

VKI
A VILLAMOSIPARI KUTATÓ INTÉZET
KÖZLEMÉNYEI

1

1966

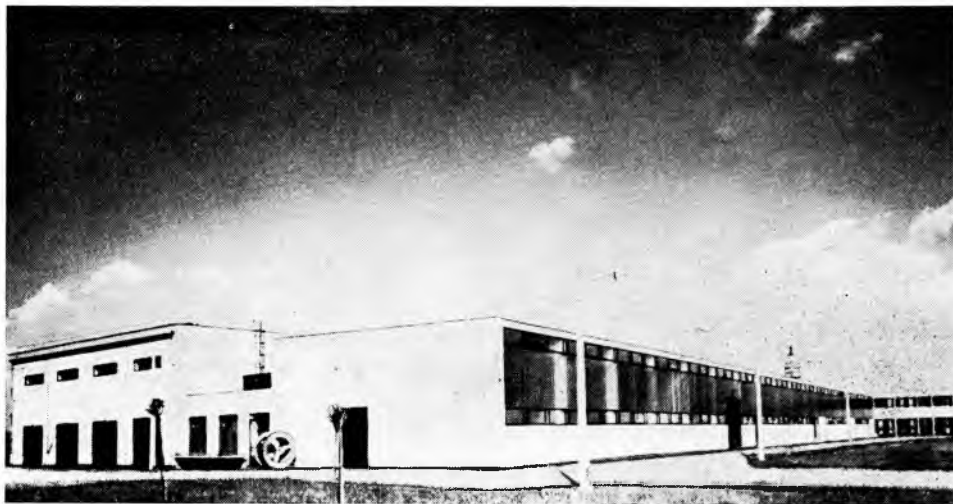
MŰSZAKI KÖNYVKIADÓ

VKI
KÖZLEMÉNYEI

1

VILLAMOSIPARI KUTATÓ INTÉZET KÖZLEMÉNYEI

1.



Az Intézet pestújhelyi székháza

MŰSZAKI KÖNYVKIADÓ, BUDAPEST

VILLAMOSIPARI KUTATÓ INTÉZET (VKI)
BUDAPEST XV., CSERVENKA M. ÚT 86

VILLAMOSIPARI KUTATÓ INTÉZET
KÖZLEMÉNYEI

1

KÖZZÉTESZI:

DR. URBANEK JÁNOS

c. egyetemi tanár

Kossuth-díjas, a műszaki tudományok doktora, a párizsi egyetem doktora,
az Intézet igazgatója

SZERKESZTETTE:

a Szerkesztő Bizottság

DR. GÁDOR LÁSZLÓ

okl. gépészmérnök,
a műszaki tudományok kandidátusa,
a Villamos Berendezések
Laboratórium vezetője

DR. LUKÁCS JÓZSEF

Kossuth-díjas
okl. gépészmérnök,
a műszaki tudományok kandidátusa,
a Félvezető Laboratórium vezetője

LEYRER RICHÁRD

okl. vegyészmérnök,
a Szigeteléstechikai Laboratórium
vezetője

DR. MOCSÁRY JÓZSEF

okl. villamosmérnök,
a műszaki tudományok kandidátusa,
a Villamos Készülék
Laboratórium vezetője

SULYOK JÓZSEF

okl. gépész- és villamosmérnök,
tudományos osztályvezető

FELELŐS KIADÓ: AZ INTÉZET IGAZGATÓJA

MŰ: 993—a—6700

A kiadási munkálatokat a Műszaki Könyvkiadó végezte
Felelős szerkesztő: Székely Zoltánné okl. villamosmérnök
Műszaki szerkesztő: Harkai József
Azonossági szám: 60 140
67-5514 – Szegedi Nyomda

ELŐSZÓ

Kutatás és termelés

DR. URBANEK JÁNOS

A termelés fejlődése nem monoton növekedő folyamat. Előremeneteleit kisebb-nagyobb ugrások jelzik. Ezek közül a jelentősebbeket mindig valami átfogó gondolat, elképzelés, program jellemzi, amit gyakran joggal megillet a forradalmi jelző is, értve ezalatt a termelés olyan alapvető átalakulását, amely annak jellegét érinti, illetve változtatja meg.

Közismert ilyen jelenség volt például maga az ún. ipari forradalom, amely keletkezésének helyein — elsősorban Angliában — még kísérő jelenségeiben is a forradalom jegyeit viselte magán.

A gépekben mutatkozó szükséglet megteremtette az ipari termelést. Ezen belül viszont egy-egy nagy horderejű találmány okozott forradalmi átalakulást, ill. a megelőző időkből nem ismert fejlődést, éspedig nemcsak mennyiségben, de az új — további fejlesztést jelentő — lehetőségekben is, valamint abban, hogy további, egészen új lehetőségek előtt nyílt meg az út.

Ilyenek voltak például a gőzgép feltalálása, a gáz- és villamos gépek feltalálása, a villamosenergia elosztására irányuló találmányok, mely utóbbiak az energia szállításának a legáltalánosabban használható módszereinek a kialakulására vezettek.

Ilyen volt a többlelektrodos vákuumcső feltalálása, ami — még néhány más alapvető találmánnyal — a modern híradástechnikai ipart alapozta meg és az egész elektronika egyik alapvető kiindulópontjának bizonyult.

A szemünk előtt játszódott le a félvezető technika születése és bevonulása az iparba, ami újabb forradalmi lendületet adott az elektrotechnikának, éspedig mind a gyenge-, mind az erősáramú elektrotechnikának, azok nagyarányú és egészen új vonásokkal gazdagított fejlődését okozva.

De nemcsak találmányok és az ezek nyomán kialakított konstrukciók alakították ki, ill. forradalmasították az ipart, hanem más tényezők is. Ilyenek voltak első-sorban:

- az alapanyagok, ill. műszaki anyagféleségek fejlődése,
- új technológiák,
- a tudomány fejlődése, ill. annak az ugyancsak nem egy esetben forradalmi eredményei,
- újabb technikai diszciplínák felmerülése és nem utolsósorban
- az iparszervezés átfogó alapelveinek a fejlődése, ill. annak az ugyancsak joggal forradalminak nevezhető egyes nagyvonalú elgondolásai.

Az anyagok terén elég két példát említeni:

Annak idején az acélipar rohamos kifejlődését, napjainkban pedig a műanyagok térhódítását a technikának úgyszólván az összes ágazataiban.

Az új technológiák kihatásainak a területén jellemző például a tömeggyártásnak a bevezetése.

A tudomány fejlődésének a termelési kihatásai szorulnak talán a legkevesebb magyarázatra annak ellenére, hogy azok gyakran nehezen mutathatók ki egyszerű

okként, hiszen egyre jellemzőbb mind a tudomány, mind a technika fejlődésére azok összefonódó fejlődése, ill. azok kölcsönös, egymást megtermékenyítő hatása. Mégis megemlíthetjük kiemelkedő iniciáló példaként az atomfizikának, a szilárd testek fizikájának a forradalmasító kihatásait, valamint állandó alátámasztó kihatásai miatt az alapszociplinák közül a klasszikus fizikából a villamosságtan, a hőtan stb. állandó fejlődését és kiterjedésüket, valamint a kvantumfizikának az egyre jobban érvényesülő ipari kihatásait.

Az újabb technológiai diszciplínák felmerülése terén talán a legjellemzőbb példa az atomtechnika megjelenése és rohamos térhódítása a technika egyre több ágazatában.

Az iparszervezés kihatásainak a területén csak két jellemző példát kívánok felhozni. Egy közismert és egy újat, mely utóbbival részletesebben kívánok foglalkozni annál is inkább, mert ez érinti a legközelebről a VKI munkáját, miután az ennek a legújabb forradalmi lendületnek a keretében kell, hogy kifejtse működését.

Közismert példaként a kisipari termelés helyett a gyáripari termelésre, de különösképpen a nagyipari termelésre való áttérést említem meg. Közismert az is, hogy ez nem csupán gazdaságossági kérdés volt és főként az, hogy ennél messzebben többet eredményezett.

Az elért eredményeket jól szemlélteti, ha néhány évtized távlatában egy-egy autót, vagy egy-egy rádiókészüléket összehasonlítunk.

De mi van mindeme eredmények mögött? Mi húzódott meg régebben szerényen mögötte és került ma a nemzetközi verseny gyújtópontjába?

A kutatás, pontosabban a kutatás, mint termelőeszköz.

Ez a legújabb forradalom, melynek eredményei már igazoltak, lemérhetők és nem egy nagy, iparilag fejlett országnak is gondot okoznak.

Az új csatateret érhetően legelőször a Szovjetunió és az USA ismerte fel.

A Szovjetunió helyzetét nálunk ismertnek feltételezve, csak a kapitalista nagyipari államokat illetően kívánok néhány adatot felsorolni, aláhúzva azt a tényt, hogy az USA, amely nyugaton elsőként ismerte fel a kutatásnak, mint termelési tényezőnek a technika mai állásánál döntő jelentőségét, olyan előnyre tett szert az iparfejlesztés területén a többi nyugati nagyipari állammal szemben, hogy azok közül nem egynek a sajtójában az a kérdés is felmerült, hogy ez az előny egyáltalán behozható-e még. Sehol sem vitás azonban az, hogy ennek a lehetőségét is csak a kutatás fokozása adhatja meg.

Mindennek az alapjai érhetően már az oktatásban is megmutatkoznak. „Számítások szerint 1970-ben a 15—64 éves korú népesség közül a közép- és felsőfokú oktatásban az NSZK-ban 0,66, Olaszországban 0,87, Franciaországban 1,52, Svédországban 1,56, az Egyesült Államokban ezzel szemben 4,69% fog résztvenni.”

„Az Egyesült Államokban a kutatás-fejlesztés céljaira fordított összegek 1940-ben a bruttó nemzeti termék 0,4%-át alkották, 1950-ben 1,0, 1954-ben pedig 3,0%-át. Nyugat-Európában a kutatás-fejlesztési költségek súlya a nemzeti termékben az 1950. év 0,5%-ról az utóbbi években $1\frac{1}{2}$... $2\frac{1}{2}$ %-ra emelkedett, Angliában eléri a 3%-ot. Az USA ilyen jellegű kiadásai több mint két és félszeresen meghaladják a nyugat-európai országok együttes kutatás-fejlesztési kiadásainak összegét.” (Iparpolitikai Tájékoztató)

Nyugaton még abban is megmutatkozik a kutatás mind erőteljesebb előtérbe nyomulása, illetőleg döntő termelési tényezőként való jelentkezése, hogy az egyre erősödő állami kutatási szervek mellett az állam a magánipar kutatásainak a költségeit is támogatja jelentős összegű dotációkkal.

Mi lehet a szerepe ebben a — mondhatnám — „háborúban” egy kis ország kutatásának?

Nem fut-e reménytelen célok felé?

Ha van egyáltalán létjogosultsága, létjogosultságát mi adja meg?

Nyilvánvalóan elsősorban az, hogy a hazai ipar általános termelőeszköze legyen. Azokat a célokat keresse, amelyek a hazai életképes ipari szektorok célkitűzéseit a legjobban alátámaszthatják és amit — ez is döntő — helyettünk senki más elvégezni nem fog.

Feladata az is, hogy a legcélszerűbb távlati ipari célkitűzések kialakításában is hathatósan közreműködjék, különös tekintettel nagy informáltságára, valamint a külföldi fejlődés irányzataira vonatkozó nagy áttekintésére. Feladata ezzel kapcsolatban az ilyen célkitűzéseket alátámasztó kutatások kellő időben való megindítása is.

Feladata az is, hogy megítélje, milyen területek azok, amelyek az önálló hazai fejlesztés alátámasztását kívánják, ill. indokolják és melyek azok, amelyek a baráti államok közötti munkamegosztással vagy esetleg nyugati licencia vásárlásával oldhatók meg célszerűbben, ill. gazdaságosabban.

Feladata nem utolsósorban az is, hogy nívójával kivívja magának azt a nemzetközi elismerést, ami egy-egy ország termelésének a fémjelzője, mert a termékek nívóját átfogóan nem utolsósorban a mögötte álló kutatási apparátus, illetőleg annak nívója alapján ítélik meg.

Ezek a gondolatok ébrednek bennem, amikor a VKI Közleményeknek az első kötetét újtára bocsátom.

De gyakorlati célokat is kívánunk szolgálni azok közreadásával. Így elsősorban éppen azt, hogy a tudományos eredmények hazai viszonylatban is könnyebben váljanak a termelés eszközeivé. A tapasztalat ugyanis azt mutatta, hogy néhány nagyobb jelentőségű eredmény (mint pl. 3000 LE-s mozdony Si-egyenirányító berendezése vagy a diósgyőri durvahengermű korszerűsítése stb.) mellett, ami a napi sajtóig is eljut, számos olyan eredmény is mutatkozik, aminek a hasznosítása messzemenően fokozható volna, mert azoknak nagy része nemcsak azokat a vállalatokat érinti, amelyek számára a kutatást mint távlati kutatást, vagy mint megrendelést eszközöltük. Közleményeink első száma — amelyet előre nem rögzített időközökben fognak a további számok követni —, miként az ezután következők is, alapvetően néhány érdekesebb kutatási eredmény műszaki-tudományos dolgozatok alapján való megismertetését célozza, tehát szükségképpen inkább a befejezett kutatásokról ad képet és nem tükrözi a VKI egész kutatási spektrumát. Ezért bevezető cikkemben a VKI-nek a jelen előszóban foglaltakkal szervesen összefüggő fejlődési irányainak a rövid ismertetése mellett arra törekedtem, hogy az Intézet 1965. évi munkásságának a tükrében az Intézet összes munkaterületeiről rövid összefoglaló képet nyújtsak.

Közleményeinket abban a reményben indítom meg, hogy azok a fentiekben ismertetett célkitűzéseket valóban szolgálni fogják.

BEVEZETÉS

Az intézet fejlődési irányai és 1965. évi kutatási tevékenysége

DR. URBANEK JÁNOS

Az Intézet rendeltetését, fejlődését és várható fejlődési irányait az 1964-ben az „Elektrotechniká”-ban megjelent „Beszámoló a VKI 15 éves működéséről” c. tanulmányomban részletekbe menően ismertettem. Az Intézet 1965. évi tevékenységének a megértése céljából célszerűnek látszik ebből a tanulmányból — összevontan — a következőket felidézni.

„Az Intézet általános rendeltetése: az erősáramú villamos gyártóipar folyamatos, korszerű fejlesztését a világszintet szem előtt tartó és arra törekvő folyamatos, korszerű kutatómunkával alátámasztani.

Közelebbi rendeltetése, mint központi, iparági kutatóintézetnek, elsősorban az erősáramú villamos gyártóiparnak, mint egésznek a kutatási igényeit szem előtt tartani. Iparági kutatás alatt azonban természetesen nemcsak azt a túlságosan leegyszerűsített meghatározást értem, hogy iparági kutatás az, ami az iparág összes, vagy legalábbis több vállalatát érinti, hanem azt, hogy iparági kutatási feladat minden olyan kutatási feladat, amely az iparág helyes fejlesztését elősegíti és legcélszerűbben, vagy kizárólag az iparág központi kutatóintézetében végezhető el.

Működési területe (osztályainak jellege) kezdetben a gyártóipar egyes fő gyártási ágaihoz igazodott (gépek, transzformátorok, készülékek stb.). Azonban az egyes gyártási ágakat átfogó, a szó szoros értelmében vett kutatási osztályok beindítása sem várathatott sokáig magára. Az első ilyen új — már alapításkor megindított osztály — a szigetelőanyag-vegyészeti osztály volt, amit viszonylag rövid idő múlva egy szigetelőanyag-technológiai osztály létesítése követett, majd pedig — hazai viszonylatban teljesen új szektorként — egy félvezető osztály és egy automatika és szabályozási osztály létesítése egészített ki. Ez utóbbi bővítések a kutatási súlypontképzést, ill. a hazai viszonylatban új gyártási szektorok bevezetését is célozták, amely szempontok a későbbiekben döntővé váltak.”

Ez a fejlődés végül is a gyártási ágak szerinti csoportosításból túlnyomóan az átfogó, gyártási szektorok feletti, ill. egyes új szektorok bevezetését, ill. fokozott megerősítését célzó csoportosításhoz való fokozatos átszervezést vonta maga után. Az így kialakult kutatási főirányokat jelenleg a következő laboratóriumok képviselik:

1. Szigetelőtechnikai Laboratórium
2. Villamos Berendezések Laboratórium
3. Félvezető Laboratórium
4. Villamos Készülék Laboratórium.

Az így kialakult kutatási főirányokat az jellemzi, hogy azok túlnyomóan gyártási szektorok feletti, éspedig

— vagy olyanok, hogy azoknak nem felel meg egy-egy gyártási szektor (így pl. nincs és nem is lehet — hacsak nem alkatrész vonatkozásban — szigetelőtechnika gyártás, vagy automatika és szabályozástechnika, ill. ipari elektronika

gyártás, vagy tropikalizációs gyártás), mert ezek úgyszólván minden gyárban jelentkező feladatok (és nem gyártási szektorok, mint pl. a transzformátor-gyártás vagy a gépgyártás);

- vagy olyanok, amelyek összetartozó gyártási szektorokat, ill. alkalmazási területeket fognak át komplex módon (mint pl. félvezető technika, villamos berendezések a legkülönfélébb ipari célokra, a közlekedés számára stb.);
- vagy olyanok, amelyek ugyan nem „gyártási szektor felettiek” — mint a Villamos Készülék Laboratórium esetében — de erősen szerteágazó hosszabb időre is erőteljesebben művelendő gyártmányfejlesztést támasztanak alá, átfogó egységes fejlesztési irányelvek alapján a szükséges (viszonylag költséges) próbaberendezések egyszeri létesítésére, mint közös célú alaptervezésre támaszkodva.

A komplex témák kutatási vonatkozásban többnyire egy laboratóriumon belül jelentkeznek oly módon, hogy több osztály szervezett együttműködése válik szükségessé. De vannak témák, amelyek több laboratórium együttműködését igénylik, sőt, olyan feladat is van, ami az összes laboratóriumok szervezett együttműködésével oldhatók csak meg. (Ilyen feladat volt pl. 1965. évben a 3000 LE-s szilícium-egyenirányítós mozdonyal kapcsolatos kutatás.)

„Az Intézet kutatás-szervezési vezérelve tehát döntően arra irányult, hogy megkeresse azt az állandónak vagy legalábbis hosszú lejáratúnak ígérkező, kevés számú kutatási kört, amely a hazai erőszakú ipart a legjobban alátámasztani látszik.”

A kutatás módja tekintetében a következő vezérelvek alakultak ki:

- Az ipari kutatást mélységben egyre több területen műszaki alapkutatással is alá kell támasztani;
- Az ipari kutatás eredményeit, ahol csak lehetséges, előbb-utóbb legalább a prototípusokig, egyes esetekben a kis sorozatgyártásig kell kifejleszteni, bizonyos esetekben a célgépek kifejlesztését is ideértve.

Ennek megfelelően az ipari kutatóintézetnek egyrészt — éppen a legjelentősebb területeken — aktuális (szükségszerű) műszaki alapkutatással is kell foglalkoznia. (Kívánatos, hogy amint teheti, ezen felül még nagy távlatra irányított műszaki alapkutatással is foglalkozzék.)

Másrészt arra kell törekednie, hogy saját kísérleti műhellyel (ill. műhelyekkel) rendelkezék, az egyes fő profiljainak megfelelő mértékben és felszereléssel.

A folyó témákat tudományosan megalapozó távlati kutatás az egyes laboratóriumokban, az átfogó jellegű távlati témák kutatása pedig az Intézet távlati fejlesztési csoportja keretében folyik.

Laboratóriumi szinten már régebben létrehoztunk egy elméleti csoportot a Villamos Berendezések Laboratóriuma keretében és 1965-ben fokoztuk az alap-kutatás jellegű munkákat a szigeteléstechikai laboratórium keretében is, amit 1966 folyamán igyekszünk még szervezettebb formában kiépíteni.

A félvezető-kutatás vonalán — csakúgy, mint a készülék-kutatás területén — az alapkutatás állandó szükségszerű velejáróként jelentkezik, ami külön szervezési formát nem igényel.

A Távlati Fejlesztési Csoport keretében folyó távlati alapkutatás tekintetében kiemelhetjük a már régebben megindult és az MHD generátorok előmunkálatait célzó plazmatechnikai csoportunk működését, valamint a tüzelőanyagelem-kutatások megindulását, mely szektorok a villamosenergia ún. közvetlen előállítását célzó kutatások megindítását jelentik.

A kísérleti műhelyek kérdését az Intézet elsősorban a félvezető elemek kifejlesztésével kapcsolatban kívánja megoldani.

Addig is, míg az egyéb területeken (villamos berendezések és villamos készülékek, szigeteléstechika) is megvalósíthatóvá válik saját kísérleti műhely, illetőleg félüzemi laboratórium létesítése, a villamos berendezések komplettebb realizálása érdekében a meglévő műhelyünket kívánjuk ilyen irányban fejleszteni, szigetelés-technikai vonatkozásban pedig — addig is, amíg a megtervezett, de még meg nem épült félüzemi laboratóriumunk megvalósítható lesz — az érdekelt gyárakkal lépünk szoros összeköttetésbe állandó jelleggel kihelyezett bevezető részleg útján (ez van jelenleg előkészületben a VSZM vonatkozásában), illetőleg ideiglenesen kihelyezett részlegek révén (ezt az utat követtük az erősáramú kerámiai kutatás ipari bevezetése tekintetében). Ez utóbbit legutóbb saját kezelésbe vettük. E téren ezért — a félvezető elemekhez hasonlóan — nemcsak kutatási, de (korlátozott mértékben) termék-megrendeléseket is el tudunk fogadni.

A kutatási témák kijelölése során szem előtt tartott vezető szempontok változatlanul a következők voltak:

- a hazai nyersanyagbázis minél jobb és racionálisabb kihasználása, ezzel összefüggésben
- a nyersanyag export—import-egyenleg minél kedvezőbb kialakítása,
- exportképes korszerű gyártmányok kidolgozása,
- a távlati kutatási terveknek a távlati iparfejlesztési tervekhez való alkalmazkodása,
- a KGST jelentette segítségnyújtás minél jobb kihasználása a kutatás racionalizálása érdekében,
- a baráti államokbeli és hazai kutatóintézetekkel való szoros kapcsolat kihasználása, ugyancsak a kutatás racionalizálásának az érdekében.

Ami a kutatási eredményeink közzétételét illeti, kutatási eredményeinket nemcsak hazai, hanem külföldi szakfolyóiratokban és előadások formájában is ismertettük, amelyek komoly elismerésre találtak.

Első összefoglaló kiadványunk a már említett, 1964-ben, 15 éves jubileumunk alkalmából az Elektrotechnikában megjelent „15 éves a Villamosipari Kutatóintézet” c. kiadvány volt. A jelen kötetben most meginduló új sorozatunk ezt hivatott szervezettebb formában folytatni, elsősorban azzal a célkitűzéssel, hogy időközönként tájékoztatást adjunk az Intézetben folyó munkákról, ezért nem zárva ki a jövőben sem azt a lehetőséget, hogy az inkább specialistáknak szánt vagy általános érdekű dolgozatokat továbbra is a szaksajtóban jelentessük meg, ill. azok egyes vonatkozásait ott publikáljuk.

Mielőtt a laboratóriumi munkák részletesebb ismertetésére rátérnék, le kívánom még szögezni azt, hogy az Intézet eredményeit nemcsak a VKI eredményeinek, hanem a velünk, azok nagy többségében jól együttműködő — túlnyomórészt iparági — gyártó vállalatok és intézmények és a VKI együttes eredményeinek tekintjük, mert az általuk lehetővé tett félüzemi kísérletek, valamint általában e vállalatoknak az ipari bevezetések során ma már túlnyomórésztben tapasztalható együttműködési készsége nélkül a kutatási eredményekből folyó ipari eredmények nyilvánvalóan nem lettek volna elérhetőek.

Az alábbiakban laboratóriumok szerint ismertetem az Intézet munkáját és foglalom össze azok eredményeit.

Szigeteléstechika és klimatizáció

A Szigeteléstechikai Laboratórium 1965. évi munkáját legfőképpen az ipar számára való széles körű rendelkezésreállítás jellemezte, rendelkezésreálláson a laboratóriumnak azt a készségét értve, hogy a szigeteléstechika terén eddig felgyülemlett tapasztalatai képessé tették arra, hogy az erősáramú iparág legváltozatosabb szigeteléstechikai kutatási igényeinek, ésszerű határidőkkel, eleget tudjon tenni, nagy segítséget nyújtva ezáltal az erősáramú vállalatok fejlesztési problémáinak sikeres és gyors megoldásához. Jellemzője még az 1965. évi munkájának a műszaki alap kutatás megindulása és ezzel a kutatás minőségi elmélyülése.



Szigeteléstechikai Laboratórium

Így pl. megindultak — döntően a derivatográfias vizsgálatoknak a rendszeres bevezetése révén — a szigetelőanyagok hőigénybevételének a mélyrehatóbb tanulmányozása, a hőmérsékletfüggés tudományos elemzése alapján pedig ezeknek a jelenségeknek a megnyugtatóbb tanulmányozása, valamint a villamos szilárdság molekuláris vizsgálatának a kezdő lépései.

Az 1965. év legkiemelkedőbb kutatási eredményei a következők voltak:

- Szilikon—szilikátos fűtőmikanit kidolgozása;
- Üvegázas erősáramú epoxilemez kidolgozása;
- Erősáramú ívöltő fröccskerámiák ipari gyártásbevezetése;
- BL₃ nyomtatott áramkörökhöz alaplemezek kidolgozása, előzetes félüzemi kísérletek;
- Hazai típusú melamingyantás présanyag kifejlesztése és ipari bevezetése.

Említésre méltó eredmények, ill. eredményes kutatási területek voltak még a következők:

- Csillám- és csillámpép-alapú szigetelések fejlesztése, ami elsősorban a VSZM-ben való megalapozottabb bevezetést, valamint újabb gyártmányfélések bevezetését célozta (pl. MÁV-fűtőtestek, vasalóbetétek, kenyérpírítók, kommutátor-szigetelések);
- Különféle újabb műanyagkiöntési problémák megoldása (pl. transzformátortekercsek, vibrátortekercsek);
- Nagygépek rúdszigeteléseinek fejlesztése eredményes kooperációban a GVM-mel és az NDK Borsig gyárral, nagygépek tekercsmerevítése (3000 LE-s mozdonny);
- Motorett-vizsgálatok (komplex szigetelési rendszerek együttes viselkedésének a tanulmányozása);
- Műanyagszigetelők szabadtéri felhasználásra (cikloalifás műanyagok felhasználásával);
- Erősáramú kerámiák a legkülönbélebb célokra, különös tekintettel a finom tagozottságú, kisméretű és az ugyancsak erősen tagolt nagyméretű idomokra (egészen több kg-os db.-ig). Ezen belül a fröccskerámiák széles körű fejlesztése, szigetelőanyagba préselt hőbetétek (pl. vasaló, újabb főzőlaptípusok);
- Folyamatos kutatás folyt a transzformátor- és kábelolaj-vizsgálati módszerek és vizsgálatok terén az olajipar nyersanyagainak és a felhasználók igényeinek a tekintetbevételével, különös tekintettel az alapanyagok időközben történt és még a jövőben is előirányzott megváltoztatására (öregedési vizsgálatok, öregedésgátlók vizsgálata, különféle behatási tényezők vizsgálata stb.).

A Szigeteléstechnikai Laboratórium keretében és azzal szoros összefüggésben fejlődött a jövőben önálló laboratóriummá fejleszteni kívánt klímaosztályunk is, melynek feladatait a jövőben az egyéb környezeti behatások tanulmányozására is ki kívánjuk terjeszteni. Jellege annyiban is eltér a többi laboratóriumainkétől, hogy feladatköre nemcsak a villamos szempontból való viselkedés tisztázására irányul, hanem a gyártmányok egyéb vonatkozású, külső behatás okozta károsodásaira is.

Munkájának oroszlanrészét változatlanul a természetes (a kitéti állomásokban végzett) és mesterséges (laboratóriumban végzett) klímavizsgálatok alkotják.

Trópusi vonatkozásban Kantonban és Sanghajban folynak még vizsgálatok; a vietnami vizsgálatok egyelőre függőben vannak; ezzel szemben egy szűkebb körű ideiglenes kapcsolat kialakítása van folyamatban Conakry-val.

Hazai természetes klímavizsgálataink döntően a saját badacsonyi és orgoványi kitéti állomásainkra támaszkodtak. Mesterséges vizsgálataink a saját laboratóriumainkban folytak. Mindezt jól egészítette ki a baráti államokkal — a közvetlen kooperáció keretében — folyó együttműködés, ami bizonyos munkamegosztást is lehetővé tesz.

A vizsgálatok eredményei részben a vizsgálati jegyzőkönyvekben, részben pedig — összefoglaló jelleggel — a kiadványainkban nyernek rögzítést.

1965-ben a következő kiadványok kerültek kiadásra:

- Villamos berendezésekben használatos sajtolóanyag-típusok laboratóriumi nedves-meleg klímavizsgálata;
- Klímaállósági vizsgálati eredmények. Présorok, kábelek;
- Termeszvizsgálatok;
- Felületvédelmi bevonatrendszerek kétéves természetes klímavizsgálatának értékelése;

- Természetes trópusi és hazai kitélteli helyek ismertetése és meteorológiai adatainak összefüggése;
 - Nedves trópuson üzemelő villamos berendezések szigetelőanyagainak kiválasztásával kapcsolatos főbb kérdések;
 - Klímaállósági vizsgálati eredmények. Feszültségváltók. Belsőtéri szakaszoló. Nagyfeszültségű biztosítóaljzat;
 - Klímaállósági vizsgálati eredmények. Motorok;
 - Irányelvek trópusi klímaterületre szállítandó villamosipari gyártmányok vas- és acélananyagainak festéssel való védelmére.
- Konkrét vizsgálatokat 1965-ben a következő vállalatok számára végeztünk:
- Magyar Kábel Művek
 - Ipari Műszergyár, Iklad
 - Egyesült Villamosgépgyár
 - Villamos Berendezés és Készülék Művek
 - Győri Vagon- és Gépgyár
 - Csepel Vas- és Fémművek
 - Ganz Villamossági Művek
 - Transzformátor KTSZ
 - Magyar Hajó- és Darugyár.
- Az eredmények a szabványalkotás keretében is felhasználásra kerültek.
- Az 1965. év kiemelkedő eredménye a „Felületvédelmi előírások” (tropikalizációt is tekintetbe véve) kidolgozása az erősáramú vállalatok részére.

Villamos Berendezések Laboratórium

A Villamos Berendezések Laboratórium súlypontilag változatlanul az erősáramú ipari elektronika területén fejtette ki igen szétágazó eredményes működését.

Legkiemelkedőbb kutatási eredményei a következők voltak:

- 3000 LE-s villamos mozdony segéd- és főüzemi egyenirányítójának kidolgozása;
- Kompletts vonatvilágítási rendszer kidolgozása (szabályozó, lámpaelőtét, inverter);
- Kompaundált generátorsorozatok (FSZG) kialakítása;
- MAG-gépcsoport frekvencia- és töltésszabályozásának kidolgozása, gyártás-bevezetés.

E felsorolás egyben az 1965-ben leginkább művelt alkalmazási területekre is utal.

A legnagyobb kutatási igény a félvezetős egyenirányítóberendezések területén mutatkozott, messze meghaladva a kutatási kapacitásunk nyújtotta lehetőségeket.

Az elméleti kutatások félvezetős erősáramú berendezések védelmi, szabályozási és általában azok üzemi kérdéseinek a vizsgálatára irányultak.

Nagyobb objektumok a már említett 3000 LE-s mozdony mellett a METRO-egyenirányító és a hidrogénperoxid-egyenirányító voltak. Előbbi befejezést nyert, utóbbi kettő még folyamatban van.

A váltakozóáramú vonatvilágítási rendszer és a hozzátartozó különleges készülékek (szabályozók, átalakítók stb.) kifejlesztésének eredményeképpen Magyarország ma már nemcsak korszerű hazai elemekkel működő szilíciumdiódás mozdonyokkal, hanem a legkorszerűbb vagonvillamossági berendezésekkel is rendelkezik, megelőzve e téren a baráti államokat is.

A tirisztoros inverterek kifejlesztése nemcsak a vasúti fénycsővilágítás számára jelent megoldást, hanem egyéb, rendkívül változatos felhasználási igényeket is kielégít, egészen a 10 kVA nagyságrendű szükség-áramforrásokig.

A vasúti érdekű korszerű gyártmányok sorát egészíti ki a mozdonyvezetés biztonságát célzó, ún. „holtember”-védelem, amely az üzemi kipróbálás során jól bevált. Felépítése korszerű, szabványos logikai áramkörök felhasználásával történt.

A kompaundált (kommutátor nélküli, félvezető gerjesztéses) váltakozóáramú generátorok sorozata is nevezetes korszerűsítő lépés a gépi berendezések gyártásának fejlesztése területén. A sorozatgyártás az Egyesült Villamosgépgyárban folyik (néhány nagyobb típuson a rendszert a GVM is adaptálta). Az ehhez tartozó szabályozókból egy kis sorozat trópusi kivitelben is elkészült.

A közeljövő esedékes fejlesztési céljait szolgálják a vezérelhető Si-diódák alkalmazására irányuló kutatások (ezek a kutatások az Intézetben párhuzamosan folynak a hazai vezérelhető Si-diódák kifejlesztési munkálataival, azzal a céllal, hogy az alkalmazástechnika ez utóbbi eredményeit felkészülten várja).

A hajtások terén a régebbi mágneses erősítő hajtások mellett a legkorszerűbb vezérelhető Si-diódás szabályozható egyenáramú hajtásokkal is foglalkoztunk, különösen a tipizált vezérlő áramkörök kialakítása tekintetében.

Változatlanul keresett cikk a jelenleg új, fejlesztett kivitelben készülő hálózati feszültségszabályozó és változatlanul jelentős exportot bonyolítunk le a VKI szabályozóberendezéssel ellátott ívkemencékkel a legkülönbébb rendeltetésekkel (pl. India).

Jelentős eredményként könyvelhetjük el végül a Diósgyőri rekonstrukció kiegészítő feladatainak a megoldását is.



*A Villamos Berendezések Laboratórium csarnoka
Elöl az Igazgatóság épülete*

A folyamatos vasvizsgáló berendezés terén említésre méltó a gueugnon-i (Franciaország) berendezés felújítása és tökéletesítése, ami több éve üzemben van az üzemeltető teljes megelégedésére, valamint annak a hidegen hengerelt szalag-acélok folyamatos vizsgálatára történt további fejlesztése, amit Salgótarjának szállítottunk le. Ide tartozik még a borsodnádasi berendezés karbantartása és felújítása is.

A laboratórium elméleti csoportja keretében fénycsőproblémák kerültek vizsgálatra, elsősorban az inverter üzem szempontjából. Végül egy, a nagyvasúti villamos vontatás újabb megoldását célzó kutatást indítottunk el.

Félvezető Laboratórium

A Félvezető Laboratórium mindenképp továbbra is sikerrel folytatta a hazai félvezető ipar további megalapozásának, ill. szintentartásának a félvezető elemek fejlesztésére irányuló mind tudományos, mind technológiai szempontból igen igényes alapvető munkáját.

A laboratórium legkiemelkedőbb eredményeit a következőkben jelölhetjük meg:

- Doppingolatlan szilícium egykristályok kidolgozása erősáramú célokra (egykristályhúzás kidolgozása);
- 50 A-es SNV vezérelt dióda-típus (tirisztor) kidolgozása, kis sorozat elkészítése;
- 25 A-es autovillamosági diódatípus és mérési rendszer kidolgozása;
- félvezetős — termovillamos — hűtőelemek reprodukciós kutatása.

Az n-típusú Si-diódák kérdése lezárásra került. Folytatódott a p-típusú diódák kifejlesztése. E fejlesztés még a jövő évre áthúzódik.

Ugyanígy folytatódott a megalapozás jellegű „Diffúziós átmenetek erősáramú vezérelt diódák számára”, az „Erősáramú vezérelt diódák mérései és mérési rendszereinek a kifejlesztése”, valamint a „Célberendezések a VKI fejlesztő laboratóriuma számára” c. téma.

Mélyreható munkák folytak a 3000 LE-s mozdonyval kapcsolatban a vasúti diódák viselkedésének a beható megismerése céljából. Ezek képezték az alapot a mozdonyprototípus elfogadására irányuló megállapodások, szabványszerű előírások, valamint az új Anód-katalógus kidolgozásához. E célok érdekében rengeteg minősítő és átadás-átvételi mérést is végeztünk a vonatkozó megrendelések keretében. Hasonló vizsgálatok a vezérelt diódákon és az autovillamosági diódákon is folytak. Ezenkívül kísérleti dióda-példányokkal láttunk el számos Intézeten kívüli fejlesztési munkát.

A nemlineáris elemek terén folytattuk a keramikus kötésű elemek kifejlesztését, az 5 kA-es típus kifejlesztésének a befejezésével kapcsolatban azonban egyelőre komoly nehézségek mutatkoznak amiatt, mert a végleges nagysághoz szükséges hidrogénkályhát mind ez ideig nem tudtuk beszerezni.

A heteroátmenetek kutatása a témafelelős tartós távolléte miatt, a nagynyomású Si-karbid berendezés felállítására pedig a letelepítési nehézségek miatt gyakorlatilag szünetelt. Ezzel szemben elkészültek különféle egyenáramú levezetők, valamint mozdonyvédő ellenállások.

A félvezető termovillamos ötvözetek fejlesztését folytattuk, különös tekintettel a reprodukálhatóságra (a szórás csökkentésére) annak érdekében, hogy a leendő gyártóművel időben szerződés legyen köthető egyes típusok kísérleti kooperációs gyártására.

Újabb kisméretű (kb. 20 l-es) hűtőszekrény-mintapéldányok készültek el a komplett berendezésekkel kapcsolatos kérdések tanulmányozása céljából. A berendezések hűtőképességében is értünk el előrehaladást.

A laboratórium végül komoly műszaki előkészületeket tesz a legközelebb megépítésre kerülő harmadik laboratóriuma: a Félvezetőfejlesztési Laboratórium (kísérleti üzem) leendő felszerelésének és célberendezésekkel való ellátásának az irányában.

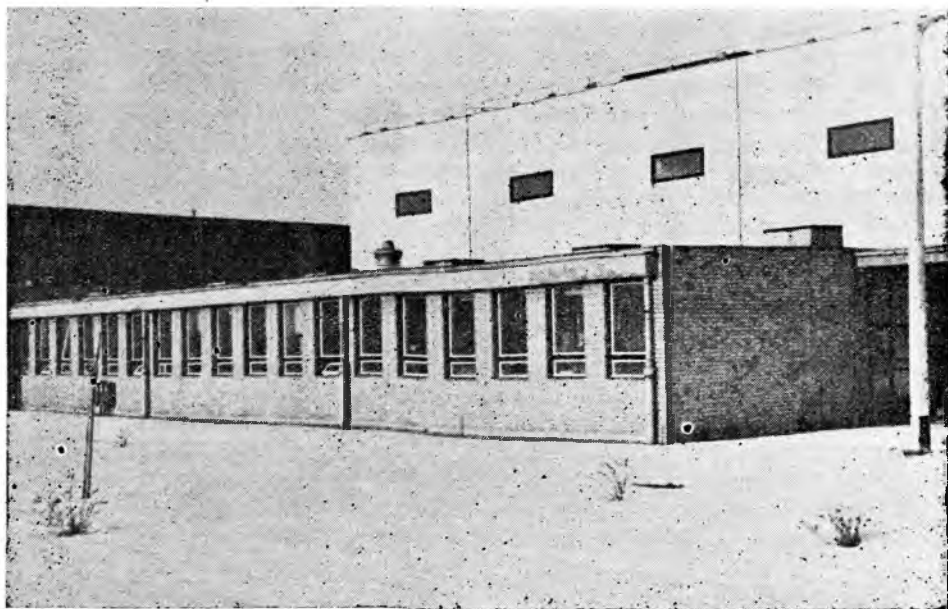
A laboratórium élénk tevékenységet fejt ki a szabványalkotás területén is.

Villamos Készülék Laboratórium

E legújabb szervezésű laboratóriumunknak a fő működési területe változatlanul a legkülönbözőbb kisfeszültségű és középfeszültségű áramkorlátozó biztosítók fejlesztése, a kisfeszültségű kapcsolókészülékekkel kapcsolatos kutatások végzése és a nagyfeszültségű, nagyteljesítményű vizsgálatok külföldi lebonyolítása volt. Ehhez járult még az év folyamán egy nagyobb arányú nemzetközi együttműködéssel kapcsolatos előkészítő munka folyamatos beindítása úgy, hogy az 1966-ban már az első konkrét feladatok megoldására alkalmas alapot szolgáltatasson.

Meg kellett indítani ezenkívül az egyenáramú zárlati vizsgálatok lebonyolításának az előkészítő munkálatait is.

Elkészült a középfeszültségű kisteljesítményű zárlati laboratórium kialakítására vonatkozó tanulmány is. A tanulmány a laboratórium kialakításához a kisfeszültségű váltakozó- és egyenáramú zárlati laboratórium transzformátorának, szabályozóelemeinek és egyéb berendezéseinek felhasználási lehetőségeit veszi alapul.



Villamos Készülék Laboratórium

Elöl a Villamos Készülék osztály laboratóriumainak, hátul a Nagyteljesítményű Vizsgálatok osztálya zárlati laboratóriumának épülete

A laboratórium 1965. évi legkiemelkedőbb eredményei a következők voltak:

- NNGf-típusú középvezetési biztosítók kidolgozása és nullszériagyártás bevezetése;
- NOSi-szilícium-diódavédő biztosítók gyártásbevezetése.

E lényegében már realizálható feladatok, ill. eredmények mellett széles körű kutató- és továbbfejlesztő munka is folyt

- a középvezetési egységes foglalatú (DIN-méretű szerinti) biztosítók;
- az igen gyors működésű diódavédő-biztosítók;
- a villamos érintkezők és érintkezőanyagok;
- a villamos ív oltásával kapcsolatos kérdések (pl. ívöltőkamra kialakítása, érintkezők visszapattantási jelenségei);
- készülékelemek (pl. legkedvezőbb áramút-kialakítás);
- nagy- és kisfeszültségű zárlati vizsgálatok;
- a kisfeszültségű zárlati rákapcsoló, valamint
- az ellenállásos megszakítás kutatása terén, amely utóbbi két feladatot a saját kisfeszültségű zárlati laboratóriumunk céljaira kellett megoldanunk. Ezekhez járultak még a kisfeszültségű váltakozóáramú és az egyenáramú rövidzárlati állomásunk villamos berendezéseinek a még hátralevő tervezési és felszerelési munkálatai.

Az NNGf biztosítók gyártása az általunk kifejlesztett új technológiával beindult. Az Intézetben kidolgozott korszerű olvadószál-szerkezettel készülő olvadóbiztosítók iránt a tőkés piacon nagy érdeklődés nyilvánult meg. A biztosítókon kívül a technológiai berendezések exportja is szóba jöhet, tekintettel annak élenjáró voltára.

Munkában van az egységes foglalatú biztosítók kifejlesztése. Továbbfejlesztettük a diódavédő biztosítókat is. Számos bel- és külföldi vizsgálat tanúsítja az elért eredmények jószágát.

Folytattuk az érintkezőanyagok és a megszakítási jelenségek tanulmányozását, számos konkrét feladatot oldva meg a gyártóipar konkrét kérdései kapcsán.

Folytattuk a kontaktorok legkedvezőbb érintkezőalakjának, a pattogás kérdésének és a működtető mágnesek problémáinak a tanulmányozását, kialakítva egyúttal e kérdések elmélyültebb folytatásának a problematikáját is, különös tekintettel a már említett nemzetközi kooperáció jelentette kibővült igényekre.

Lebonyolítottuk az iparág csak külföldi zárlati állomásokon lebonyolítható vizsgálatait és egységes szempontok alapján értékeltük azok eredményeit, rámutatva a fejlesztés szükséges irányaira az egyes gyártóvállalatok felé.

Részletes vizsgálatoknak vetettünk alá külföldi készülékeket, tapasztalat-szerzés céljából.

Részt veszünk a nemzetközi szabványosítási munkában, elsősorban a közép- és kisfeszültségű áramkorlátozó olvadóbiztosítókra vonatkozóan, de bekapcsolódunk a kisfeszültségű készülékekkel foglalkozó bizottság munkájába is. Kutatási eredményeinkre támaszkodó javaslataink legnagyobb részét — különösen a középvezetési biztosítókra vonatkozóan — az IEC illetékes bizottsága elfogadta. Javaslataink elfogadása elsősorban biztosítóink nemzetközi elismerése és ezzel exportképességének növelése szempontjából nagyjelentőségű.

Távlati Fejlesztési Csoport

A klasszikus és nukleáris energiahordozók energiájának közvetlen átalakítása villamos energiává téma keretében egyrészt

— MHD generátorok lehetséges munkaközégeinek ionizációs problémáival, másrészt

— a tüzelőanyag-cella rendszer kifejlesztésére irányuló kutatásokkal foglalkoztunk.

Az első témával kapcsolatban eddigi tanulmányaink alapján elkészültek egy kísérleti zártciklusú, higanygőz munkaközeggel működő, kísérleti MHD generátor tervei.

Ezenkívül előzetes mérések alapján elkészítettünk egy MHD effektust realizáló nagyteljesítményű elektrolitvizsgáló elektrolitcsatornát.

A második témával kapcsolatban meghatároztuk a tárgyra vonatkozó kutatás jövőbeni irányát, mely szerint a kutatás a gázalakú szénhidrogén üzemanyagú, közepes és nagyhőmérsékletű rendszer kifejlesztésére fog irányulni. Elkészítettük a részletes kutatási tervet, megkezdtük a kutatás műszaki és személyi feltételeinek a megteremtését és a kutatásokat beindítottuk.

E csoport keretében bonyolítjuk a „Turbógenerátor hűtőgépes póthűtése” c. témánkat is. E téren megtörtént egy 200 000 kcal/h hűtőteljesítményű kompresszor összeépítése egy egyenáramú hajtómotorral, a szükséges transzduktorok megtervezése és folyamatba tettük azok legyártását.

A fenti tételes teljesítés-ismertetéssel kapcsolatban megjegyzem még azt, hogy nem egy esetben a minisztérium indokolt kérésére rendkívüli sürgősséggel kellett egy-egy feladatot végrehajtanunk. Pl. 20 készlet kisgenerátor szabályozó berendezés tropikalizált kivitelben, az EVIG számára elkészített inverterek soron kívüli ismételt elkészítése abból a célból, hogy azok a győri korszerű vagonvilágítás bemutatóval kapcsolatban felhasználhatók legyenek. Magának a 3000 LE-s mozdonynak az egyenirányító berendezései is ebbe a kategóriába tartoznak, amennyiben eredetileg kísérleti mozdony volt előirányozva és csak a sürgősségre való tekintettel vállaltuk el mindjárt a végleges mozdony egyenirányító megoldások elkészítését, vállalva azokat a kockázatokat, amik — új kutatási területeken — egy ilyen merész eljárással járnak.

E feladatokat is maradéktalanul teljesítettük.



SZIGETELÉSTECHNIKAI LABORATÓRIUM

I.

Kiöntőgyanták alkalmazása és felhasználási problémái az erősáramú villamosiparban

LEYRER RICHÁRD

ÖSSZEFOGLALÁS

Az epoxi kiöntőgyanták az erősáramú villamosiparban igen jól beváltak. Alkalmazási területük az elmúlt évek folyamán erősen megnövekedett, ami kiváló mechanikai és villamos tulajdonságaiknak köszönhető. Hátrányuk a fémekhez viszonyított nagy hőtágulási tényezőjük. Az ebből származó nehézségek kiküszöbölését az áramváltók és feszültségváltók gyártására vonatkozóan a cikk keretében ismertetjük.

ПРИМЕНЕНИЕ ЗАЛИВОЧНОЙ СМОЛЫ И ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СИЛЬНОТОЧНОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

P. Лейрер

Резюме

Эпоксидная заливочная смола очень хорошо оправдала себя в высокоточной электротехнической промышленности. Область применения этой смолы за последние годы значительно увеличилась благодаря их отличным механическим и электрическим свойствам. Недостатком их является большой коэффициент термического расширения по отношению к металлам. Устранение возникающих вследствие этого трудностей при производстве трансформаторов тока и трансформаторов напряжения рассматривается в рамках данной статьи.

DIE ANWENDUNG UND VERWENDUNGSPROBLEME VON GIESSHARZEN IN DER STARKSTROM ELEKTROINDUSTRIE

R. Leyrer

Zusammenfassung

Die Epoxy Giessharze haben sich in der Starkstrom-Industrie sehr gut bewährt. Ihr Verwendungsgebiet hat sich in den vergangenen Jahren sehr erhöht, was ihren hervorragenden Eigenschaften zu verdanken ist. Sie haben den Nachteil, dass ihr Wärmeausdehnungskoeffizient gegenüber den Metallen gross ist. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Beseitigung der aus diesem Grunde heranwachsenden Schwierigkeiten bei der Herstellung von Stromwandlern und Spannungswandlern geschildert.

THE APPLICATION AND UTILIZATION PROBLEMS OF POURING RESINS IN THE HEAVY CURRENT ELECTRICAL INDUSTRY

R. Leyrer

Summary

The Epoxy pouring resins proved very good in the heavy current electrical industry. Owing to the excellent mechanical and electrical properties the field of their application made a considerable progress in the last years. Their disadvantage lies in the fact, that in relation to metals their coefficient of thermal expansion is greater. The elimination of difficulties arising from the fact are outlined in the article in connection with the manufacture of current transformers and voltage transformers.

Mint ismeretes, az erősáramú villamosiparban kiöntőgyantákat már a második világháború folyamán is használtak, igaz, újszerű voltak miatt és speciális tulajdonságaik következtében csak kismértékben. Ezek a kiöntőgyanták elsősorban poliésztergyanták, amelyeknek a jelenlegi szemszögből megítélve még igen sok hiányosságuk volt, de már megmutatták azon távlatokat, melyek a kiöntőgyanták alkalmazásával elérhetők. A háború után, különösen az epoxigyanták nagyipari gyártásának megindulásakor kezdtek mindinkább elterjedni, és ma már az erősáramú villamosipar számtalan területén nélkülözhetetlen szigetelőanyagává váltak a kiöntőgyanták. Megjelentek a transzformátorgyártásban — különösen a korszerű mérőváltóknak képezik elengedhetetlen szigetelőanyagait —, de ezen túlmenően számtalan célra alkalmazzák az epoxigyantákat, pl. a kábelvédelezes kiöntésére, átvezető és támszigetelő készítéséhez, búvárszivattyú-motorok burkolásához, logikai elemek lezárásához stb., de mint lakkot vagy ragasztóanyagot is sok helyen használják.

Az eddig a villamosiparban használatos két kiöntőgyanta-típus, a telítetlen poliészter- és az epoxigyanták közül idők folyamán a felhasználók tapasztalatai eredményeként bizonyos eltolódások jöttek létre az epoxigyanták felé. Ennek oka elsősorban abban rejlik, hogy — noha az epoxigyanták világviszonylatban is drágábbak, mint a poliésztergyanták —, kedvezőbb villamos és mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, azonkívül feldolgozástechnológiájuk, különösen öntéstechnológiájuk lényegesen sokoldalúbb és kedvezőbb. Mindez azt eredményezte, hogy az erősáramú iparban az epoxigyanták alkalmazási területe mindinkább megnőtt, bár kisebb igényű helyekre poliésztergyanták is bevezetést nyertek.

Eleinte természetesen a kiöntőgyantákat is igen konvencionális módon alkalmazták, és csak később, amikor a tervezők jobban megismerkedtek a kiöntőgyantákban rejlő lehetőségekkel, kezdtek merészebben, a kiöntőgyanták jellegének

megfelelően tervezni. Ez viszont számtalan új lehetőséget biztosított a villamosipar számára, melynek illusztrálására csak az alábbi két ábrát kívánjuk bemutatni a megfelelő adatokkal.

Kétségtelen, hogy az erősáramú villamosipar területén a kiöntőgyanták alkalmazása a legforradalmibb hatással a mérőváltók gyártásában mutatkozott. A régi olaj-, vagy porcelán szigetelésű mérőváltókat szinte teljes mértékben sikerült helyettesíteni, és ma már nemcsak a középfeszültségű mérőváltókat, hanem a nagyfeszültségű kombinált áram—feszültség—váltókat is jó részt epoxigyantákkal gyártják. Hogy mindez megvalósítható volt, ennek oka abban rejlik, hogy az epoxi kiöntőgyanták olyan kiváló tulajdonságokkal rendelkeznek, melyek különösen alkalmassá teszik azokat a mérőváltók gyártásához [1]. Ezek a következők:

— a keményedés hő hatására, melléktermékek keletkezése nélkül, atmoszferikus nyomás jön létre;

— a megszilárdulás közben a kiöntőkeverék csak kis mértékben zsugorodik és töltőanyagokkal ezt is tovább lehet csökkenteni;

— a feldolgozási hőmérsékleten a kiöntőkeverék igen jól folyik, azaz alacsony a viszkozitása, és így a szerszámokat, valamint a beágyazott tekercseket jól kitölti;



1-1. ábra. 10 kV-os feszültségváltó porcelán szigeteléssel, súlya: 46,8 kp

— megszilárdulás után a kikeményedett műgyanta jó hőállósággal (B osztály) és megfelelő alaktartással (*Martens* 90...130 °C) rendelkezik;

— jók a villamos tulajdonságok (átütési szilárdság, fajlagos és belső ellenállás, dielektromos veszteségi szög, kúszóáram-szilárdság), és ezek a lágyuláspontig csak kis mértékben változnak;

— kicsi a vízfelvétel, és ennek következtében a villamos tulajdonságok nem romlanak;

— jól tapad a beágyazott szigetelőanyagokhoz, valamint a fémekhez, de amennyiben nem szükséges, ez meggátolható.

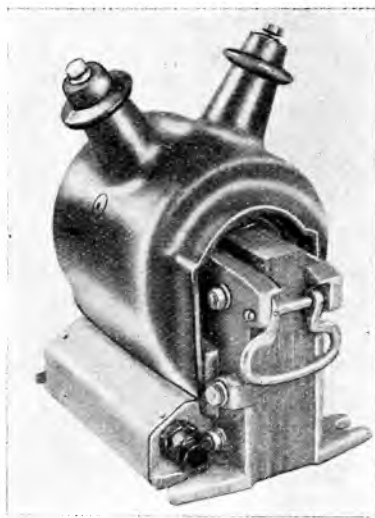
Mindezen előnyök mellett azonban néhány hátrányos tulajdonsága is van az epoxigyantáknak. Így a kiöntőgyantáknak viszonylag kicsi a rugalmassági modulusa, ugyanakkor a hőtágulási tényezője nagymértékben eltér a fémekétől. Ezen hátrányos tulajdonságoknak az a következménye, hogy a beágyazott fémek és a műgyanta között a hőigénybevételekből kifolyólag mechanikus feszültségek lépnek fel, melyek előbb-utóbb repedésekhez, törésekhez vezetnek, és így a készülék tönkremenetelét okozzák. A hátrányok részben a kiöntőgyanták keverékeinek összetételében létrehozott változtatásokkal — elsősorban töltőanyagok bekeverésével — részben technológiai és szerkezeti elvek bevezetésével elkerülhetők.

A kiöntőgyanták alkalmazás-technikájával a VKI-ban már 1954 óta foglalkozunk intenzíven. A műgyanta szigetelésű mérőváltók kikísérletezését a VKI a Transzvill Gyárral közösen végezte, melyek eredményeként a Transzvill a műgyanta szigetelésű mérőváltók gyártását megkezdte [2].

A továbbiakban a mérőváltók gyártásánál alkalmazott két újszerű technológiai elvet ismertetünk, melyek alkalmazása lehetővé tette a kísérletek folyamán felmerült problémák és nehézségek eredményes megoldását.

Áramváltók

Az áramváltók kikísérletezésekor sem az öntés, sem a villamos igénybevétel folyamán különösebb problémák nem merültek fel. Nehézségek jelentkeztek azonban az áramváltókra előírt típuspróbák előírásainak betartásakor. Míg a dinamikus próbákat az áramváltók, éppen a műgyanta szigetelések kiváló mechanikai szilárdsága következtében jól bírták, a termikus próbáknál — sokszor a próba lefolytatása után — a műgyanta testben repedések keletkeztek. A probléma behatóbb vizsgálata folyamán megállapítható volt, hogy a vizsgálat során a primer rézvezető sín kb. 160...180 °C-ra melegedett. A kitágult rézvezető azután, részben a műgyanta rossz hővezetőképessége, részben az eltérő hőtágulási tényezők következtében a műgyanta testet megrepesztette.

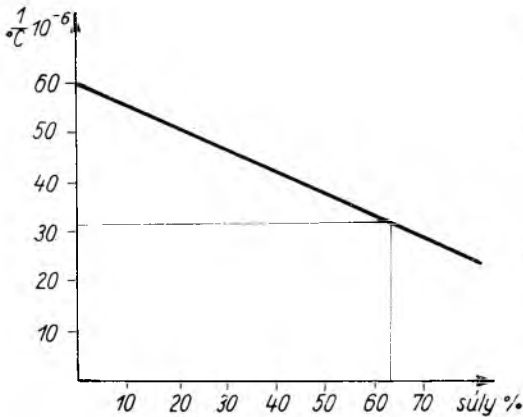


1-2. ábra. 10 kV-os műgyanta szigetelésű feszültségváltó, súlya: 18 kp

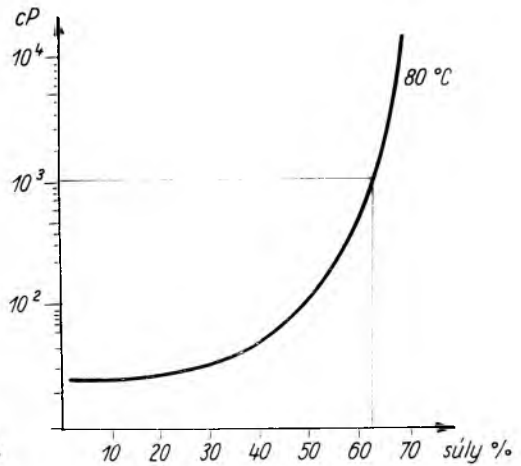
Az alábbi táblázat szemlélteti a rézvezető és az epoxigyanta hőtágulási tényezőit:

	$1/^\circ\text{C}$
Cu	$16 \cdot 10^{-6}$
Epoxigyanta	$60 \cdot 10^{-6}$
Epoxigyanta 63% kvarccal töltve	$32 \cdot 10^{-6}$

Látható, hogy kvarc töltőanyag lényegesen csökkenti ugyan a hőtágulási tényezőt (1-3. ábra), azonban a réz hőtágulási tényezőjét még mindig jóval túlhaladja. További kvarcliszt töltőanyag adagolására azonban már nincs mód, mert mint az az 1-4. ábrából is jól látható, a kiöntőkeverék viszkozitása olyan nagy mértékben megnövekszik, hogy azt öntéstechnikailag már nem lehetett feldolgozni.



1-3. ábra. Epoxigyanta hőtágulási tényezője a töltőanyag függvényében

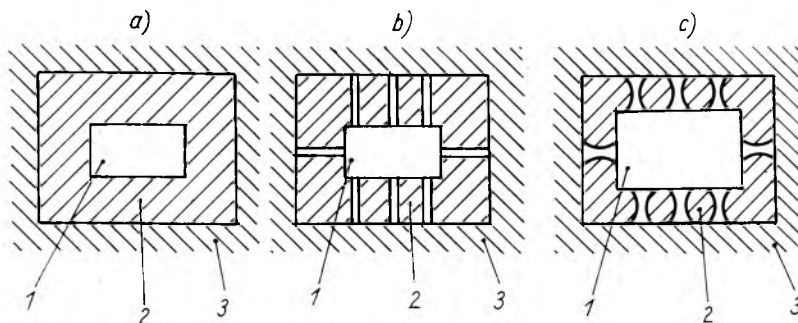


1-4. ábra. Epoxigyanta viszkozitása a töltőanyag függvényében

A kérdést tehát csak konstrukciós úton lehet megvalósítani. A megoldás „párnázás” kialakításával történt.

Az eljárás lényege az, hogy a rézvezető felületét rugalmas, könnyen összenyomható párnaréteggel vonjuk be, így lehetőség nyílik arra, hogy a réz tágulását elasztikusan felfogjuk, és az erőhatást a műgyanta falán kiküszöböljük. A megoldást az 1-5. ábra szemlélteti. Az 1-5a ábrán látható a megoldás elvi vázlata. A rézvezetőt teljesen körülzáró gumiburkolat azonban — ha az teljesen tömör, még ha a leglágyabb gumifajtából készül is —, miután teljesen körül van véve a műgyanta szigeteléssel, az erőhatások elől nem tudván kitérni, azokat teljesen átadja a műgyanta falnak. Ebben az esetben tehát a párnázás ellenére is repedések fognak keletkezni a műgyanta testben. Ha azonban az 1-5b megoldás szerint a gumiburkolatot perforációval látjuk el, a réz hőtágulásából származó térfogatváltozást a gumipárnázás a perforációkba szétnyomódva fel tudja fogni, és így a műgyanta falra a termikus igénybevételkor nyomás nem fog nehezedni. Az 1-5c ábrán látható az, hogy a kitágult rézvezető hogyan nyomja össze a perforált gumipárnázást. Hasonló módon célravezető habgumi alkalmazása is.

A villamos tér hatására azonban a párnázásban levő levegőben csendes kisülések jönnének létre, amelyek a szigetelés előbb-utóbbi tönkremenetelét vonják maguk után. Ennek elkerülésére a párnázás külső felületén vezető réteget kell kialakítani, melyet a primer rézvezetővel fémesen össze kell kötni. Ily módon a párnázásba zárt levegő villamosan nincs igénybe véve, és elkerülhető a villamos meghibásodás veszélye is.



1-5. ábra. A „párnázás” hatása

a) 1 rézvezető, 2 gumipárnázás, 3 műgyanta öntvény

b) 1 rézvezető (hidegen), 2 perforált gumipárnázás, 3 műgyanta öntvény

c) 1 rézvezető (melegen kitágulva), 2 perforált gumipárnázás összenyomva, 3 műgyanta öntvény

E megoldás segítségével sikerült elérni azt, hogy a műgyanta szigetelésű áramváltók a legszigorúbb termikus igénybevételeknek is megfeleltek. [3].

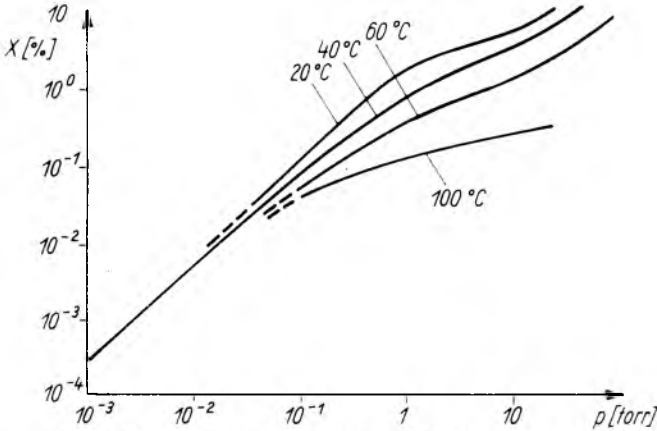
Feszültségváltók

A műgyanta szigetelésű feszültségváltóknál elsősorban a menetszigetelési próbák alkalmazásakor jelentkeztek a nehézségek, menet-, ill. rétegzárlat formájában. A probléma kellő megértéséhez vizsgáljuk meg egy műgyanta szigetelésű feszültségváltó primer tekercsének felépítését.

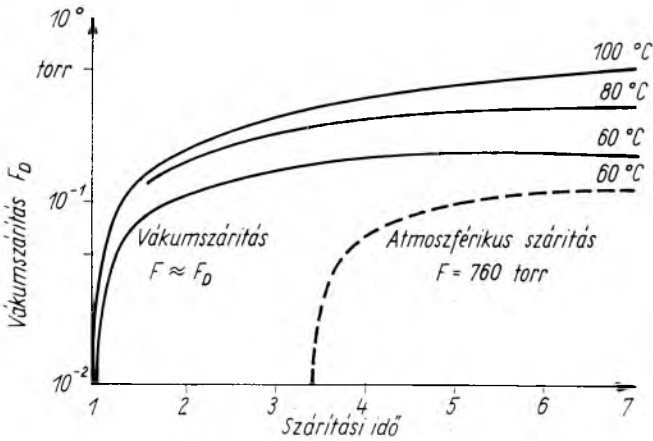
Mint ismeretes, a primer tekercset vékony zománchuzalokból készítik, melyet rétegenként egy-két réteg nátroncellulóz papír rétegszigeteléssel választanak el egymástól. Az egyes menetek között a feszültségkülönbség csak néhány volt, azonban a rétegek között üzem közben is, de különösen a menetszigetelési próbánál néhány ezer volt feszültségkülönbség is fellép. Ennek következtében a huzalok között, de különösen a rétegek között, semmiképpen sem maradhat levegő, vagy gáz-zárvány, esetleg nedvesség, mert az átütéshez vezetne. Következésképpen a tekercset tökéletesen ki kell szárítani, és a huzalok közötti teret műgyantával ki kell tölteni. E célra oldószermentes, igen alacsony viszkozitású epoxigyantát kell használni, mely vákuum alatt képes a tekercs belsejébe hatolni.

A papírszigetelés tökéletes kiszárítása alapvető fontosságú a műgyanta szigetelésű feszültségváltóknál, és mint az az irodalomból is ismeretes, csak oly módon oldható meg, ha a szárítást megfelelő, $10^{-2} \dots 10^{-3}$ torr vákuummal végezzük. Az alábbi ábrák egyértelműen bizonyítják, hogy a papírból a nedvességet csak finom vákuummal lehet eltávolítani, valamint azt is, hogy rosszabb vákuum esetében a nedvesség még akkor sem távolítható el, ha a szárítási időt többszörösére megnöveljük.

A szárítás folyamán a réteg-szigetelőanyag zsugorodása, valamint a felmelegítés folyamán a huzalanyagok hőtágulása következtében a tekercsek meglazulnak. Ennek elkerülése érdekében a tekercselést igen szorosan kell végezni, nehogy a lazulás a tekercsek megcsúszását eredményezze. Viszont szoros tekercselés esetében az impregnálógyanta behatolása olyan nagy mértékben meg van nehezítve, hogy azt megfelelő módon végrehajtani nehéz.



1-6. ábra. Nátrónpapír abszorpciós izothermái

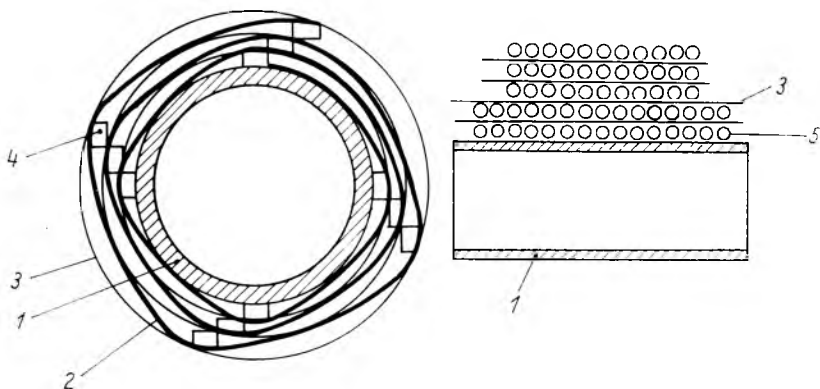


1-7. ábra. Szárítási idő, a vákuum és a hőmérséklet közötti összefüggés

A probléma megoldását az ún. tekercstartó pálcikák segítségével lehet elérni. Az eljárás lényege az, hogy tekercseléskor a menetekre tengelyirányba négy vagy hat helyen egy-egy 0,2...0,3 mm vastag és kb. két-három mm széles prespáncsikot fektetünk, majd a további rétegeket erre tekercseljük fel. A következő réteg tekercselése előtt a prespáncsikákat az előző pálcák mellé helyezzük (1-8. ábra).

Ily módon elérhető, hogy a tekercs belsejében csatornák alakulnak ki, melyek mentén az impregnáló gyanta akkor is könnyen be tud hatolni a menetek közé, ha igen szoros a tekercselés.

A módszer alkalmazásának nagy előnye egyúttal, hogy a felesleges impregnálógyanta eltávolítását a csatornák lehetővé teszik. A szükséges mennyiségű impregnálógyanta a kapillaris erők következtében a tekercs belsejében marad. Ezzel szemben



1-8. ábra

1 szigetelőcső; 2 menetek; 3 rétegszigetelés; 4 tekercstartó pálcák; 5 huzal

a tekercsek szélein a rétegszigetelő papír közei közül, valamint a csatornákból jól kifolyik. (Ez ismét a hőtágulási tényezők eltérő volta miatt szükséges.) Mint az előzőkből láttuk, a tiszta gyanta hőtágulása sokszorosa a töltött gyantáénak, ill. a rézhuzalokénak. Ezért feltétlenül szükséges, hogy a gyanta és huzalok érintkező felületén lehetőleg minél kisebb legyen az eltérés. Különösen lényeges ez a tekercselés széleinél, ahol a rézvezetőn túlnyúlik a papír-rétegszigetelés. Ha ezeken a „szabad helyeken” a tiszta impregnálógyanta összegyűlik, ill. marad, a tiszta gyanta, valamint a rézvezető közötti hőtágulási különbségekből származóan olyan nagymértékű mechanikus feszültségek lépnek fel, melyek a tiszta gyantaréteg megpedését, sőt sok esetben a rétegszigetelés átszakadását is okozhatják.

Mint azt a legtöbb esetben tapasztaltuk, a meghibásodások rétegzárlat következtében itt a széleken következtek be. Ezért fontos, hogy a rétegszigetelő papír a lehető legkisebb mértékben nyúljon túl a tekercselésen, és ezek a helyek a lehető legkevesebb impregnálógyantát tartalmazzák. Az impregnálást követő töltőanyag-gal ellátott, és így kisebb hőtágulási tényezőjű gyantakeverék a menetek széleire a „szabad helyekre” a vákuumöntési művelet folyamán jól be tud hatolni és biztosítani tudja a megfelelő szigetelési szintet.

Összefoglalás

Az epoxigyanták igen jó mechanikai és villamos tulajdonságokkal rendelkeznek, hőállóságuk, kis vízfelvételük lehetővé teszi, hogy a villamosiparban számtalan helyen, készülékekben, berendezésekben mint új konstrukciós és szigetelőanyagot felhasználjuk. Hátrányuk azonban kis rugalmassági modulusuk és a kiöntött fémalkatrészekről nagy mértékben eltérő hőtágulási tényezőjük, melyet még töltőanyag alkalmazásával sem lehet a fémekével teljesen egy szintre hozni. Olyan esetekben tehát, ahol különösen melegező alkatrészek beágyazását kell megoldani, különleges konstrukciós megoldásokat kell alkalmazni, hogy a repedésveszély kiküszöbölhető legyen.

Irodalom

- [1] *Davies, H.*: The Applications of Epoxy Resins in the Electrical Industry. *Plastics*, 1959. Dec.
- [2] *Anda G.—Áts I.*: Középfeszültségű műgyanta szigetelésű áramváltó-sorozat. VBKM közlemények **1**, 42—49. old.
- [3] *Transzsvill—VKI*: Magyar szabadalom 150—995.

2.

Kísérletek polietilén-glikol-tereftalát hazai előállítására

LEYRER RICHÁRD—FAZEKAS GÁBORNÉ

ÖSSZEFOGLALÁS

A lefolytatott kísérletsorozat eredményeként kidolgoztuk a polietilén-glikol-tereftalát gyanta laboratóriumi szakaszos előállítási módszerét.

Dimetil-tereftalátból kiindulva oldottuk meg a bisglikol-tereftalát előállítását. Különböző katalizátorokat próbáltunk ki, melyeknek segítségével az átészterezést maradék nélkül végre lehet hajtani.

A polikondenzációra vonatkozólag kidolgoztuk a legmegfelelőbb nyomás és hőfoktartomány értékeit.

Vizsgálatokat folytattunk a hőstabilitást befolyásoló tényezők megállapítására mely az anyag további feldolgozása szempontjából lényeges.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ, НАПРАВЛЕННЫЕ НА ОТЕЧЕСТВЕННОЕ ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛИЭТИЛЕНГЛИКОЛТЕРЕФТАЛАТ

P. Leyrer — G. Fazekas

Резюме

В результате проведенной серии экспериментов разработан лабораторный периодический метод получения смолы полиэтиленгликолтерeftалата.

Исходя из диметилтерeftалата было решено получение бисгликол-терeftалата. Были испробованы различные катализаторы с помощью которых без остатка можно произвести перестерификацию.

Относительно поликонденсации разработаны наиболее удовлетворительные значения диапазона давления и температуры.

Проведены исследования по определению факторов влияющих на тепловую стабилизацию, что является существенным с точки зрения дальнейшей обработки материала.

VERSUCHE ZUR HERSTELLUNG VON POLYÄTHYLEN-GLYKOL-TEREPHTHALAT IN UNGARN

R. Leyrer—Frau G. Fazekas

Zusammenfassung

Als Ergebnis der durchgeführten Versuchsserie wurde eine Methode zur abschnittweisen Herstellung von Polyäthylene-Glykol-Terephthalatharz in Laboratoriumsmaßstab ausgearbeitet.

Die Herstellung des Bisglykol-Terephthalats wurde von Dimethylterephthalat ausgehend gelöst. Es wurden verschiedene Katalysatoren erprobt, mit deren Hilfe die Veresterung restlos vorgenommen werden kann.

Bezüglich der Polykondensation wurden die am besten geeigneten Druck- und Temperaturbereichswerte ausgearbeitet.

Es wurde zur Feststellung der Faktoren welche die Wärmestabilität beeinflussen untersuchungen durchgeführt, die hinsichtlich der weiteren Verarbeitung des Materials von wesentlicher Bedeutung sind.

EXPERIMENTS AIMING AT THE DOMESTIC PRODUCTION OF POLYTHENE GLYCOL TEREPHTHALATE

R. Leyrer—Mrs. G. Fazekas

Summary

As a result of the series of experiments carried out, the laboratory batch-type production method of polythene glycol terephthalate was worked out.

The bisglycol terephthalate production was solved by setting out from dimethyl terephthalate. Various catalysts were tried which all proved to be suitable for perfect esterization.

The most suitable values of the pressure and temperature ranges were worked out for the polycondensation.

Examinations were carried out to determine the factors which influenced the thermal stability as this was considered to be essential for the further processing of the material.

1. Bevezetés

A polietilénlikoltereftalát olyan lineáris polimer, melyet kondenzációs reakció útján állítanak elő. A kondenzációs polimereket az 1927—37-es években W. H. Carothers fejlesztette ki az Egyesült Államokban, a Du Pont de Nemours laboratóriumában [1]. Carothers vizsgálatait főleg a poliamidok területén folytatta, melynek eredménye a Nylon szál megszületése lett.

A poliészterekre vonatkozólag 1939—41-ben az angliai Calico Printers Association Ltd. (Lancashire) vegyészei, J. R. Whinfield és J. T. Dickson folytatták le eredményesen a kísérleteket és állítottak elő használható terméket (fonalat) polietilénlikoltereftalátból [2]. Az ipari kifejlesztést a két fő szabadalomtulajdonos, az Imperial Chemical Industries Ltd. és a Du Pont de Nemours Comp. végezte el. Az ICI Európában több cégnek adott el szabadalmat, így a tereftalátgyanta termékek ma már sokféle kereskedelmi néven és formában kerülnek piacra.

2. A polietilénlikoltereftalát tulajdonságai és főbb alkalmazási területei

A tereftalátgyanta olvadáspontja 260...265 °C. Kémiai ellenállóképessége igen jó: ásványi savaknak ellenáll, de a koncentrált kénsav megtámadja. Erős alkáliákkal szembeni ellenállóképessége közepes. Kitűnő az oxidáló szerekkel szembeni ellenállása. Az általában használatos szerves oldószerek nem támadják meg (aceton, kloroform, széntetraklorid, alkohol, triklóretilen); de a fenol, klórozott fenol, meleg nitrobenzol, tetraklórétán oldják.

A belőle készült fonal és fólia mechanikai tulajdonságai kiválóak, hőellenállóképessége szintén: -60 °C... +150 °C-ig tartóan, rövid ideig 200 °C-on is igénybe vehető. Vízfelvétele alacsony: 0,3...0,5% vizes áztatás után. A szag-, víz- és gőz-áteresztő képessége kicsiny. Mikroorganizmusoknak, rovaroknak, időjárásnak, ultrabolya fénynek jól ellenáll. Külön ki kell emelni előnyös villamos tulajdonságait; jó villamos szigetelőképességét.

Kedvező tulajdonságai folytán igen nagy elterjedésnek örvend számos területen. A tereftalát szálak textílfonalként és technikai fonalként egyaránt jól felhasználhatók tisztán, vagy gyapjúval, gyapottal keverve. A tereftalát fólia az elektrotechnikai iparban talál széles körű alkalmazásra. Villamos motorok horonyszigetelése

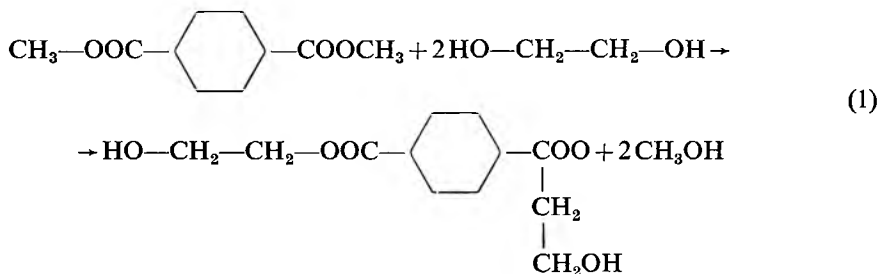
sére, kábeltekerceslésre, kondenzátorok szigetelésére, gyengeáramú készülékek szigetelésére jól használható. Kedvező tulajdonságai lehetővé teszik, hogy alkalmazásával a villamos készülékek méreteit csökkentésük. Magnetofonszalag, írógép-szalag, fényképezési film készül belőle. Vékony fémréteggel együtt alkalmazható, hő- és hangszigetelő lemezborítás készítésére alkalmas. Ideális csomagolóanyag.

Fentiek figyelembevételével célszerűnek látszott a polietilén-glikoltereftalát előállítás, feldolgozási lehetőségeinek tanulmányozása, illetve erre vonatkozó kutatási munkák végzése.

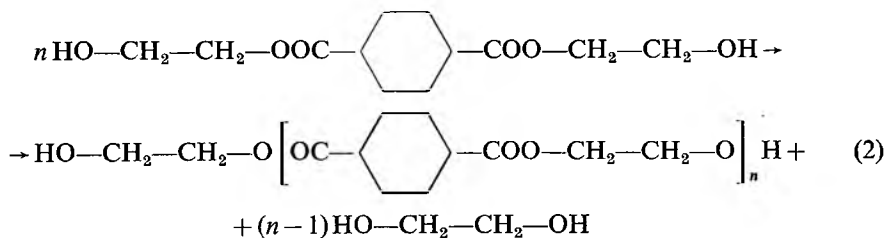
3. A polietilén-glikoltereftalát-gyanta előállítása

A poliészter előállításának kézenfekvő módszere — kiindulás dikarbonsavból és difunkcionális alkoholból — a polietilén-glikoltereftalát készítésénél rendkívül rossz eredményt ad, mivel a tereftálsav csekély oldhatósága miatt a reakció igen lassan indul meg. A nagyipari előállításnál ezért a tereftálsav dimetilészteréből indulnak ki.

Az egyik legelterjedtebb és általunk is alkalmazott módszer szerint a tereftálsav dimetilészterét etilén-glikollal átészterezik. Eközben a következő reakció megy végbe:

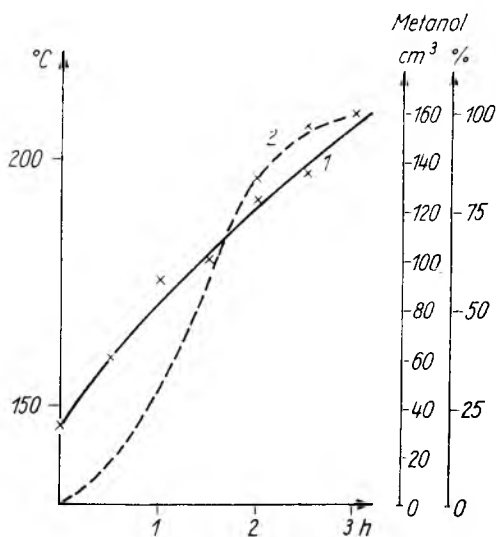


A keletkező bis-glikoltereftalátot a második lépcsőben polikondenzálják, míg a megfelelő molekulásúlyú polimert nem nyerik.

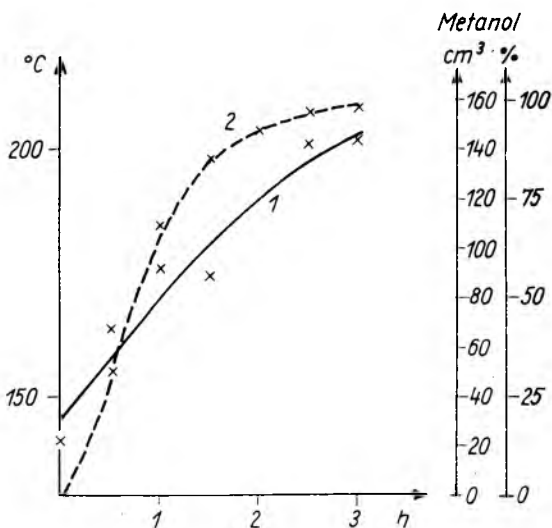


Míg az (1) reakció, a bis-glikoltereftalát keletkezése aránylag kis hőmérsékleten, 140...220 °C-on, atmoszferikus nyomáson játszódik le, a második lépcső végrehajtásához lényegesen nagyobb hőmérséklet, 260...300 °C szükséges és ezenkívül jó minőségű termék előállításához feltétlenül vákuumra van szükség.

Mindkét reakció végrehajtásához katalizátorok szükségesek. Az átészterezéshez és a polikondenzáció végrehajtásához a legkülönbözőbb katalizátorokat alkalmazták, amelyekre vonatkozóan igen sok szabadalom található [3]. Szinte valamennyi megegyezik viszont abban, hogy katalizátorként nehézfém-sók oxidját, vagy újabban



2-1. ábra. A hőmérséklet változása (1) és a ledesztillált metanol mennyiségének növekedése (2) átészterezés közben
Molarány 1:2,5 Katalizátor Zn acetát



2-2 ábra. A hőmérséklet változása (1) és a ledesztillált metanol mennyiségének növekedése (2) átészterezés közben
Molarány 1:2,5 Katalizátor Mn acetát

A reakciók lefolyását a különböző katalizátorokkal a 2-1...2-4. ábrák diagramjai jól szemléltetik.

mindinkább azok acetátját alkalmazták. Így elsősorban az ólom-, mangán-, kobalt-, kadmium-, cinkacetátok használatosak; az utóbbiak valamivel kedvezőbbnek látszanak, mert a keletkező termékek színe fehérebb. Ezenkívül más fémeket, elsősorban alkálifémeket, vagy alkáliföldfémeket, pl. fémnátriumot, magnéziumot, illetve azok származékait, mint pl. lítiumhidridet is alkalmaznak átészterező katalizátorként.

A második — polikondenzációs — lépcső végrehajtásához ugyancsak különböző katalizátorokat használnak, a legmegfelelőbbnek azonban az antimontrioxid látszik. A polikondenzáció lefolyása a katalizátoron kívül még igen sok tényező hatásától függ.

3.1 Dimetilteftalát átészterezése bisglikolteftaláttá

A reakció 140...220 °C-on játszódik le, különböző nehézfémek, mint katalizátorok, így ólom-, kadmium-, mangán-, kobalt-, cinkacetátok hatására. Ezen reakciót az irodalomban sok helyen leírták [4], kísérleteink folyamán az irodalmi adatok jól reprodukálhatók voltak, így különösebb vizsgálatok lefolytatását nem igényelték. A katalizátorok mennyisége minden esetben $5 \cdot 10^{-4}$ mól/l mol dimetilteftalát volt. A dimetilteftalát-glikol molaránya viszont 1:2,5.

Az átészterezés előrehaladását a ledesztillált metanol mennyiségével kísértük figyelemmel, gondosan ügyelve arra, nehogy glikol desztilláljon át a metanol mellett.

3.2 Polikondenzáció

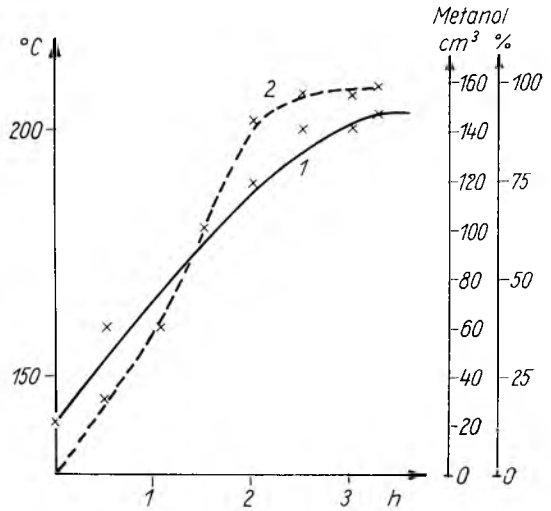
A második lépcső — a poliésztergyanta képződése az átészterezés folyamán keletkező bis-glikoltereftaláttól — polikondenzáció útján jön létre.

A reakcióban etilén-glikol keletkezik melléktermékként, melynek eltávolítása a polikondenzáció továbbhaladásának alapfeltétele. Kísérleteink folyamán néhány szabadalmi leírás alapján megkíséreltük azokat az értékeket elérni, melyeket a nyugatnémet Hostaphan, angol Melinex, illetve olasz Montivel gyártmányokon mértünk, azonban ezek a kísérleteink nem jártak kellő eredménnyel, így a kérdés eldöntésére teljesen szisztematikus kísérletsorozat elvégzése vált szükségessé.

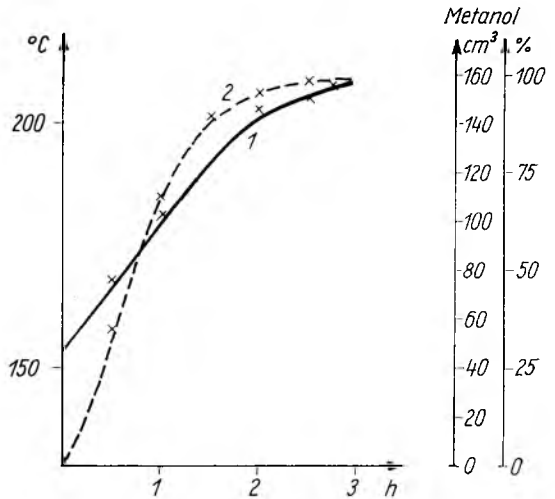
Mindenekelőtt azonban szükséges volt, hogy a külföldi gyártmányú fóliák jellemző tulajdonságait meghatározzuk. A polietilén-glikoltereftalátnál természetesen csak akkor érhető el jó fonal- és fóliaképzési tulajdonság, ha a molekulaszám egy bizonyos értéket elért. A feldolgozás szempontjából az is fontos, hogy egy bizonyos értéket ne haladjon meg a polikondenzáció mértéke. A gyanta minőségének, használhatóságának jellemzésére tehát a polikondenzáció fokának, az ebből eredő molekulaszámnak meghatározására szolgál.

A polimer összetételét vizsgálva megállapíthatjuk, hogy annak nagyságát, molekulaszámát jellemezni kétféle módszer segítségével tudjuk.

Az egyik a végcsoportok meghatározása analitikai módszerekkel. Erre vonatkozólag megállapíthatjuk, hogy a végcsoportokat elvileg hidroxilcsoportok alkotják. Azonban a viszonylag nagy hőmérséklet mellett, amelyen a polikondenzáció, különösen pedig a granulátum további feldolgozása megtörténik, számba kell venni a fokozatos bomlási reakciót, amely a poliészterláncokon karboxil-végcsoportot



2-3. ábra. A hőmérséklet változása (1) és a ledesztillált metanol mennyiségének növekedése (2) átészterezés közben
Molarány 1:2,5 Katalizátor Cd acetát



2-4. ábra. A hőmérséklet változása (1) és a ledesztillált metanol mennyiségének növekedése (2) átészterezés közben
Molarány 1:2,5 Katalizátor Co acetát

eredményez. A hidroxilcsoportok közvetlen analitikai meghatározására nem állnak rendelkezésre megfelelő gyors és megbízható módszerek, annál is inkább, miután a polietilén-glikoltereftalát a szokásos oldószerekben nem oldódik és így a végcsoportokon reakciók végrehajtása nehézségekbe ütközik. A meghatározásnak az a módja, hogy a hidroxilcsoportokat savas végcsoportokká alakítsuk át és azokat határozzuk meg, rendkívül hosszadalmas, nehézkes, üzemi célokra nem alkalmas eljárás. Maguknak a karboxilcsoportoknak a meghatározása viszonylag gyorsan és jól kivitelezhető [5]. Mivel ezen végcsoportok ismeretében a tereftalát-láncok bomlási folyamataira következtethetünk, minden esetben meghatároztuk a savszámot.

2-1. táblázat

Minta megnevezése	$[\eta]$	M_n	Savszám
Montivel	0,64	17 815	2,9
Hostaphan	0,70	19 900	3,4
Melindex	0,71	20 345	2,4

gyanta 0,5 vagy 1%-os oldatának relatív viszkozitását meghatározni. Bizonyos oldódási problémák ugyan itt is fellépnek, valamint tekintettel kell lenni arra is, hogy a viszkozitásméréseket nagyon gondos termosztálás mellett kell végezni, mind ezek ellenére a viszkozimetrikus molekulásúly-meghatározás jelenleg még előnyösebb és könnyebben elvégezhető [6].

A külföldi polimer minták közül összehasonlítóként meghatároztuk az angol Melindex, a nyugatnémet Hostaphan, valamint az olasz gyártmányú Montivel minták határviszkozitását, illetve molekulásúlyát és savszámát. Az eredményeket a 2-1. sz. táblázat szemlélteti.

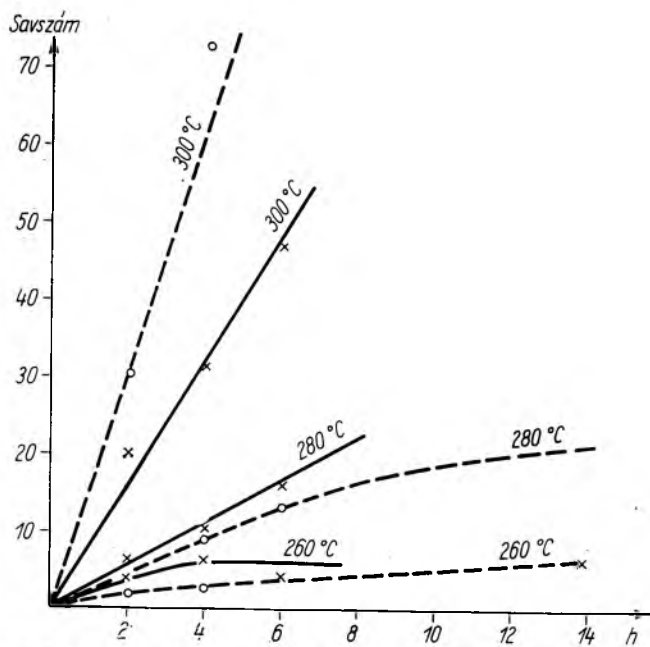
A polikondenzáció körülményeinek pontos tanulmányozása érdekében kísérlet-sorozatot végeztünk, melyhez kadmiumacetáttal mint katalizátorral több kilogramm dimetiltereftalátot bis-glikoltereftaláttá alakítottunk, majd a polimerizációs kísérleteket ebből az anyagból folytattuk le.

A polimerizációt az alábbi körülmények között végeztük el:

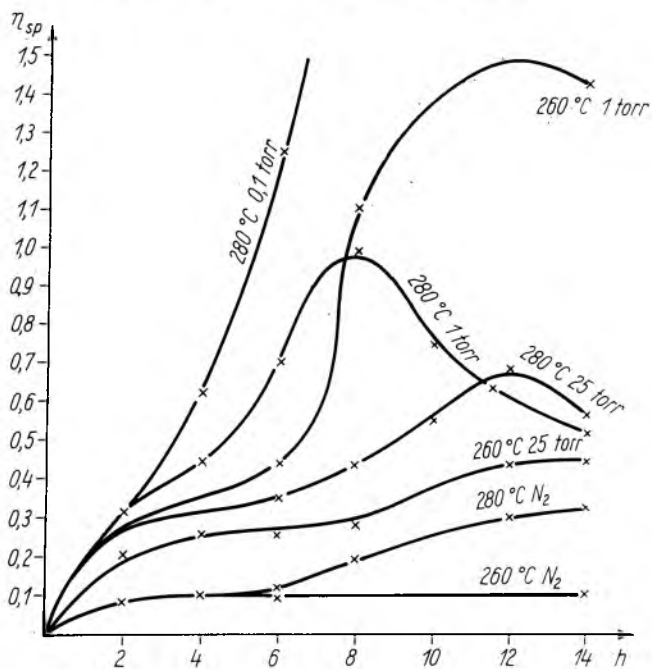
- Atmoszferikus nyomáson 260, 280 és 300 °C-on;
- Atmoszferikus nyomáson nitrogén védőgáz atmoszférában, 260 és 280 °C-on;
- Vízszugár vákuumban (20...25 torr), 260, 280 és 300 °C-on;
- Olajrotációs szivattyúval előállított vákuumban (1...5 torr) 260 és 280 °C-on;
- Kétlépcsős olajrotációs szivattyúval előállított vákuumban (0,1...0,2 torr) 260 és 280 °C-on.

Valamennyi kísérlethez 0,03% Sb_2O_3 katalizátort használtunk. A kísérleteket 500 g-os frakcionáló lombikban végeztük, a hőmérsékletet kontakthőmérővel $\pm 1^\circ C$ pontossággal tartottuk.

A polikondenzációs kísérletek folyamán két kísérletsorozatot végeztünk. Az első sorozatban 2, 4, 6 és 14 óra után vettünk mintákat és azokon meghatároztuk a savszámot, valamint az 1%-os oldatok viszkozitását. Ez a kísérletsorozat tájékoztató jellegű volt. A második sorozatban a tájékoztató jellegű kísérletek alapján kiszűrtük azon eseteket, melyek azt mutatták, hogy az irány helytelen. (Így például 300 °C túl magasnak bizonyult.) A kísérletsorozat folyamán a 2., 4., 6., 8., 10., 12. és 14. órában vettünk mintákat. Ezeknek ugyancsak meghatároztuk a savszámát, valamint az 1%-os oldatok relatív viszkozitását. A kísérletsorozat eredményeit a 2-5. és 2-6. ábrákon látható diagramok szemléltetik.



2-5. ábra. Savszám változása atmoszferikus nyomáson (folytonos vonal) és vákuumban (szaggatott vonal)



2-6. ábra. η_{sp} változása polikondenzáció közben

A 2-5. diagram a kísérletek folyamán a savszám változását mutatja a különböző kísérleti körülmények között. A 2-6. sz. diagram pedig a polikondenzáció közbeni fajlagos viszkozitások változását szemlélteti a polikondenzáció viszonyainak és a reakció idejének függvényében.

3.3 A kísérleti eredmények kiértékelése

A diagramokat kiértékelve a következőket állapíthatjuk meg:

- a) Atmoszferikus nyomáson 260 és 280 °C hőmérsékleten a polikondenzáció csak kis mértékben játszódik le és igen lassan halad előre úgy, hogy műszakilag használható terméket ilyen módon előállítani nem lehet. A fajlagos viszkozitásiértékek oly alacsonyok, hogy a diagramokon kellő módon nem is szemléltethetők. Ezzel szemben a savszámok fokozatosan és lassan emelkednek.
300 °C-on az anyag erősen elszíneződik és meg bomlik. A fajlagos viszkozitás növekedése ugyancsak nem jelentős, a savszám azonban rohamosan emelkedik és vákuumban ez az emelkedés még erőteljesebben fokozódik. Mindezen jelenségek arra utalnak, hogy 300 °C-on az anyag kémiai szerkezetére már károsan kiható bomlási folyamatok játszódnak le; ilyen nagy hőmérsékletnek azt kitenni nem szabad.
- b) Atmoszferikus nyomáson nitrogén védőgáz atmoszférában 260 °C-on a polikondenzáció kb. két és fél óra alatt eléri az egyensúlyi állapotot, ami után további változás nem következik be. A keletkező termék molekulásúlya igen alacsony.
280 °C-on a polikondenzáció határozottabban halad előre és kb. 14 óra után alacsony molekulású termék keletkezik, azonban ez már bizonyos szálhúzóképeséget is mutat. A termék fajlagos viszkozitása ekkor kb. 0,3...0,4.
- c) Vízugár-vákuumban (20...25 torr vákuum mellett) 260 °C-on határozottan halad előre a polikondenzáció és 14 óra után kb. 0,4...0,5 fajlagos viszkozitású termék keletkezik. A polimer erősen szálhúzó jellegű. Értékében azonban a külföldi minta alatt marad.
A polimer savszáma fokozatosan és kis mértékben emelkedik.
280 °C-on a fajlagos viszkozitás görbéjét vizsgálva, 12 órán keresztül emelkedő jellegű görbét kapunk, utána kismértékű viszkozitáscsökkenés volt tapasztalható. A visszaesés minden valószínűség szerint bomlásból származik. A maximális viszkozitású anyag nagyon jó szálhúzó-tulajdonságokkal rendelkezik.
Savszám szempontjából a minták savszáma kisebb mértékben emelkedik, mint ugyanezen a hőmérsékleten atmoszferikus nyomáson, de az emelkedés 280 °C-on nagyobb, mint 260 °C-on hasonló nagyságú vákuumban.
- d) Olajrotációs szivattyúval előállított vákuumban (1...2 torr) 260 °C-on a fajlagos viszkozitás először aránylag lassan emelkedik, majd rohamos további emelkedés tapasztalható, végül a 12. óra után valamelyes csökkenés áll be. A termék már 6...8 óra után is rendkívül erős szálhúzó-képességgel rendelkezik, míg 12...14 óra után olyan nagy viszkozitású polimer-olvadékot kapunk, melyet az edényből már alig lehet kiönteni. A polimer viszkozitása ebben az állapotában lényegesen nagyobb a megfelelő külföldi mintáknál.
280 °C-on a polikondenzáció gyorsabban játszódik le, viszont igen érdekes,

hogy a 8. órától kezdve erőteljes lebomlás észlelhető, a görbe inflexiós pontot mutat.

Savszám vonatkozásában a 260 és 280 °C-on mért értékekre ugyanazokat állapíthatjuk meg, mint az előzőekben.

- e) Kétlépcsős olajrotációs szivattyúval előállított vákuumban (0,1...0,2 torr) 260 °C-on a polikondenzáció sebessége lényegesen nem változik az előzőekhez képest. A görbe lefutási jellege is teljes mértékben hasonló az előzőhöz. A polikondenzáció természetesen a megfelelő állapotnál megszakítható és így a feldolgozás körülményeinek legmegfelelőbb molekulásúlyú termék állítható elő.

A reakció idejére ebből a kísérletsorozatból döntő következtetést nem lehet levonni, csupán azt tudjuk megállapítani, hogy kb. 250 g-os kísérleti mintamennyiség esetében a külföldi fóliákon mért 0,7-es határviszkozitás kb. 5...8 óra alatt érhető el, a vákuumtól függően. Más berendezéseken, pl. keverővel ellátott duplikátoron, vagy film-reaktoron természetesen lényegesen rövidebb idő alatt lehet ugyanezeket az értékeket elérni, de a hőmérsékletre, valamint a vákuumra vonatkozó megállapításaink ebben az esetben is érvényesek maradnak.

4. A polietilénlikoltereftalát hőstabilitása, valamint az azt befolyásoló tényezők

A polietilénlikoltereftalát előállítására vonatkozó kísérletsorozatok lefolytatásakor tapasztaltuk, hogy a polietilénlikoltereftalát egyes esetekben, így nagyobb hőmérsékleten, különösképpen vákuumban, nagy hajlandóságot mutat a lebomlásra, ami a molekulásúly rohamos csökkenésében és a savszám emelkedésében jelentkezik.

Miután a polietilénlikoltereftalát granulátum fóliává vagy szálanyagká váló továbbfeldolgozása 260...280 °C-on történik, a helyes feldolgozástechnológia kialakításához feltétlenül szükséges annak ismerete, hogy az anyag ebben a hőmérséklet-intervallumban hogyan viselkedik, és melyek azok a tényezők, amelyek a bomlást elősegítik, milyen mértékű a lebomlás, és végül milyen technológiai vagy kémiai műveleteket kell a granulátum előállítására és feldolgozása közé iktatni, hogy a lebomlás elkerülhető vagy legalábbis kismértékű legyen. Az eddigi kutatások szerint az anyag nedvességtartalma és a hőigénybevétel egyaránt döntő a lebomlás szempontjából. Mindezeket figyelembe véve nemcsak az anyagnak hővel szembeni viselkedését vizsgáltuk, hanem paraméterként figyelembe vettük a nedvességtartalmat, és vizsgáltuk a nedvességtartalom—hőhatás-függvényt is.

4.1 Nedvességtartalom és hőbomlás

A légszáraz állapotú mintákat (nedvességtartalom 0,20...0,30%) 96 órán át 80%-os relatív nedvességű térbe, más mintákat 45 órán át desztillált vízbe helyeztünk. A vízfelvétel megállapítása után a mintáknál hőbontást végeztünk olyan módon, hogy nitrogén védőgázban 265 °C-ra melegítettük. A lebomlás mértékének megállapítására mértük a minták savszámát és viszkozitását. Az eredmények a 2-2. táblázatban láthatók.

A vízfelvétel szempontjából igen fontos az anyag szemcsefinomsága. Háromféle finomságú mintán határoztuk meg a nedvességtartalmat légszáraz állapotban,

2-2. táblázat

	Hőbontás ideje	[η]	Savszám
Kiindulási állapot		0,57	4,85
80%-os relatív nedvességű térben tartott minta hőbontása	15 min	0,45	6,48
	1 h	0,42	9,70
Vizes áztatást követő hőbontás	15 min	0,35	7,49
	1 h	0,33	11,55

2-3. táblázat

Szemcseméret \varnothing mm	Nedvességtartalom légszáraz állapotban %	Vízfelvétel 80%-os rel. nedv. térben 96 h alatt %	Vízfelvétel deszt. vízben 45 h alatt %
0,1...0,3	0,30	0,113	3,69
0,5...0,8	0,24	0,110	2,68
2,0...4,0	0,22	0,098	1,18

valamint a vízfelvételt a 80%-os relatív nedvességű térben és vizes áztatáskor. Az eredmények a 2-3. táblázatban vannak feltüntetve.

A hőmérséklet hatását oly módon vizsgáltuk, hogy a légszáraz polietilén-glikoltereftalátot 80, ill. 150 °C-os vákuumszárítás után 260, 280 és 300 °C-on hő hatásának tettük ki és 2, 4, 6 óra után meghatároztuk a minták savszámát és határviszkozitását. A kísérletet lefolytattuk levegő jelenlétében (ahol tehát oxidációs hatás is szerepet kapott) és nitrogén védőgáz alkalmazásával. Az eredményeket a 2-4. és 2-5. táblázatban foglaltuk össze.

4.2 A kísérleti eredmények kiértékelése

A táblázatokban levő adatokat összevetve, a következőket állapíthatjuk meg:

A nedvességfelvétel és a hőbomlás szempontjából vizsgálva a folyamatokat, egyértelműen megállapítható, hogy a hőbomlásra döntő befolyással van az anyagban levő nedvességtartalom. Minél nagyobb a nedvességtartalom, annál nagyobb lesz a lebomlás mértéke is.

Az abszorbeált nedvesség a kísérletek szerint már a felmelegítés pillanatában azonnal elhidrolizálja a polietilén-glikoltereftalát molekuláit, így tulajdonképpen a bomlás oka nem is annyira a hőigénybevétel, mint inkább a nedvesség hatásában keresendő.

A hőmérsékleti igénybevétel levegőn, tehát oxidatív atmoszférában 260 °C-on — a kezdeti bomlás után — még nem jelentős, kétségtelen azonban, hogy a vákuumszárítás hatására erőteljesebb lebomlás jön létre, mint a szárítás nélküli állapotban.

280 °C-on a lebomlás erőteljesebb mértékben következik be és az idő függvényében is nagyobb a változás, mint 260 °C-on. A bomlás 300 °C-on rendkívül nagymértékű és rohamosan folytatódik.

Itt is jól megfigyelhető, hogy a 150 °C-on vákuumban szárított gyanta erőteljesebb bomlást szenved, mint a légszáraz állapotú.

2-4. táblázat

Hőbomlás levegőn

Előkezelés	Hőfok		2 óra	4 óra	6 óra
Szárítás nélkül COOH: 4,09 [η]: 0,57	260 °C	[η]	0,36	0,34	0,39
		COOH	9,75	10,15	10,58
	280 °C	[η]	0,23	0,22	0,21
		COOH	13,90	10,40	20,30
	300 °C	[η]	0,19	0,16	0,12
		COOH	29,13	37,25	44,53
80 °C-on 0,1...0,2 torr vákuumban szárítva COOH: 3,96 [η]: 0,57	260 °C	[η]	0,38	0,37	0,29
		COOH	7,07	7,55	8,81
	280 °C	[η]	0,36	0,30	0,29
		COOH	11,21	11,08	13,11
	300 °C	[η]	0,32	0,28	0,22
		COOH	15,26	19,79	26,01
150 °C-on 0,1...0,2 torr vákuumban szárítva COOH: 4,23 [η]: 0,63	260 °C	[η]	0,30	0,30	0,24
		COOH	11,13	11,47	13,70
	280 °C	[η]	0,13	0,11	0,09
		COOH	13,86	11,55	18,42
	300 °C	[η]	0,08	0,09	0,03
		COOH	21,92	30,92	38,91

A nitrogén védőgáz alkalmazásával teljesen egyértelműen megállapítható, hogy minden hőmérsékleti tartományban a bomlás sokkal kisebb mértékű, mint levegőn. Így megállapíthatjuk, hogy 260 °C-on kb. 4 óra hosszat lényeges lebomlás nélkül tartható a gyanta és csak a 6. órában mutatkozik kisebb mérvű bomlás. Természetesen 280 °C-on ez a bomlás nagyobb mérvű és végül 300 °C-on a legnagyobb.

Összefoglalva a kísérleti munkát, a polietilenglikoltereftalát-gyanta fóliává vagy szállá történő feldolgozása szempontjából a következőket kell betartani:

A tereftalátgyantát az extrudáláshoz minél nagyobb szemcsézettségű anyag formájában kell szállítani.

A feldolgozás előtt a granulált anyagot legalább 80 °C-on 0,1...0,2 torr vákuumban kell megszáritani.

A gyantát kizárólagosan nitrogén vagy más védőgáz alatt szabad megolvasztani és a felmelegítés csak 260 °C-ig történhet.

260 °C-on védőgáz alatt a megolvasztott gyanta legalább négy óra hosszat tartható minőségi változás nélkül. 280 °C-on védőgáz alatt a gyanta legfeljebb egy órán belül feldolgozandó.

Ezen feltételek betartása esetén a gyanta struktúrája a feldolgozás körülményei között nem fog változást szenvedni.

2-5. táblázat

Hőbomlás védőatmoszférában

Előkezelés	Hőfok		2 óra	4 óra	6 óra
Szárítás nélkül COOH: 4,09 [η]: 0,57	260 °C	[η]	0,42	0,43	0,44
		COOH	8,58	9,40	9,98
	280 °C	[η]	0,38	0,43	0,37
		COOH	8,52	10,83	13,55
	300 °C	[η]	0,41	0,32	0,26
		COOH	10,98	13,59	20,31
80 °C-on 0,1...0,2 torr vákuumban szárítva COOH: 3,96 [η]: 0,57	260 °C	[η]	0,60	0,57	0,52
		COOH	4,78	4,48	7,56
	280 °C	[η]	0,51	0,42	0,36
		COOH	9,28	11,61	12,98
	300 °C	[η]	0,22	0,17	0,15
		COOH	20,44	28,84	39,50
150 °C-on 0,1...0,2 torr vákuumban szárítva COOH: 4,23 [η]: 0,63	260 °C	[η]	0,72	0,66	0,52
		COOH	6,58	6,92	8,02
	280 °C	[η]	0,47	0,43	0,30
		COOH	10,54	13,24	15,54
	300 °C	[η]	0,24	0,09	0,08
		COOH	16,98	28,61	40,95

5. Vizsgálati módszerek

A tanulmányban szereplő viszkozitás, valamint savszám meghatározásokra speciális módszereket alkalmaztunk. A meghatározások menete a következő:

5.1 Viszkozitásmérés

A polietilénlikoltereftalát minták jellemzésére oldataik viszkozitását, illetőleg az abból számítható [η] határviszkozitás-értéket használtuk.

A mérést Ostwald—Fenske-viszkoziméterrel végeztük az ismert módon: 1%-os oldat viszkozitását mértük. A mérésekből meghatározható η_{rel} értéke.

$$\eta_{rel} = \frac{t}{t_0};$$

ahol t az oldat kifolyási ideje, t_0 az oldószer kifolyási ideje.

$$\eta_{spec} = \eta_{rel} - 1$$

Definíció szerint: $[\eta] = \lim_{c \rightarrow 0} \frac{\eta_{spec}}{c}$.

$[\eta]$ kiszámítására jól használhatjuk a Frind [6] által megadott képletet:

$$[\eta] = \frac{\sqrt{1 + 1,4\eta_{\text{spec}}} - 1}{0,7c},$$

ahol η_{spec} a specifikus viszkozitás, c a koncentráció g/100 ml-ben.

A molekulásúly meghatározására a következő, Conix [7] által megadott képletet használtuk:

$$[\eta] = 2,1 \cdot 10^{-4} M_x^{0,82}.$$

5.2 Karboxil-végcsoportok meghatározása

A karboxil-végcsoportok meghatározására Pohl módszerét használtuk [5]. Oldás-hoz a benzilalkoholos fűrdőt, titráláshoz pedig 0,1 n benzilalkoholos NaOH helyett 0,1 n etanolos káliklúgot választottunk. Az eredményeket savszámban adtuk meg.

Irodalom

- [1] Carothers, W. H.: High Polymers. Interscience Publishers Inc., New York, 1940. „Studies on Polymerisation and Ring Formation.”
- [2] Whinfield, J. R.: Chemistry of Terylene. Nature **158**. 930. (1946)
- [3] 2465 150 sz. amerikai, 720 120, 773 778 és 793 589 sz. angol szabadalom.
- [4] Griehl, W.: Zur Kinetik der Polyesterbildung durch Umesterung. Prague Symposium. Journal of polymer Science. Vol. XXX. (1958. July) p. 413—422.
- [5] Pohl, H. A.: Determination of Carboxyl End Groups in a Polyester, Polyethylene Terephthalate. Anal. Chem. **26**. 10. (1954)
- [6] Frind, H.: Die Bestimmung der Grundviskosität von Polyäthylenterephthalat-Lösungen. Faserforschung und Textiltechnik. **5**. 7. (1954)
- [7] Conix, A.: On the Molecular Weight Determination of Poly(ethylene terephthalate). Die Makromolekulare Chemie. **XXVI**. 3. (1958. Mai)

3.

Villamosüzemű vasúti fűtőtestek vizsgálata

DÁVID PÉTER

ÖSSZEFOGLALÁS

A villamosüzemű vasúti fűtőtestek működése körül észlelt zavarok vizsgálatára termoanalitikai, szinképelemzési és villamos méréseket végeztünk, valamint az előfordult különféle hibatípusokra összehasonlító statisztikát vettünk fel. Megállapítható volt a vizsgálatok alapján, hogy a fűtőszálak korróziója okozta a hibák döntő többségét, valamint, hogy a fűtőtest-konstrukció a szigetelőlemez felületét veszi inkább igénybe villamosszigetelés szempontjából.

ИСПЫТАНИЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

П. Давид

Резюме

Для исследования помех обнаруживаемых в области действия железнодорожных электрических нагревательных элементов применялись термоаналитические, спектрально-аналитические и электрические измерительные методы, а также проведена запись сравнительной статистики имевших место различных видов дефектов. На основании испытания было установлено, что коррозия нитей накаливания вызывала большинство дефектов, а также то, что конструкция нагревательного элемента подвергает нагрузке больше всего поверхность изоляционной пластины с точки зрения электрической изоляции.

UNTERSUCHUNG ELEKTRISCHER BAHN-HEIZKÖRPER

P. Dávid

Zusammenfassung

Zur Untersuchung der im Betrieb von elektrischen Eisenbahn-Heizkörpern festgestellten Störungen gelangten thermoanalytische, spektralanalytische und elektrische Messmethoden zur Anwendung, ausserdem wurde auch eine vergleichende Statistik der vorgekommenen verschiedenen Fehlertypen zusammengestellt. Auf Grund der Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass die überwiegende Mehrzahl der Fehler und Störungen durch die Korrosion der Heizfäden verursacht wurde, sowie dass die Heizkörper-Konstruktion die hinsichtlich der elektrischen Isolierung die Oberfläche der Isolierplatte am stärksten beansprucht.

INVESTIGATION OF RAILWAY RADIATORS

P. Dávid

Summary

Thermoanalytical, spectral analytical and electrical measuring methods were used and statistical studies were performed to investigate the trouble in operation of the railway radiators. The greater part of the troubles was caused by the corrosion of the heating wires, and mainly the surface of the insulating plate is loaded by the construction of the radiator from point of view of electrical insulation, as it was established on the basis of studies.

A vasúti személykocsik 1500 V-os villamosüzemű fűtőtestjeinek csillám-alapanyagú szigetelése importált mikanitból készül. Az 1950-es évek második felében meghibásodásokat okozott az import leállítása és hazai gyártású szigetelőlemez alkalmazása. Évente kb. 12 t mikanitot importálnak jelenleg e célra.

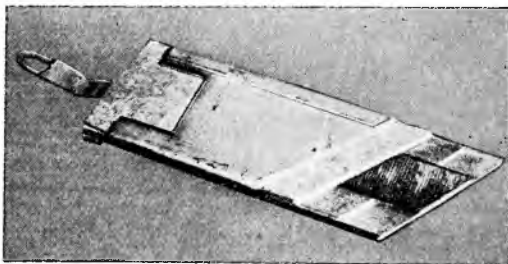
A villamosított vonalak viszont bővülnek, valamint a vasúti villamosüzemű fűtés iránt támasztott nemzetközi szintű igények mellett egyre elavultabbá válik az egész fűtőtest kb. harmincéves konstrukciója és így — elsősorban export-kötelezettségeink teljesítésére, továbbá a hazai kocsipark egy részének a nemzetközi forgalomban való részvétele érdekében — korszerűbb vasúti fűtőberendezéseket külföldről kell behozni.

A vagongyárak ezért jelenleg a fűtőtestek két fő típusát építik be a különféle kocsikba: a hazai forgalomnak szánt, hazai gyártású, mikanitszigetelésű típust, valamint az elsősorban a külföldi forgalomnak szánt és külföldről behozatott csőfűtőtest-típust. A továbbiakban elsősorban az előbbiről, tehát a mikanitszigetelésű típusról lesz szó és így, a külön kiemelő típus-megjelölés nélkül előforduló „fűtőtest” kifejezés *mikanitszigetelésű fűtőtest*-ként értendő.

A fűtőtesteknél előfordult meghibásodások kivizsgálása kapcsán a VKI kutatási programot kezdett — a fűtőtesteket szállító Elekthermax V. felkérésére — vizsgálati, technológiai és szervezési síkon egyidejűleg. Jelen közleményünkben ennek az átfogó tevékenységnek a vizsgálati ágát ismertetjük.

1. A mikanitos fűtőtest-típus rövid ismertetése

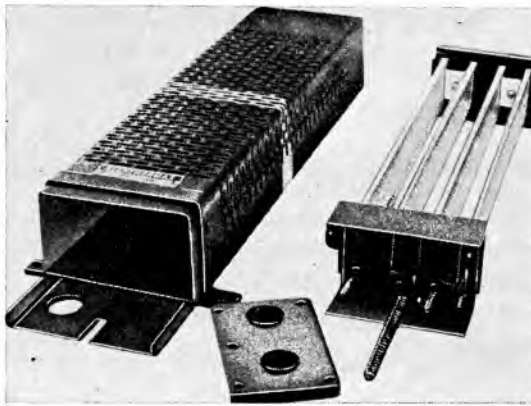
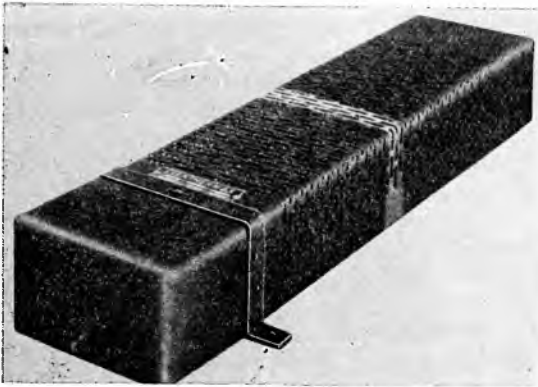
Amint a 3-1. ábrából látható, a fűtőtestek lapos, „kard” alakúak. Az ábrán egy ilyen fűtőtest szelvény metszete látható. A fűtőtestek készítésekor két egybevágóan egymásra helyezett, egyenként kb. 0,5 mm vastag és 25 mm széles mikanitsíkra csévélük fel a kívánt teljesítményt adó 0,15...0,20 mm átmérőjű ellenálláshuzalt. A fűtőszálal ily módon hordozó kettős mikanitsík hosszúsága a fűtőtest hosszúságával egyezik meg, amely viszont többféle lehet a különféle teljesítményt adó típusok szerint.



3-1. ábra. Mikanit szigetelésű kardfűtőtest szelvény metszete

Látható még a 3-1. ábrából, hogy a fűtőszállal megtekercselt mikanitsík a kellő szigetelési vastagság (kb. 1 mm) szerinti mikanitfedőlemezek között van elhelyezve, úgy, hogy elmozdulás ellen, valamint a fedőlemezek síkban tartására kb. 15 mm széles, két oldalán elhelyezett távköztartó mikanitsíkok közé kerül.

Ugyancsak látható az ábrából, hogy az előbbi módon összerakott, tekercselt és nem tekercselt mikanitrétegeket ráhajtott, illetve rápréselt vaslemez burkolat fogja körül rögzítés és védelem céljából. A tekercselt mikanitsíkon levő fűtőszál a mikanitsík két végén ütött lyukakba sajtolt csőszegecsek révén kapcsolódik az ábrán is látható kivezető pánthoz, amely kivezetés közelében a vaslemez burkolaton szögletes kivágás látható újabban alkalmazott fogásként, ez nyilván a „kúszóút” megnövekedését szolgálja.



3-2. ábra. „E” típusú MÁV-kályha különböző fokig szétszerelve

A 3-2. ábrán látható az a megoldás, amellyel ezek a kardfűtőtestek egymással sorbakapcsolva egy teljes egészet, egy ún. „MÁV-kályhát” alkotnak. Az említett meghibásodások, valamint a vizsgálati és kísérleti munkák során leggyakrabban az úgynevezett „E” típusú kályha szerepelt, amelyben négy db sorbakapcsolt kardfűtőtest 1500 V fűtőfeszültséggel 500 W teljesítményt képvisel.

2. A meghibásodásokkal kapcsolatos vizsgálatok

A fűtőtestek szigetelésére évtizedek óta sikerrel alkalmazták a fűtőmikanitot. Ez a szigetelőlemez természetes kémiai állapotú csillámlemezekből, kis mennyiségű ragasztóval — általában sellakkal — készült [1].

Régóta ismeretes volt, hogy a fűtőmikanit kötőanyag-tartalma csupán egyes technológiai fázisokban szükséges, megfelelően választott fűtőtestkonstrukció esetén a ragasztóanyagot még a teljes összeszerelés előtt hevítéssel el lehetett távolítani, vagy üzem közben eltávozott. Az így kötőanyag nélkül maradt csillámlemezek

szigetelési funkcióját a méretekből adódó átlapolás lehetősége, valamint a rögzítésüket biztosító fűtőtestkonstrukció garantálta.

Már itt megjegyzendő azonban, hogy — e helyen nem részletezhető okokból — a fűtőtestek fűtőfeszültségét idők folyamán egyre növelték, amely tényt a „jól bevált fűtőmikánit” méltatásánál sem szabad figyelmen kívül hagyni!

Az elmúlt évtizedben az ipar kénytelen volt a fűtőmikánit behozataláról lemondani és áttérni a mikape alkalmazására, amelynek eredeti technológiáját annak idején a VKI dolgozta ki és vezette be. Tudvalevő, hogy a mikape: sellakkal ragasztott csillámpapír, minősítése pedig kommutátormikánit.

Az ezután gyártott kályhák tömegesen hibásodtak meg, úgyhogy néhány év múltán vissza kellett térni az importált fűtőmikánit alkalmazására.

Mivel a meghibásodott kályhákban fűtőmikánitként alkalmazott mikape kötőanyag-(sellak-) tartalma (10% körüli) jóval és ingadozó mértékben meghaladta a fűtőmikánitokra szabványosan megengedett mértéket, kézenfekvő, bár nem bizonyított magyarázat volt ez hosszú ideig a kályhák meghibásodását illetően.

A meghibásodások értelmezése kezdetben több nézőpontból indult ki és — indokolatlanul — felmerült a csillámpapírból készült szigetelőlemez-típus hőtechnikai létjogosultságának kérdése is. Ezért e helyen ki kell térni röviden azokra a legfőbb jellemzőkre, amelyek alapján a csillámpapírnak hőtechnikai alkalmazhatósága helyesen ítélni lehet meg.

2.1 Csillámpapírból készült szigetelőlemez hőtechnikai lehetőségei

A termikusan feltárt csillám fizikai-kémiai tulajdonságai az alkalmazás szempontjából az alábbi felosztással jellemezhetők (szemben a természetes csillámmal):

- a) kedvezőbb hőállóság (csökkent hőbomlási készség);
- b) kedvezőtlenebb nedvességállóság (nagyobb vízfelvételi készség).

Lássuk ezeket részletesebben.

a) A termikus csillámfeltárási eljárások valamelyikére alapított csillámpapír — amint a későbbiekből kitéjük — elvileg kedvezőbb hőállóságot (hőbomlást) mutat, mint a kiindulási anyagul szolgáló természetes állapotú csillám. Különösen vonatkozik ez a muszkovit csillámra, ezenkívül manapság még ez a féleség fordul elő gyakrabban a fenti vonatkozásban. A muszkovit csillám hevítve ún. szerkezeti vizet veszít. Ez a vízvesztés már a vörösizzás hőmérsékletén is kis mértékben észlelhető, de zömmel 800 °C környezetében következik be, miért is a villamos hőkészülékekben már számolni kell e jelenséggel. Mivel a természetes állapotú csillám szerkezeti víztartalmának tekintélyes hányada már a termikus feltárás során eltávozik, elvileg nyilvánvaló tehát, hogy az így készült csillámpapír valamely üzemi hőigénybevétel esetén csökkent hőbomlási készséget, tehát jobb hőállóságot mutat.

b) A szerkezeti víznek a termikus feltárás során történő részleges eltávolítása azonban egy kedvezőtlen hatást is von maga után: a fokozott nedvszívó készséget. A szerkezeti víznek a technológiai hevítéssel történő részleges elűzésével az eredeti kristálystruktúra nem „omlik össze” és így számottevő kötőerő szabadul fel a szerkezeti víz kilépése után. Ennek a felszabadult kötőerőnek a felhasználása ugyan részben megtörténik éppen a csillámrészecskék papírszerű réteggé történő egyesítésekor, de számos mellékhatást is okoz, amelyet szintén e csillámrészecskék megnövelt felületi aktivitása magyaráz. Így pl. a papírgyártó szitára kerülő ún. csillámpépnek jelentős pufferkapacitása van (p_H -változást kiegyenlítő kapacitás). Ugyanígy érthető a csillámpapír bizonyos felületi nedvszívó képessége. Nyomós okok vannak

annak feltételezésére, hogy a csillámpapír víztartalma sem egységes a reáható kötőerők rendűségében és így az adszorpciós erőktől kezdve a kristályrácsban ható magasabb rendű erőkig többféle kötéstípus megtalálható a csillámpapír szerkezeti vizének vizsgálatakor [2].

Föltehető az is, hogy a viszonylag lazábban kötött víz nem kizárólag az eredeti szerkezeti víz „maradéka”, hanem a felszabadult kötőerők által megkötött légnedvesség stb.

Nyilvánvaló mindezek után, hogy a kellő technológia, valamint az alkalmazott kötőanyag fogja eldönteni, hogy a kötőanyaggal ellátott csillámpapír-fólia táblákba préselve hőállóság tekintetében ki tudja-e használni a fenti a) bontásban rögzített előnyöket és el tudja-e kerülni a felosztás b) pontjában felhozott hátrányt a nedvszívó képesség tekintetében.

Feltételezve a kellő technológiát a tekintetben, hogy a csillámpapír előbb kiemelt fokozott felületi aktivitásával a gyártás során számolva, esetleges szennyezők, valamint fölös adszorbtíván kötött víz nem rontják a csillámpapír tulajdonságait, az eddigiekig az ideális kötőanyag a viszonylag kis hőmérsékleten olvadó üvegek (általában ólomüvegek) körében volt keresendő. A megolvadt üveg tökéletesen összeragasztja a csillámrészecskéket, azonkívül kiváló hőálló és nedvességálló tulajdonságokkal rendelkezik. (Az üvegek jó villamos jellemzőiről itt nem is kell szólni.)

Sajnálatos azonban, hogy ez a kiváló összetételű szigetelőanyag nehezen formázható: 500...600 °C-on történő préseléssel lehet táblákká alakítani, utólagos megmunkálása is nehezebb a mikanitoknál szokásos (vágás, stancolás) módszereknél.

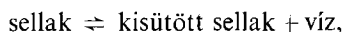
A mikanitok gyártásánál előnyös körülmény ugyanis az, hogy nagy táblákban állíthatók elő, amely táblákat a felhasználó vágja fel (vagy ki) a szükséges méretre és alakra. Mindez a Micalex és Micaver típusú anyagoknál jóval nehezebben oldható meg, miért is azok alkalmazása szerszámoszási gondokat okoz.

A manapság már klasszikusnak számító szigetelő-, ill. kötőanyagoknak, a sellaknak csillámpapírral történő kombinálásánál viszont más a helyzet. A sellakkal készült szigetelőanyagok vagy szigetelések technológiája azért is lehet oly változatos, illetve kevésbé kényes, mert

- a) a sellak bizonyos szigetelési jótulajdonságokkal rendelkezik;
- b) a sellak kiváló ragasztóanyag (pl. csillám ragasztására);
- c) az olvadt állapotban levő sellak megszilárdulása elérhető egyrészt további hőkezeléssel, másrészt az olvadási hőmérséklet alá történő hűtésével. (Ez lehetővé teszi pl. valamely sellakos préselvény préselésének megszakítását, a lehűtött szerszámból való kivétel után a technológia egyes fázisaiban történő felhasználását, majd egy utolsó hőkezeléssel — egy termoplasztikus fázison át — teljes kikeményítését; pl. nagy gépek tekercseinek elemiszál-merevítése.)

Ezek a tulajdonságok igen előnyösek voltak és még ma is azok a sellak szigetelés-technológiai felhasználása tekintetében, viszont a hőálló csillámpapír-alapú szigetelőlemez kötőanyagaként már számos olyan hátrányt mutat, amelyet bizonyos technológiai kezelhetősége sem ellensúlyoz. Így, mint szerves anyag, a sellak nagyobb hőmérsékleten elbomlik, elég és így a csillámpapír-alapú lemez — kötőanyag hiányában — szétesik.

Az elektrotechnikai irodalomból kevésbé ismert tény még az [6], hogy a sellak hőkezelése (kisütése) az alábbi, megfordítható folyamattal jellemezhető:



ahol is, a megfordítható folyamatok általános szabályszerűségeit követve, a víz (pl. nyomás alkalmazásával) „visszavihető” a sellakba. Ekkor a kisütött sellak újra meglágyul, majd újra kisüthető. A sellakot ez a tulajdonsága élesen elválasztja az ún. hőre keményedő gyantáktól.

A vasúti fűtőtestek mérsékelt hőigénybevételét tekintve ez azt jelenti, hogy az üzemi hőmérsékleten a teljes elbomlás igen lassan következik be és mindaddig egy hőkezelt sellak-kötőanyag van jelen, amely megfelelő körülmények összzejátszása esetén vízfelvétellel visszalágyulhat, majd újból hőkezelve vizet adhat le. Mindez a csillámpapír felületi aktivitásával és labilisán kötött víztartalmával olyan előnytelen kölcsönhatásokat teremt, amelyek eredője aztán a sellakkal ragasztott, csillámpapír-alapú szigetelőlemez nedvességérzékenysége.

Mindezeket a kedvezőtlen hatásokat általában a sellak-kötőanyag százalékos mennyiségének csökkentésével igyekeznek mérsékelni és ezért a különböző technológiai és szabványelőírások még megengedhető felső értékeket szabnak ki a kötőanyag (sellak) viszonylagos mennyiségére nézve.

Nyilvánvaló, hogy olyan kötőanyag esetén, *amelynek hőstabilitása és villamos tulajdonságai megfelelők, nincs értelme a kötőanyag mennyiségét eleve korlátozni.*

A sellaknak, mint kötőanyagnak hőtechnikai célokra is alkalmazott csillámpapír-alapú szigetelőlemezben (ilyen volt a mikape) várható szerepét nem azért szükséges itt körvonalazni, mintha a jövő ilyen lehetőségei között számításba jönne, hanem azért, mert a múltban a sellakos mikapelemezzel szigetelt vasúti fűtőtestek meghibásodásait nem lehetett elválasztani a sellak szerepétől mindaddig, amíg az ettől jórészt független fűtőszál-korrózió jelenségére fény nem derült.

2.2 Termikus vizsgálatok

Az Elekthermax V. felkérésére kapcsolódott be a VKI a vizsgálatokba, miután már mindezekről függetlenül jelentős előrehaladást ért el a mikape változatának: a csillámpapírból készült fűtőmikanitnak kidolgozása terén.

Az alkalmazott sellak kötőanyag, mennyiségének pontos meghatározására, illetőleg a már üzemben volt fűtőtestekből kiszertelt mikapelemek maradék sellaktartalmának lehető teljes megismerésére az Intézet derivatográfiai vizsgálatokat kezdeményezett. Ezek taglalásától e helyen el kell tekinteni, hivatkozva azonban az idevágó korábbi közleményre [2]. Ezeknek a vizsgálatoknak legfőbb tanulsága az volt, hogy felhívta a figyelmet a fűtőtestben uralkodó hőmérsékleti viszonyok tisztázatlan voltára, valamint a mikape gyártásakor, a hőkezelő-préselő műveletnél elkövethető hibáknak éppen a fűtőtestek esetében adódó jelentőségére.

2.3 A hőigénybevétel vizsgálata

A fűtőtestek hőmérsékleti viszonyainak lehetőleg pontos feltérképezésére a VKI az 1963. év folyamán mélységi és felületi hőmérsékletmérési munkálatokat végzett mikape-alapú, valamint NSZK eredetű mikanittal szigetelt fűtőtesteken, üzemszerű körülmények között.

Mértük így pl. a fűtőszál erősen görbült, a mikanitsík élein átbukó szakaszai közvetlen környezetében kialakuló helyi hőmérsékletet; mégpedig a fűtőtest hosszát tekintve középen és egyik vége közelében. A meghibásodások magyarázására vállalkozó korábbi elképzelések nagy része ugyanis abból a feltevésből indult ki, miszerint a fűtőtestekben a fűtőszál hőmérséklete 500...600 °C tartományba esik, vagyis, hogy az enyhe vörösszáz hőmérsékletét közelíti meg. Mint különösen nagy hő-

mérsékletű helyet emelték ki többen a fűtőszáلتartó mikapecsík éleit, amelyek valóban a legrosszabb hőelvezetési viszonyai vannak a fűtőtestben.

Ez a magyarázat azon a megfigyelésen alapult, hogy számos szétszedett, meghibásodott fűtőtest mikape fedőlemeze belső felületén, a fent említett élek mentén összefüggőnek látszó elszenedett csík volt tapasztalható, vagyis, hogy a legmelegebb pontok a fűtőszáلتartó élei mentén képzelt egyenesen fekszenek. Nem adott számot azonban ez elképzelés arról, hogy a legmelegebb helyek vajon üzem közben is, vagy esetleg csupán egy időben lejátszódó meghibásodási folyamat során állnak elő.

Mivel mindezek az elképzelések csupán valószínűsíthető fokon állottak, szükséges volt azok ellenőrzése mérések segítségével.

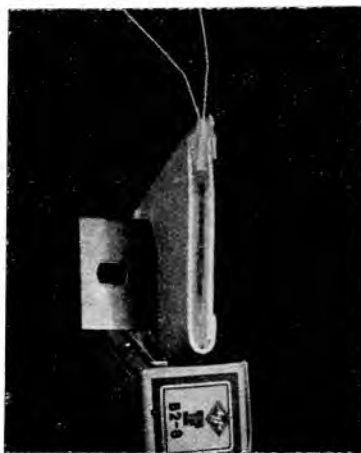
Az előbbieken körülírt helyeken történő hőmérsékletméréshez olyan módszert kellett kialakítani, amely a lehető legkevésbé változtatja meg a fűtőtest belsejében kialakuló hőmérsékleti viszonyokat. A fűtőtestek szétszedését tehát mindenképpen el kellett kerülni. A méréshez ezért vékony, 0,5 mm átmérőjű huzalokból készült vas—konstantán-termoelemek kerültek felhasználásra, az élén megfűrt fűtőtestben, egészen a fűtőszálig kiképzett csatornában elhelyezve.

A 3-3. ábra metszetben mutatja meg ezt az elhelyezést. Látható, hogy a középen elhelyezkedő fűtőszáلتartó mikapecsík két szélén sötét kis foltokként jelentkeznek azok a fűtőtest egész hosszában húzódó üregek metszetei, amelyek a hőátadást az éppen kimérni kívánt helyeken rontják. Látható még az, hogy a termoelem kivezető két szára kerámia csővel van elszigetelve a köpenytől. A termoelem két kivezető szára egymástól szilikonlakkal impregnált üvegszálburkolattal van elszigetelve. A termoelem fémesen érintkezik a fűtőszállal.

Amennyiben a termoóram feszültségét mérő műszert megfelelően elszigetelt alapra sikerül helyezni, ezzel az elrendezéssel a fűtőfeszültség alatt levő fűtőszál hőmérséklete (egy kardfűtőtesten a feszültségésés 375 V) kellő biztonsággal mérhető. A termoelem bevezetése után a fűtőszálig fűrt egész csatorna kvarcliszttel töltött szilikonlakkal került kiöntésre, amely megszilárdulása után biztosította a csatorna hőmérsékleti szempontból vett lezárását.

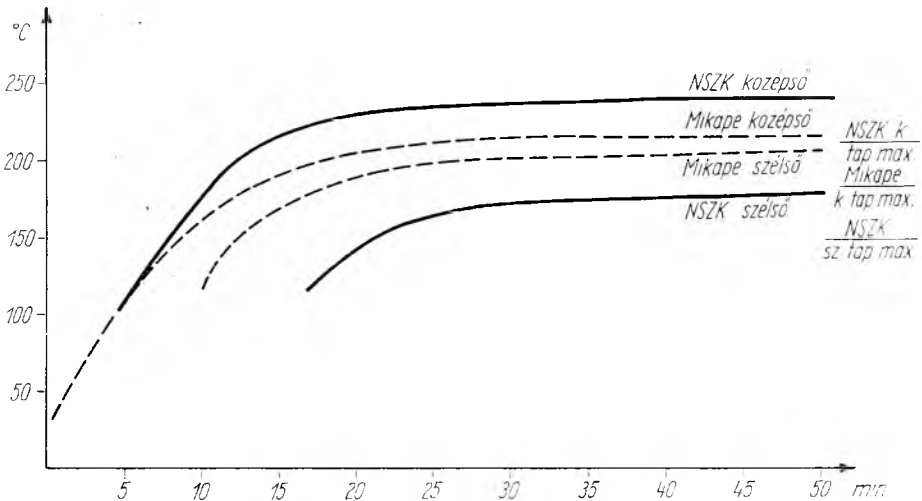
(A 3-3. ábrán látható metszet készítésekor a metszési sík létrejötte után, köszöreléssel egy ettől hegyesszögben eltérő második sík került kiképzésre, amely a kerámiaacsó hengeres felületével adott áthatása révén jobban láthatóvá tette a fentiekben körülírt beépítést.)

A mérési eredmények a 3-4. ábrán láthatók. Az ábrán az abszcisszán felmért idő függvényében az ordinátára felvitt hőmérséklet alakulásának képe figyelhető meg. Az ábrán látható hőmérsékleti görbéknek a vízszintesbe hajló ága érdekes, mivel ebből lehet következtetni az idővel megvalósuló stacionárius állapothoz tartozó hőmérsékleti értékre, amely egyben megadja a fűtőszál környezetének üzemi hőmérsékletét. A folytonos vonallal kihúzott görbék NSZK eredetű fűtőmikanittal szigetelt fűtőtestre vonatkoznak, a szaggatott vonallal kihúzott görbék mikapelemezsel szigetelt fűtőtest fűtőszál hőmérsékletének alakulását mutatják.



3-3. ábra. Kardfűtőtestbe szerelt hőcsem (a láthatóság érdekében metszetben)

A „középső” és „szélső” megjelölések a mérési helynek hossz szerinti elhelyezésére utalnak, mivel a feltevések szerint tetemes hőmérsékleti különbségek állnak fenn a kardfűtőtestek hossz szerint vett középső, ill. szélső részei között. Az ábrából ezek a hőmérsékleti különbségek plasztikusan kiadódnak.



3-4. ábra. Kardfűtőtestek hőmérsékleti viszonyai

Az ábra jobb szélén látható rövid görbeszakaszok az előbbiekhöz hasonló futású görbék vízszintes ágát jelképezik, csupán az ábra áttekinthetőségének megőrzése végett nem kerültek teljes megrajzolásra. Ezek a mérések a fűtőtestek felületén tapintó-hőelemekkel végzett hőmérsékletmérések eredményei. E tapintó-hőelemek a fentiekben leírt hőelemektől annyiban különböztek, hogy hegesztési pontjukon egyben egy 10 mm átmérőjű és 0,5 mm vastag bronzkorongra voltak felhegesztve. Az ábrán feltüntetett rövid görbeszakaszok tehát a felületi hőmérsékletek maximumait jelzik (az ábrán *max.*), feltüntetve a szigetelőlemez fajtáját (az ábrán *NSZK*, ill. *Mikape*), valamint jelezve még, hogy a mérés a fűtőtest hossz szerint vett középső (az ábrán *k*) vagy szélső (az ábrán *sz*) részén történt, tapintó- (az ábrán *tap.*) hőelem segítségével.

Rövidségért eltekintve e helyen az ábra hőmérsékleti görbéinek részletes elemzésétől (amely azonban lényeges lehet a fűtőtest konstrukciójának megítélésakor), a meghibásodások vizsgálata szempontjából, valamint a szigetelőlemez hőmérsékleti igénybevételének kellő megvilágítására, megállapítható, hogy a szigetelőlemez hőmérsékleti igénybevétele aránylag mérsékelt, összehasonlítva a fűtőmikánitok más villamos hőkészülékekben (háztartási vasaló, kenyérpírító) fennálló hőigénybevételével. A fent ismertetett méréseknél, még különböző szigetelőlemezek esetén sem sikerült 250 °C-nál nagyobb hőmérsékletet mérni, amely tény nyilvánvalóan más megvilágításba helyezi a meghibásodások kérdését, úgyszintén valamely MÁV-fűtőtest céljára szánt szigetelőlemezzel szemben támasztandó hőállósági követelményeket.

A 2-2-ben érintett termikus (derivatografiás) vizsgálatok kapcsán végzett ezen mélységi és felületi hőmérsékletmérések mutattak rá legelőször arra, hogy a fűtő-

testek meghibásodásának okát, vagy okait nem lehet oly egyértelműen a kötőanyag termikus viselkedésével, szenesedésével és ezen keresztül szabvány szerint meg nem engedett százalékos mennyiségével magyarázni, mint ahogy az, az addigiakig szokásban volt.

2.4 Korrózióvizsgálatok

A hőigénybevétel mértékének és jellegének megismerése után a figyelem automatikusan az Elekthermax V. által már korábban is nyomatékolt jelenség: a fűtőtestek belsejében, a fűtőszálak környezetében észlelhető ún. rozsdafoltok felé irányult.

A VKI-hez vizsgálat céljából beküldött, meghibásodott fűtőtestek vaslemez burkolata erősen korrodálódottnak mutatkozott, külső és belső felületén egyaránt.

A mikape alapanyagból készült lemezek közül a külsők, tehát a fűtőszállal közvetlenül nem érintkezők semmiféle különösebb elváltozást nem mutattak, ill. csupán a bádogburkolat belső, rozsdás felületéről származó szennyeződések. E szennyeződések azonban nem látszottak közvetlen kapcsolatban lenni a meghibásodás tényével, illetve helyével.

Elváltozások voltak azonban észlelhetők a fűtőtestek belsejében: a fűtőszál hordozó mikanitcsíkon és a fűtőszálal közvetlenül lefedő mikape lemezen (annak belső felületén), valamint magán a fűtőszálon. Ezek az elváltozások már a szemrevételezés alapján is korróziós elváltozásoknak voltak tekinthetők.

A fűtőtestek belsejében, a fűtőszál közvetlen környezetében található nagyszámú korróziós nyom („rozsdafolt”) a korrózió *termékének* volt tekinthető, amelyet a porózus állományú szigetelőlemez felszívott (mint tintát az itatóspapír). Ezt bizonyítja a foltok alakjának jól kivehető tükörképjellege két egymásnak fordított olyan mikapelemezen, amelyek fűtőszálal fognak közre. A rozsdafoltokat alkotó korróziós termék tehát a lemezek szemközti felületei között jött létre (vagyis a fűtőszálon), és a terméket így a két lemezfelület közel egyenlő mértékben és módon szívta fel, ily módon két tükörképfolt keletkezett.

A korróziós nyomok szemrevételezésének egyik legfigyelemreméltóbb megállapítása volt, miszerint az ún. rozsdafoltok a mikapelemezek melegebb részein, vagyis a fűtőszál üzemi hőmérsékletének közvetlenül kitett helyeken jelentkeztek, és egyetlenegy folt sem volt található a széleken. A foltok fent körülírt megjelenési tartományában a sellak-kötőanyag nagy része már hőbomlást szenvedett, és ennek folytán a lemez színe ott már ezüstös fényű volt.

A fűtőtestek belső felületein — fentiek szerint — a foltok a színerősség és alak figyelembevételével az esetek többségében egy foltcentrumot jelöltek ki minden egyes jól kifejtett folton. E centrum a fűtőszál egy jól definiálható pontjának közvetlen közelébe esett, vagyis ez a korrózió támadási pontja és a folt az e pontban képződött korróziós termék „képe”; a helyi diffúziós és kapilláris viszonyok megszabta színerősségekben és alakzatban. A foltcentrumhoz tartozó helyek a fűtőszálon már szabad szemmel is sokszor látható korróziós romlást mutattak.

Számos esetben volt észlelhető ilyen foltcentrumhoz tartozó pontokban fűtőszálszakadás, ami a meghibásodásnak kétségtelen közvetlen oka. (A 3-5. ábrán egy korróziós nyomokat mutató mikape fűtőszáltartó lát-



3-5. ábra. Fűtőszál-korrózió mikape lemezen



3-6. ábra. Korrodált fűtőszál nagyított képe (kb. 125×-os nagyítás)

került meghibásodott kályhák tömegéből a helyszínen kiválasztott nagyobb számú kályha felbontásából és szemrevételezéséből állt.

ható, rátekeresztelt fűtőszállal, fűtőtestből kiszerveve, hosszabb üzem után.)

Mindezek alapján, a meghibásodások számának és az egyes esetleg különféle hibatípusok gyakoriságának egybevetésére, számszerű összefüggés nyeresére a VKI javaslatára helyszíni vizsgálat folyt le az Elekthermax V.-nál, az érdekeltek, valamint az illetékesek jelenlétében. A vizsgálat a MÁV-tól vissza-

Az eredmények a következők voltak:

	<i>Megvizsgált kályhák %</i>
A meghibásodás egyedüli kísérő jelensége a korrózió	59
A meghibásodás egyedüli kísérő jelensége az ún. szenesedés	13,6
A meghibásodást nem kísérte észrevehető anyagi elváltozás, csupán szálszakadás	4,5
A meghibásodást együttesen kísérte korrózió és szenesedés	22,7

Tehát az összes korrózió 81,7% és az összes szenesedés 36,3% (a fenti 22,7%-os átfedéssel).

A korróziós centrumokban levő fűtőszálszakaszokról mikroszkópi vizsgálat is készült. A korrodált fűtőszál nagyított képe igen jellegzetes: a fűtőszálon kinövések formájában, sötétbarna, de átlátszó, üveges állományú anyag — a korrózió terméke — volt látható. Megfigyelhető volt a fűtőszál elvékonyodása, sőt teljes szálszakadás is. A mikroszkópi kép a korrózió kétségtelen jelenlétét igazolta (3-6. ábra).

A korrózió jelenlétének jobb értelmezése végett emissziós szinképfelvételek készültek a fűtőtest összes fémalkatrészeiből (bádogköpeny, csatlakozópánt és fűtőszál), valamint a szigetelőlemez rozsdafoltos és folt nélküli helyéről vett kaparékából. E szinképfelvételekben a jellemző és közös komponensek után kutatva megállapítható volt, hogy a rozsdafoltok helyén a fűtőszál egyes jellemző komponensei (a vasat tehát leszámítva) dúsultak fel, illetve jelentek meg. Feldúsult így a Mn, Cr, és Al; megjelent a Ni. Így pl. a Cr feldúsulása kizárja azt, hogy a korróziós folyamat során a vezető pánt, vagy a köpeny szerepet játszott volna, mivel ez az összetevő sem a pánt, sem a köpeny szinképében nem jelentkezett, csakis kizárólag a fűtőszál szinképében.

Ez a tény közvetlen bizonyítéka annak, hogy a rozsdafoltok anyagának egyik fő összetevője a fűtőszálból keletkezett korróziós termék. Tekintettel a fűtőszál Kanthal DSD minőségére, az is nyilvánvaló, hogy azt valamely agresszív anyag támadta meg, pusztán víz (nedvesség) jelenléte nem lett volna elégséges a jelenség előidézésére.

Mindezeknek a korróziós jelenséggel kapcsolatos vizsgálatoknak, valamint a belőlük levont következtetéseknek egybevetése és összefoglalásaként megállapítható, hogy a rendelkezésre álló nagy mennyiségű meghibásodott kályhában *a döntő hibatípus korróziós jelenséggel áll szoros összefüggésben*. Továbbá: *a korrózió a fűtőszál korróziója*, amikor is valamely agresszív anyag a fűtőszálat támadta meg, előidézve ezáltal a meghibásodások túlnyomó többségének közvetlen okát: a szálszakadást. A vizsgálatok alapján joggal következtethető, hogy az agresszív anyag a mikapelemezekben volt, illetve legalábbis azok közvetítésével került a fűtőszállal érintkezésbe. Nem lehet valószínű, hogy e korrózió a fűtőtestek összeszerelése után, kizárólag kívülről jövő behatás következménye lenne.

A mikape-gyártás, vagyis a természetes csillám termikus kémiai feltárásának ismeretében még továbbmenőleg feltehető, hogy szabad sav vagy savmaradék vagy a megfelelő alkálivegyületeknek — mint gyártáskor visszamaradt szennyezőknek — hatásával van összefüggésben a vizsgált korróziós jelenség. Hogy a korrózió létrejöttéért pontosan a savmaradékot (ill. szabad savat) vagy az alkáli iont lehet-e felelőssé tenni, annak exakt eldöntéséhez az eddigi vizsgálatok, illetve a korrózió laboratóriumi reprodukálására tett kísérletek még ez ideig nem voltak elégségesek. Megfelelő lehetőség esetén azonban a kísérletek továbbvitele, vagyis a korrózió okának teljes felderítése mindenképpen szükséges; nem utolsósorban a jövőben alkalmazandó csillámpapír gyártási technológia, illetve az erre alapított hőálló szigetelőlemez hőtechnikai létjogosultságának megalapozása végett.

*

Amint az előbbiekből is kitűnik, a villamosüzemű vasúti fűtőtestek meghibásodásának vizsgálata gyökeresen új szemléletet teremtett a kérdés megítélésében, beleértve a jövőbeni szigetelési megoldások prognózisát is. És bár a vizsgálatok nem hoztak még minden részletre kiterjedő exakt választ, mégis megalapozták azt a döntő megállapítást, miszerint nem a mikapelemezek villamos szigetelés-funkciójának elégtelen teljesítése, hanem egy — föltehetően technológiai lazaságból eredő — korróziós jelenség volt az ok.

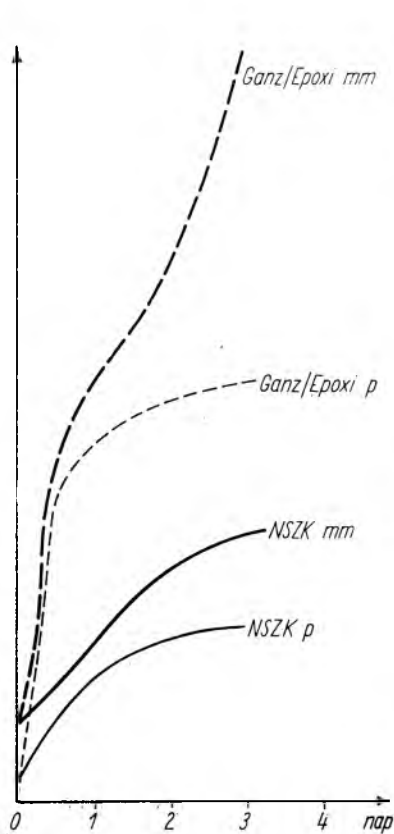
3. A fűtőtest konstrukciójának vizsgálata

A különféle szigetelőlemezek, valamint az ezekkel szerelt különféle kardfűtőtestek villamos vizsgálata azt mutatta, hogy a szigetelőlemezek egyes típusai között nincsen túlságosan nagy — és így jellemző — különbség az átütési feszültség fajlagos értéke tekintetében.

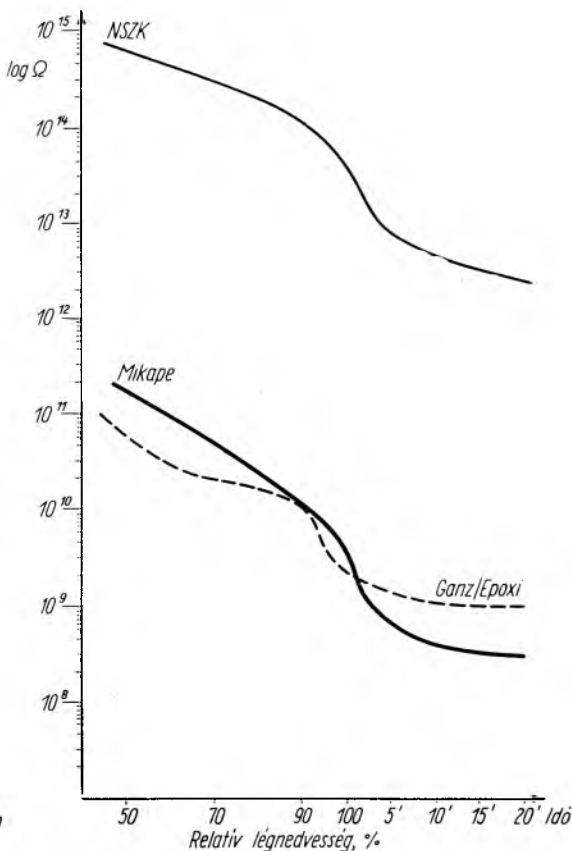
Ugyancsak erre mutatott a számos meghibásodott és égési nyomokat magánviselő fűtőtest vizsgálata; amikor is nemigen lehetett találni a lemezek síkjára merőleges átütési nyomokat, hanem annál inkább beégett csatornákat az egymásra borított szigetelőlemezek belső felületein, a fűtőszál és a bádogköpeny között. Ez kellő következtetési alap volt ahhoz, hogy az „átütést” valamely kardfűtőtestben határfelületi jelenségnek lehessen tekinteni.

A szóbanforgó fűtőtestek esetében ugyanis pl. a mérhető és jellemző szivárgási áram nem annyira a szigetelőlemezen keresztül, hanem inkább annak felületén alakul ki és a fűtőtest konstrukciója — vagyis beágyazás nélküli fűtőszál elhelyezése — folytán e felületi szivárgási áram akadálytalanul alakulhat ki a fűtőszál és a bádogköpeny között.

A DIN 53 482 előírás szerinti kúszóáram-szilárdsági vizsgálat viszont túlságosan drasztikusnak mutatkozott jelen kérdés tanulmányozásánál. Ennélfogva az egyes szigetelőlemez-típusok közötti finomabb különbségek nem voltak mérhetőek, illetve pl. a sellakos mikapelemezen a vizsgáló oldat okozta peptizálódás folytán a mérés eleve illuzórikussá vált. Jellemző, hogy a felületi áramvezetés, valamint az ezt jórészt szabályozó nedvességfelvételi készség tekintetében oly különböző importált mikanit és kísérleti epoxi-kötésű mikanit, ugyanazt a kúszóáram-szilárdságot mutatta: T5-ös fokozat, bemélyedés mindkettőnél kb. 0,1 mm.



3-7. ábra. Kétféle mikanit nedvességfelvétele és duzzadása (a próbatestek 95% relatív légnedvességű térben való tartása után mérve a súlynövekedést és a vastagságnövekedést)



3-8. ábra. Kétféle mikanit felületi ellenállásának változása a mérőhely relatív légnedvességének, illetve az idő függvényében

A két mikanit erősen eltérő nedvességérzékenységet a 3-7. ábra szemlélteti a felvett víz súlyának, valamint a vastagsági méret növekedésének ábrázolásával, a nedves kezelés időtartamának függvényében. Az eltérés igen jellemző és döntő, mégis — mint a fentiekben is említésre került — a kúszóáram-szilárdság mérésével semmi különbség nem adódott a kétféle mikanit között.

A különféle mikanitok felületi áramvezetési hajlamát — mint a jelenlegi MÁV-fűtőtest szigetelésének leggyöngébb pontját — jellemzően szemlélteti a 3-8. ábra, amely az NSZK és Ganz/epoximikanit, valamint a sellakos mikapelemez felületi ellenállás értékeit ábrázolja, a mérőhely %-os relatív légnedvességének, illetve 100% felett az idő függvényében.

A mérés a 3-9. ábrán látható NDK gyártmányú „Ricu” műszer felhasználásával 1000 V egyenfeszültséggel, a próbalemezre festett kolloid-ezüst elektródok útján történt, melyek egyenként 100 mm hosszú és 1 mm széles, egymástól 10 mm távolságban felfestett párhuzamos, egyenes csíkok voltak. A 3-8. ábrából világosan kitűnik, hogy a különböző szigetelőlemez-fajták között nagyságrendi különbségek adódnak, amely nagyságrendi felületi ellenállás eltérések közvetlen egyezésben vannak a szigetelőlemezekkel szerzett gyakorlati tapasztalatokkal. Ugyanakkor újból élesen kitűnik, hogy a kúszóáram-szilárdsági mérések nem voltak alkalmasak az egyes szigetelőlemez-fajták összehasonlítására, annak ellenére, hogy a meghibásodott fűtőtestek szigetelésén ún. „kúszónyomok” voltak észlelhetők.

Ezek alapján feltehető, hogy a MÁV-fűtőtesteken észlelt kúszónyomok már másodlagos jelenségek, amelyeket a helyi felületi ellenállás értékek üzem közben fellépő tetemes csökkenése előz meg [3, 4, 5].

Kitűnik tehát mindezekből, hogy a mikanitszigetelésű fűtőtestekben a szigetelőlemezek felületén lejátszódó jelenségek vezetnek be az „átütést”, amely szintén a felületen játszódik le, kúszónyomokat hozva létre. Bár az elmúlt idők meghibásodásait — mint az előzőkből látható volt — főként korrózió okozta, mégis a jelenlegi fűtőtest konstrukciója, vagyis a beágyazás nélküli, csupán fedőlemezekkel letakart fűtőszál-elhelyezés a szigetelőlemezek felületi villamos igénybevételét jelenti, amely az atmoszférikus stb. viszonyoktól függően a fűtőtestek szigetelésének méretezését megnehezíti.

4. Fejlesztési lehetőségek

Az üzembiztosság növelésének és a korszerűsítés érdekében ezért a következő lehetőségek jöhetnek számításba, mint a fejlesztés feladatai:

- a) A jelenlegi konstrukciós elv és anyagok megtartásával megnövelni a „kúszóutat” a fűtőtestek kisebbik lapméretének megnövelésével. (Ez tetemes anyag többlet beépítését tenné szükségessé.)
- b) Nedvességálló szigetelőlemez alkalmazása a jelenlegi konstrukció és méretek megtartásával.
- c) A beágyazott fűtőszál-elhelyezés kialakítása akár a mikanitlemezek között, akár azok elhagyásával. (Mindkét esetben az egész kályha konstrukciója



3-9. ábra. Ricu—Vakutronik elektronikus megohmmérő, amely a tetején elhelyezett mérő-platóval és a lezárható (az ábrán felnyitott) fedéllel kondicionált térben történő felületi ellenállás mérésekhez használható

változatlan maradna, csupán a fűtőtest szigetelési megoldása változna az összes méretek változatlanul hagyásával.)

- d) Csőfűtőtestek kidolgozása, követve a külföldi példákat (teljes konstrukciós elv és méretváltoztatás).

Tekintettel arra, hogy a VKI már évekkkel ezelőtt számottevő eredményt ért el hő- és nedvességálló szigetelőlemez kifejlesztése terén, az Intézetben folyó fejlesztési tevékenység a fenti b) pontban körülírt irányt követi, a c) és d) alatti lehetőségeknek — mint második lépcsőnek — figyelembevétele mellett. Ezekről a munkálatokról egy későbbi közlemény tájékoztat majd.

Irodalom

- [1] *MSZ 18418—56* Mikanit gyártmányok.
[2] *Liptay—Dávid—Erdey*: Elektrotechnika **57** (1964) 392—397. old.
[3] *Kopniczky Sz.*: Elektrotechnika **58** (1965) 414. old.
[4] *Kopniczky Sz.*: Elektrotechnika **58** (1965) 357. old.
[5] *Kopniczky Sz.*: Hidegen hálósított poliészter és epoxigyanták szabadtéri alkalmazása. VKI Zárójelentés, 1965.
[6] *Angelo Bros LTD*: Shellac. Calcutta, Angelo Bros. LTD 1956.

4.

A kúszóáram-vizsgálat elvi alapjai és a vizsgálóberendezés ismertetése

MISZLIVETZ JÓZSEF—OBER FERENC

ÖSSZEFOGLALÁS

Napjainkban a kúszóáram-szilárdság meghatározásának egyre döntőbb szerep jut. A cikk összefoglalja külföldi szerzők munkái alapján a kúszóáram kialakulásának feltételeit, a kúszóáram által az anyagban létrejövő elváltozásokat. Ismerteti a kúszóáram-szilárdság meghatározásával kapcsolatban az egyes nemzeti szabványok előírásait. Ezután részletesen tárgyalja — rajzok és fényképek alapján — a VKI-ben készült vizsgálóberendezés szerkezeti felépítését. A korszerű vizsgálóberendezés lehetővé teszi az eddigi 220 V, illetve 600 V-os vizsgálatokon kívül az 5 kV-ig történő vizsgálatokat is. Az automatikus cseppadagolás és a beépített számlálószervezet a méréseket a vizsgáló személytől függetleníti és így pontosabbá teszi.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ПРОЧНОСТИ ОТ ТОКУ УТЕЧКИ

Й. Мисливетц—Ф. Обер

Резюме

В наши дни определение прочности к току утечки приобретает все более решающее значение.

На основе трудов заграничных авторов в статье обобщаются условия образования тока утечки, превращения возникающие в материале посредством тока утечки. В связи с определением прочности по току утечки излагаются предписания отдельных международных стандартов. После этого на основе рисунков и фотоснимков подробно рассматривается, разработанная в Исследовательском институте электротехнической промышленности конструкция оборудования для испытания Современное оборудование для испытания помимо проводившихся до сих пор испытаний на 220 в и 600 в позволяет производить испытание до 5 кв. Автоматическое капледозирование и встроенный вычислительный механизм позволяют производить независимые от персонала и таким образом более точные измерения.

EINRICHTUNG ZUR PRÜFUNG DER KRIECHSTROMFESTIGKEIT

J. Miszlivetz—F. Ober

Zusammenfassung

Die Rolle der Bestimmung der Kriechstromfestigkeit gewinnt z. Zt. stets entschieden an Bedeutung.

In der Arbeit werden auf Grund der Publikationen ausländischer Autoren die Bedingungen des Entstehens von Kriechströmen und die im Material unter Einwirkung derselben vor sich gehenden Aenderungen zusammengefasst, sowie die in Zusammenhang mit der Bestimmung der Kriechstromfestigkeit in den verschiedenen Staatsnormen festgelegten Vorschriften mitgeteilt. Hiernach wird auf Grund von Zeichnungen und Lichtbildaufnahmen der konstruktive Aufbau der im Forschungsinstitut für Elektrotechnik hergestellten Prüfanlage ausführlich beschrieben. Die moderne

Prüfanlage ermöglicht ausser den bisher üblichen 220 bzw. 600 V Prüfungen auch solche bis zu 5 kV. Die automatische Tropfenzuführung (Zapfspeiser) und der eingebaute Zähler gewährleistet die Unabhängigkeit der Messungen von dem Prüfpersonal und ihre höhere Genauigkeit.

LEAKAGE CURRENT STRENGTH (TRACKING RESISTANCE) TESTING SET

J. Miszlivetz—F. Ober

Summary

In our days the determination of the leakage current strength plays a more and more important role.

The paper gives a summary of the conditions, necessary for development of leakage current and of the changes in materials in the consequence of the leakage current, on the basis of foreign authors' works. The requirements of some national standards on the determination of the leakage current strength are described. After this the construction of the testing set, made in the Research Institute of the Electric Industry is dealt with in detail. In addition to the tests on voltages 220 V and 600 V, tests to 5 kV can be performed by the aid of this up-to-date testing set. Automatic drop supply and built-in counting mechanism make the measurements independent of the operator and in consequence more accurate.

1. Általános tudnivalók

A kúszóáramút képződésére vonatkozó kutatások több helyütt régóta folynak külföldön. Az idevonatkozó munkát elsősorban a fenol-alapú műanyagok kedvezőtlen kúszóáram-szilárdsági viszonyai indították el. A villamos készülékekben alkalmazásra kerülő keramikus szigetelőanyagok és műgyanta-alapú szigetelőanyagok közötti harc még nem dőlt el. Erre vonatkozóan az egyik döntő tényező azoknak az okoknak a feltárása, amelyek a kúszóáram kialakulására, ill. megakadályozására gyakorolnak befolyást. Ez pedig elég sok kutatást igényel.

A VDE egyik munkabizottsága évekig foglalkozott a kúszóáram-probléma tisztázásával. E munka eredményeképpen dolgozták ki a DIN 53 480 sz., a „Kúszóáram-szilárdság meghatározása” című szabványt (azonos a VDE 0303, Teil 1/10.55 vizsgálati előírással). Kúszóáramnak olyan áramot tekintenek, amely a száraz és tiszta állapotban jól szigetelő anyagnak a felszínén, vagy a felső rétegében, különböző potenciálú részek között képződik idegen anyagok lerakódása, nedvesség stb. jelenlétében. Ez egyrészt a felületi vezetőképességet is növelheti, másrészt az áramátmenet hatására keletkező lerakódás a felületet tönkre is teheti.

A kúszónyom (angolul: tracking) a szigetelőanyag felszínének a kúszóáram hatására bekövetkező, szemmel is látható elroncsolódása. A kúszónyomnak két alapformájáról beszélhetünk. Az elsónél a roncsolódások a villamos erőter irányában haladnak, s ez a körülmény a kúszónyom nagyobb villamos vezetőképessége esetén a felület durvulásához és elszenesedéséhez vezethet. A másodiknál a szigetelőanyag az átugró szikrák következtében elgázosodik és ez a felületnek a villamos térre merőleges, rovátkaszerű kivajódását okozza. Ez utóbbi esetben a szigetelőanyag szigetelőképesége nem változik lényegesen, de a hosszabb ideig tartó igénybevétel végül is az első kúszónyom-alapformához vezethet.

Az áramsűrűség helyi megnövekedése össze nem függő kúszónyomokhoz vezet, amelyek előbb-utóbb összefüggő vonallá, ún. kúszóúttá egyesülnek. A kúszónyomok és kúszóutak képződése kizárólag felületi jelenség. A jelenség kialakulá-

sát befolyásolja maga a szigetelőanyag, a felszín alakja és minősége — pl. mechanikai megmunkálás — és más, ez utóbbiakra ható külső befolyások, mint a hőmérséklet okozta roncsolódások, szikra- és fényív, valamint különböző szennyeződések. A lerakódó szennyeződések egy része (a szénpor, grafitpor, szálasanyagok) nem okoz korróziót; más részük (hidroszkópos sók, víz és elektrolitek) jelentős korróziót is okozhatnak.

A kúszóáram-szilárdság, vagy kúszóút-szilárdság (angolul: tracking resistance) a villamos szigetelőanyag ellenállóképessége a kúszóút-képződéssel szemben. A kúszóút-biztonság bizonyos tekintetben a konstrukciós kiképzés következménye és az alkalmazott szigetelőanyag kúszóáram-szilárdságával együtt fejezi ki a berendezés, vagy készülék minősítési értékét.

A kúszóáram képződésének egyik fő oka a légnedvesség és a szigetelőanyag által adszorbeált vízfilmnek az elektrolittartalma. Hatásukra csak a felületi ellenállás, nem pedig a belső ellenállás változik. Ez is éppen egy bizonyíték arra vonatkozóan, hogy a kúszóáramok kialakulásának esetében felületi jelenségekről van szó. A kúszóáramút képződésére hajlamos szigetelőanyagok szerkezeti felépítése olyan, hogy a határfelületeken a lecsapódott anyagból származó ionok a feszültség hatására könnyen vándorolhatnak.

Érdekes megfigyelni a 90%-nál nagyobb légnedvesség hatására keletkező kúszóáramút kialakulását. A felszínen folyó áram hatására a folyadékréteg egy része elpárolog és ennek következtében az eleinte összefüggő réteg szétszakadozik. Kevésbé kúszóáramszilárd (kúszóárambiztos, kúszóáramálló) szigetelőanyagok esetében a szakítási ív az anyag felszínének egyes részeit elégeti. Az elégett részecskék vezetővé válnak, a folyadék további elpárolgásával egyre nőnek, míg végül is összenőve kúszóutat alkotnak az elektródok között. Ezzel ellentétben kúszóáramszilárd szigetelőanyagnál a megszakítási ív által felhevített felszíni részek vezetőképessége a még nedves környezet vezetőképességével szemben csökken, aminek következtében az ívmegszakadások mindig új helyen következnek be.

A szigetelőanyagban az egyenletesen elosztott és csekély mennyiségű nedvesség nagyfeszültség esetében gyakran csak szárító kisülést idéz elő. Ez egy, a felület mentén kiszélesedett, gyorsan mozgó parázfénykisülés, amelynek hőenergiája nagy területen oszlik el úgy, hogy a helyi felmelegedések elkerülhetők. Ezzel szemben a nem egyenletesen elosztott, vagy nagy mennyiségű nedvesség esetében álló, összefüggő kisülések keletkeznek. Ezeknek a kisüléseknek az ún. forró talppontja a villamos erőter hatására vándorol és a felszínbe vezető kúszóáramnyomot éget be. Ezt nevezük kúszóáram-kisülésnek.

A kúszóáram-hajlamra az égési maradékok vezetőképessége és a termikus roncsolódás folytán azoknak térfogatrésze által jellemzett gázlehasadás a mértékadó. Az égéstermékek — bár az alapanyag elszéneseése folytán jönnek létre — kémiailag mégis annyira megváltoztak, hogy, amint azt már Stäger is kimutatta, az alapanyag villamos vezetőképességére vonatkozóan semmiféle utalást nem adnak. Egy szigetelőanyag égéstermékeinek ellenállása a hőmérséklet fokozódásával annál erősebben csökken, minél nagyobb a kúszóáramút képzésére való hajlama, természetesen egy bizonyos minimális hamumennyiséget feltételezve. Ez azonban az elégségnél keletkező gáz alakú termékek hányadától függ. Ha a finom kristályos szerkezetű szén képződését tekintjük a kúszóáramút keletkezésének tulajdonképpen okaként, akkor érthető, hogy a melamingyanta jóval nagyobb kúszóáram-állóságú a fenolgyantával szemben. A fenolgyantában lényegesen nagyobb a széntartalom, mint általában a melamingyantában, de ezen túlmenően a melamingyanták nitrogén alkotója, ami a kúszóút képződésekor eltávozik, az összefüggő grafit szerkezet

kialakulását késlelteti. Hasonló a helyzet, de még további kutatásokat igényel az epoxigyanták esetében, ahol a széntartalom aránya, bár közelebb áll a fenolgyantákéhoz, az oxigéntartalom következtében a kisülésekkor keletkező szén egy része azonnal CO alakjában távozik. Mindez — hasonlóképpen az előzőkhöz — az összefüggő kúszóút kialakulásának késleltetésében nyilvánul meg.

A kevésbé kúszóáramszilárd anyagokból legelőször a hidrogén és ennek alacsony széntartalmú vegyületei hasadnak le úgy, hogy a szénmennyiség az égési maradékban nő. Ez a növekedés grafitcsírák képződéséhez vezet. Ezekből a csírákból később kristallitok keletkeznek és ezeknek 800 °C körüli hőmérsékletnél létrejövő összekapcsolódásából pedig véglegesen kialakulnak a grafitkristályok, amelyek összefüggő réteget alkotnak. Megállapították, hogy a kúszóáramút fajlagos ellenállása 0,04...1 Ω cm.

Különböző műgyanta-alapú présporok esetén a töltőanyag minősége és mennyisége is befolyásolja a kúszóáram-szilárdságot. A szigetelőanyag kúszóáram-szilárdsága az összetételen kívül értelemszerűen függ az előállítási technológiától is. A műanyag szigetelőanyagok esetében az előállítás során kialakuló térháló, vagy polimerizációs lánc méretei, a térfogategységre eső kémiai kötések száma stb. a kúszóáram-állóságra nagy befolyást gyakorol. A technológia hibájából tökéletlenül végbement kondenzáció, polimerizáció, a melléktermékek, zárványok (molekuláris méretben is) stb. az egyébként megfelelő kiindulási összetételű szigetelőanyag kúszóáram-szilárdságát súlyosan leronthatják. Megfelelő bevonó-lakk alkalmazása is javíthatja sok szigetelőanyag kúszóáram-szilárdságát, mivel a lakkréteg elroncsolódása a tulajdonképpeni szigetelőfelszín megtámadását késlelteti. Olaj alatt a kúszóáram-szilárdság a levegőn mért értéknek kb. négyszeresére nő.

A kúszóút képződése a szigetelőanyag igénybevételének módjától is függ. A legerősebb igénybevételek közé tartoznak a folyadékfilmeknél fellépő megszakítási kisülések, ha az igénybevételi tér kicsi. A feszültségen kívül az áram fajtája is befolyásolja a kúszóáramszilárdságot; az egyenáram, amennyiben teljesen hullámentes, kedvezőtlenebb hatású, mint a váltakozóáram*.

2. Vizsgálati eljárások

A különböző okok, amelyek kúszóút képződéséhez vezethetnek, alapvetőleg meghiúsítják egy egyszerű vizsgálati eljárás kialakítását. Jelenleg három főbb, általánosan alkalmazott vizsgálati eljárást különböztetünk meg. Ezek: a *Nekál-cseppentési eljárás*, a *Nekál-merítési eljárás* és a Micafil által kifejlesztett *gőzeljárás*.

A legerjedtebben alkalmazott vizsgálati módszer a Nekál-cseppentési eljárás, a későbbiekben ismertetett vizsgálóberendezés is erre alkalmas, és így a továbbiakban csak ennek az általános ismertetésére szorítkozunk.

A Nekál-eljárásnál a nedvesség előállítására 0,5%-os Nekál BX oldatot használnak desztillált vízben. A Nekál BX nedvesítőszer, magban alkilezett naftalin-szulfosav nátriumsója. Mint nedvesítőszer csökkenti a víz felületi feszültségét és ezzel a szigetelőanyag felszínének egyenletes megnedvesítését idézi elő, továbbá növeli a víz vezetőképességét. A vezetőképesség további növelése 0,5...1,5%-os konyhasóoldat hozzáadása révén lehetséges. A Nekál helyett más kémikáliák is alkalmazhatók, így pl. Svájcban 0,1%-os ammóniumklorid oldatot írnak elő. A Nekál alkalmazása megkönnyíti és meggyorsítja a vizsgálatot, az eredményeket

* Oburger és Stäger nyomán.

egyértelműbbé teszi és ezért mint vizsgálófolyadék jól bevált. Az ammóniumklorid alkalmazása az eredmények jobb reprodukálhatóságát segíti elő.

A Nekál-cseppentési eljárásnál meghatározott nagyságú cseppeket ejtünk a két, feszültség alatt álló elektród között elhelyezett próbatestre. A cseppek bizonyos száma kúszónom képződéséhez vezet és a rövidzárás bekövetkeztéig leejtett cseppek száma lesz a minősítési szám.

Amint az az elméleti ismertetésből kitűnik, a szigetelőanyagok kúszóáram-szilárdsága mind fontosabb helyet foglal el a régi, klasszikus villamos jellemzők — felületi ellenállás, átütési szilárdság stb. — mellett. Különösen fontos a kúszóáram-állóság meghatározása, ha a szigetelőanyag szabadtéri, vagy rossz belsőtéri klímakörülmények között kerül felhasználásra. A korszerű vizsgálati módszer, kialakítása, illetve továbbfejlesztése azonban a vizsgálóberendezés fejlesztését is igényli. Így pl. igen érdekes kutatási feladat a feszültség függvényében megállapítani a kúszóáram-szilárdságot, vagy korrelációt képezni a kúszóáram-szilárdság és egyéb villamos jellemzők között stb.

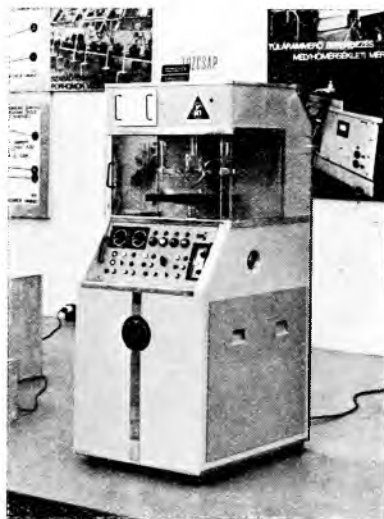
3. A vizsgálóberendezés

Ezeknek az irányelveknek a figyelembevételével terveztük, illetve készítettük el a VKI Szigeteléstechikai Laboratóriumában a korszerű kúszóáramszilárdság-vizsgáló berendezést (4-1. ábra). A berendezés 800×700 mm²-es alapterületű, 1600 mm magasságú; festett alumíniumlemez burkolattal. A berendezés elvi elrendezése szerint (4-2. ábra) az alábbiakban ismertetjük a főrészeket.

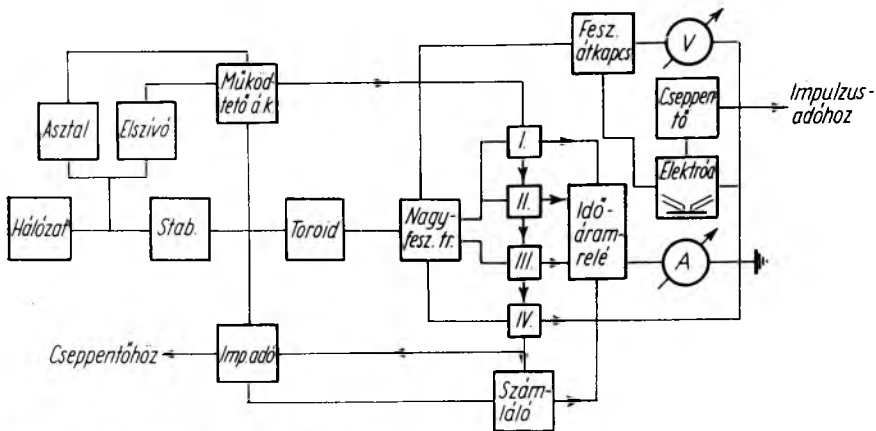
3.1 Vizsgálótér

Ebben a $400 \times 400 \times 600$ mm méretű, 3 oldalán szerves üveggel határolt zárható térben van a villamos motorról csigahajtással fel- és lemozgatható, keménygumiból készült vizsgálóasztal, melyre a vizsgálatra kerülő próbatest helyezhető. Az asztal kb. 100 mm mélységig süllyeszthető, és így megvalósítható a nagyobb méretű próbatesteken és alkatrészeken történő vizsgálat is. A próbatesten fekszenek fel a platinafejjel rendelkező, egymástól 4 mm távolságra levő elektródok. A csukló körül elmozgatható elektródok a szabványban előírt 100p-os nyomóerővel nehezednek a próbatest felületére. Az elektródok a vizsgálótér fedőlapjába beépített átvezető szigetelőkön keresztül kapják a megfelelő vizsgálati feszültséget.

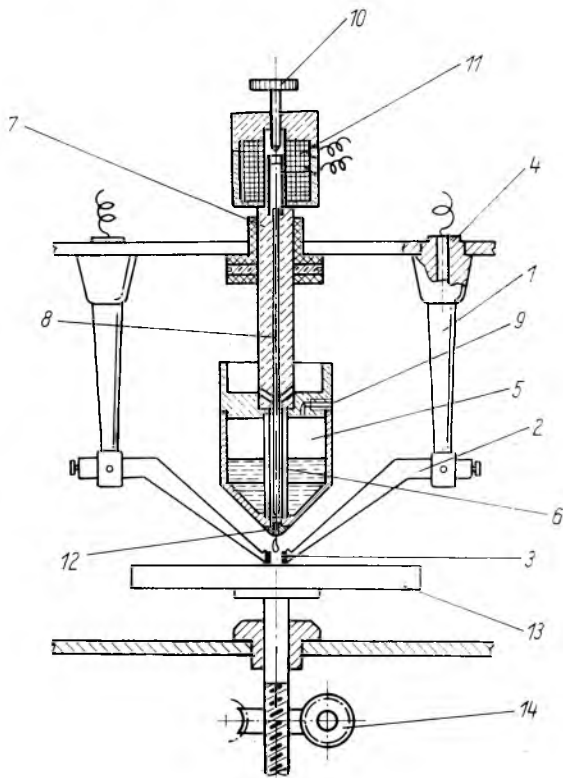
Ugyancsak a vizsgálótér fedőlapjába beépítve nyúlik ki az elektródok fölé és közé a cseppentő berendezés (4-3. ábra). Ez szerves üvegből készült folyadék tartó edényből és az edénybe nyúló tűszelepet vezérlő elektromágnesből áll. Az impulzusadón keresztül vezérelt elektromágnes úgy mozgatja a tűszelepet, hogy ennek nyitási ideje 3 másodperctől 120 másodpercig változtatható. Az edény oldalán levő furat-



4-1. ábra. A berendezés fényképe



4-2. ábra. A berendezés elvi elrendezése



4-3. ábra. Cseppentő berendezés

- 1 elektródtartó; 2 elektródkar; 3 platina elektródbetét;
 4 átvezető szigetelő; 5 folyadék tartó edény; 6 átvezető műanyag cső; 7 műanyag tartóoszlop; 8 műanyag szelepszár; 9 kúpos beállító csavar; 10 szelepszabályozó csavar; 11 mágnes tekercs; 12 teflon szelepülék; 13 vizsgálóasztal; 14 csigahajtás

ban helyezkedik el egy kúpos végződésű csavar. Ezzel érhető el a folyadékra ható atmoszferikus nyomás állandósága, amely a megfelelő cseppnagyság kialakítását biztosítja. A csepp nagysága a szabvány szerint 20_{-0}^{+5} mm³.

A vizsgálótér hátsó falában helyezkedik el az elszívó ventilátor. Ennek feladata az ivhő hatására keletkező égési termékek, gőzök és gázok eltávolítása. A vizsgálótér zárt kivitele egyrészt a munkavédelmi biztonságot oldja meg, másrészt bizonyos függetlenséget biztosít a környezeti behatásoktól. (Így pl. megfelelő kondicionált vizsgálótér alakítható ki.)

3.2 A berendezés villamos felépítése

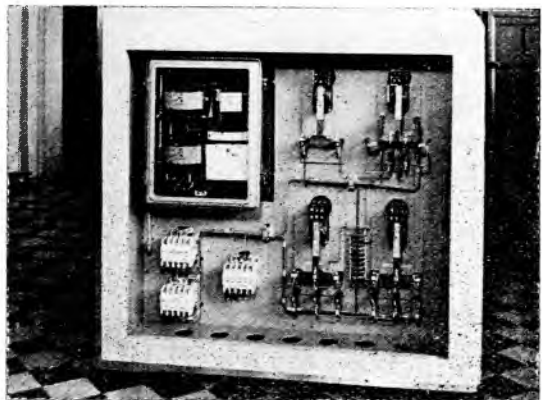
A berendezés erősáramú és gyengeáramú részekre tagolódik, melyeket a továbbiakban részletesen ismertetünk.

3.2.1 Erősáramú rész

Az erősáramú rész (4-4. ábra) a működtető és a vizsgáló áramkört tartalmazza.

A *működtető áramkör* mágneskapcsolókon keresztül egyrészt — megfelelő átkapcsolással — a vizsgáló áramkört, másrészt a kiszolgáló berendezéseket: a vizsgálóasztalt és az elszívóberendezést vezérli. Ugyancsak a működtető áramkör táplálja az impulzusadó hálózati részét, valamint a számlálószervezet és cseppentő berendezés vezérlését biztosító elektromágnezt.

A *vizsgáló áramkör* táplálása hálózati stabilizátoron keresztül történik. Ebből egy vezérlő szervén és a toroidtranszformátoron keresztül az egyfázisú nagyfeszültségű transzformátor primer részére jut a 0...220 V-ig szabályozható feszültség. A transzformátor szekunder oldala három megcsapolással: 500, 1000 és 5000 V értékkel készült. Ehhez a három feszültségértékhez négy vizsgálati állás tartozik, I...IV-ig jelzéssel. A vizsgálati állások kialakításánál az érvényben levő magyar és külföldi szabványok áramköri adatait, valamint a vizsgálati módszer fejlődésének irányát vettük figyelembe. A I és II vizsgálati állás tulajdonképpen az 500 V-os megcsapolás két leágazása.



4-4. ábra. A készülék erősáramú része

I vizsgálati állás (ez egyben a készülék tartalékállása is). A vizsgálati feszültség 500 V-ig folyamatosan változtatható. Az áramkörbe épített 126,6 Ω-os nem szabályozható ellenállással a még néhány esetben esetleg megkövetelt régi DIN szabvány szerinti vizsgálat valósítható meg (vizsgáló feszültség 380 V, köráram 3 A). A kioldási áram 2,5...5 A-ig, a kioldási idő 0,5...6 s-ig folyamatosan változtatható.

II vizsgálati állás. A vizsgálati feszültség 500 V-ig folyamatosan változtatható. Az áramkörbe épített 500 Ω-os csúszóellenállás a toroiddal kényszerkap-

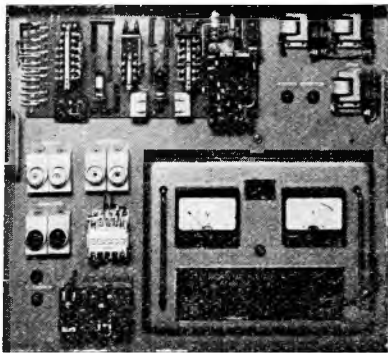
csolatban van úgy, hogy 100 V...500 V-ig a köráram $1 \pm 0,1$ A. Ebben a vizsgálati állásban a KGSZ 49.0402—65 és a DIN 53480 (500 V-ig), valamint a CEE szerint lehet a vizsgálatokat végezni. A kioldási áram 0,5...1 A-ig, a kioldási idő 0,5...6 s-ig folyamatosan változtatható.

III vizsgálati állás. A vizsgálati feszültség 1000 V-ig folyamatosan változtatható. (A gyakorlatban — a nagyfeszültségű transzformátor alacsony gerjesztése miatt — alsó határként kb. 400 V ajánlatos.) Ez a vizsgálati állás lehetővé teszi a DIN szerinti vizsgálatot 600 V-ig, illetve a DIN szerinti vizsgálati módszer további bővítését 1000 V-ig. Az áramkörbe épített 1000 Ω -os csúszóellenállás a toroiddal kényszerkapcsolatban van. 100...1000 V-ig a köráram $1 \pm 0,1$ A. A kioldási áram 0,5...1 A-ig, a kioldási idő 0,5...6 s-ig folyamatosan szabályozható.

IV vizsgálati állás. A vizsgálófeszültség 5000 V-ig folyamatosan változtatható. Az áramkörbe ellenállás nincs beépítve, a maximális köráram 300 mA. Ez a vizsgálati állás azért került beépítésre, mert a jövő fejlődési irányától várhatóan a szigetelőanyagok kúszóáram-szilárdságánál nagyfeszültségű vizsgálatokra is sor kerülhet.

3.2 Gyengeáramú rész

A gyengeáramú rész (4-5. ábra) az impulzusadót foglalja magában, amelynek feladata a szabványban előírt 30 s-os időközönként egy-egy négyszögimpulzus kibocsátása. Amint azt már a vizsgálótér leírásánál említettük, az impulzus-időtartomány a kutatás érdekében 3...120 s-ig változtatható.



4-5. ábra. A készülék gyengeáramú része

Az impulzusok előállítására az impulzustechnikában ismeretes, időben lineárisan változó jeleket adó Miller-integrátor elvét használtuk fel. A fűrészfog alakú impulzusjeleket egy PL 21-es gáztöltési trioda anódkörébe kapcsolt Integrálfogó alakítja át négyszög-impulzusokká.

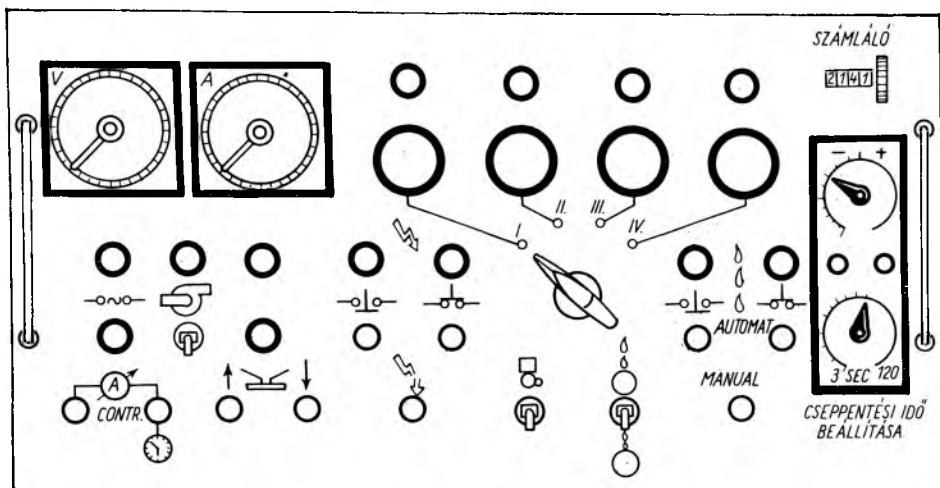
3.3 A műszerfal

Röviden külön ismertetjük a műszerfalat (4-6. ábra), amelyen a könnyebb érthetőség és a nyelvi nehézségek elkerülése végett az egyes alkatrészek és a fogalmak jelképi jelölését alkalmaztuk. A műszerfalról vezérelhetők a vizsgálótér, valamint az erős- és gyengeáramú részek egyes elemei.

A voltmérő mutatja a mindenkori vizsgálófeszültséget, az ampermérő pedig a vizsgálókör áramát. A voltmérő alatt elhelyezkedő két parázsfénylámpa jelzi a hálózati feszültség, ill. a stabilizált feszültség megjelenését. Alattuk kerültek beépítésre a köráramot, illetve a kioldási időt hitelesítő nyomógombok. Az ampermérő alatt helyezkedik el az elszívóberendezés kapcsológombja és jelzőlámpája, valamint a vizsgálóasztal mozgatását biztosító rövidrezárt villamos motor indítógombja, illetve jelzőlámpái.

Az erősáramú részben ismertetett vizsgálati állások (I...IV-ig) üzembehelyezése az alattuk középen elhelyezkedő átkapcsolóval történik. Az egyes vizsgálati állások bekapcsolását különböző színű jelzőlámpák mutatják.

A vizsgálatokat a „nyíl” jel alatt elhelyezkedő $\text{---}\frac{1}{\text{---}}$ jelű be-gombbal indítjuk el. A $\text{---}\frac{0}{\text{---}}$ jelű ki-gomb a toroid primer részében, míg a „tört nyíl” jel alatt levő gomb a nagyfeszültségű transzformátor szekunder részében szakítja meg az áramkört. A vizsgálati állás átkapcsolója alatt balra helyezkedik el a vizsgálat befejezését jelző csengő kapcsolója.



4-6. ábra. A műszerfal

A műszerfal jobb oldalán elhelyezkedő beskalázott potencióméterek segítségével állítható be a cseppentési idő (3...120 s-ig). A beállítás az alsó durva fokozatú és a vele sorbakötött felső finom fokozatú potencióméterrel történik. A potencióméterektől balra helyezkedik el az automatikus cseppentő adagoló be-, illetve ki-gombja. A $\text{---}\frac{1}{\text{---}}$ jelű be-gomb felett elhelyezkedő jelzőlámpa az automatika működésének visszajelzésére szolgál. A ki-gomb feletti jelzőlámpa párhuzamosan van kötve a számlálószerkezettel és a cseppadagoló berendezés elektromágnesével; ily módon a kimenő impulzusokat jelzi.

Ha a szabványokban általában előírt 50, illetve 100 határcseppes vizsgálatokat akarjuk elvégezni, akkor az automatika bekapcsolása előtt a csengő kapcsolója mellett elhelyezkedő határcsepp-kapcsolót 50 csepp esetén a felső, 100 csepp esetén az alsó állásba kapcsoljuk. Természetesen, ha a próbatesten a roncsolódást jelentő kúszóáramút a beállított határcseppszám előtt alakul ki, úgy a működtető áramkörbe beépített időáramrelé a feszültséget kikapcsolja, a cseppentő berendezés működését megszünteti, ugyanakkor a jelzőcsengő megszólal.

A „MANUAL” jelzésű nyomógommbal a cseppentés kézi adagolását biztosítjuk. Szerepére főként akkor kerül sor, ha az automatikus vezérlés meghibásodik. Mind az automatikus, mind pedig a kézi adagolás esetén a kimenő impulzusok számát mutatja a műszerfal jobb felső sarkába beépített nullázható számláló szerkezet.

4. Összefoglalás

Jelen cikk keretében ismertetni kívántuk azt a korszerű kúszóáramszilárdság-vizsgáló berendezést, amelyet a VKI Szigeteléstechnikai Laboratóriumában terveztek és készítettek el. Amint ez a készülék leírásából is látható, célunk az volt, hogy a különböző nemzeti szabványokban lefektetett előírások szerint tudjunk végezni vizsgálatokat, de ezen túlmenően a készülék alkalmas legyen arra is, hogy a vizsgálati módszer továbbfejlesztésével a korszerű szigetelőanyagkutatást elősegítsük.

5.

Melamin—formaldehid alapú sajtolóanyagok villamosipari célokra

KOPNICZKY SZANISZLÓ

ÖSSZEFOGLALÁS

A melamin—formaldehid-alapú sajtolóanyagok az erősáramú ipar értékes sajtolóanyagai, elsősorban kiváló ivállóságuk és kúszóáram-szilárdságuk révén. Az egyes típusok alkalmazási területét nagymértékben befolyásolja az alkalmazott töltőanyag fajtája és minősége. Kutatásaink során részletesen foglalkoztunk e sajtolóanyag-típus általános tulajdonságainak, továbbá nedvességállóságának vizsgálatával és a Műanyagipari Kutató Intézettel kifejlesztettünk egy fokozott nedvességállóságú típust. Foglalkoztunk továbbá e sajtolóanyag-típus feldolgozási technológiájával és alkalmazhatóságával.

ПРЕСС-МАТЕРИАЛЫ МЕЛАМИН-ФОРМАЛЬДЕГИДНОЙ ОСНОВЫ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

С. Копницки

Резюме

Пресс-материалы меламин-формальдегидной основы являются ценными пресс-материалами в области силовоточной промышленности и, в первую очередь, благодаря их отличной дугостойкости и прочности к току утечки. На область применения отдельных типов в значительной мере воздействует разновидность и качество применяемого наполнителя. В процессе экспериментов мы детально занимались испытанием общих свойств, а также влагостойкости данного типа пресс-материала и совместно с Исследовательским институтом промышленности пластмасс разработали новый тип с более повышенной влагостойкости. Кроме того, мы занимались технологией обработки и возможностью применения данного типа пресс-материала.

PRESSSTOFFE AUF MELAMIN—FORMALDEHYD-HARZBASIS FÜR DIE ELEKTROINDUSTRIE

Sz. Kopniczky

Zusammenfassung

Pressstoffe auf Melamin-Formaldehyd-Basis sind auf Grund ihrer vorzüglichen Lichtbogen- und Kriechstromfestigkeit besonders wertvolle Pressstoffe für die Starkstromtechnik. Das Anwendungsgebiet der einzelnen Typen wird weitgehend durch die Sorte und die Qualität des zur Anwendung gelangenden Füllstoffes beeinflusst. Im Laufe unserer Forschungen wurden die Untersuchungen der allgemeinen Eigenschaften, weiterhin der Feuchtebeständigkeit dieses Pressstoff-Typs besonders eingehend vorgenommen, und mit dem Forschungsinstitut für Kunststofftechnik gemeinsam ein Typ mit erhöhter Feuchtebeständigkeit entwickelt. Weiterhin wurde auch die Aufarbeitungstechnologie und die Verwendbarkeit dieses Pressmaterial-typs behandelt.

PRESSING MATERIALS ON BASIS OF MELAMINE-FORMALDEHYDE RESIN FOR THE ELECTRIC INDUSTRY

Sz. Kopniczky

Summary

The pressing materials on basis of melamine-formaldehyde resin are valuable pressing materials for the heavy current engineering, mainly because of their excellent arc-resistance and leaking voltage strength. The range of application of the individual types is influenced to a great extent by the sort and quality of the filling material. The general properties and the moisture resistance of this type of pressing material were studied in detail during our experiments and a high moisture resistant type was developed jointly with the Research Institute of Plastic Materials. Furthermore, it was dealt with the process technology and adaptability of this type pressing material.

1. Bevezetés

A villamosipari konstrukciók fejlődése sok esetben igényli olyan sajtolóanyagok alkalmazását, amelyek elsősorban kiváló kúszóáram-szilárdságukkal tűnnek ki. Ilyen követelményeknek a hagyományos fenolplaszt anyagok már nem felelnek meg, ezért ilyenkor elsősorban melamin—formaldehid-, karbamid—formaldehid-, epoxi- és poliészter-alapú sajtolóanyagok jönnek számításba. Ezek közül legelterjedtebbek az aminoplaszt-féleségek, tekintettel viszonylag egyszerű előállítási technológiájukra, és az epoxigyantás sajtolóanyagokhoz képest alacsony árakra. Az aminoplaszt-családon belül a két fő típus a karbamid—formaldehid- és melamin—formaldehid-alapú sajtolóanyag-féleségek, illetve ezek fenolos és anilines kombinációi. E két típus egyaránt igen elterjedt, azonban újabban szívesen alkalmazzák a melamin-gyantás sajtolóanyagokat, mert ezek viszonylag kevésbé hőérzékenyek, forma-, illetve utózsugorodásuk kisebb, nedvesség- és hőállóságuk, továbbá kúszóáram-szilárdságuk jobb, mint a karbamidos sajtolóanyagoké.

Intézetünk az elmúlt évek folyamán a MŰKI-vel együttműködve részletesen foglalkozott e sajtolóanyag-típus nedvességállóságának vizsgálatával, ezen belül egy nedvességálló típus kifejlesztésével, valamint feldolgozástechnológiai kérdésekkel. A továbbiakban ezeket a kérdéseket tárgyaljuk.

2. A sajtolóanyagok fontosabb tulajdonságai

2.1 Kúszóáram-szilárdság. Ívállóság

Kúszóáramnak azt az áramot tekintjük, amely egy száraz és tiszta állapotban jól szigetelő anyag különböző potenciálú helyei között jön létre az anyag felületén, vagy annak felületi rétegében abban az esetben, ha a szigetelőanyag felületére a villamos igénybevételén kívül külső tényezők hatnak [1, 3].

A kúszóáram-szilárdság elsősorban az anyag kémiai felépítésével van szoros összefüggésben, a vázanyag, töltőanyag, előállítási technológia hatása — bár nem lebecsülendő — másodlagos hatású. Az anyagok kúszóáram-szilárdság szerinti minősítését leggyakrabban az ún. cseppentéses Nekál-módszerrel bírálják el, amit az MSZ 451—52, VDE 0303 és a DIN 53480 számú szabványok részletesen leírnak. A vizsgálat lényegében a természetes igénybevétel mesterséges utánzása, s mint

ilyen, nem tekinthető jól definiálható anyagállandónak, csupán az egyes anyagok relatív összehasonlítására szolgál.

A melamin—formaldehid-alapú sajtolóanyagok közismerten a legjobb kúszóáram-szilárdságú anyagok közé tartoznak. Ennek oka leginkább abban kereshető, hogy a kúszóáram előidézte termikus igénybevételkor csak kis mennyiségű és viszonylag kis vezetőképességű szilárd bomlástermék keletkezik.

A jó minőségű melamingyantás sajtolóanyagok kúszóáram-szilárdságának vizsgálatakor állandó ív nem keletkezik, csupán az erőtér irányára merőleges, sávalakú bemélyedések észlelhetők.

A kúszóáram-szilárdsággal rokon tulajdonság az ívállóság. Az ív itt is a próbatest felületén fekvő két elektród között keletkezik, azonban mesterséges szennyeződést nem hoz létre. A vizsgálat végét jelentő zárlatkor a szigetelőanyag felületén vezető kúszónyom jön létre. Jó az ívállósága azoknak az anyagoknak, amelyek nagyfokú hőstabilitással rendelkeznek, vagy az ív hatására gázosodnak és a keletkezett termékeknek ívöltő hatásuk van, illetve az anyag felületén vezető kúszónyom nem alakul ki. A melamin—formaldehid-alapú termékek ívállósága általában igen jó, különösen a szervesetlen vázanyagú termékeké. Az ívállóság meghatározásának módszerét az ASTM D 495—58 T és DIN 53484 szabványok tartalmazzák [4].

2.2 Ízásállóság, izzócsapos próba

Izzásállóság a műanyagok szilárd izzó testekkel szembeni ellenállóképessége. Egyes szerzők szerint [1] az izzásállóság és a Martens fok között egyenes arányú összefüggés van. Az izzásállóság vizsgálatát az MSZ 1428—61 írja le [5].

Az izzócsapos próba az izzásállósághoz hasonló vizsgálat. Ebben az esetben a műanyag 300, ill. 500 °C-os hőmérséklettel szembeni ellenállóképességét mérik. Az izzócsapos próba elvégzése az MSZ 161 szerint történik.

A melamin—formaldehid-alapú sajtolóanyagok izzásállósága és izzócsapos próbája szervesetlen töltőanyag alkalmazása esetén kiváló.

2.3 Alaktartóság Martens szerint

A Martens szerinti alaktartóságot semmiképpen nem szabad hőállóságnak tekinteni, mivel az önmagában nem jellemző. E szempontból sokkal lényegesebb a mechanikai és villamos tulajdonságok hőhatásra bekövetkező változása, amelyet azonban minden esetben külön meg kell állapítani és egyben meghatározni azt az értékcsökkenést, amely adott esetben még elfogadhatónak tekinthető.

A melamin—formaldehid-alapú sajtolóanyagok Martens szerinti alaktartósága általában 100 és 180 °C között változik, a töltőanyag fajtájától és mennyiségétől függően. A szerves töltőanyagú (pl. cellulóz, faliszt) termékek hőállósága a legalacsonyabb, 100...130 °C. Az azbeszt vagy üvegszál töltésű sajtolóanyagok Martens-foka 130...170 °C, szemcsés ásványi töltőanyagú melamingyantás sajtolóanyagok Martens foka gyakran eléri a 180...190 °C-ot is.

5-1. táblázat

Kvarcliszt-töltőanyagú melamin—formaldehid-alapú sajtolóanyag alaktartóságának változása a töltőanyag-tartalom függvényében

Töltőanyagtartalom %	Alaktartóság Martens szerint °C
50	148
55	161
60	169
65	182

Az alaktartóság azonban — mint már az előbbieken is említettük — nemcsak a töltőanyag minőségétől, hanem mennyiségétől is függ. Például egy kvarcliszt töltőanyagú sajtolóanyag esetében kapott értékeket az 5-1. táblázat szemlélteti. A víz-, illetve a töltőanyag mennyiségének növelésével tehát az alaktartóság nagy mértékben fokozható.

2.4 Zsugorodás és utózsugorodás

Sajtolt tárgyak zsugorodásán a hideg sajtolószerszám és az elkészült sajtolt darab sajtolás után minimum 12, maximum 24 órával mért méretkülönbségét értjük.

Utózsugorodáson a sajtolt darab sajtolás után 12...24 órával mért és a szab-

5-2. táblázat

Különböző eredetű, azbeszt-töltőanyagot tartalmazó melamin—formaldehid-alapú sajtolóanyagok tulajdonságai

Tulajdonságok	Demilán 150	Demilán 156	Albamid 156	Ultrapas 156	Meladur 156	Olvadékfázi- sú előimp- regnálással előállított sajtolóanyag
Ütő-hajlítószilárdság, cm kp/cm ² ...	6,3	3,0	4,2	4,3	8,5	3,7
Hajlítószilárdság, kp/cm ²	898	564	721	—	900	562
Alaktartóság Martens szerint, °C ...	123	142	151	168	150	117/140*
Vízfelvétel 96 h, 20 °C víz, %	0,56	0,16	0,30	0,33	0,66	0,057
Belső ellenállás, kiindulási áll., Ω	1,9 · 10 ¹⁰	1,2 · 10 ¹¹	1,1 · 10 ⁹	3,6 · 10 ⁷	2,5 · 10 ⁷	5,0 · 10 ¹¹
Belső ellenállás, 56 nap nedves-meleg igénybev. után, Ω	4,5 · 10 ⁸	4,1 · 10 ⁹	3,5 · 10 ⁷	7,5 · 10 ⁹	> 10 ⁵	1,3 · 10 ¹¹
Fajlagos ellenállás, Ω	1,0 · 10 ¹²	8,0 · 10 ¹²	8,0 · 10 ¹⁰	1,7 · 10 ¹⁰	4,0 · 10 ¹⁰	4,1 · 10 ¹³
Fajlagos ellenállás, 56 nap nedves-meleg igénybev. után	3,0 · 10 ⁹	1,6 · 10 ¹¹	1,2 · 10 ⁹	5,5 · 10 ⁹	1,4 · 10 ⁸	1,0 · 10 ¹²
Felületi ellenállás, Ω	1,0 · 10 ¹³	1,7 · 10 ¹³	1,4 · 10 ¹¹	4,0 · 10 ¹⁰	5,0 · 10 ⁸	8,2 · 10 ¹³
Felületi ellenállás, 56 nap nedves-meleg igénybev. után, Ω	3,0 · 10 ¹⁰	2,0 · 10 ¹²	5,0 · 10 ⁹	4,1 · 10 ⁸	2,5 · 10 ⁷	4,2 · 10 ¹²
Villamos szilárdság, kV/mm	11,4	13,8	7,2	3,8	5,5	11,4
Villamos szilárdság, 56 nap nedves-meleg igénybev. után, kV/mm	6,8	11,4	5,8	1,3	1,3	11,2
Kúszóáram-szilárdság	T 5	T 5	T 5	T 5	T 5	T 5

* Megjegyzés: 110 °C, 24 órás utókezelés után.

vány által megadott hőmérsékleten való 200 órás utóhőkezelés után szobahőmérsékletre lehűlt állapotban mért méretváltozását értjük.

Az utóhőkezelés hőmérsékletére vonatkozóan az MSZ 7253—59 melamin-gyanta-alapú sajtolóanyagokra 130 °C-ot ad meg. Véleményünk és tapasztalatunk szerint az idézett szabványban megadott hőmérsékleti értékek túlzottak (főleg az ásványi töltőanyagú fenoplasztoknál megadott 200 °C). Ezt alátámasztja az újabb DIN 53464 szabvány is, amely a melamin—formaldehid-alapú sajtolóanyagokra 168 h 110 °C-os utóhőkezelést ír elő. Ennél a sajtolóanyag-típusnál sajnos jóval nagyobb zsugorodási, de főleg utózsugorodási értékekkel kell számolni, mint a fenoplasztoknál. A nagymértékű — gyakran anizotróp — utózsugorodás technikai szempontból mindenképpen hátrányos, mert nemcsak a sajtolt tárgy méretstabilitását veszélyezteti, hanem annak belsejében feszüléseket idéz elő. Ezek azután mikrorepedések keletkezéséhez, illetve a mechanikai tulajdonságok csökkenéséhez vezetnek, főleg, ha az alkatrészt az üzemelés során hőhatás is éri, ami villamosipari alkalmazás esetében igen gyakori.

A zsugorodást és utózsugorodást adott gyantatípuson belül nagy mértékben befolyásolja az alkalmazott töltőanyag minősége és mennyisége is. A szervesetlen vázanyagok általában csökkentik a zsugorodást (főleg az üvegszál és az azbeszt).

2.5 Mechanikai tulajdonságok

A melamin—formaldehid-alapú sajtolóanyagok mechanikai tulajdonságai általában megegyeznek a hasonló fenoplaszt-típusok tulajdonságaival. A legkritikusabb az ütőhajlítószilárdság, ami szálás, rostos töltőanyagok bevitelével bizonyos mértékben javítható (5-2. táblázat).

A vizsgálati eredményeket ennél az anyagscsoportnál — de ezen belül is elsősorban a szemcsés ásványi töltőanyagokat tartalmazó, viszonylag ridegebb anyagoknál — igen nagy mértékben befolyásolja a próbatest elkészítésének módja is. Figyelemre méltó ebben a vonatkozásban az a különbség, amit a két- és a hatrészes próbatestsajtoló szerszámban készített próbatestek ütőhajlítószilárdságára vonatkozóan tapasztaltunk a Melopas AR és a fentebb már említett kvarc-liszt-tartalmú anyagnál. A kétrészes szerszámban készült próbatesteken mért ütőhajlítószilárdság csaknem kétszer akkora volt, mint a hatrészes szerszámban előállított próbatesteknél (5-3. táblázat.) Ez utóbbi esetben ugyanis a próbatestek lesorjázása jóval nagyobb megmunkált felületet eredményez. Ez egyben azt is jelenti, hogy nagyobb a lehetőség mechanikai sérülések keletkezésére, amelyek azután az ütőigénybevételnél horonyhatáshoz vezetnek. Ez egyben arra is figyelmeztet, hogy mivel a melamingyanták ridegebbek a fenol—formaldehid-alapú gyantáknál, ezért a horonyhatást itt még óvatosabban el kell kerülnünk az alkatrészek készítésekor.

5-3. táblázat

Szemcsés ásványi töltőanyagot tartalmazó melamin-
gyantás sajtolóanyag ütő-hajlítószilárdsága két- és hat-
részes szerszámban sajtolva

Anyag megnevezése	Ütő-hajlítószilárdság, cm kp/cm ²	
	kétrészes szerszámban készítve	hatrészes szerszámban készítve
Melopas AR	2,51	1,60
Saját kísérleti gyártmány	4,15	2,50

2.6 Villamos tulajdonságok szállítási állapotban és nedves igénybevétel után

A villamosiparban szigetelőanyagként alkalmazott melamingyantás sajtolóanyagoktól ma már megköveteljük, hogy jó villamos tulajdonságokkal rendelkezzenek, és ezeket hosszantartó környezeti igénybevétel esetén is megtartsák. A környezeti igénybevételek közül az egyik leggyakoribb a nedves igénybevétel, amely jelenthet vízzel való közvetlen érintkezést (pl. vegyi üzemekben, hajókon vagy bányákban üzemelő gépek, berendezések esetén), vagy a levegő nedvességtartalmának hatását (pl. nedves-trópusi környezetben). Vizsgálataink során arra törekedtünk, hogy a nedves igénybevétel mindkét fajtájának hatását vizsgáljuk, ezért a különböző sajtolóanyagokból készített próbatestek egy részét gyorsított nedves-meleg igénybevételnek vetettük alá (40 °C, 95...100% relatív légnedvesség), másik részüket 20 °C hőmérsékletű vízben tároltuk, és mértük a legfontosabb villamos jellemzők változását az igénybevételi idő függvényében. Természetesen helyszűke miatt itt nem közöljük valamennyi vizsgálat eredményét, csupán néhány jellemző példát igyekszünk kiragadni.

Ezeket a vizsgálatokat azért végeztük el, mert bár a melamingyanta-alapú sajtolóanyagok kiváló kúszóáram-szilárdsággal rendelkeznek, véleményünk szerint helytelen lenne figyelmünket kizárólag erre az egy tulajdonságra korlátozni, ugyanis a jó szigetelőanyag kritériuma ebben az esetben sem csupán egy kiragadott tulajdonság kiváló volta, hanem az, hogy egyidejűleg lehetőleg minél több villamos jellemző jó legyen és stabilitását környezeti hatások között is (pl. nedves környezetben) megőrizze. Ellenkező esetben a szigetelőanyag felhasználhatósága eleve erősen korlátozott.

Vizsgálataink során számos külföldi eredetű melamin—formaldehid-alapú sajtolóanyag vizsgálatát végeztük el. A vizsgált anyagok specifikációját az 5-4. táblázat tartalmazza.

5-4. táblázat

A vizsgált anyagok megnevezése és eredete

Név	Töltőanyag	Eredet
Melopas AR Demilan 150	szemcsés ásványi faliszt	CIBA A. G., Basel Vereinigte Chemische Fabriken, Wien
Demilan 156	azbeszt	Vereinigte Chemische Fabriken, Wien
Albamid 156	azbeszt	Chemische Werke Albert, Wiesbaden
Ultrapas 156 Meladur 156	azbeszt azbeszt	Dinamit A. G., Troisdorf NDK, Piesteritz
E 156	azbeszt	Saját kísérleti termék

E sajtolóanyagok — mint ez ismeretes — különböző töltőanyagokat tartalmaznak, melyek közül a leggyakoribbak a cellulóz, faliszt, azbeszt, üvegszál, szintetikus szál, textilvagdalk és különböző ásványi töltőanyagok.

Mindezek közt a legelterjedtebb a cellulóz, azonban ennél a típusnál kell számolnunk a legnagyobb utózsugorodással, azonkívül — ami főleg az erősáramú

iparban való alkalmazás szempontjából lényeges — viszonylag alacsonyabb hőállóságával.

A különböző szeretlen töltőanyagokat tartalmazó kombinációk e szempontból kedvezőbbek, ezeknél viszont számolni kell a fokozottabb ridegséggel.

Egyike a legcélszerűbb töltőanyagoknak az azbesztrrost vagy azbesztphehely, mivel az ezzel készült melamingyantás sajtolóanyagok jó hőállósággal, ivállósággal és kúszóáram-szilárdsággal rendelkeznek és utózsugorodásuk lényegesen kisebb, mint a cellulóz-töltőanyagú kombinációknak, továbbá az azbeszt rostos szerkezeténél fogva az egyéb, ásványi eredetű töltőanyagoknál jobb mechanikai szilárdságot képes biztosítani.

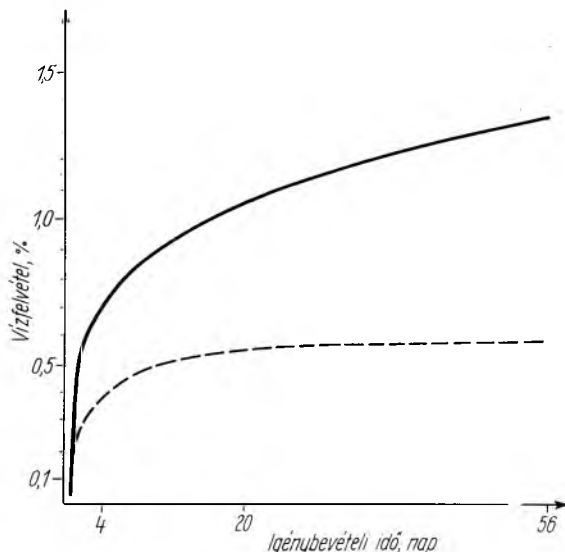
A Melopas AR kiindulási (szállítási) állapotban a típuskövetelményeket elégti (DIN Typ. 155.), nedves igénybevétel esetén azonban a villamos ellenállás már 96 óra alatt 3...4 nagyságrendet csökken és abszolút értékét tekintve is igen alacsony. A csökkenés mértéke különösen a 20 °C-ú vízben tárolt próbatesteknél jelentékeny. Ennek legvalószínűbb okát már a sajtolt darab külalakjának szemrevételezésével is megállapíthatjuk. A durvaszemcséjű ásványi töltőanyagot tartalmazó sajtolóporból készült tárgyak szerkezete porózus, a külső felület érdes. A lyukacsos-porózus anyagon keresztül a víz „pillanatszerűen” képes áthatolni, és így abban viszonylag igen rövid idő alatt vezető hidak alakulhatnak ki. Egészen más a folyamat lefutása nedves térben, ugyanis itt a vízgőz a külső és belső felületeken adszorbeálódik, majd a belső üregekben kapillár-kondenzáció következik be. Ez azonban nem pillanatszerűen végbemenő folyamat, hanem — mivel az anyag általában különböző méretű hézagokat tartalmaz, továbbá a hézagok alakja sem szabályos — a kondenzálódott vízzel való feltöltődés fokozatos, és ha a sugár mérete meghaladja a Thompson által megadott képletből levezethető r értéket, úgy a kapillár-kondenzáció megszűnik, mivel ekkor egyensúlyi állapot jön létre.

$$r = \frac{2Mg}{RT \ln p},$$

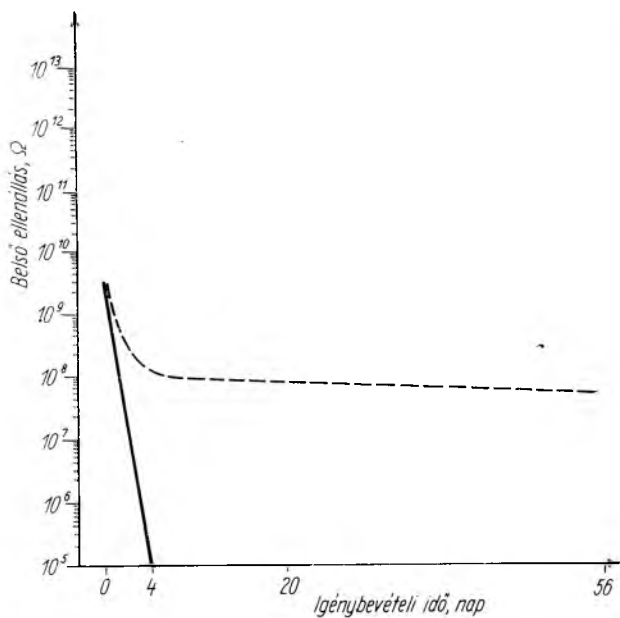
ahol r a kapillaris sugara, M a folyadék mólsúlya, R a gázál-landó, T az abszolút hőmérséklet, p a folyadék gőzének tenziója.

Ez a villamos értékek alakulásában azt eredményezi, hogy a közvetlen vezetőhidak kialakulása nem pillanatszerű, számuk kisebb és ezért a szigetelési ellenállás csökkenése sem olyan rohamos, mint vízzel való közvetlen érintkezéskor és általában az egyensúlyi állapothoz tartozó értékek is jobbák (5-1. és 5-2. ábrák).

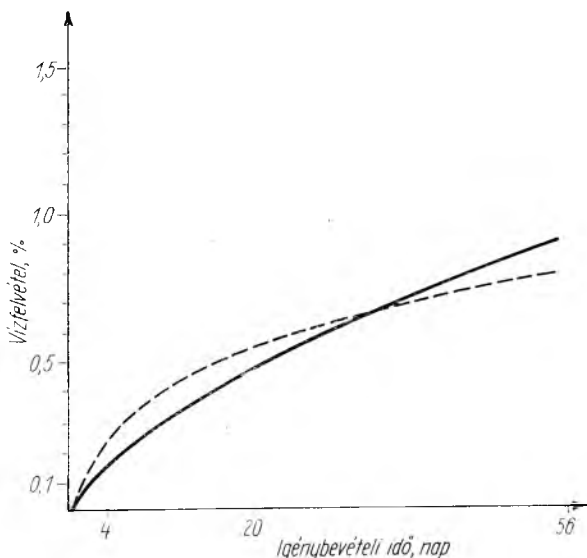
Másként alakul a kétfajta igénybevétel által előidézett tulajdonságváltozás egymáshoz való viszonya abban az esetben, ha a sajtolóanyag szerkezete homo-



5-1. ábra. Melopas AR jelű sajtolóanyag nedvességfelvétele 20 °C-ú vízben (folytonos vonal), illetve 100% rel. légnedvességű térben, 40 °C-on tárolva (szaggatott vonal)



5-2. ábra. Melopas AR jelű sajtolóanyag belső ellenállásának változása 20 °C-ú vízben (folytonos vonal), illetve 100% rel. légnedvességű térben, 40 °C-on tárolva (szaggatott vonal)



5-3. ábra. Demilan 156 jelű sajtolóanyag nedvességfelvétele 20 °C-ú vízben (folytonos vonal), illetve 100% rel. légnedvességű térben, 40 °C-on tárolva (szaggatott vonal)

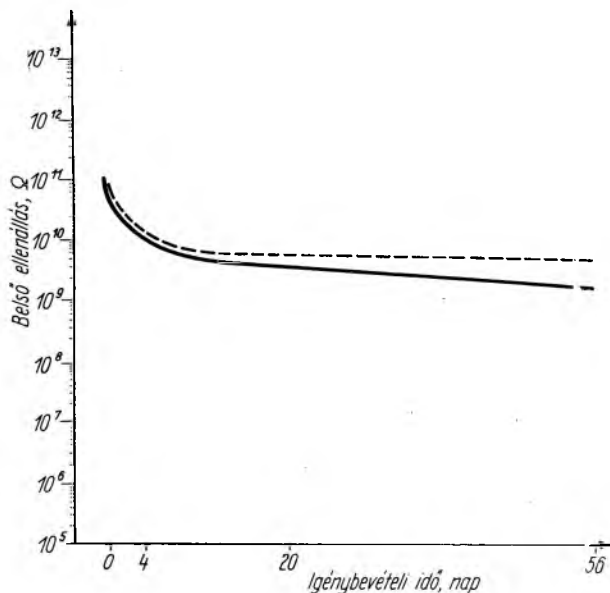
génebb és kompaktabb. Így pl. a Demilan 156 jelű sajtolóanyagnál — amely a fenti követelményeket viszonylag jól kielégíti — nem tapasztaltunk olyan lényeges és egyértelmű különbségeket a víz és a nedves tér által előidézett hatásokban, mint a Melopas AR-nél (5-3. és 5-4. ábra). A vázanyag és a gyanta szorosabb összeépülése bizonyos mértékben visszaszorítja a kapilláris vízbehatolást és egyre inkább előtérbe kerül a diffúziós vízvándorlás.

A rostos-szálás töltőanyagot tartalmazó sajtolóanyagok legtöbbször már szállítási állapotban sincsenek kedvező villamos tulajdonságai, de még a jó kezdeti értékekkel rendelkező anyagok nagy része is csakhamar elveszíti jó tulajdonságait nedvesség hatására.

A töltőanyagként cellulózt, illetve falisztet tartalmazó sajtolóanyagokon belül is megtalálható mindkét típus. A nedvesség hatására bekövetkező nagymértékű értékcsökkenés okát főleg a szerves töltőanyag erős nedvsvívásában kell keresnünk. Az általános tapasztalat is azt bizonyítja, hogy az ilyen típusú sajtolóanyag alkalmazhatósága erősen korlátozott és olyan helyeken való felhasználása, ahol fokozott nedves-igénybevétel, vagy termikus hatással kell számolnunk, nem ajánlatos.

Az üvegszálás sajtolóanyagok alkalmazása újabban egyre inkább tért hódít [4]. A sajtolóanyag-típus kétségtelen előnye a nagyobb mechanikai szilárdság. A magasabb ár és nehezebb feldolgozhatóság mellett azonban egyik leg-

kényesebb probléma éppen a nedvességállóság. A probléma hasonló az üvegvázás rétegelt termékeknél ma már klasszikussá vált problémához. Az üvegszálnak a gyantával való rossz nedvesíthetősége melamingyantánál még inkább fennáll, mint a poliészter- vagy az epoxigyantánál. A rossz nedvesíthetőség következtében a gyanta az üvegszálat nem képes egyenletesen bevonni, a határfelületek mentén nagyszámú hézag, kapilláris járat keletkezik, ami a nedvességállóságot igen kedvezőtlenül befolyásolja.



5-4. ábra. Demilan 156 jelű sajtolóanyag belső ellenállásának változása 20 °C-ú vízben (folytonos vonal), illetve 100% rel. légnedvességű térben, 40 °C-on tárolva (szaggatott vonal)

Ezt alátámasztja a Polomel S jelű üvegszál töltőanyagú melamingyanta sajtolóanyagban mért belső ellenállás értékek nedvesség hatására bekövetkező gyors változása is. A kezdetben igen jó ellenállásértékkel rendelkező anyag (10¹² Ω) belső ellenállása 96 órai vízbentárolás után már 10⁸ Ω-ra esett. A probléma főleg hosszú üvegszálat tartalmazó sajtolóanyagoknál jelentős. Ha az üvegszál hosszát csökkentjük, a nedvességállóság javul, ekkor azonban nem nyerünk sokat mechanikai szilárdságban [16]. Ez természetesen nem zárja ki a sajtolóanyag típus alkalmazhatóságát, csupán korlátozza azt. Várható azonban, hogyha az üvegszál és a melamingyanta közötti tapadást javítani lehet, úgy ez a típus is előnyösebben alkalmazható lesz nedves környezetben is.

A villamosipari célokra felhasznált melamingyanta-alapú sajtolóanyagok jórésze töltőanyagként azbesztet tartalmaz. A típuson belüli gyártmányok igen különböző minőségűek, elsősorban villamos jellemzőiket tekintve. A vizsgált sajtolóanyagok közül a Demilan 156 jelű bizonyult a legjobbnak, mind villamos jellemzőit, mind nedvességállóságát tekintve. Az Albamid 156-os anyagról ugyanezt nem lehet elmondani. Villamos értékei mind kiindulási állapotban, mind nedves igénybevétel után meglehetősen alacsonyak. Az Ultrapas 156 és Meladur 156 jelzésű sajtoló-

anyagok villamos tulajdonságai valamennyi azbesztes sajtolóanyag közül a leggyengébbek.

Az azbeszt-töltőanyagú sajtolóanyagok villamos tulajdonságai és nedvességállósága tehát igen különböző, ami véleményünk szerint az azbeszt változó minőségére, vízben oldható szennyezőanyag és nedvességtartalmára vezethető vissza, a nedves igénybevétel által előidézett értékcsökkenés pedig a melamingyantával való átitatás mértékétől függ. A tökéletlen átitatás — mint erre már az előzőekben is utaltunk — mindig a kapilláris vízáthatolás növekedését vonja maga után.

3. Az azbeszt-vázanyagú sajtolóanyagok nedvességállóságának javítására irányuló kísérletek

Intézetünk a Műanyagipari Kutató Intézettel együttműködve behatóan foglalkozott az azbeszt-vázanyagú melamingyantás sajtolóanyagoknál tapasztalható rossz nedvességállóság kérdésével és ennek kiküszöbölésére kidolgozott egy olyan olvadékfázisú előítatási módszert, amelynek segítségével a sajtolóanyag nedvességállósága jelentékeny mértékben fokozható anélkül, hogy ez a mechanikai tulajdonságok rovására menne. A feladat megoldása szempontjából igen lényeges volt első lépésben az azbeszt nedvességtartalmának kellő mértékű csökkentése, ugyanis egyes azbeszt-töltőanyagú sajtolóanyagok kiindulási állapotban tapasztalt igen alacsony villamos értékei minden valószínűség szerint az azbeszt nagy nedvességtartalmára és vízoldható szennyezőanyagok jelenlétére utal. A víz sem a sajtolóanyag-készítéskor, sem a sajtoláskor nem képes már teljesen eltávozni, sőt feltehetőleg az átitatást is gátolja.

Kísérleteink során ezért az azbesztet a gyantával való bedolgozás előtt kiszárítottuk, miáltal már elérhető volt bizonyos fokú minőségjavulás. Ennek mértéke azonban még nem volt kielégítő, mert a nedvesség hatására bekövetkező értékcsökkenés még mindig igen számottevő volt. A tapasztalatok arra engedtek következtetni, hogy az azbeszt gyantával való átitatása az előszáritás ellenére sem volt tökéletes. A gyanta és a töltőanyag hengerszákon való összedolgozásakor a két komponens egyszerű összehengerlése ez esetben nem képes biztosítani a tökéletes összeépülést.

Számos kísérlet elvégzése után (pl. vizes melamin—formaldehid-gyanta oldattal való előítatás) a kérdést végül oldószer nélküli epoxigyantával olvadékfázisban történő előítatással sikerült előbbre vinni.

Az ily módon történő előimpregnálás előnye a szokványos oldószeres módszerekhez képest:

a) Az előítatás a sajtolóanyag-gyártással azonos technológiai művelettel történik, míg az oldószeres eljárásnál ez feltétlenül több — egymástól jellegében is eltérő — műveletet feltételez. (A műgyantakomponens feloldása, a műgyantával való elkeverése, az előimpregnált anyag szárítása, az oldószer eltávolítása stb.)

b) Az olvadékfázisban történő előítatás oldószer- és időmegtakarítással jár, tehát gazdaságosabb is.

Az alkalmazott eljárás tehát a hagyományos előítatási módszerekhez képest azoknál technológiailag jóval egyszerűbb és gazdaságosabb. Az ily módon előállított sajtolóanyag tulajdonságait, összehasonlítva néhány import anyaggal az 5-2. táblázat tartalmazza.

A vizsgálati eredmények egyértelműen azt bizonyítják, hogy az azbeszt előszáritásával és előimpregnálásával a nedvességállóság igen jelentékeny mértékben fokozható, anélkül, hogy ez a mechanikai tulajdonságok rovására menne.

4. A melamin—formaldehid-alapú sajtolóanyagok előállításakor és feldolgozásakor előforduló főbb problémák

4.1 Az előállítás körülményei

A sajtolóanyagok két főbb előállítási módja ma is az ún. nedves és az ún. száraz eljárás.

A nedves eljárás alkalmazása esetén a töltő-, illetve vázanyagot a kötőanyagként szolgáló gyanta vizes, vagy szerves oldószeres oldatával összekeverik, majd az így nyert masszát megszárazítják, illetve előkondenzálják. Hőhatásra ugyanis az oldószer egyidejű eltávolítása mellett a műgyanta komponens képező óriásmolekula is tovább nő és részben térhálós szerkezet (ún. B-állapot) alakul ki. Az előkondenzált anyagot ezután porrá őrlik és ezt dolgozzák fel mint sajtolóanyagot. A műgyanta komponens csak a sajtoláskor alkalmazott hő és nyomás együttes hatására éri el a teljes térhálós szerkezetet (ún. C-állapot).

A száraz eljárás során a komponenseket meleg hengerszéken dolgozzák össze. Ezen a hőfokon (100...130 °C) a szobahőmérsékleten szilárd műgyanta komponens megolvad és a váz-, illetve töltőanyaggal jól elegyíthető. Ezzel egyidejűleg következik be a gyantakomponens előkondenzációja is. Az optimális kondenzációfokot a gyártás folyamán folyóképesség-méréssel ellenőrzik. Ennek elérése után az anyagot a hengerekről vékony lepel formájában leválasztják, majd szobahőmérsékletre való lehűtés után porítják és így kerül feldolgozásra.

Az előállítás során nagy gondot kell fordítani az optimális kondenzációfok biztosítására. Az alulkondenzált anyagot nehéz tökéletesen térhálósítani, a sajtoláskor a tárgy gyakran „nyers” marad, kivételkor erősen deformálódik, tulajdonságai nem kielégítőek. A túlkondenzált anyag viszont sajtoláskor nem folyik eléggé, a szerszámokat nem képes egyenletesen kitölteni, a sajtolt tárgy anyaghiányos, porózus szerkezetű lesz.

A kondenzációfok ellenőrzése általában folyóképesség-vizsgálattal történik, azonban az irodalomban ismeretesek más, egzaktabb ellenőrzési módszerek is. Így pl. Ulbricht és Thater [12] a kondenzációfokot a 150 °C hőmérsékleten folyamatosan mért súlycsökkenéssel jellemzi, s következtetéseit a súlyváltozás—idő-görbék jellegéből vonja le. A módszer véleménye szerint jellemzőbben utal a kondenzációfokra, mint a folyóképesség, mivel azt egyéb tényezők is befolyásolják, így pl. az őrlési fok és az ezzel összefüggő fajtérfogat.

Az őrlési fok tapasztalataink szerint a sajtolóanyag feldolgozhatóságát erősen befolyásolja. A durvára őrlött anyagból készült préselvény felülete gyakran márványos, a túlságosan finomra őrlött anyag viszont sajtoláskor rosszul folyik, szerkezete laza, a töltőtérfogat igen nagy, a sajtolószerszám hőmérsékletét nehezebben veszi át, aminek következtében könnyen lép fel helyi túlmelegedés. Különösen szálas, rostos töltőanyagú sajtolóanyagok esetében gyakori ez a jelenség. Ennél a sajtolóanyagtípusnál a túl finomra őrlés az anyag „felbolyhosodását” eredményezi, ami az egyenletes folyást módfelett megnehezíti. Ajánlatos tehát általában közepes, de inkább durva őrlést alkalmazni.

4.2 A feldolgozás körülményei

4.2.1 Sajtolásra való előkészítés

A melamin—formaldehid-alapú sajtolóanyagok sajtolásra való előkészítése — mint erre az irodalomban számos utalást találunk — igen fontos; nagyobb jelentőségű, mint a fenoplaszt-típusú sajtolóanyagoknál.

a) *Tablettázás.* Főleg a laza, nagy töltőtér fogatú sajtolóanyagoknál igen előnyös. A tablettázás lehetővé teszi a szerszámok töltőterének csökkentését, egyszerűsíti az adagolást, megkönnyíti az előmelegítést, a sajtolószerszám töltési és zárási idejét lerövidíti. Tablettázott anyag alkalmazása esetén kisebb az anyagvesztés és pontosabb adagolás lehetséges. Ha lehet, a tabletták méretét úgy kell megválasztani, hogy a sajtolt darab egyetlen tablettából készüljön [9].

b) *Előmelegítés.* A sajtolt darab előállításának sebességét többek között meg szabja az az idő, amely alatt a sajtolóanyag felveszi a szerszám hőmérsékletét. Mivel a legtöbb sajtolóanyag rossz hővezető, a szerszámban való felmelegedés egyrészt lassú, másrészt soha nem egyenletes; a szerszám falánál elhelyezkedő rétegek hőmérséklete nagyobb, mint a belsőké. Ez a sajtolóanyag egészének egyenetlen folyásához vezet, ami a kisajtolt darab tulajdonságait károsan befolyásolja.

Mindezek a hátrányok a sajtolóanyag megfelelő előmelegítésével elkerülhetők. Az előmelegítés során a sajtolóanyag egyenletesen melegszik át, s így a forma kitöltése és a kikeményedés még komplikált idom esetében is egyenletesebben történik és a sajtolt darab tulajdonságai jobbak lesznek.

A jobb folyás lehetővé teszi kisebb sajtolási nyomás alkalmazását, miáltal mind a gépet, mind a szerszámot kíméljük.

Az előmelegítés ezenkívül — főleg vastagabb falú idomok sajtolása esetében — jelentős időmegtakarítást eredményez. Melamin—formaldehid-alapú sajtolóanyagoknál az előmelegítésnek azért van különösen nagy jelentősége, mert ez egyike a legjobb módszereknek az ennél a gyantatípusnál igen jelentékeny zsugorodás csökkentésére [17].

Az előmelegítési műveletet végrehajthatjuk nagyfrekvenciás térben, vagy szárítószekrényben, esetleg infralámpák segítségével. Általában kisebb darabokhoz nagyfrekvenciás térben, nagyobbakhoz szárítószekrényben érdemes előmelegíteni a sajtolóanyagot [17].

A nagyfrekvenciás előmelegítéssel igen rövid idő alatt (10..60 s) lehet igen egyenletes átmelegítést elérni, ez azonban azzal a következménnyel jár, hogy a viszonylag rövid előmelegítési idő nem elég ahhoz, hogy a nedvesség jórésze a sajtolóanyagból eltávozzon. Ezért a villamos tulajdonságok — amelyeket a jelenlévő nedvesség nagymértékben befolyásol — nagyfrekvenciás előmelegítéssel lényegesen nem javulnak.

Egészen más a helyzet a szárítószekrényben történő előmelegítésnél, ahol a művelet jóval hosszabb ideig tart és ezalatt a nedvesség nagy része is eltávozik. Arra azonban gondosan kell ügyelni, hogy a sajtolóanyag az előmelegítéssel és előkondenzálással ne száradjon ki túlságosan, mert ekkor folyóképessége oly mértékben csökkenhet, hogy ez a feldolgozást akadályozza. Ezt a körülményt saját

kísérleteink is megerősítették, mivel azt találtuk, hogy a túlságosan kiszáritott sajtolóanyagból készült próbatestek anyaghiányosak voltak, felületük porózus volt.

A kályhában való előmelegítést főleg alulkondenzált sajtolóanyagoknál ajánlatos alkalmazni. Ezáltal — a különben szinte feldolgozhatatlan — sajtolóanyagot minden nehézség nél-

5-5. táblázat

Erősen alulkondenzált azbesztes-melamingyantás sajtolóanyag tulajdonságainak javulása szárítószekrényben történő előmelegítéssel

Tulajdonság	Alulkondenzált sajtolóanyag	
	előmelegítés nélkül	előmelegítéssel
Vízfelvétel, %	0,24	0,095
Belső ellenállás, Ω	$4,2 \cdot 10^9$	$1,7 \cdot 10^{11}$

kül lehetett sajtolni és a villamos tulajdonságok is jelentékeny mértékben javultak. Erre vonatkozólag kísérleteket is végeztünk általunk készített, erősen alulkondenzált azbeszt-vázanyagú sajtolóanyaggal, melyek eredményeit az 5-5. táblázatban közöljük.

Az optimális kondenzációfokú, valamint a túlkondenzált sajtolóanyagot véleményünk szerint nem ajánlatos szárítószekrényben előmelegíteni, mert ebben az esetben fokozott mértékben fennáll a kiszáradás és az ebből adódó rossz folyóképesség veszélye. A nagyfrekvenciás előmelegítéshez a sajtolóanyagot mindig tablettázni kell, szárítószekrényben lehet por alakban is előmelegíteni. A művelet során azonban minden esetben óvatosan kell eljárni, mert ha az anyagot túl sokáig előmelegítjük, az éppúgy hátránnyal járhat.

4.22 Sajtolás

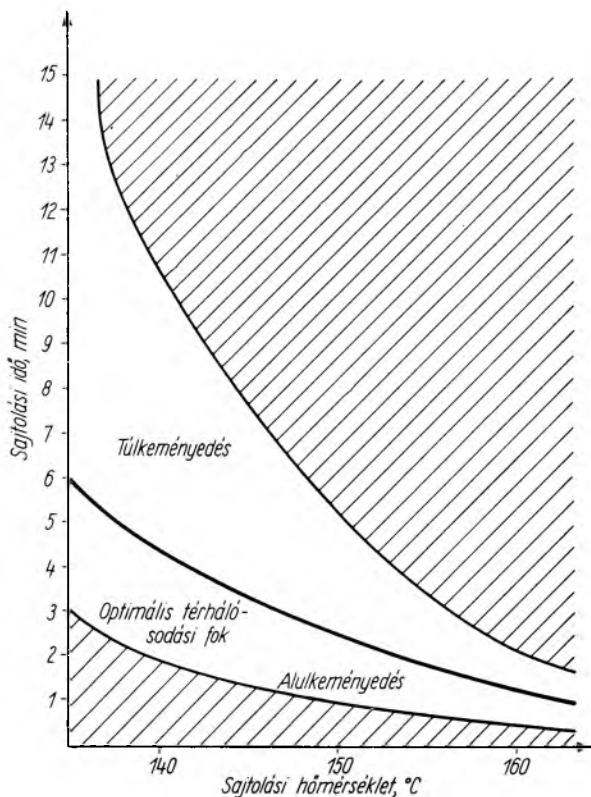
a) *Sajtolási nyomás.* A melamingyantás sajtolóanyagok feldolgozásakor alkalmazandó nyomást számos tényező befolyásolja. Ezek közül a legfontosabbak: a sajtolóanyag típusa, a sajtoló darab alakja, falvastagsága, a folyási hossz és folyási magasság, valamint a sajtolószerszám felületének minősége. Az általában alkalmazott fajlagos nyomás 150...600 kp/cm². A cellulóz-, faliszt-, kőzetliszt-, csillám-töltésű sajtolóanyagok a skála alsó felében, a különböző textilvagdálékokat tartalmazó anyagok a skála felső felében, az azbesztes sajtolóanyagok középtájt helyezkednek el [16, 17].

Egy adott típuson belül a típusra általában megadott nyomást tovább módosítja a sajtolni kívánt alkatrész alakja. A vékony, magas falú, számos élesen kiképzett átmenetet tartalmazó darab sajtolásához nagyobb nyomás szükséges, mint nagyobb falvastagságú, kevésbé tagolt idomok esetén.

A szerszám felületének minősége olyan értelemben befolyásolja a sajtolási nyomást, hogy minél homályosabb, kopottabb a szerszám felülete, annál nagyobb nyomás szükséges a feldolgozáshoz.

b) *Töltési és zárási idő.* Bár szorosan nem tartozik a feldolgozási körülmények közé, szerepe mégis jelentős, főleg a sajtoló tárgy felületének minősége szempontjából. A hosszú töltési és zárási idő azzal a következménnyel jár, hogy a még laza sajtolópor azon részein, amelyek a forró szerszámfelülettel közvetlenül érintkeznek, rögtön megindul a kondenzálás és mire a szerszám zár, ezek a részek már jóval nagyobb kondenzációfokkal rendelkeznek, mint a sajtolópor egésze, ami azzal a nemkívánatos következménnyel jár, hogy a sajtoló tárgy felülete nem lesz egységes, az előkondenzált részecskék már nem olvadnak össze, hanem a felületen pettyeket képeznek (a jelenség főleg főzési próbakor válik jól észrevehetővé). A feldolgozáskor tehát törekednünk kell a minél rövidebb töltési és zárási időre. A megengedhető zárási idő függ a feldolgozás hőmérsékletétől is. Ugyanis, ha a szerszám hőmérséklete nagyobb, akkor rövidebb idő alatt mehet végbe az előkondenzálás, ilyenkor tehát a zárási idő lehetőleg rövid kell hogy legyen.

c) *Sajtolási hőmérséklet.* A melamin—formaldehid-alapú sajtolóanyagok feldolgozásakor különös gondot kell fordítani a sajtolási hőmérséklet helyes megválasztására és annak pontos tartására, mivel ez a sajtolóanyag-típus lényegesen hőérzékenyebb, mint a fenoplaszt-típusok. Így pl. az IGG (Internationale Galalit Gesellschaft) sajtolóanyag-prospektusában [16] fenoplasztokra 150...170 °C hőfoktűrést enged meg, a melamin—formaldehid-típusra viszont csak 150...155 °C-ot. A túl nagy sajtolási hőmérséklet elkerülését a következő szempontok indokolják:



5-5. ábra. Aminoplaszt sajtolóanyagok kikeményedési körülményei a sajtolási hőmérséklet és a sajtolási idő függvényében, 4 mm-es falvastagságra vonatkoztatva

pontjából inkább ajánlatos viszonylag kisebb hőmérsékletet választani. Ezáltal ugyancsak jobbak lesznek a sajtolóanyag öregedési tulajdonságai és elkerülhető a nagymértékű utózsugorodás és repedezés.

5. Az egyes melamin—formaldehid gyanta alapú sajtolóanyagok alkalmazási területe

A legelterjedtebb típust, amely töltőanyagként falisztet vagy cellulózt tartalmaz, többnyire inkább csak burkolóelemként alkalmazzák, illetve olyan villamos alkatrészek gyártására, ahol nincsenek fokozottabb ivállósági és kúszóáram-szilárdsági követelmények, nincs tehát szükség különös nedvességállóságra. A típus előnye a könnyű feldolgozhatóság és a tetszés szerinti szín, a viszonylag jó mechanikai szilárdság.

A textilvagdálék-vázanyagot tartalmazó sajtolóanyag kimondottan olyan helyen kerül alkalmazásra, ahol fokozottabb mechanikai igénybevételekkel kell számolni.

A szemcsés ásványi töltőanyagot tartalmazó sajtolóanyagok (pl. a Melopas AR) tulajdonságaikat tekintve közel állnak a keramikus szigetelőanyagokhoz, tehát

Egyrészt, a hőmérséklet növelésével mind jobban korlátozzuk magunkat a kikeményítési időt illetőleg (5-5. ábra). Másrészt, bár a hőmérséklet növelésével a folyóképesség ugyan nő (a viszkozitáscsökkenés eredményeképpen), azonban ezzel egyidejűleg csökken a folyási idő is. Ez egyrészt nagymértékben szűkíti a töltési és zárási időintervallumot, másrésztől fennáll annak veszélye, hogy a sajtoló anyag kikeményedik, mielőtt még a szerszámot teljesen kitöltené. Végül, nagyobb hőmérsékleten dolgozva könnyen bekövetkezhet túlkeményedés, ami a mechanikai tulajdonságok csökkenését, a vízfelvétel, az utózsugorodás és repedezési hajlam fokozódását okozza.

Az optimális sajtolási hőmérséklet megválasztása természetesen mindig kompromisszumot jelent, hiszen nem várható, hogy valamennyi tulajdonság szempontjából egyidejűleg kedvező hőmérsékletet sikerül kiválasztani, mégis, villamosipari alkalmazás szem-

azokon a helyeken alkalmazzák őket, ahol fokozott hőigénybevétel lép fel, vagy magas ívállóságra van szükség (pl. lángkamrák, kisteljesítményű szakaszoló-ívoltó-kamrájaként). A sajtolóanyag-típus hátránya a viszonylag kismértékű mechanikai szilárdság, elsősorban az ütészékeség.

Ezeket a hátrányokat küszöböli ki bizonyos mértékben az azbeszt-töltőanyag alkalmazása. Az azbeszt-töltőanyagú sajtolóanyagok az előbbi típusnál viszonylag rugalmasabb, szívósabb anyagok, feldolgozásuk is jóval kedvezőbb, jobb folyóképességgel rendelkeznek és a szerszámot kevésbé veszik igénybe. Alkalmazásuk javasolható bonyolultabb alakú, vékonyabb falvastagságú alkatrészek sajtolására, ahol az anyagtól nagyobb rugalmasságot követelünk meg (pl. kapcsolóberendezések, megszakítók bonyolultabb alkatrészeinél).

A típus fő hátránya eddig az igen alacsony nedveségállóság volt. Kísérleteink alapján azonban remény van ennek jelentékeny javítására. Feltétlenül meg kell említenünk, hogy a jelenlegi melamingyantás sajtolóanyagok nem képesek minden igényt kielégíteni. A vonatkozó szakirodalom és a hazai tapasztalatok egyaránt azt mutatják, hogy szükség lenne olyan melamingyantás sajtolóanyagra is, amely a jó kúszóáram-szilárdságon kívül az eddigi típusoknál lényegesen jobb mechanikai szilárdsággal rendelkezik. W. Lohmann [2] leír egy üvegszál-vázanyagú melamingyantás sajtolóanyagot, amely valóban igen jó mechanikai szilárdsággal rendelkezik (DIN Vortyp DN), hátránya azonban a sajtolóanyagnak a kis kopásállóság és rossz nedveségállóság.

6. Összefoglalás

A melamin—formaldehid-alapú sajtolóanyagokat a villamosipar olyan helyeken alkalmazza, ahol fokozott kúszóáram-igénybevétel és ívhatás lép fel. Ezek közül a szervesetlen töltőanyagú melamingyantás sajtolóanyagok kiváló kúszóáram-szilárdsággal, jó ívállósággal, csekély zsugorodással és jó termikus tulajdonságokkal rendelkeznek.

Vizsgálataink során számos külföldi sajtóanyag jellemzőit határoztuk meg szállítási állapotban és nedves igénybevétel után, majd ezeket az anyagokat összehasonlítottuk a DIN 7708 számú szabvány típuskövetelményeivel és úgy találtuk, hogy típuson belül is igen eltérők az egyes gyártmányok minőségi jellemzői.

A kiterjedt vizsgálatok tanulságait levonva kifejlesztettünk olyan ásványi töltőanyagú melamingyantás sajtolóanyagot, amely töltőanyagként azbesztet tartalmaz. A hazailag kifejlesztett sajtolóanyag minőségi jellemzői megfelelnek a DIN 7708 típuskövetelményeinek, sőt villamos tulajdonságait, valamint azok nedves igénybevétel alatti stabilitását tekintve, a követelményeket jóval meg is haladja.

A továbbiak során részben saját tapasztalataink alapján, részben az erre vonatkozó szakirodalom felhasználásával elemeztük, hogy az előállítás és a feldolgozás egyes paraméterei hogyan befolyásolják a sajtolt darab minőségét.

Végül utaltunk az egyes melamingyantás sajtolóanyag-típusok alkalmazási területeire, hangsúlyozva, hogy ezek mindegyike csak bizonyos megszorításokkal alkalmazható, mivel ma még nem áll rendelkezésre olyan melamingyantás sajtolóanyag, amelynek valamennyi tulajdonsága egyaránt kiváló lenne.

Irodalom

- [1] *Oburger, W.*: Die Isolierstoffe der Elektrotechnik. Springer Verlag Wien, 1957.
- [2] *Lohmann, W.*: Der heutige Stand technischer Melaminharz-Pressmassen und ihre Anwendungen. *Kunststoff-Praxis* (1958), № 9 p. 67.
- [3] *DIN 53.480*. Bestimmung der Kriechstromfestigkeit bei Betriebsspannungen unter 1 kV.
- [4] *MSZ 7254 T* Szilárd villamos szigetelőanyagok ellenállóképességének vizsgálata nagyfeszültségű, kis áramerősségű ivvel szemben.
- [5] *MSZ 1428—61* Izzó anyagokkal szembeni ellenállóképesség vizsgálata.
- [6] *Kopniczky Sz.*: Heterogén szigetelőanyagok nedvességállóságának vizsgálata. *Elektrotechnika* **57**. (1964) № 2—3. 53. old.
- [7] *Kopniczky Sz.*: Szigetelőanyagként alkalmazott műanyagok kúszóáramszilárdsága. *Elektrotechnika* **58**. (1965) № 8—9. 357. old.
- [8] *Dr. K. Ulbricht*: Asbestgefüllte Aminoplastpressmassen. *Elektrie* **18**. (1964). № 2. p. 66
- [9] *Mandler H.*: Zur Tablettierung duroplastischer Pressmassen. *Der Plastverarbeiter* **15**. (1964) № 2, p. 83.
- [10] *Wiegand H.—Wallhäuser H.*: Zur HF Vorwärmung von Pressmassen. *Kunststoffe* **51**. (1961) №6.
- [11] Bestimmung der Verarbeitbarkeit von Melaminharzpressmassen. *Plaste und Kautschuk* **8**. (1962) № 11. 456.
- [12] *Ulbricht K.—Thater R.*: Vergleichuntersuchungen über das Fließverhalten von Melaminharzpressmassen. *Plaste und Kautschuk* **12** (1965) № 4. p. 224.
- [13] *Bauer W.*: Entwicklungslinien auf dem Gebiet der Pressmassenverarbeitung. *Kunststoffe* **55**. (1965) № 4. p. 273.
- [14] *Tochtermann W.*: Glasfaserverstärkte Kunstharz-Pressmassen. *Der Plastverarbeiter* **15**. (1964) № 9. p. 535.
- [15] *Rychtera M.—Blahník R.*: Untersuchung der Beziehungen der Sorption der Feuchtigkeit und der elektrischen Durchlagsspannung von Pressteilen mit anorganischen und organischen Füllstoffen. *Information* **2**. (1963) № 3. p. 73.
- [16] *IGG Pressmassen*. (katalógus)
- [17] *CIBA Pressmassen* (katalógus)

6.

Trópusi berendezések tervezésének klimatológiai alapjai

SULYOK JÓZSEF

ÖSSZEFOGLALÁS

Trópusi klímára kerülő villamos berendezés tervezése, védelmének kialakítása igen összetett probléma. A tervezőnek először meg kell ismerni a várható klímaigénybevételt, annak szigorúságát. Az anyagok, védelmek kiválasztásánál, a méretezésnél a konstruktőr szembeállítja a várható klímaigénybevételt és az anyagokra, védelmekre, azoknak a szóban forgó igénybevétellel szemben tanúsított viselkedésére vonatkozó mérési adatokat. A döntéshez még sok egyéb szempontot is figyelembe kell venni, így a berendezés rendeltetését, fontosságát, a berendezés üzemét, üzemeltetési körülményeit, a tervezett élettartamot (vagy az erkölcsi elévülés idejét), az alkatrészek megbízhatóságát és egyéb gazdaságossági kérdéseket.

Ahhoz, hogy a tervező mindent mérlegelve helyesen dönthessen, a tárgyra vonatkozóan alapos ismeretekkel kell rendelkeznie. A cikk kapcsán ezért áttekintettük a klimatológiai ismereteket, foglalkoztunk a szabványokban rendelkezésre álló klímaadatok kritikájával, s javaslatot tettünk méretezés céljára alkalmas adatokra vonatkozóan.

КЛИМАТОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНСТРУКЦИИ ТРОПИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Е. Шуйок

Резюме

Конструкция электрического устройства для тропического климата, разработка его защиты, — это является наиболее сложной проблемой. Для конструктора нужно сперва узнать ожидаемую климатическую нагрузку и её жесткость. При выборе материалов, защит, при вычислении конструктор сопоставляет ожидаемую климатическую нагрузку с данными измерения, относящимися к материалам, защитам и к их поведению в условиях упомянутой нагрузки. Для решения необходимо учитывать ещё много других точек зрения, например назначение и важность устройства, работу и режим работы устройства, расчётный срок службы, (или морального износа), надёжность составных частей и другие вопросы по экономической эффективности.

Для того, чтобы конструктор мог правильно решить, взвешивая всё, он должен иметь подробные знания по данному вопросу. Поэтому в статье мы дали обзорение климатологических знаний, занимались критикой климатических данных, имеющихся в стандартах, и внесли предложение о данных, пригодных для целей вычисления.

KLIMATOLOGISCHE GRUNDSÄTZE DER KONSTRUKTION VON TROPISCHEN EINRICHTUNGEN

J. Sulyok

Zusammenfassung

Die Konstruktion der elektrischen Einrichtungen für tropische Klima, und die Gestaltung des Schutzes ist ein kompliziertes Problem. Der Konstrukteur muss vor allem die zu erwartende Beanspruchung, deren Grad kennen lernen. Beim Erwählen der

Materialen und Schutzmöglichkeiten, bei Festlegung der Abmessungen stellt der Konstruktor die tropische Beanspruchung mit den Messungsangaben, welche sich auf die Materiale, Schutzmöglichkeiten und deren Benehmen im Falle der eben bestehenden Beanspruchung, beziehen, — mit einander entgegen. Zur Entscheidung muss man auch viele übrige Gesichtspunkte in Betracht nehmen, so die Bestimmung der Einrichtung, ihre Wichtigkeit, den Betrieb der Einrichtung, die Betriebsumstände, die geplante Lebensdauer (oder den Zeitpunkt der moralen Veralterung), die Beständigkeit der Bestandteile und sonstige wirtschaftliche Fragen.

Dazu, dass der Konstruktor alldies erwogen richtig entscheiden kann, muss er mit gründlichen betreffenden Kenntnissen verfügen. In diesem Artikel haben wir eben darum die klimatologischen Kenntnisse betrachtet, wir haben uns mit der Kritik der in den Standards zur Verfügung stehenden Klimaangaben beschäftigt und haben einen Vorschlag bereitet zur Gestaltung von Angaben, welche zur Festlegung der Abmessungen genügen.

THE CLIMATOLOGICAL BASIS OF DESIGNING TROPICAL EQUIPMENTS

J. Sulyok

Summary

The design of electrical equipments getting to tropical climate, is a very complex problem. Before of all the designer has to recognise the expectable climatological stresses and the seriousness of those. When selecting the materials, protections and dimensioning, the designer makes a counterposing of the expectable climatological stresses and the results of tests relating to the materials, protections and the behaviour of those against the stresses in question. For decision other aspects must be taken into account too, as the purpose of the equipment, the importance, the circumstances of the operation, the planned life time (or the time of the moral obsolence), the reliability of the components and other economical questions.

For being able to make a correct decision the designer must possess a detailed knowledge about the object. Therefore in this paper a survey has been made over the climatological knowledge and a critic of the environmental dates which are available in the standards, and we offer a proposal of the dates suitable for dimensioning.

A villamos berendezés klímaigénybevételek hatására károsodást szenved. A károsodás mértéke, annak a berendezés üzemére, üzembiztonságára gyakorolt hatása egyrészt a klímaigénybevétel fajtájától, intenzitásától és idejétől, másrészt a berendezésnek az igénybevételekkel szemben tanúsított ellenállóképességétől, azaz a berendezés védettségétől függ. Villamos berendezések klímavédelmének megvalósításához az első lépés tehát a klímaigénybevételek megismerése.

A villamos berendezésre ható klímátényezők intenzitása, a technikai szempontból érdekes kritikus értékek gyakorisága, a domináló klímátényezők egyidejűségének mérve alapján alakíthatók ki azok a technikai szempontból fontos klímák, amelyek jellemzői, jellemző adatai villamos berendezések klímavédelmének megtervezéséhez számszerűen és minőségileg alapul szolgálnak.

1. Villamos berendezések tönkremenését előidéző domináló klímátényezők

Az anyagok, berendezések klíma által előidézett leromlását mindig több klímátényező komplex hatása idézi elő. A technikailag számottevő leromlásokat rendszerint mégis csak bizonyos tényezők, az úgynevezett domináló tényezők idézik elő. A leromlás mértékét pedig a döntő klímátényezők intenzitása, behatásuk időtartama, illetve bizonyos intenzitás fellépésének gyakorisága szabja meg.

Foglaljuk össze a villamos berendezésre ható főbb klímátényezőket és a velük kapcsolatos károsodás eredetét.

Klímátényezők

Környezeti hőmérséklet

Magas léghőmérséklet

Alacsony léghőmérséklet

Gyors hőmérsékletváltozás

Légnedvesség

Kritikus feletti relatív légnedvesség

Alacsony relatív légnedvesség

Magas relatív (illetve abszolút) légnedvesség tartós jelenléte, gyakori előfordulása

Napsugárzás

Alacsony légnyomás

Légszennyeződések

Ipari szennyeződés kritikusanál nagyobb mennyiségben való gyakori előfordulása

Tengeri só kritikusanál nagyobb mennyiségben való gyakori előfordulása

Por és homok nagy mennyiségben való gyakori előfordulása a levegőben és a légáramban (homokos szélvihar)

Különleges légszennyeződések

Egyéb tényezők

Biológiai (penész, baktériumok, rovarok, állati kártevők)

Eső, harmat, zúzmara, szél, viharok

A károsodás eredete

Túlmelegedés (villamos berendezésnél a berendezés által termelt meleg és a környezeti hőmérséklet együtt okozhat túlmelegedést)

Túlhűlés

Nem megengedhető dilatáció

A vízgőz adszorpciója — kondenzáció a felületen

Káros mértékű kiszáradás (deszorpció)

Az anyagok átnedvesedése (abszorpció)

Fotókémiai elváltozás

Különféle (nem kielégítő hűtés, a levegő csökkent villamos szilárdsága stb.)

Korrozió (vezető szennyeződés, nedvesség-
lekötés stb.)
ua.

Kopás, korrozio (vezető szennyeződése,
nedvesség-
lekötés, mozgásgátlás stb.)

Különféle

Különféle (vezető szennyeződése, korrozio,
nedvesség-
lekötés, mechanikai rongálódás stb.)

Különféle

2. A klímák osztályozása, technikai klímaterületek

A technikai berendezésekre ható domináló klímátényező előfordulása, intenzitása és gyakorisága alapján klímátípusokat alakíthatunk ki. A klímátípusok abban különböznek egymástól, hogy bennük a domináló tényezők intenzitása és bizonyos intenzitás előfordulásának gyakorisága hogyan alakul.

2.1 Makroklímák

Technikai szempontból a szárazföldet úgynevezett *technikai klímaterületekre* (makroklíma-terület) osztják. A technikai klímaterületek száma, képzésük kritériuma nem teljesen egységes. A 6-1. táblázatban példaként bemutatjuk a földnek különböző klímaterületekre való felosztását.

6-1. táblázat
A Föld technikai klímafelosztása

Klímateület	MSZ 8887/1 szerint	KGST szabv. tervezet	IEC javaslat	
			TC 50 (Secr.) 118 irat	TC 50 (Germany) 103 irat
<i>Hideg</i>	+	+	+	+
Extrém hideg			+	+
Száras hideg				+
<i>Északi</i>			+	
<i>Mérsékelt</i>	+	+	+	
Hideg mérsékelt				+
Meleg mérsékelt				+
<i>Száras-meleg</i>	+	+	+	+
Extrém száras-meleg			+	+
<i>Nedves-meleg</i>	+	+	+	+
Monzunszerű			+	+
Extrém nedves-meleg			+	+
<i>Enyhe trópusi</i>			+	
Nedves enyhe trópusi		+		+
Száras enyhe trópusi				+
<i>Magaslati</i>	+		+	+

2.2 Mezoklimák

A makroklíma-területeken belül az egyes országok, országrészek, helységek klímája jelentősen eltérhet. Kisebb területek klímáját, amelyet a földfelszín, növényzet, ipari létesítmények, tenger vagy víz közelsége stb. jelentősen befolyásol, mezoklimának nevezik. Technikai szempontból *ipari*, *tengerparti* és *hegyi* mezoklimák megkülönböztetése látszik szükségesnek.

2.3 Mikroklímák

A berendezés tulajdonképpeni klímaigénybevételét közvetlen környezetének klímája szabja meg. A berendezés környezetének klímáját mikroklímának nevezzük.

Attól függően, hogy a berendezés felállításának helyén ható mezoklimát valamilyen védettség (tető, zárt építmény) befolyásolja-e és mennyiben, a szabványok három mikroklímát különböztetnek meg: *szabadtéri*, *fedett-téri*, *zárt-téri*.

A mikroklíma általában azzal jellemezhető, hogy a helyi klímában ható domináló tényezők milyen mértékben érvényesülhetnek.

A szabadtéren tulajdonképpen a helyi klímán ható tényezők érvényesülnek korlátlanul, míg a fedél a közvetlen napsugárzás és az eső hatását megszünteti. A zárt-téri mikroklímáról külön kell szólnunk. A zárt-tér ugyanis a helyi klímában ható tényezőket igen különbözőképpen korlátozhatja, vagy módosíthatja (az épület anyaga, zártsága, gépek működése, élőlények jelenléte, fűtés, a munkafolyamatoknál keletkező gőzök, gázok, szilárd szennyeződések stb. révén). A zárt-tér fogalmát ezért mint általános szabványos fogalmat használhatjuk. Zárt-téri mikroklíma alatt így azt érthetjük, hogy az épület a helyi klímán ható tényezők közül egyeseket

(pl. a közvetlen napsugárzást, esőt) megszüntet, más tényezőket (pl. relatív nedvességtartalmat, hőmérséklet-csúcsértékeket, a gyors hőmérsékletváltozást) pedig korlátoz, ismét másokat pedig elősegít (pl. penészképződés). Zárt-téren működő berendezések mikroklímája alatt egyébként az esetek nagy részében *speciális*, illetve *mesterségesen befolyásolt mikroklímákat* kell érteni.

2.4 Az alkatrész mikroklímája

A villamos berendezésbe épített anyag, illetve alkatrész igénybevételét a berendezés belsejében uralkodó klíma jelenti. A berendezés belsejében kialakuló klíma, ha a tér kapcsolatban van környezetével, függ a környezet klímájától, a berendezés konstrukciója, üzeme azonban jelentősen befolyásolhatja azt.

A berendezés belsejében uralkodó klímát mint szabványos fogalmat az MSZ 8887/1 lap *alkatrész-mikroklímának* nevezi, találkozunk „kryptoklíma” elnevezéssel is.

3. A trópusi klíma jellemző adatai

E munka tulajdonképpeni tárgya: trópusi felhasználású villamos berendezések tervezéséhez klimatológiai ismeretek és közelebbi adatok nyújtása. A továbbiakban ezért a kérdések megvizsgálását a trópusi klímára korlátozzuk.

Abban az esetben, ha adott objektumban (erőmű, gyár stb.) felhasználásra kerülő berendezéseket (különösen nagy berendezéseket) tervezünk trópusra, be kell szerezniük a *helyi klímára* vonatkozó jellemző adatokat.

A *mikroklímára* vonatkozóan vagy beszerezhetők a konkrét klímaadatok (pl. a villamos berendezés nagy hőmérsékleten dolgozó gépet működtet, ahol a környezeti hőfok a nyári hónapokban tartósan 70 °C, vagy pl. a levegő adott koncentrációban szennyezett porral és CO₂ gázzal stb.), vagy minőségileg becsülhető meg a mikroklíma kedvező, vagy kedvezőtlen volta. (Pl. rosszul szellőzött pinchelyiség — fokozott penészesvény, fokozottan páráns üzem, pl. konzervgyárban — állandó nedvesedés, kondenzáció).

Abban az esetben, ha berendezéseink konkrét alkalmazási helye nem ismert, a gyártmányra vonatkozóan előírt, szóban forgó kivitel megtervezéséhez a *makroklíma-területek* jellemző klímaadatait használjuk fel.

A szabványokban szereplő klímaadatok a szabadtéren uralkodó klímát jellemzik. A különböző védettség (tető, zárt-tér) korlátozó hatását, annak mértékét minőségileg kell megbecsülni. Vizsgálati adatok, ilyen irányú kutatások, megfigyelések eredménye elősegítheti a becslést. (A TGL 9200 Blatt 1 szabvány megpróbálkozik a szabadtérré vonatkozó adatokból a fedett és zárt-térré vonatkozó hőmérséklet-adatokat is megbecsülni.) Mesterségesen befolyásolt, speciális mikroklímák adatait ezek a szabványok nem tartalmazhatják.

A 6-2. táblázatban az MSZ 8887/1 lap szabványban szereplő klímaadatok láthatók. Összehasonlítás céljából a 6-3. táblázatban a KGST 271.446—65 szabványtervezetből a levegő hőmérsékletére és nedvességtartalmára vonatkozó adatokat is bemutatjuk.

A szabványokban szereplő, nevezett táblázatokban is ismertetett adatok nem érzékeltetik eléggé az illető klímatervező feltüntetett értékeinek gyakoriságát, az előforduló értékek szélsőségeségét. A technikai klímaterületek (makroklímaterületek) ugyanis nagy, összefüggő szárazföldi területeket jelentenek, azonos makroklíma-területhez tartozó országok, földrajzi helyek klímaadatai között ezért

abszolút értelemben is és azok évi alakulását illetően is jelentős eltérések lehetnek. Célszerű tehát megismerni egy-egy klímaterületen a legfontosabb klímatervezők jellemző értékeinek eltérését, a szélsőértékeket, mégpedig a jellemző, pl. a legmelegebb, a legnedvesebb és a leghidegebb hónapokban. A 6-4. táblázatban (DIN 50019 szabvány alapján) bemutatjuk különböző trópusi klímaterületekre vonatkozóan a gőznyomás (abszolút légnedvességtartalom), a hőmérséklet és a relatív nedvességtartalom különböző átlagértékei megfigyelt minimumának és maximumának alakulását a legmelegebb, legnedvesebb és leghidegebb hónapokban.

A táblázatban szereplő értékek — minthogy szélső értékek — a szóban forgó átlagértékekre vonatkozóan a 6-1. ábrán bemutatott *klimatogramok* sarokpontjait jelentik. Az illető klímaterületen a tárgyi hónapban, a szóban forgó átlagértékeket illetően, csak a hatszögön (ill. ötszögön) belüli értékek fordulhatnak elő. A 6-4. táblázatban levő értékekből sokféle klimatogram készíthető.

A klimatogramok segítségével, a szemléltető ábrázolás révén, áttekinthető képet kapunk a legfontosabb klímatervezőknek az illető klímaterületen való alakulását illetően. A hatszög területének nagysága jellemző az illető klímaterületen

6-2. táblázat
A klímaterületek jellemzői

A tényezők megnevezése	Trópusi klímaterület	
	nedves trópusi TH	száraz trópusi TA
A léghőmérséklet abszolút minimuma, °C	- 10	- 20
A léghőmérséklet évi abszolút minimumainak átlaga, °C	+ 3	- 10
A léghőmérséklet évi középértékének átlaga, °C	+ 10... + 25	+ 5... + 30
A léghőmérséklet évi abszolút maximumainak átlaga, °C	+ 40	+ 50
A léghőmérséklet abszolút maximuma, °C	+ 45	+ 55
Maximális hőmérsékletváltozás 8 h alatt, °C	10	40
A léghőmérséklet havi maximumainak középértéke 80% relatív légnedvességtartalom esetében, °C	+ 33	—
A levegő relatív légnedvességének abszolút minimuma +40 °C léghőmérsékleten, %	—	10
Homályos fekete felület maximális hőmérséklete közvetlen napsugárzásnak kitéve, °C	+ 80	+ 90
A napsugárzás erőssége min., cal/cm ² min	< 1,4	< 1,6
A talaj hőmérséklete 1 méter mélységben max., °C	+ 30	+ 30
Harmat	++	+
Sótartalmú levegő	+	++
Viharok	++	+
Homok és por	+	++
Záporosók	++	+
Jégesedés, zúzmara	0	0
Penészgombák	++	0
Termeszek	++	+
Csúszómászók, rágszálók	++	++

Jelmagyarázat: ++ gyakori
+ ritkán vagy helyenként
0 nincs gyakorlati jelentősége

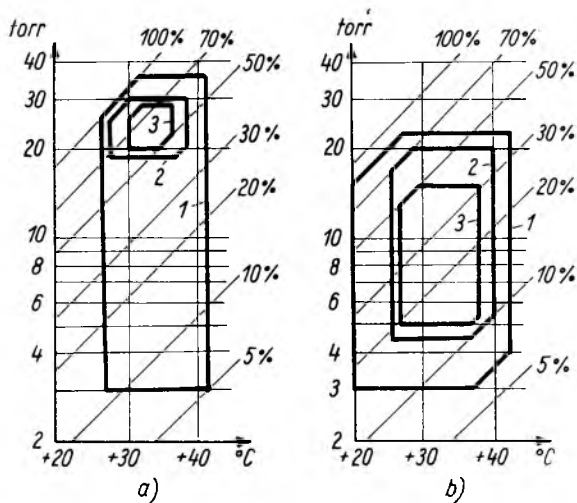
6-3. táblázat

Léghőmérséklet- és légnedvesség-adatok összehasonlítása

Klimatényezők	Klímate terület		
	száraz trópusi TA	nedves trópusi TH	szubtrópusi TS
A léghőmérséklet			
abszolút minimuma, °C	-20	0	-10
abszolút maximuma, °C	55	40	50
Maximális hőmérsékletváltozás 8 h alatt, °C/8 h	40	10	30
A 30 °C feletti hőmérséklet évi gyakorisága, %	40	20	20
A napsugárzás erőssége, cal/cm ² min	1,6	1,4	1,4
Légnedvesség			
95%-nál magasabb	+	+	+
70%-nál magasabb relatív nedvesség évi gyakorisága, % . . .	20	80	60
50%-nál alacsonyabb relatív nedvesség évi gyakorisága, % ..	50	1	30

a klimatényezők értékeinek szélsőséges vagy kevésbé szélsőséges alakulására. A különböző átlagértékek szélsőértékei által körülfogott területekkel pedig az illető értékek gyakorisága is érzékelhető.

Érdekessége még ezeknek a klimatogramoknak, hogy a különböző klimatényezők összetartozó értékei egyidejűségének lehetőségeit is bemutatja (pl. az ábrákból láthatjuk, hogy nem fordulhat elő egyidejűen a maximális hőmérséklet és a maximális relatív légnedvesség). A tervezők számára szükségesnek tartjuk a fentiek tanulmányozását, ismeretét.



6-1. ábra. a) Extrém nedves klímaterület legmelegebb hónapra vonatkozó klimatogramja; b) Extrém száraz-meleg klímaterület legmelegebb hónapra vonatkozó klimatogramja

1 a napi átlagok extrém értéke; 2 a havi átlagok extrém értéke;
3 a havi átlagok sokévi átlaga

6-4. táblázat
Klímaadatok a DIN 50019 alapján

Klimaterület	Napi átlagok extrém értéke						Havi átlagok extrém értéke						Havi átlagok sokévi átlaga					
	e		t		U		e		t		U		e		t		U	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
A legmelegebb hónap klímaadatai																		
Száraz-meleg	4,5	22	18	38	10	90	7	19	20	35	30	85	8	18	22	32	35	80
Extrém meleg	3	23	20	42	7	82	4,5	20	25	40	10	70	5	16	26	38	12	50
Nedves-meleg	10	32	23	38	25	98	13	29	24	33	45	93	15	27	25	31	55	90
Váltakozó nedves-meleg	4,5	28	18	40	10	80	7	26	20	37	20	75	9	24	25	35	25	70
Extrém nedves-meleg	3	36	27	41	5	100	18	30	28	38	40	90	19	29	30	36	50	80
A legnedvesebb hónap klímaadatai																		
Száraz-meleg	8	26	18	36	30	90	10	21	19	32	40	88	13	19	20	30	50	85
Extrém meleg	7	25	22	40	15	85	8,5	20	24	37	25	70	9	19	25	34	28	60
Nedves-meleg	15	34	21	36	45	100	18	30	22	32	60	97	19	28	25	31	65	95
Váltakozó nedves-meleg	15	34	21	36	45	100	16	30	22	32	55	97	17	26	24	31	60	90
Extrém nedves-meleg	2,5	38	27	40	5	100	18	32	28	36	45	90	19	29	31	34	50	80
A leghidegebb hónap klímaadatai																		
Száraz-meleg	0,9	16	-14	26	40	95	2,5	14	-5	24	45	90	3	13	0	23	50	80
Extrém meleg	3	16	0	30	20	80	4	14	4	25	25	75	5	13	9	24	28	65
Nedves meleg	5	25	7	29	45	100	7	22	11	28	55	96	9	20	15	27	60	90
Váltakozó nedves-meleg	4	20	7	28	20	95	4,5	19	11	27	25	90	5	18	15	26	28	85
Extrém nedves-meleg	5	16	6	27	35	100	6	15	10	24	45	90	8	13	13	22	60	80

Jelmagyarzat e: gőznyomás (torr)

t: hőmérséklet (°C)

U: relatív légnedvesség (%)

1: a klímaterületen mért legkisebb érték,

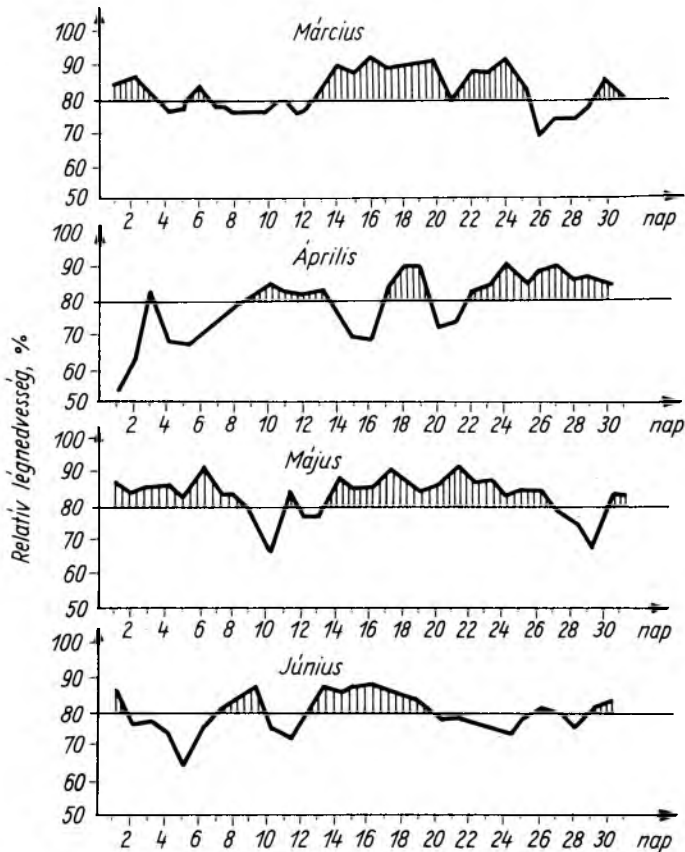
2: a klímaterületen mért legnagyobb érték.

4. A levegő nedvességtartalmára és hőmérsékletére vonatkozó adatok megvizsgálása villamos berendezések tervezése szempontjából

Trópusra kerülő villamos berendezések tervezése szempontjából a levegő hőmérsékletére és nedvességtartalmára vonatkozó adatok alapvető fontosságúak. A továbbiakban ezért nézzük meg kissé részletesebben, hogy a tervezéshez milyen adatok felhasználása szükséges.

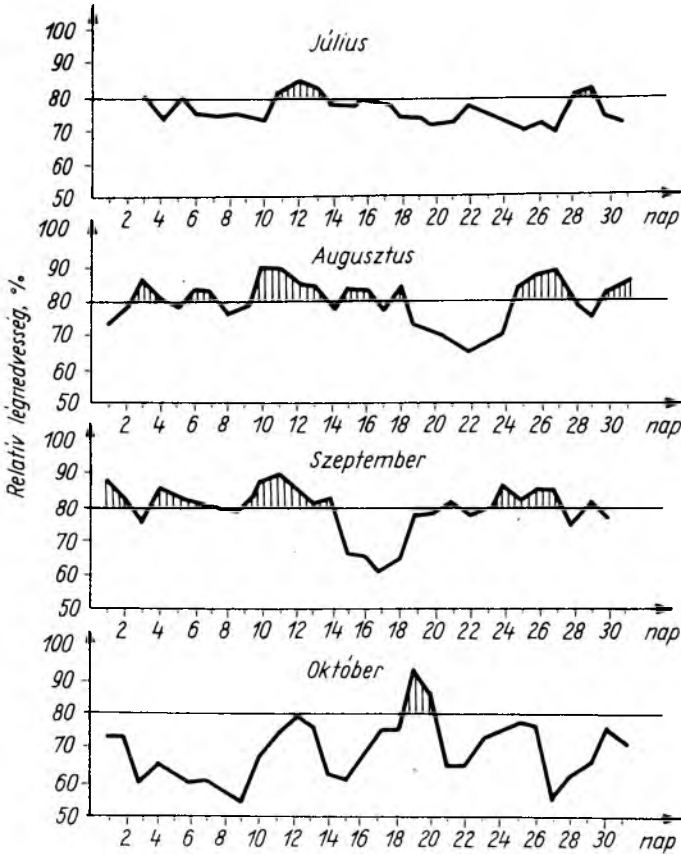
4.1 A légnedvesség kérdése

A nedves trópusi klímán üzemelő villamos berendezés üzembiztos működését a villamos berendezésben szereplő szigetelőanyagok, szigetelési rendszerek nedvességgel szembeni viselkedése, nedvességállósága döntően befolyásolja. A szigetelőanyag nedvesedése követi a relatív nedvességtartalom változását. A nedvességfelvétel mértékét, illetve az egyensúlyi állapotot — a szigetelőanyag ezirányú alapvető tulajdonságai mellett — a külső (levegő-) és belső (a szigetelőanyag belsejében uralkodó) gőznyomás egyensúlya szabja meg.



6-2. ábra. A relatív légnedvesség havonkénti alakulása a nedves periódusban, Kantonban

A levegő nedvességtartalmának nagysága és időbeni alakulása igen bonyolult és különböző, mind az egyes alkalmazási helyeket, mind pedig a különböző évszakokat illetően. A kérdés mélyebb vizsgálatába e helyütt nem mehetünk bele, mégis nézzük meg, hogy a relatív légnedvesség és a hőmérséklet, valamint ezek egyidejűségének bonyolult alakulása mellett is milyen módon jellemezhetjük a természetes nedves-meleg igénybevételek szigorúságát.



6-3. ábra. A relatív légnedvesség havonkénti alakulása a nedves periódusban, Kantonban

A magas relatív légnedvesség és az egyidejű nagy hőmérséklet gyakorisága és annak időbeni alakulása látszik alkalmasnak a nedves-meleg igénybevétel szigorúságának megfogalmazására. Nézzük meg ezt a következő példa (vizsgálati tapasztalat) kapcsán. A 6-2. és 6-3. ábrán a relatív légnedvesség változását — Kantonban a „nedves periódus”-ban — ábrázoltuk. A vonalkázott területekkel a 80% feletti relatív légnedvesség előfordulásának gyakoriságát kívántuk érzékeltetni.

A 6-4. ábrán egy rétegelt papírbakelit villamos szilárdságának és vízfelvételének alakulását mutatjuk be (csak jellegre) a szóban forgó nedves periódusban.

Az ábrák összevetésekor — az alapproblémát illetően — a következőket állapíthatjuk meg:

A magas relatív légnedvesség gyakorisága (vonalkázott területek) május végéig növekvő tendenciát mutat. Ennek megfelelően a szigetelőanyag nedvesedése is fokozódott, s villamos szilárdsága folyamatosan csökkent.

Júniusban a 80% feletti relatív légnedvesség gyakorisága már csökkent a korábbi szakaszhoz képest, júliusban pedig egészen kis időszakokra korlátozódik csak. Az átütési szilárdság ennek megfelelően alakul, s mint az ábrából látható, a májusi mélypont után júliusig emelkedő jelleget mutat.

Augusztusban a 80% feletti relatív légnedvesség gyakorisága ismét növekedett. Ennek következményeként a villamos szilárdság csökkent.

A májusi minimumot azonban nem érte el, a viszonylag rövid augusztusi magas relatív nedvességű szakasz ugyanis — szemben a márciustól májusig terjedő szakasszal — nem volt elegendő ahhoz, hogy a májusi minimum megismétlődhessen.

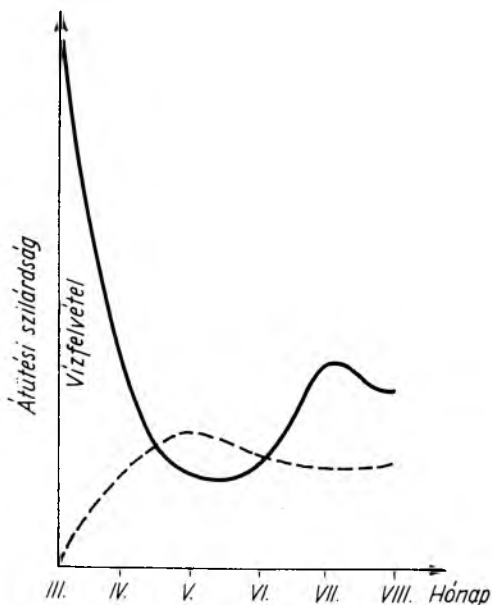
A korábbiakból tudjuk, hogy a technikai klímaterületek meglehetősen nagy, összefüggő szárazföldi területeket jelentenek. A klímatervezők intenzitása és bizonyos intenzitás gyakorisága, valamint annak évi alakulása egy technikai klímaterületen belül, egyes helyek között igen különböző. Egyes földrajzi helyek klímája ebből kifolyólag összehatásában is különböző. Nézzük meg ezt a kérdést is egy vizsgálati példa kapcsán.

A 6-5. ábrán a nedves-trópusi klímaterülethez (TH) tartozó két helyiség (Kanton és Szin-lun) évi csapadékeloszlását ábrázoltuk; a 6-6. ábrán pedig azoknak a napoknak a számát (havonta), amikor a relatív légnedvesség 80% és a hőmérséklet egyidejűleg 20°C felett volt, naponta legalább 12 órán át.

Az említett két helyen klímavizsgálatnak alávetett VH jelű 0,6 kW-os féigzárt motorok szigetelési ellenállás értékeinek változását a 6-7. ábrán mutatjuk be.

Az ábrák tanulmányozásakor megfigyelhetjük, hogy a motorok szigetelési ellenállása a csapadékosabb és az év nagyobb részében nedves Hajnan szigeten levő Szin-lun-i kitételi állomáson kedvezőtlenebben alakult. A hajnani kitételi helyen a magas relatív légnedvesség hosszabb ideig fennáll, fellépésének gyakorisága nagyobb, mint a kantoni kitételi helyen. A „hajnani motorok” szigetelésének regenerálódása éppen ezért lényegesen kedvezőtlenebb, és amint az ábrából láthatjuk, a szigetelési ellenállás a kétéves vizsgálati időszak alatt is eső tendenciát mutat.

A fenti gondolatokat összefoglalva — amelyeket az előzőekben két példával is illusztráltunk — megállapíthatjuk, hogy nedves-trópusi klímaterületen belül az egyes

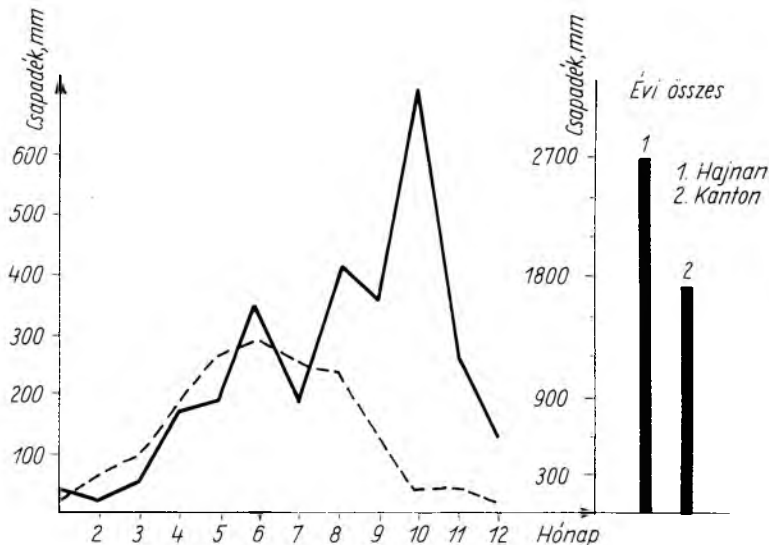


6-4. ábra. Az átütési szilárdság (folytonos vonal) és a vízfelvétel (szaggatott vonal) változásának jellege a nedves periódusban, Kantonban

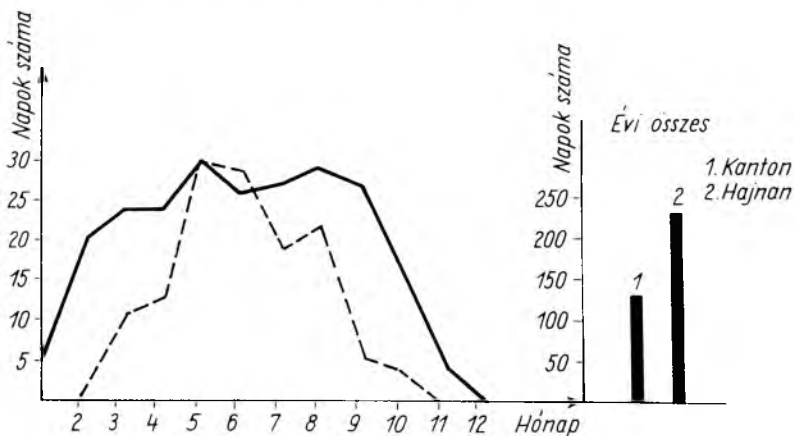
helységek klímája összehasonlítva különböző lehet, és e különbség — a nedves igénybevétel szigorúságát illetően — a magas légnedvesség gyakoriságában és annak időbeni alakulásában rejlik.

A nedves trópusi klímaterületen található országok, illetve helységek nedves-meleg klímaigénybevétele között lehet olyan különbség, amelyet a villamos berendezés szigetelésének megválasztásakor, a védelem kialakításánál, valamint a villamos alkatrészek, illetve berendezések mesterséges nedves-meleg klímaigénybevétele szigorúsági fokának megállapításakor figyelembe kell venni.

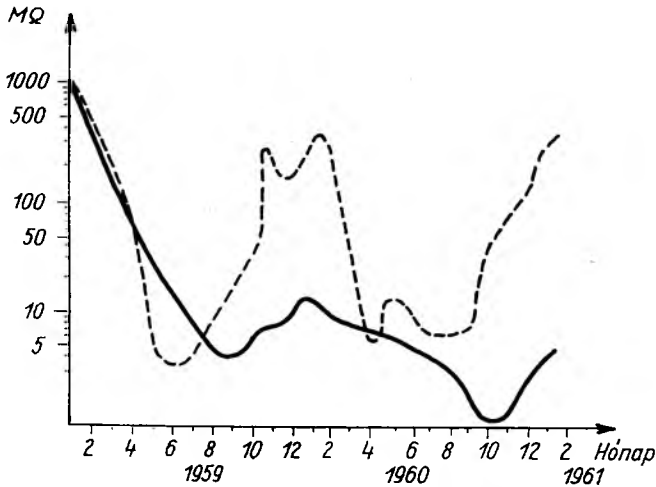
Ahhoz, hogy adott nedves trópusi hely igénybevételenek szigorúságát — első sorban nagyfotosságú trópusi létesítmények tervezésekor — figyelembe tudjuk



6-5. ábra. A csapadék mennyiségének évi alakulása Kantonban (szaggatott vonal) és a Hajnan szigetén levő Szin-lun-ban (folytonos vonal)



6-6. ábra. Azoknak a napoknak a száma (havonként), amelyeken a relatív légnedvesség 80%, a hőmérséklet egyidejűleg 20 °C felett volt legalább 12 órán át (Kanton: szaggatott vonal; Hajnan: folytonos vonal)



6-7. ábra. VH jelű féligzárt motorok szigetelési ellenállásának alakulása két éves természetes nedves-trópusi kitétel folyamán (Kanton: szaggatott vonal; Hajnan: folytonos vonal)

venni, berendezéseink működési helyére vonatkozóan ismernünk kell a relatív légnedvesség és a hőmérséklet alakulására vonatkozó részletesebb adatokat.

4.2 A léghőmérséklet kérdése

A 6-2., 6-3. és 6-4. táblázatokból láthatjuk, hogy a vonatkozó szabványok a hőmérsékletértékekre vonatkozóan egyrészt az *abszolút maximális hőmérsékletet*, másrészt az *évi maximális hőmérsékletek sokévi átlagát* szerepeltetik. Villamos berendezéseinket az esetek nagy részében nem célszerű csak e maximális hőmérsékletértékek alapján méretezni.

A villamos berendezés élettartamát (elsősorban a szigetelés szempontjából nézve a kérdést) döntően a tartósan fellépő nagy hőmérséklet szabja meg.

A szigetelési osztály szerinti hőmérséklet elvileg a névleges teljesítménnyel üzemelő berendezés szigetelésének tartós hőmérséklete lehet. Berendezéseink nagy része viszont egyrészt nem üzemel állandóan névleges terheléssel, másrészt a hőmérséklet az év folyamán nem állandó, s viszonylag ritkán azonos a méretezésnél alapul vett maximális környezeti hőmérséklettel.

Az igen ritkán előforduló maximális környezeti hőmérsékletértékekkel azoknál a berendezéseknél, illetve alkatrészeknél célszerű számolni, amelyeknél a ritkán, vagy rövid időre fellépő környezeti hőmérséklet — a berendezés túlhőmérsékletével együtt természetesen — károsodást okozhat, vagy olyankor, ha az alkatrész fontossága, a berendezés rendeltetése nagyobb fokú biztonságot követel meg.

Az *abszolút maximális hőmérséklet* igen ritkán, 50 évben egyszer előforduló hőmérséklet [9].

Az *évi maximális hőmérsékletek sokévi átlaga* is igen ritkán előforduló hőmérsékletérték.

A *hőmérséklet napi átlagának extrém értéke* a vizsgált (pl. a legmelegebb) hónapban olyan hőmérsékletérték, amellyel már néhány napon keresztül, bár csak a nap néhány órájában, számolni kell.

A sokévi havi átlaghőmérséklet-értékkel a tárgyi hónapban (pl. a legmelegebb) már tartósan számolhatunk.

Logikusnak látszik az előzőekben tárgyalt hőmérséklet-értékekkel úgy számolni, hogy azok különböző ideig tartó igénybevételeket képviselnek, tehát:

az abszolút maximális hőmérséklet abszolút csúcs-igénybevételt, az évi maximális hőmérsékletek sokévi átlaga csúcs-igénybevételt, a napi átlagok (a tárgyi hónapban) extrém értéke rövid idejű igénybevételt, a sokévi havi átlag (a tárgyi hónapra vonatkozóan) tartós idejű igénybevételt.

6-5. táblázat
A legmelegebb hónap hőmérsékletadatai

Klimaterület	Abszolút csúcsigénybevétel		Csúcsigénybevétel	Rövid idejű igénybevétel	Tartós idejű igénybevétel
	Feketetest hőm. °C	A levegő hőmérséklete °C-ban			
Száraz-meleg	90	55	45	38	32
Extrém száraz-meleg	95	60	50	42	38
Nedves-meleg	80	47	40	38	31
Váltakozó nedves-meleg ...	90	55	45	40	35
Arab-Perzsa öböl	95	50	45	41	36
A vonatkozó klímaterület	Feketetest hőmérséklete	Abszolút maximális hőmérséklet (50 évben egyszer)	Az évi extrém hőmérséklet sokévi átlaga	A hőmérséklet napi átlagának extrém értéke	A hőmérséklet „sokévi” havi átlaga

Fenti gondolatokat a [9] munka nyomán, a DIN 50019-ben, a legmelegebb hónapra vonatkozó adatok felhasználásával a 6-5. táblázatban dolgoztuk fel. A környezeti hőmérséklet megválasztására vonatkozó gondolatokat szovjet szakemberek vizsgálati tapasztalatai is igazolják [10].

Javaslat villamos berendezések környezeti hőmérsékletének megválasztására vonatkozóan:

- Trópusi klímára kerülő berendezések tervezésénél, vagy esetleg hazai kivitelű berendezések trópusi klímára való alkalmassá tételénél (teljesítménykorrekció) figyelembe kell venni a különböző átlaghőmérséklet-értékek gyakoriságát, hatásuk idejét. Célszerű ezért az e pontban ismertetett abszolút csúcs, csúcs, rövid idejű, valamint tartós igénybevételek képzése, a 6-5. táblázatban a DIN 50019 Blatt 2-ből nyert, a legmelegebb hónapra vonatkozó hőmérsékletadatokkal.
- Berendezéseinket a berendezés rendeltetése, üzeme, tervezett élettartama, a konstrukció, a gyártási feltételek stb. mérlegelése alapján kiválasztott, a 6-5. táblázatban ismertetett valamelyik igénybevételre, s a hozzá tartozó környezeti hőmérsékletre kell méretezni. A vonatkozó előírásokat berendezés-csoportonként kell elkészíteni.
- Olyan fontos villamos berendezés, vagy komplex objektum méretezéséhez, amelynek felállítási helye ismeretes, vagy speciális mikroklíma-körülmények között üzemel, az illető helyre, vagy mikroklímára vonatkozó konkrét adatokat kell beszerezni és a méretezést ezek alapján kell elvégezni.

5. Összefoglalás

Trópusi klímára kerülő villamos berendezés tervezése, védelmének kialakítása igen összetett probléma. A tervezőnek először meg kell ismerni a várható klímaigénybevételt, annak szigorúságát.

Az anyagok, védelmek kiválasztásánál, a méretezésnél a konstruktőr szembeállítja a várható igénybevételt és az anyagokra, védelmekre, alkatrészekre, azoknak a szóban forgó igénybevétellel szemben tanúsított viselkedésére vonatkozó vizsgálati adatokat.

A méretezéshez szükséges adatok kiválasztásához, az anyag és védelem megválasztásával kapcsolatos döntéshez azonban még sok egyéb szempontot is figyelembe kell venni, így:

a berendezés rendeltetését, fontosságát;

a berendezés üzemét, üzemeltetési körülményeit;

a tervezett élettartamot (vagy az erkölcsi elévülés idejét);

az alkatrészek megbízhatóságát (a gyártás megbízhatóságát, új, vagy régi konstrukció);

egyéb gazdaságossági kérdéseket.

Ahhoz, hogy a tervező mindent mérlegelve helyesen dönthessen, a tárgyra vonatkozóan alapos ismeretekkel kell rendelkeznie, mind a klimatológiai ismereteket, mind az anyagok, védelmek viselkedésére vonatkozó ismereteket illetően. A cikk kapcsán ezért áttekintettük a klimatológiai ismereteket. Foglalkoztunk a szabványban rendelkezésre álló klímaadatok kritikájával, s javaslatot tettünk méretezés céljára alkalmas adatokra vonatkozóan.

Irodalom

- [1] *MSZ 8887/1 lap A* Föld technikai klímafelosztása.
- [2] *MSZ 8887/3 lap A* klímaállóság jelölése.
- [3] *MSZ 8887/4 lap* Fogalom-meghatározások.
- [4] *DIN 50019 Blatt 2.* Freiluftklimat. Klima-Daten.
- [5] *KGST 271.446-65* szabványtervezet. Klimatikus tényezők és az elektromos berendezések szempontjából fontos klímaterületek.
- [6] *TGL 9200 Blatt 1* Klimaschutzarten.
- [7] *IEC TC 50 (Secretariat) 118 irat.* Javasolt függelék a 68-1 számú IEC közleményhez.
- [8] *IEC TC 50 (Germany) 103 irat.* A Német Nemzeti Bizottság megjegyzései az 50 (Secretariat) 118-as iratra.
- [9] *Dr. Böer, W.—Burchard, H.—Gaster, F.—Dr. Hoffmann, G.—Dr. Kerner, G.—Dr. Reidat, R.—Richter, K.:* Technik und Klima. METALL 15. évf. (1961) 5., 6.
- [10] *W. A. Bajew:* Arbeitsbedingungen industrieller Elektroausrüstungen in tropischer Ausführung bezüglich der Temperatur des umgebenden Mittels. (Information über Probleme des Klimaschutzes, 1964/3.)
- [11] *J. Strümpel:* Dimensionierung und Lebensdauer elektrischer Maschinen beim Einsatz in tropischen Klimaten. (Information über Probleme des Klimaschutzes, 1964/1.)
- [12] *Rychtera, M.—Reinhartova, I.:* Zur Frage der elektrotechnischen Klassifikation des Klimas. (Studia geoph. et geod. 4 — 1960.)
- [13] *Rychtera, M.:* Elektromos berendezések környezeti hatásokra történő leromlásának elemzése és ezek reprodukálása laboratóriumi viszonyok között. (Tropizálási konferencia — 1965. XII. 13—15. Budapest — kiadványa.)
- [14] *Sulyok J.:* Nedves-trópuson üzemben levő berendezések szigetelőanyagainak kiválasztása. Elektrotechnika, 1965. 11. szám.

VILLAMOS
BERENDEZÉSEK
LABORATÓRIUM

7.

Néhány szempont a hálózati feszültség szabályozásához

DR. GÁDOR LÁSZLÓ

ÖSSZEFOGLALÁS

A villamos energiácsoztó hálózaton minőségi követelmény és gazdaságilag is indokolt a hálózat különböző pontjain fellépő feszültségingadozások mértékét szabályozással csökkenteni. A névlegestől eltérő feszültségen felhasznált villamosenergia rontja a felhasználás gazdaságosságát, az okozott kár az eltérő feszültségen fogyasztott energia mennyiségétől és a feszültségeltéréstől függ. A szabályozás kritériumát a feszültségeltérés okozta kár és a szabályozás költségének a szembeállításával, a feszültségingadozások statisztikája alapján lehet meghatározni. A VKI-ban kifejlesztett ATSZ típusú szabályozó működési jelleggörbéje az így meghatározott törvényszerűséget követi.

НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕЧАНИЯ ПО РЕГУЛИРОВАНИЮ СЕТЕВОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Др. Л. Гадор

Резюме

В сетях распределения электроэнергии уменьшение колебаний напряжения в разных точках сети при помощи регулировки является вопросом качества, а также требованием экономии. Электроэнергия, которая используется с напряжением, отклоняющимся от номинального, ухудшает экономичное применение употребляемой энергии, а потери зависят от количества употребляемой энергии и отклонения напряжения. Критерий регулировки определяется сравнением потерь из-за отклонений напряжений и расходов регулировки на основании статистики отклонений напряжений. Рабочая характеристика регулятора типа „АТС”, разработанного Исследовательским Институтом по Электропромышленности, действует по закономерности, определенной таким же образом.

EINIGE BEMERKUNGEN ZUR REGELUNG DER NETZSPANNUNG

Dr. L. Gádor

Zusammenfassung

Es ist eine Qualitätsforderung und auch wirtschaftlich begründet das Mass der an verschiedenen Stellen des elektrischen Verteilungsnetzes auftretenden Spannungsänderungen durch Regelung herabzusetzen. Die bei einer von ihrem nominellen Werte abweichenden Spannung verbrauchte elektrische Energie verdirbt die Wirtschaftlichkeit des Verbrauches; der verursachte Schaden hängt von der Menge der bei der abweichenden Spannung verbrauchten Energie und von der Spannungsabweichung ab. Das Kriterium der Regelung kann durch Gegenüberstellung des von der Spannungsabweichung verursachten Schaden und der Kosten der Regelung bestimmt werden, auf Basis der Statistik der Spannungsänderungen. Die Arbeitscharakteristik des im Forschungsinstitut der Elektrischen Industrie entwickelten Spannungsreglers Typ ATSZ folgt dem obigen Gesetze.

SOME ASPECTS OF THE REGULATION OF NETWORK VOLTAGES

Dr. L. Gábor

Summary

If is a qualitative requirement and also economically justified to decrease the rate of fluctuations of voltage appearing at several spots of the network by regulation. The electrical energy consumed at a voltage different from its nominal value spoils the economy of consuming, the caused damage being dependent on the quantity of the energy consumed at the different voltage and on the voltage difference. The criterion of the regulation can be determined by comparing the damage caused by the voltage difference with the costs of the regulation, on the basis of the statistics of the voltage-fluctuations. The working diagram of the voltage regulator type ATSZ, developed in the Research Institute of the Electrical Industry follows the law established above.

1. Bevezetés

Az erőművek rendszere a hurkolt elosztóhálózaton keresztül villamos energiát bocsát a fogyasztók rendelkezésére, mégpedig „házhoz szállítva”. A villamos energiának a fogyasztás helyén a kívánt mennyiségben és minőségben kell rendelkezésre állnia, hogy a fogyasztók igényeit optimálisan elégítse ki. Ez utóbbi — nevezetesen a minőségi követelmény — a villamos energia előírt jellemzőinek, a frekvenciának és a feszültségnek a névleges értéken tartásában elégül ki.

A bonyolult villamosenergia-rendszer frekvencia tekintetében mereven összekapcsolt egység, ezért a frekvencia tartását a villamos energia előállítási helyein, az erőművekben célszerűen és az egész hálózatra kiterjedően meg lehet oldani.

Feszültség szempontjából a terhelt hálózat tarka képet nyújt, a vezetékeken létrejövő feszültségváltozások miatt a feszültségek a fogyasztási helyeken se nem névleges értékűek, se nem egyformák. Akkor sem, ha az erőművekben biztosítjuk a feszültségek névleges, vagy egyforma értékét. Nem érünk tehát célt azzal, hogy az erőművekben szabályozással biztosítjuk a névleges feszültséget, vagy valamiféle egyforma, a vezetékek átlagos feszültségeséseit figyelembe vevő, a névlegesnél nagyobb feszültséget. Az erőművek szolgáltatta feszültség azonos szintűre történő szabályozása a helyes teherelosztás érdekeit sem szolgálja.

A táppontok, a fogyasztási pontok, az azokat összekötő hálózat, a pontonkénti terhelések viszonylag rendszertelen változása, a betáplálás ehhez valamennyire igazodó, ugyancsak táppontonként változó alakulása így egy bonyolult rendszert ad, amelyben a feszültségeloszlás térképének nívóvonalai csak itt-ott fekszenek a névleges feszültség szintjében, másutt hol alatta, hol fölötte járnak.

A fogyasztók ellátását a névleges feszültségű villamos energiával ideálisan úgy lehetne biztosítani, hogy minden fogyasztó mellé egy-egy feszültség szabályozót helyezünk. A szabályozás ilyen mérvű decentralizációja azonban nyilvánvalóan gazdaságtalan és rendkívüli módon megnövelné a villamos energia költségeit.

A gyakorlatban úgy juthatunk gazdaságosan közelebb a kívánt célhoz, hogy a feszültségtérkép fel-le hullámzó domborzatát néhány jól kiválasztott ponton megfogjuk és állandó értékre szabályozzuk, vagy még célszerűbben a megfogott pontot a környezetében fennálló terhelési viszonyokhoz igazodó szintre hozzuk, vagyis magasabbra, ha nagy a terhelés és a fogyasztóhoz vezető vonalon nagyobb a várható feszültségesés, alacsonyabbra a kevésbé terhelt időszakokban.

csökkenése a névlegestől ΔU -val eltérő feszültség alkalmazása esetén $(\Delta U)^2$ -tel arányos.

Azonos terhelést feltételezve tehát körülbelül ugyanannyi kár származik abból, hogy a feszültségeltérés 9%-ról 10%-ra emelkedik, mintha a névleges feszültség helyett 4% feszültségeltéréssel tartjuk az üzemet.

A feszültségeltérés okozta kár természetesen függ az üzemelő berendezések mennyiségétől. Bár az egyes fogyasztóknál jelentkező kár a berendezés természetétől is függ, például más az izzólámpa és más egy ventilátormotor esetén, statisztikusan nem járunk el helytelenül, ha a kárt egyszerűen az eltérő feszültségen fogyasztott energiával vesszük arányosnak.

3. A feszültség szabályozás kritériuma

A statisztikusan változó feszültség és terhelés együtt határozza meg tehát a gazdaságos üzem feltételeit. A szabályozó működési kritériumának a meghatározását tárgyalva egyelőre tekintsük a terhelést állandónak, például állandóan névlegesnek. Ekkor a feszültségeltérés okozta kár egyszerűen a feszültségeltérés négyzetével és az idővel arányos, értéke a T idő alatt:

$$\Delta G = a \int_0^T (\Delta U)^2 dt, \quad (6)$$

ahol a az arányossági tényező.

Térjünk át viszonyított mennyiségekre:

$$u = \frac{\Delta U}{U_n}, \quad (7)$$

ahol U_n a névleges feszültség. Egyszerűség kedvéért írjunk ΔG helyett g -t. Ezzel

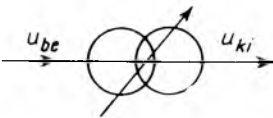
$$g = a \int_0^T u^2 dt. \quad (8)$$

A szabályozás céljára a hálózaton gyakorlatilag kivétel nélkül lépcsős szabályozót használunk. A szabályozás költsége a szabályozónak az értékcsökkenése és üzemköltsége, illetőleg vesztesége, ebben jut kifejezésre a beruházás, a karbantartás és működés közvetlen költsége.

Az értékcsökkenés és üzemköltség a működéssel függ össze, a szabályozó, ha sohasem kapcsol át, gyakorlatilag „örökéletű”. Így a szabályozás költsége az átkapcsolás költségében jut kifejezésre.

Legyen b egy átkapcsolás költsége. A szabályozó felállítása és működése akkor gazdaságos, ha a szabályozás révén a feszültségeltérésből származó kár nagyobb mértékben csökken, mint amennyi a szabályozás költsége.

7-1. ábra. A feszültség-szabályozó vázlata



Legyen u_{be} a viszonylagos feszültségeltérés a szabályozó bemenetén, vagyis a szabályozatlan oldalon, u_{ki} a szabályozó kimenetén, vagyis a szabályozott oldalon (7-1. ábra).

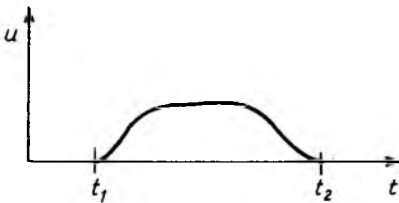
A szabályozás mérsékli a feszültségeltérés mértékét, az ezzel T idő alatt elért csökkenés a feszültségeltérés okozta kárban:

$$a \int_0^T u_{be}^2 dt - a \int_0^T u_{ki}^2 dt = a \int_0^T (u_{be}^2 - u_{ki}^2) dt. \quad (9)$$

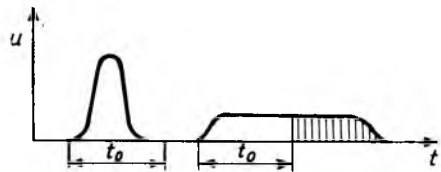
Tegyük fel, hogy a szabályozónak ez alatt az idő alatt k_T -szer kellett átkapcsolnia ahhoz, hogy a kisebb eltéréssel jellemzett u_{ki} létrejöjjön. A szabályozás akkor gazdaságos, ha

$$k_T b < a \int_0^T (u_{be}^2 - u_{ki}^2) dt. \quad (10)$$

Kérdés, hogyan kell beállítani a szabályozót ahhoz, hogy az átkapcsolások száma ne legyen nagyobb a (10) egyenlőtlenségben meghatározottnál.



7-2. ábra. Feszültségeltérés az idő függvényében



7-3. ábra. Rögzített időkélesztés esetén nem a feszültségeltérés kárterülete, hanem annak tartama határozza meg a működést

Vegyünk figyelembe egy viszonylag rövid ideig tartó, $(t_2 - t_1)$ tartamú feszültségeltérést a 7-2. ábra szerint. Ha erre a feszültségeltérés-impulzusra

$$a \int_{t_1}^{t_2} u^2 dt < b, \quad (11)$$

akkor már egyetlen átkapcsolás többre kerül, mint a feszültségeltérésből eredő kár. Ez nyilvánvalóvá teszi időkélesztés alkalmazásának a szükségességét, a szabályozónak a 7-2. ábra szerinti rövid ideig tartó eltérésre nem szabad működnie. És még egy: a késleltetés nem egyszerűen egy meghatározott, rögzített időköz, hanem az az időköz, amely alatt a feszültségeltérés kezdetének időpontjától számítva a (8) egyenlet jobb oldalán álló integrál értéke valamilyen meghatározott állandó értéket, például a b értékét eléri. Ha nem így volna, akkor a 7-3. ábrán bemutatott két azonos, $a \int u^2 dt < b$ értékű feszültségimpulzus közül az első nem váltana ki működést a t_0 késleltetésű szabályozóból, a második azonban igen, noha a gazdaságosság egyik impulzus esetében sem indokolja a működést.

Szabad-e minden esetben átkapcsolni, ha

$$a \int_{t_1}^{t_2} u^2 dt > b ?$$

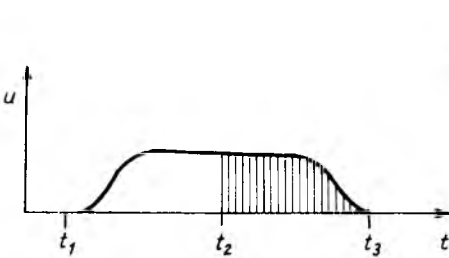
Legyen a 7-4. ábra szerinti feszültségeltérés olyan, hogy éppen

$$a \int_{t_1}^{t_2} u^2 dt = b, \quad (12)$$

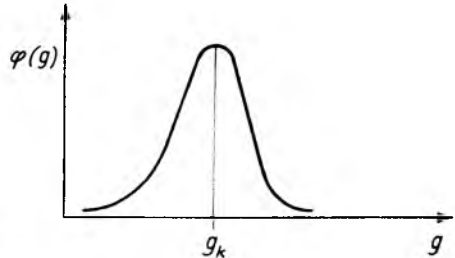
és feltételezzük, hogy az átkapcsolással a szabályozó teljesen megszünteti a feszültségeltérést. Ha nem volna szabályozás, akkor a kár

$$a \int_{t_1}^{t_3} u^2 dt$$

volna. A t_2 időben végrehajtott szabályozás következtében a vonalkázott kárterület



7-4. ábra. Ha az átkapcsolás t_2 időben következik be, a $t_2 - t_3$ közti kárterület a megtakarítás



7-5. ábra. Az egyes feszültségeltérések g kárterülete a normál eloszlást követi

elesik, de megjelenik az átkapcsolás költsége, tehát akkor érdemes átkapcsolni, ha

$$a \int_{t_1}^{t_2} u^2 dt + b < a \int_{t_1}^{t_2} u^2 dt,$$

ill.

$$b < a \int_{t_2}^{t_3} u^2 dt. \quad (13)$$

Nem az az érdekes tehát, mennyi volt a megelőző feszültségeltérés és az ebből származó kár, hanem hogy mi volna az átkapcsolást követően a kár, ha az átkapcsolás nem következett volna be. Érzékelő szervünknek tehát a jövőbe kell látnia, ha a működés egyértelmű gazdaságosságát feltételül kötjük ki.

Műszaki berendezéseinkben a jóslásra két megoldást ismerünk, az extrapolációt és a statisztikát. Lényegében az extrapoláció is valószínűségi döntést jelent, mert a folyamat tendenciájából, a deriváltból valószínűsíti a jövőben kialakuló értéket. Az elosztó hálózat feszültségváltozásai általában lassú folyamatok, a derivált értéke rendszerint kisebb annál, hogysen a szabályozásban könnyen felhasználhatnánk. Ennek ellenére a deriváltat is figyelembe vevő szabályozási kritérium is elképzelhető. Nagyobb reménnyel kecsegtet a statisztikus jóslás.

Tételezzük fel, hogy az előforduló feszültségeltérések az általuk okozott kárt tekintve normális eloszlású halmazt alkotnak. Vagyis ha általában

$$g_i = a \int_{t_i}^{t_i'} u^2 dt \quad (14)$$

az i -edik esetben bekövetkező, $(t'_i - t_i)$ ideig tartó feszültségeltérés és az összes vizsgált eltérések n száma elég nagy, akkor egy adott g előfordulási valószínűsége:

$$\varphi(g) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(g-g_k)^2}{2\sigma^2}}, \quad (15)$$

ahol g_k közepes és egyben leggyakoribb értéke g -nek (7-5. ábra), σ a közepes négyzetes eltérés.

Vegyük továbbra is azt az egyszerűsítő feltevést, hogy a szabályozó egyetlen lépésben megszünteti a feszültségeltérést. Ha a szabályozás feltételét úgy választjuk, hogy még nagy g értékeknél se következzen be működés, akkor a hálózat szabályozatlanul jár, a feszültségeltérésből eredő kár teljes egészében megjelenik és akkora, mintha minden alkalommal a közepes kár jelentkeznék:

$$G = ng_k. \quad (16)$$

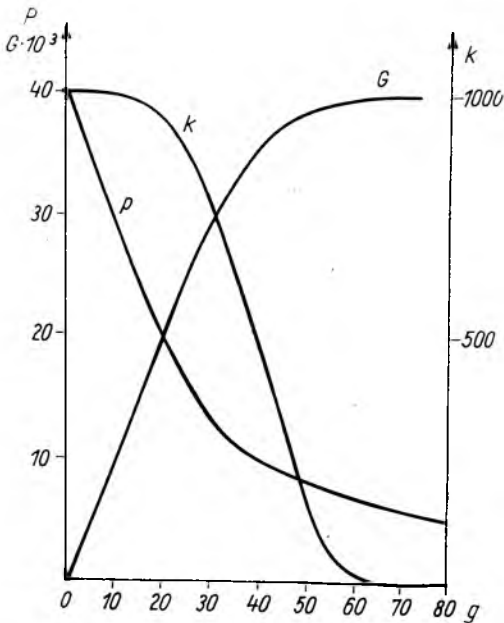
Amint a működés feltételeként megszabott g -t fokozatosan csökkentjük, csökken a feszültségeltérésből eredő G kár, növekszik a kapcsolási szám, amint ez a 7-6. ábrán látható. A példaként felvetett esetben $g_k = 40$, $n = 1000$. Az ábrán látjuk a $G_{\max} - G$ megtakarításnak egy kapcsolásra vontakoztatott $p = \frac{G_{\max} - G}{k}$ értékét, amely együtt nő a kapcsolási szám emelkedésével.

Ha tehát egy adott feszültségeltérés-halmaz kiszabályozása egyáltalán gazdaságos, akkor azt úgy érdemes megtenni, hogy minden egyes feszültségeltérést kiszabályozunk, mégpedig a lehető legkisebb késleltetéssel. Ekkor az elérhető megtakarítás kapcsolásonként éppen g_k . Emlékeztetbe idézzük, hogy mindez azzal a feltételezéssel érvényes, hogy a szabályozó egyetlen működéssel teljesen megszünteti a feszültségeltérést és a késleltetés sohasem egyszerűen időben, hanem az $\int u^2 dt$ -ből visszaszámított feszültségfüggő tartamban értendő.

A halmaz kiszabályozásának a feltételét az elmondottakból igen egyszerűen megfogalmazhatjuk: a feszültség szabályozás akkor gazdaságos, ha

$$b < g_k. \quad (17)$$

A hálózaton a gyakorlatban két független, nagyjában normális eloszlású halmazra számíthatunk, a rövid átmeneti feszültségeltérések halmazára és a feszültség rendszeres, napi ingadozására. A rövid, átmeneti eltérésekre valószínűleg nem eléggül ki a (17) feltétel, ezért a szabályozási feltételt úgy kell megszabni, hogy a beállít



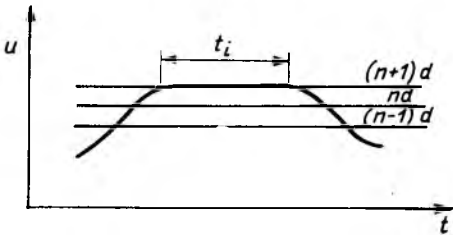
7-6. ábra. Jellemzők alakulása a késleltetés beállításától függően; G feszültségeltérésből eredő kár, k átkapcsolások száma, $p = \frac{G_{\max} - G}{k}$ megtakarítás kapcsolásonként

tott késleltetés ezeket az átmeneti eltéréseket szabályozatlanul hagyja és csak a feszültség lassú változásait küszöbölte ki. Konkrétan adott hálózat szabályozásának a megoldásához azonban el kell végezni a szóban forgó hálózaton fellépő feszültség-ingadozások statisztikus elemzését. A hálózaton bekövetkezett nagyobb változások után ezt az elemzést ismételtelen el kell végezni.

4. Lépcsős szabályozás

Eddigi vizsgálatainkat azzal az egyszerűsítő feltételezéssel végeztük, hogy a szabályozó működése egyszerre megszünteti a feszültségeltérést. Vizsgáljuk most meg a lépcsőzés szerepét.

Legyen a szabályozási lépcsők feszültségugrása viszonyított nagyságokban mérve d . Ha fennáll feszültségeltérés, akkor időnként a feszültség az $(n+1)d$ szinten időzik (7-7. ábra). Az $(n+1)d$ nagyságú feszültségeltérések t_i tartamai jó közelítéssel ugyancsak normális eloszlásúnak tekinthetők.



7-7. ábra

Lépcsős szabályozó feszültségeltérése

A feszültségeltérésekből származó kár, ha a feszültség t_i ideig az $(n+1)$ -ik lépcsőnek megfelelő értékkel tér el névleges értékétől:

$$g_{i(n+1)} = a(n+1)^2 d^2 t_i. \quad (18)$$

A $g_{i(n+1)}$ közepes és egyben legvalószínűbb értéke:

$$g_{k(n+1)} = a(n+1)^2 d^2 t_k, \quad (19)$$

ahol t_k az $(n+1)d$ nagyságú eltérés közepes és egyben legvalószínűbb tartama.

Ha a szabályozás működik, a feszültséget d szinttel viszi közelebb a névleges értékhez. Ezen a szinten a feszültségeltérésekből eredő kár:

$$g_{in} = an^2 d^2 t_i. \quad (20)$$

A t_i időszak elején bekövetkezett szabályozás következtében előállott megtakarítás:

$$\begin{aligned} g_{i(n+1)} - g_{in} &= a(n+1)^2 d^2 t_i - an^2 d^2 t_i = \\ &= a(2n+1)d^2 t_i. \end{aligned} \quad (21)$$

A szabályozást akkor gazdaságos végrehajtani, ha a kapcsolás költsége kisebb, mint a megtakarítás:

$$b < a(2n+1)d^2 t_i. \quad (22)$$

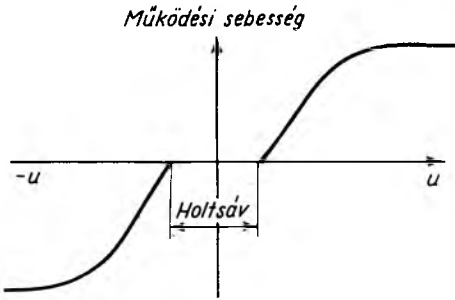
A 3. pontban a (17) összefüggés kapcsán végzett megfontolások alkalmazásával elmondhatjuk, hogy szabályozni akkor érdemes — és akkor minden feszültségeltérést érdemes kiszabályozni —, ha

$$b < a(2n+1)d^2 t_k. \quad (23)$$

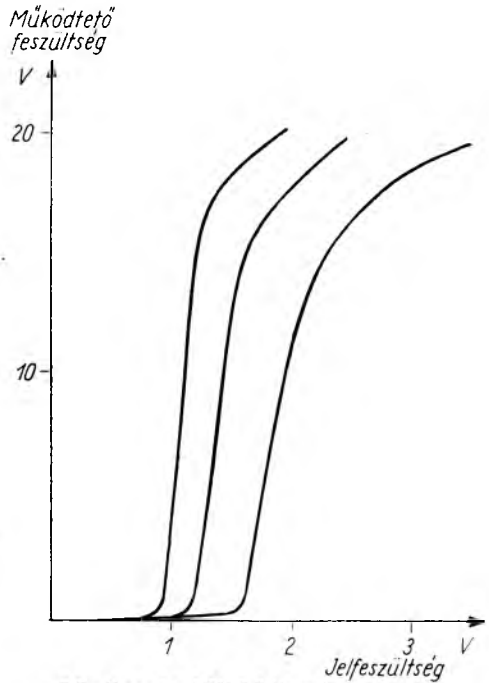
Ebben az összefüggésben t_k maga is alá van vetve a valószínűségi eloszlás törvényének, kis feszültségeltérések statisztikusan hosszabb ideig állnak fenn, mint a nagyok. A kis feszültségeltérések tartományában a Gauss-féle eloszlási görbe tetőpontja közelében járunk, néhány százalék eltérésig t_k gyakorlatilag azonosnak

vehető. Ebben a tartományban — minthogy d is állandó — az egyenlőtlenség jobb oldala n -nel arányosan nőne. A gazdaságosság azt kívánja, hogy az egyenlőségtől ne távolodjunk messzire, ezért ugyanilyen arányban az a arányossági szorzót csökkentjük, ami a szabályozó működési sebességének a növelését, egyébként változatlan körülmények között pedig az egymást követő kapcsolások időközének a rövidítését jelenti.

Nagyobb feszültségeltérések esetén t_k csökkenése ellensúlyozza n növekedését, ezért nincs értelme a működési sebességet tovább fokozni. A szabályozó működési jelleggörbéje tehát célszerűen a 7-8. ábra szerinti alakot ölti. A holt-sáv biztosítja a lépcsős szabályozó lengésmentes működését, az egyenesen emelkedő szakasz jellemzi a kis eltérések tartományát, s ez a nagy eltéréseknél át-megy az állandó sebességű működésbe.



7-8. ábra
Működési jelleggörbe kívánt menete



7-9. ábra. Az ATSZ-3 típusú
feszültségszabályozó működési jelleggörbéje

A 7-9. ábra mutatja a VKI-ben kidolgozott ATSZ-3 típusú feszültségszabályozó automatika ténylegesen felvett jelleggörbéjét, amely jó egyezést mutat a 7-8. ábra görbéjének a menetével. A működési sebesség állításával megvan a mód arra, hogy a szabályozandó hálózat tényleges feszültségviszonyainak statisztikus elemzésével megkeressük a legalkalmasabb üzemmódot.

Nem vettük figyelembe fejtegetéseinkben azt a körülményt, hogy a gazdaságosság nemcsak a feszültségeltéréstől, hanem a fogyasztás mértékétől is függ. Ez egyszerűen egy további faktort visz az összefüggésbe, amelynek figyelembevétele a gyakorlati kivitelben sem okoz nehézséget. Teljes mértékű érvényre juttatása azonban nem célszerű, mert ez azt jelentené, hogy az üresen járó hálózat szabályozásától teljesen eltekintünk. Ha ezt nem akarjuk, akkor a terhelést csak bizonyos fokú korrekció formájában szabad alkalmaznunk.

Irodalom

- [1] *P. Ailleret*: L'introduction de la mesure dans la notion de la qualité du service d'une distribution d'électricité et son intérêt on point de vue de la conception des réseaux, Bull. SFE, 1956.
- [2] *H. Langer*: Regelungstechnischer Einsatz des Transformators. ETZ-A **81** (1960).
- [3] *P. Gaussens—P. Gazelet*: Le réglage de la tension dans les réseaux de distribution. Bull. SFE. 1960.
- [4] *Ja. D. Barkan*: Nyekoterüje voproszû automatizacii regulirovanija naprazsenija. Elektricesesztvo, 1963.
- [5] *Gádor L.*: Elosztó hálózati feszültségszabályozás. Villamosság, 1964.

8.

A diósgyőri durvahengermű szabályozott hajtásainak néhány áramköri kérdéséről

MLINKÓ TAMÁS

ÖSSZEFOGLALÁS

A diósgyőri durvahengermű rekonstrukciója során a régi elavult hengermű helyén új blokk- és bugasor létesült. Az 1 000 000 t kapacitású blokkosor és a bugasor hajtásai szabályozott egyenáramú Ward—Leonard hajtások. A Ward—Leonard generátorokat amplitdinnek gerjesztik, amelyekbe feszültségszabályozó és áramkorlátozó szabályozó körök avatkoznak be.

A cikk részletesen foglalkozik a két szabályozókört felépítő elemek működésével, külön-külön és együttesen. Ezen belül a nagyteljesítményű, kapcsolóüzemű tranzisztoros erősítő és amplitdin együttes működésével, továbbá a hibajelkorlátozó és áramkorlátozó küszöbkapcsolások felépítésével és működésével.

НЕСКОЛЬКО ВОПРОСЫ ПО ЦЕПЯМ ТОКА РЕГУЛИРУЕМЫХ ПРИВодОВ ДИОШДЬЕРСКОГО КРУПНОСОРТНОГО СТАНА

Т. Млинко

Резюме

В процессе реконструкции диошдьерского крупносортового прокатного стана на месте устаревших прокатных станов сооружены новый блюминг и слябинг. Приводы блюминга и слябинга производительностью 1 000 000 т представляют собой регулируемые приводы постоянного тока системы Вард—Леонард. Генераторы системы Вард—Леонард возбуждаются амплидинами (электромашинными усилителями), в работу которых вмешиваются регулируемые контуры регулятора напряжения и ограничителя тока.

В статье подробно рассматривается работа элементов двух регулируемых контуров по отдельности и вместе, в том числе совместная работа мощного транзисторного усилителя в ключевой режиме и амплидина, а также построением и работой предельных соединений ограничителя ошибки и ограничителя тока.

EINIGE PROBLEME IN STROMKREISEN DER GEREGLTEN ANTRIEBE DES GROB WALZWERKES IN DIÓSGYŐR

T. Mlinkó

Zusammenfassung

Bei der Rekonstruktion des Grobwalzwerkes in Diósgyőr wurde anstelle des alten Walzwerkes eine neue Block- und Knüppelstrasse errichtet. Als Antrieb der Block- und Knüppelstrasse mit einer Kapazität von 1 000 000 t dienen geregelte Gleichstrom-Ward—Leonard-Aggregate. Die Generatoren werden durch Amplidyne erregt, die durch Spannungsregler und Strombegrenzer-Regelkreise gesteuert werden.

In der Arbeit wird die Arbeitsweise der die beiden Regelkreise aufbauenden Elemente einzeln und gemeinsam, darunter die Zusammenarbeit des transistorisierten Hochleistungsschaltverstärkers und der Amplidyne, weiterhin der Aufbau und die Arbeitsweise der Fehlsignal-Begrenzer und Strombegrenzer-Schwellenschaltungen ausführlich behandelt.

SOME PROBLEMS OF CIRCUITS OF CONTROLLED DRIVE OF THE DIÓSGYŐR HEAVY MILL.

T. Mlinkó

Summary

During the reconstruction of the Diósgyőr heavy mill, new blooming and billet mills were constructed instead of the old obsolete mill. The blooming mill of 1 000 000 t output and the billet mills are driven by controlled d. c. Ward—Leonard drives. The Ward—Leonard generators are excited by amplidynes, with built — in voltage control and current limiting circuits.

The operation of the elements in the two control circuits — as well as their common action is detailed. The paper describes further the cooperation of the high-power switchgear amplifier and of the amplidyn, as well as the construction and operation of the threshold connections for limiting error signals and currents.

Az 1964-ben üzembehelyezett 1 000 000 t kapacitású diósgyőri durvahengermű — amely jelenleg hazánk legnagyobb meleghengerműve — az első, amit a tervezéstől a kivitelezésig magyar szakemberek készítettek. A hengermű tíz blokkosori és hét bugasori egyenáramú hajtása alapvetően azonos felépítésű, szabályozott Ward—Leonard-hajtás. Az egységes felépítésű szabályozott hajtások a különböző technológiai követelményeknek megfelelő kiegészítő berendezésekkel, illetve szabályozókörökkel vannak ellátva.

Intézetünk feladata volt a szabályozókörök egységeinek kifejlesztése, és a KGMTI-ben készült előzetes tervek modellezés útján való ellenőrzése. A kétéves munka alatt kilencféle szabályozóegységet és négyféle tápegységet fejlesztettünk ki, amelyekből közel 300 db került beépítésre a 17 egyenáramú hajtás szabályozókörébe.

A hajtásokkal szemben támasztott villamos követelményeket elsősorban a hengermű nagy termelékenysége határozta meg. Az elsődleges szempontot a hajtások rövid ideig tartó tranziens üzemállapota képviselte. A görgősorok és a sorvonómotor fordulatszámának pontos tartása, illetve a fordulatszámok szinkronozása másrendű követelmény volt.

Valamennyi hajtás Ward—Leonard-hajtás, ahol a külső gerjesztésű egyenáramú motor armatúrafeszültségét szabályozzuk a generátor gerjesztőkörét tápláló egy vagy több, az igényeknek megfelelően kapcsolt amplidin segítségével.

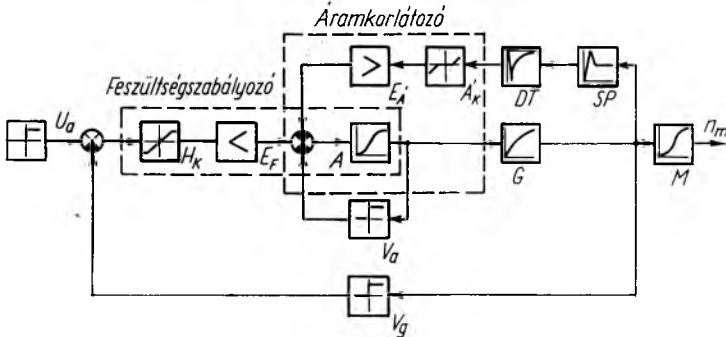
A lehető legrövidebb indítási, fékezési és reverzálási idők elérésének céljából a Ward—Leonard-gépcsoport gépei a mindenkor gerjesztéshez tartozó, maximálisan megengedett armatúrárámmal vannak igénybevéve tranziens üzemállapotban.

A szabályozás elsődleges feladata, hogy a gépcsoport terhelőárama ne lépje túl a kommutációs határáramot, de a tranziens üzemállapot ideje alatt a megengedett mértékben azt megközelítse és állandó értéken tartsa. Az állandó árammal történő indítás, fékezés és irányváltás a leggazdaságosabb. Az ideális indítási áram felfutó és lefutó szakaszának meredekségét a nagyteljesítményű generátorok (100 kW, 4000 kW) nagy gerjesztőköri időállandói erősen csökkentik. Ennek a hatásnak a csökkentésére a szabályozások nagy forszírozási lehetőséggel rendelkeznek.

A hajtások szabályozásának azonos felépítésű részét a 8-1. ábrán levő hatásvázlat szemlélteti. A szabályozás két főrészből áll, feszültség szabályozásból és áramkorlátozásból. Mindkét szabályozó rész az amplidinen keresztül avatkozik be. A következőkben a szabályozás e két főrészének problémáit vizsgáljuk meg.

A feszültség szabályozó kör feladata a motor armatúrafeszültségének állandó értéken tartása. Tranziens üzemállapotban az A amplidin a G generátor forszíro-

zásának megfelelő gerjesztést szolgáltatja. Az amplidin gerjesztését tranziens üzemiállapotban *HK* hibajel korlátozó oly módon korlátozza, hogy az adott alapjelhez tartozó armatúrafeszültségnek megfelelő hibajel többszörösét engedi meg az amplidin bemenetén. Az alapjel és elsősorban a hibajelkorlátozó teljesítményszintjének csökkentése miatt nagyteljesítményű tranzistoros erősítőt alkalmaztunk. Az *EF* feszültségszabályozó erősítő nemcsak jó teljesítményerősítést, hanem szabályozástechnikailag jól felhasználható feszültségerősítést is biztosít.



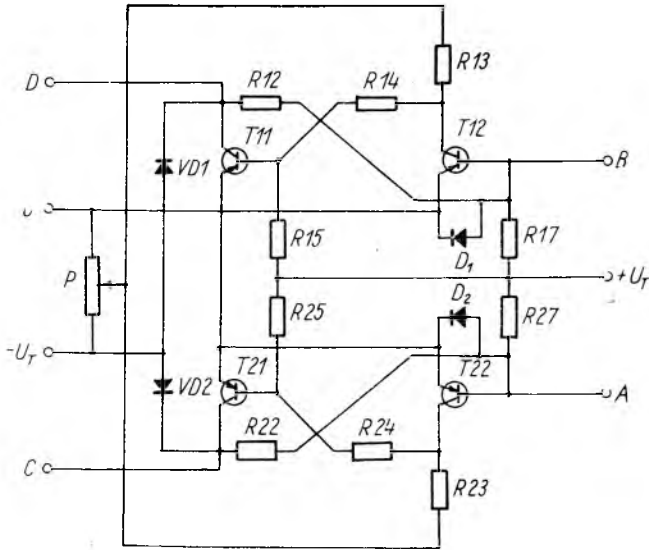
8-1. ábra. Az egyenáramú hajtások szabályozásának hatásvázlata

Az áramkorlátozás a hajtás állandósult üzemiállapotban nem működik. A működtető jelet a Ward—Leonard-gépcsoport segédpólusairól és a *DT* differenciáló transzformátorról vesszük le. Az így létrejött feszültségjel a terhelőárammal arányos, és az *ÁK* áramkorlátozó küszöbfeszültségének értékét elérve a jelnek a küszöbfeszültség fölötti része az *EA* tranzistoros erősítőn keresztül ellentétes értelemmel avatkozik be, mint a feszültségszabályozó. Az *EÁ* erősítő teljesen megegyezik az *EF* feszültségszabályozó erősítővel, de itt az erősítő alkalmazását elsősorban a feszültségerősítés indokolja.

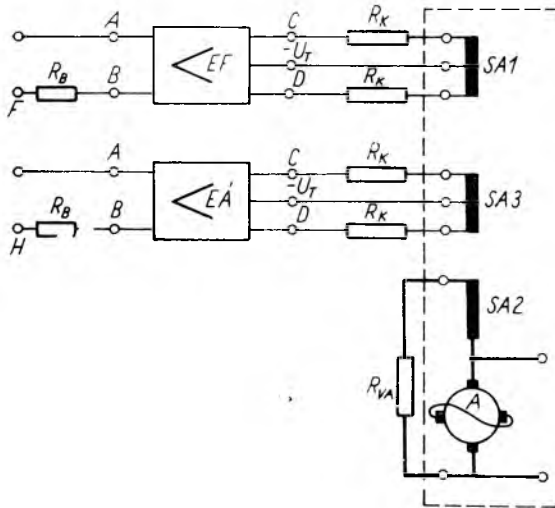
Mielőtt rátérnénk a két szabályozókör részletes ismertetésére, meg kell vizsgálnunk, hogy az amplidin és a tranzistoros erősítők működés szempontjából hogyan valósítják meg a kívánt szabályozástechnikai követelményeket.

A 8-2a ábrán látható a nagyteljesítményű, kapcsolóüzemű, ellenütemű tranzistoros erősítő kapcsolása, a 8-2b ábrán az erősítők bekötése és a 8-2c ábrán az erősítő fényképe. Az erősítő két szimmetrikus fele azonos módon, de ellenfázisban működik. Az erősítő elvi alapját a két tranzistorból álló egy stabil állapotú billenőkör alkotja. Az erősítő nyugalmi állapotában a *T11* és *T21* végtranzisztor teljesen nyitva van, és az erősítő *C* és *D* kimenő pontjaira kötött terheléseken keresztül egyenlő nagyságú I_C és I_D áramok folynak. Ha az erősítő *A*, *B* bemenő pontjaira megfelelő értékű R_B bemenő ellenálláson keresztül egyenfeszültséget kapcsolunk, akkor az erősítőre jutó egyenfeszültség polaritásától függően valamelyik fele átbillen, és az átbillent rész végtranzisztorának árama zérus lesz. Az erősítő átbillenéséhez akkora U_1 feszültségre van szükség, ami a bemenő tranzisztor teljes kinyitáshoz szükséges bázisáramot biztosítani tudja az erősítő R_B bemenő ellenállásán, továbbá a vezérelt tranzisztor emitter—bázis-diódáján, és az ellenütemű rész bemenő tranzisztorának emitter—bázisát áthidaló diódán keresztül. Az erősítő gyors átbillenését az *R12* és *R22* pozitív visszacsatolást adó ellenállások biztosítják. Az át-

billent félrész bemenő tranzisztorának bázisáramának egy része a lezárt végtranzisztor nagy kollektorfeszültsége miatt a pozitív visszacsatolást biztosító ellenálláson folyik, és ennek következményeképpen az erősítő bemenetén levő U_1 feszültség hatására a bemenő tranzisztoron annak nyitvatartásához szükséges bázisáramnál nagyobb



8-2a ábra. Nagyteljesítményű kapcsolóüzemű tranzisztoros erősítő kapcsolási rajza

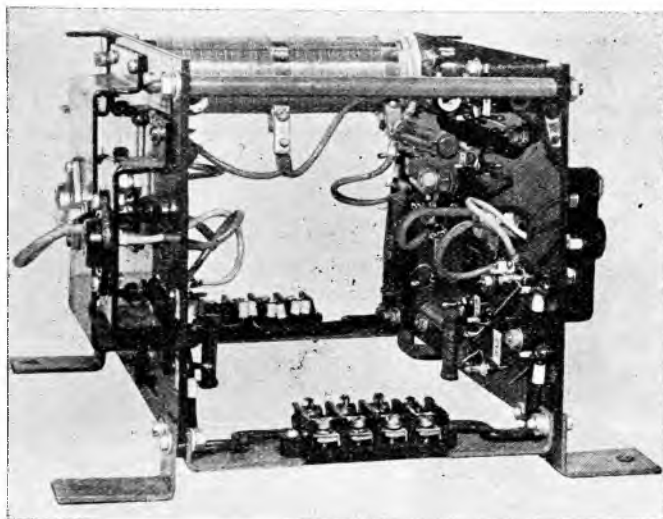


8-2b ábra. Az amplidin és a tranzisztoros erősítők kapcsolási rajza

bázisáram folyik. Az erősítő visszabillenéséhez szükséges U_2 feszültség tehát a pozitív visszacsatolást biztosító ellenállás értékétől függően kisebb lesz U_1 feszültségnél. Az U_1 és U_2 feszültségek közötti eltérés az erősítő billenési sávzélessége.

Ha az erősítő bemenetére 50 Hz-es egyfázisú váltakozófeszültséget kapcsolunk, akkor a hálózati frekvenciának megfelelően felváltva billen át az erősítő két fele.

A 8-2b ábrán láthatjuk, hogy az amplidin $SA1$ és $SA3$ vezérlőtekercesei közép- megcsapolásúak, és R_k kollektorköri ellenálláson keresztül kapcsolódnak az erősítőkre. Ha az erősítők bemenetén csak váltakozófeszültség van, akkor a két féltekerces gerjesztése azonos nagyságú és ellentétes irányú lesz, az amplidin eredő



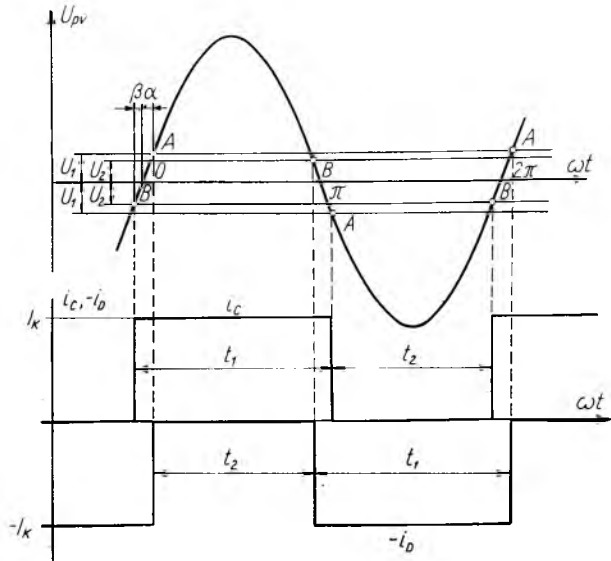
8-2c ábra. A tranzistoros erősítő

gerjesztése pedig zérus. Ha az erősítő bemenetére egyenfeszültségre superponált váltakozófeszültséget kapcsolunk, akkor a két félrész be- és kikapcsolt állapotának aránya az egyenfeszültség nagyságától és irányától függően megváltozik. Az erősítő kimenetére kapcsolt amplidin-vezérlőtekerces gerjesztése az erősítő bemenetére kapcsolt egyenfeszültséggel változtatható.

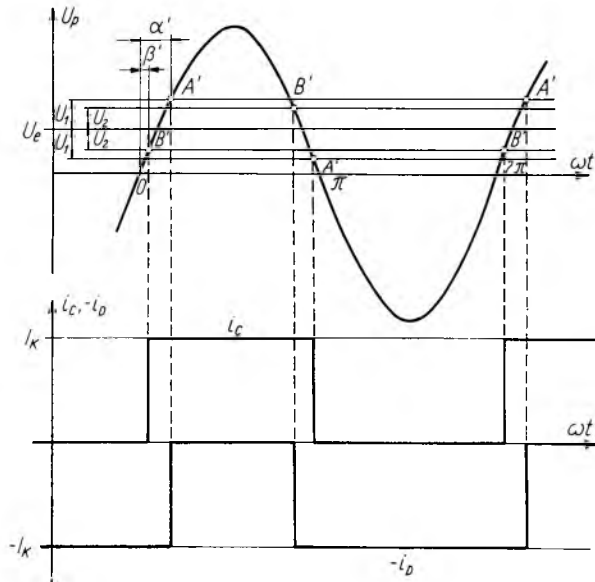
Vizsgáljuk meg először, hogy az amplidin vezérlőtekercesét tisztán ohmos terhelésnek tekintve, milyen összefüggéseket állapíthatunk meg az erősítő kimenő és bemenő jele között.

A 8-3a ábra az erősítő bemenetén levő U_{pv} váltakozófeszültséget és az erősítő kimenetén levő i_c és i_D kollektoráramokat ábrázolja a fenti föltételezéssel. Az erősítő U_1 feszültségnél billen át és U_2 feszültségnél billen vissza. Az átbillenési pontokat A -val, a visszabillenési pontokat B -vel jelöltük. A billenési fázisszöveget mindig a váltakozófeszültség nullátmenetétől kiindulva számítjuk, jelen esetben α és β . Az ábrából látható, hogy i_c és i_D középvértéke azonos, tehát az általuk létrehozott eredő gerjesztés zérus.

A 8-3b ábrán a váltakozófeszültségre U_c egyenfeszültség superponálódik. Az átbillenési pontok A' , ill. B' , szögük α' , ill. β' . Az ábrából látható, hogy i_D középvértéke nagyobb, mint i_c középvértéke.



8-3a ábra. A tranzisztoros erősítő bemenetére kapcsolt váltakozófeszültség és a terhelőáramok az amplitudin-vezérlőtekercsek inductivitásának elhanyagolásával



8-3b ábra. A tranzisztoros erősítő bemenetére kapcsolt, szuperponált egyen- és váltakozófeszültség és a terhelőáramok az amplitudin-vezérlőtekercsek inductivitásának elhanyagolásával

Az erősítő jelleggörbéjének felrajzolásához számítsuk ki i_c és i_D áramok középértékét a vezérlő U_e egyenfeszültség függvényében annak feltételezésével, hogy az áramimpulzus amplitúdójának értéke I_k .

$$I_{Ce} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_c(\omega t) d\omega t;$$

$$I_{Ce} = \frac{I_k}{2\pi} \left[\arcsin \frac{U_e + U_1}{\hat{U}_{pv}} + \arcsin \frac{U_e + U_2}{\hat{U}_{pv}} \right];$$

$$I_{De} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_D(\omega t) d\omega t;$$

$$I_{De} = -\frac{I_k}{2\pi} \left[\arcsin \frac{U_e - U_1}{\hat{U}_{pv}} + \arcsin \frac{U_e - U_2}{\hat{U}_{pv}} \right];$$

ahol \hat{U}_{pv} a váltakozófeszültség csúcserőértéke.

A következőkben a számítások egyszerűsítése érdekében feltételezzük, hogy $U_1 = U_2 = U_0$.

Az eredő egyenkomponens $I_e = I_{Ce} - I_{De}$ alapján:

$$I_e = \frac{I_k}{\pi} \left[\arcsin \frac{U_e + U_0}{\hat{U}_{pv}} + \arcsin \frac{U_e - U_0}{\hat{U}_{pv}} \right]. \quad (1)$$

A 8-3b ábrából látható, hogy

$$\alpha' = \arcsin \frac{U_e + U_0}{\hat{U}_{pv}},$$

$$\beta' = \arcsin \frac{U_e - U_0}{\hat{U}_{pv}}.$$

A jelleggörbe (1) egyenlete csak $U_e + U_0 \leq \hat{U}_{pv}$ tartományban érvényes. Az egyenlőség azt fejezi ki, hogy az erősítő egyik felének vezérelhetősége megszűnt, tehát ennek a félnek a végtranzisztora állandóan nyitva van.

Ha $U_e + U_0 > \hat{U}_{pv}$, akkor

$$I_e = \frac{I_k}{2} + \frac{I_k}{\pi} \arcsin \frac{U_e - U_0}{\hat{U}_{pv}}. \quad (2)$$

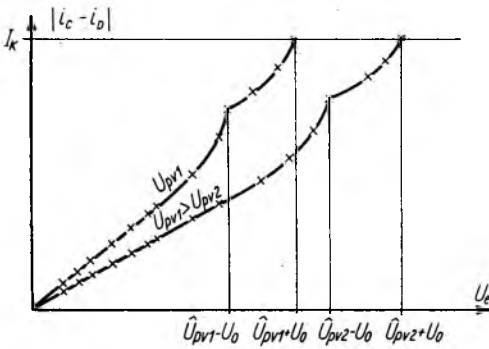
A jelleggörbének tehát töréspontja lesz. A töréspontban az eredő egyenáramú komponens megkapjuk, ha (2) egyenletbe a vezérlőfeszültség határfeltételét behelyettesítjük.

$$I_e = \frac{I_k}{2} + \frac{I_k}{\pi} \arcsin \frac{\hat{U}_{pv} - 2U_0}{\hat{U}_{pv}}. \quad (3)$$

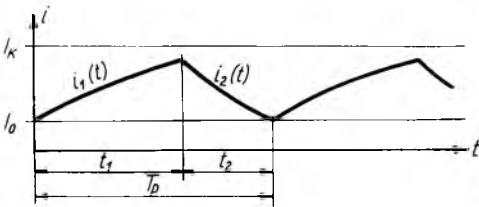
Mivel az $U_0 \ll \hat{U}_{pv}$, a levezetett végeredményekből látható, hogy az erősítő jelleggörbéje közel \arcsin függvény szerint változik, és erősítési tényezője a váltakozófeszültség amplitúdójával fordítottan arányos a kezdeti lineáris szakaszon.

Az erősítő jelleggörbéje ohmos terhelés esetén a 8-4. ábrán látható. A számított jelleggörbén néhány mért pontot megjelöltünk, ezek mutatják a számított és mért értékek igen jó egyezését.

Az amplidin gerjesztőtekererse az erősítő számára induktív terhelést jelent. Állandósult állapotban — ha egy vezérlőtekeres egyik felét a hozzá tartozó erősítő-



8-4. ábra. A tranzistoros erősítő jelleggörbéi különböző nagyságú váltakozófeszültségek esetén



8-5. ábra. Az amplidin fél vezérlőtekeresének áramalakja

Az amplidin vezérlőtekereséből és az előtétellenállásból álló áramkör lineáris, amelynél a feszültségekre és áramokra a szuperpozíció elve érvényes. Ezért a vezérlőtekeresen átfolyó áram egyenáramú összetevőjét a feszültség egyenáramú összetevője és az áramkör ellenállása határozza meg. Tehát:

$$U_{ek} = U_T \frac{t_1}{T_p}, \quad (5)$$

ahol U_{ek} az erősítő egyik felén a kimenő feszültség egyenösszetevője, U_T pedig az erősítő tápfeszültsége. Ebből:

$$I_c = \frac{U_{ek}}{R_k + R_s}, \quad (6)$$

ahol R_s az amplidin-vezérlőtekeres egyik felének ellenállása.

Ez egyben azt is jelenti, hogy a 8-4. ábrán látható jelleggörbék induktív terhelésre is érvényesek.

A 8-4. ábra jelleggörbéi mutatják, hogy az erősítő csak korlátozott kivezérlésig tekinthető lineárisnak. Az amplidin-vezérlőtekeres és az erősítő paramétereinek

féllel együtt, a vezérlőtekereselés többi részétől elkülönítve vizsgáljuk — a féltekeres árama a 8-5. ábrán látható függvény szerint változik. A valóságos áramgörbe a két féltekeres kölcsönös induktivitása miatt a billenési sávon belül kismértékben eltér az ábra szerinti görbétől, de ez a szimmetria miatt a vezérlőtekeres eredő gerjesztését nem befolyásolja. A T_p periódusidő t_1 bekapcsolási és t_2 kikapcsolási időből áll. A féltekeres árama mindkét irányban ugyanakkora T időállandó szerint exponenciálisan változik, az áram pillanatértékének minimuma I_0 .

Minthogy I_0 értékére a későbbiekben szükségünk lesz, állandósult állapotra az $i(t) = i(t + T_p)$ feltétel alapján az alábbiak szerint írjuk fel az összefüggést:

$$[I_0 + (I_k - I_0)(1 - e^{-t_1/T})]e^{-t_2/T} = I_0,$$

és ebből az

$$I_0 = \frac{I_k(1 - e^{-t_1/T})e^{-t_2/T}}{1 - e^{-T_p/T}} \quad (4)$$

kifejezést kapjuk.

megfelelő megválasztásával azonban elérhető, hogy az erősítőt a szükséges maximális kivezérlésig csak a lineáris szakaszon dolgoztassuk.

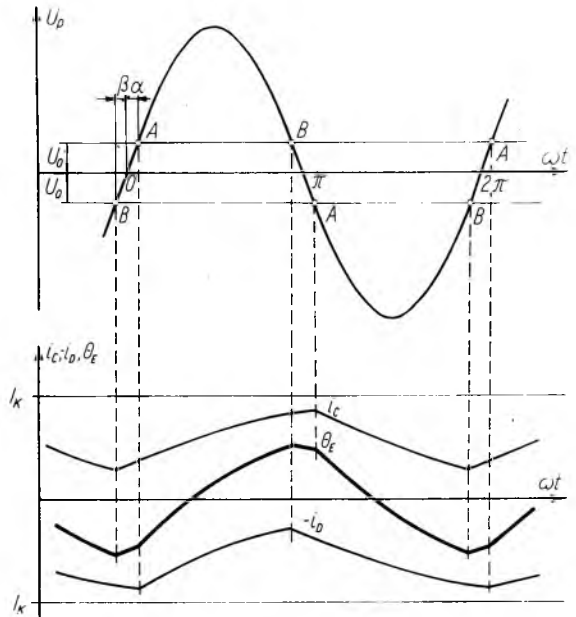
A 8-6a és 8-6b ábrák az induktivitás figyelembevételével mutatják meg a vezéreltlen és vezérelt erősítő áramalakjait és az eredő gerjesztést. Látható, hogy az amplidin gerjesztésében a hálózati frekvenciának, mint alapharmonikus-frekvenciának megfelelő, jelentős nagyságú váltakozó gerjesztés van jelen. Ennek hatására az amplidin kapcsolófeszültségének is jelentős nagyságú váltakozófeszültségű komponense lesz, ami a Ward—Leonard-generátor nagy időállandója miatt nem hoz létre váltakozóáramú gerjesztőáram-komponenst, de az amplidin állórészében jelentős vasvesztést és armatúrájában járulékos tekercsvesztést idéz elő a keresztköri váltakozóáram jelenléte miatt.

A váltakozóáramú komponens hatásának megítélése szempontjából az alábbi feltételezések mellett kiszámítjuk az amplidin kapcsolófeszültségében megjelenő alapharmonikus-komponens amplitúdóját.

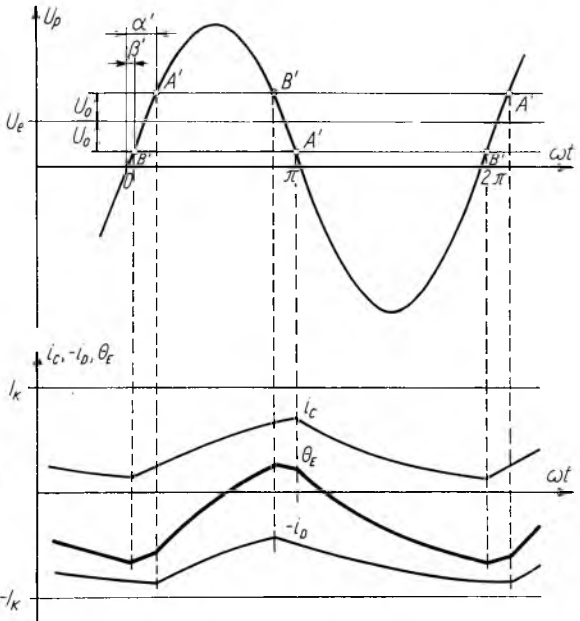
Belátható, hogy a tranzistoros erősítő négyszög-impulzusokból álló kimenő feszültségének váltakozó összetevője akkor maximális, ha az erősítő bekapcsolási és kikapcsolási ideje azonos, tehát

$$t_1 = t_2 = \frac{T_p}{2}. \quad (7)$$

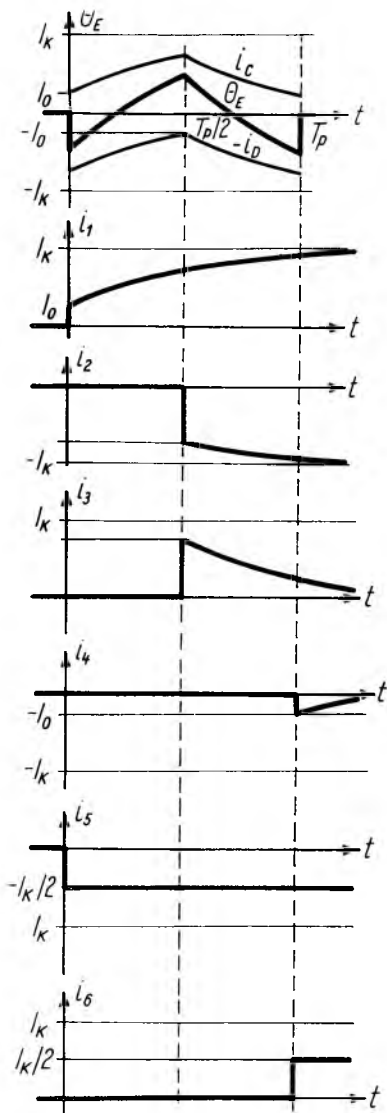
Ha a számítás egyszerűsítése érdekében az $U_0 = 0$ feltételt vezetjük be — ez az erősítő megfelelő méretezésével megvalósítható —, akkor ez az állapot az erősítő vezéreltlen állapota.



8-6a ábra. A tranzistoros erősítő bemenetére kapcsolt váltakozófeszültség és a terhelőáramok induktív terhelés esetén



8-6b ábra. A tranzistoros erősítő bemenetére kapcsolt, szuperponált egyen- és váltakozófeszültség és a terhelőáramok induktív terhelés esetén



8-7. ábra. Az egyszerűsített indukzív áramalak és félértékének összetevői

A 8-7. ábrán látható Θ_E időfüggvény egy periódusa a fenti egyszerűsítő feltételek figyelembevételével.

Az ábrából kitűnik, hogy $i_C(t)$ és $-i_D(t)$ függvények egymással párhuzamosak, s minden időpillanatban I_k értékkel különböznek egymástól.

A Θ_E eredő gerjesztéssel arányos $i(t)$ áramot az alábbiak szerint írhatjuk fel:

$$i(t) = i_C(t) - i_D(t) = i_C(t) + i_C(t) - I_k = 2 \left[i_C(t) - \frac{I_k}{2} \right]. \quad (8)$$

Az $i(t)$ eredő áram alapharmonikusát a bonyolult áramalak miatt közismert Fourier-sorbafejtés helyett a Laplace-transzformáció segítségével határozzuk meg.

Mint ismeretes, egy periodikus függvény előállítható

$$f(t) = \sum_{k=0}^{+\infty} (A_k \cos k\omega t + B_k \sin k\omega t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} S_k e^{jk\omega t}$$

alakban, ahol a komplex együttható

$$S_k = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} f(t) e^{-jk\omega t} dt = \frac{A_k - jB_k}{2}, \quad k = 1, 2, \dots$$

Ha az $f(t)$ periodikus függvény egyetlen periódusát $f_T(t)$ -vel jelöljük, akkor a komplex együttható:

$$S_k = \frac{1}{T_p} F_T(s)_{s=jk\omega}, \quad (9)$$

ahol

$$F_T(s) = \mathcal{L}f_T(t).$$

A komplex együtthatóból a valós együtthatókat az alábbiak szerint kapjuk meg:

$$A_k = 2 \operatorname{Re} S_k; \quad B_k = -2 \operatorname{Im} S_k.$$

A (8) egyenletből $i(t)$ kifejezésének felével számolunk, hogy az eddigi ábrázolási módnak megfelelő részábrákkal illusztrálhassuk a számítás menetét.

Az $i_C(t) - I_k/2$ függvény egy periódusának alakját 6 részfüggvény szuperponált eredőjének tekintjük, melyeket a 8-7. ábrán külön-külön ábrázoltunk.

$$i_{CT}(t) - I_k/2 = \sum_{i=1}^{i=6} i_i(t).$$

Az egyes részfüggvények az ábra alapján:

$$i_1(t) = [(I_k - I_0)(1 - e^{-t/T}) + I_0] I(t);$$

$$i_1(t) = [I_k(1 - e^{-t/T}) + I_0 e^{-t/T}] I(t);$$

$$i_2(t) = - \left[I_k - \left\{ I_k - \left[I_k \left(1 - e^{-T_p/2T} \right) + I_0 e^{-T_p/2T} \right] \right\} e^{-\left(t - \frac{T_p}{2} \right)/T} \right] I \left(t - \frac{T_p}{2} \right);$$

$$i_2(t) = - \left[I_k \left(1 - e^{-\left(t - \frac{T_p}{2} \right)/T} \right) - I_k \left(1 - e^{-\frac{T_p}{2T}} \right) + I_0 e^{-\frac{T_p}{2T}} \right] e^{-\left(t - \frac{T_p}{2} \right)/T} I \left(t - \frac{T_p}{2} \right);$$

$$i_3(t) = \left[I_k \left(1 - e^{-\frac{T_p}{2T}} \right) + I_0 e^{-\frac{T_p}{2T}} \right] e^{-\left(t - \frac{T_p}{2} \right)/T} I \left(t - \frac{T_p}{2} \right);$$

$$i_4(t) = - I_0 e^{-(t - T_p)/T} I(t - T_p);$$

$$i_5(t) = - I_k/2 \cdot I(t);$$

$$i_6(t) = I_k/2 \cdot I(t - T_p);$$

Az áram egy periódusának Laplace-transzformáltja:

$$I_T(s) = \mathcal{L} \sum_{i=1}^{i=6} i_i(t);$$

$$I_T(s) = I_k \left[\frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{1}{T}} - \frac{1}{s} e^{-sT_p/2} + \frac{1}{s + \frac{1}{T}} e^{-sT_p/2} - \frac{1}{2s} + \frac{1}{2s} e^{-sT_p} \right] +$$

$$+ I_0 \left[\frac{1}{s + \frac{1}{T}} - \frac{1}{s + \frac{1}{T}} e^{-sT_p} \right]; \quad (10)$$

Az alapharmonikusra vonatkozóan $k=1$, ennek megfelelően a (10) egyenletbe $s=j\omega$ behelyettesítésével és a törtekifejezések átalakításával

$$I_T(j\omega) = I_k \left[\frac{1}{j2\omega} - \frac{T}{1 + j\omega T} - \frac{1}{j\omega} e^{-j\omega T_p/2} + \frac{T}{1 + j\omega T} e^{-j\omega T_p/2} + \frac{1}{j2\omega} e^{-j\omega T_p} \right] +$$

$$+ I_0 \left[\frac{T}{1 + j\omega T} - \frac{T}{1 + j\omega T} e^{-j\omega T_p} \right]. \quad (11)$$

kifejezést kapjuk.

A valós együtthatókat a (11) egyenlet reális és képzetes részekre bontásával kapjuk meg:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} I_T(j\omega) &= I_k \left[-\frac{T}{1+\omega^2 T^2} + \frac{1}{\omega} \sin \omega T_p/2 + \right. \\ &+ \frac{T}{1+\omega^2 T^2} \cos \omega T_p/2 - \frac{T^2}{1+\omega^2 T^2} \sin \omega T_p/2 - \frac{1}{2\omega} \sin \omega T_p \left. \right] + \\ &+ I_0 \left[\frac{T}{1+\omega^2 T^2} \cos \omega T_p - \frac{\omega T^2}{1+\omega^2 T^2} \sin \omega T_p \right], \\ \operatorname{Im} I_T(j\omega) &= I_k \left[-\frac{1}{2\omega} + \frac{\omega T^2}{1+\omega^2 T^2} + \frac{1}{\omega} \cos \omega T_p/2 - \right. \\ &- \frac{\omega T^2}{1+\omega^2 T^2} \cos \omega T_p/2 - \frac{T}{1+\omega^2 T^2} \sin \omega T_p/2 - \frac{1}{2\omega} \cos \omega T_p \left. \right] + \\ &+ I_0 \left[-\frac{\omega T^2}{1+\omega^2 T^2} + \frac{\omega T^2}{1+\omega^2 T^2} \cos \omega T_p + \frac{T}{1+\omega^2 T^2} \sin \omega T_p \right]. \end{aligned}$$

A Fourier-sor valós együtthatóinak kiszámításakor figyelembe vesszük, hogy az $i(t)$ áram felével számoltunk. Az alábbiak szerint a kifejezések egyszerű alakúak lesznek. Figyelembe véve, hogy $\omega T_p = 2\pi$:

$$\sin \omega T_p = \sin \omega T_p/2 = 0,$$

$$\cos \omega T_p = 1,$$

$$\cos \omega T_p/2 = -1.$$

$$\operatorname{Re} I_T(j\omega) = -\frac{2I_k T}{1+\omega^2 T^2}, \quad (12)$$

$$\operatorname{Im} I_T(j\omega) = 2I_k \left[\frac{\omega T^2}{1+\omega^2 T^2} - \frac{1}{\omega} \right]. \quad (13)$$

Az együtthatók:

$$A_1 = 2 \frac{2}{T_p} \operatorname{Re} I_T(j\omega) = -\frac{4I_k T}{1+\omega^2 T^2} \frac{\omega}{\pi}, \quad (14)$$

$$B_1 = 2 \left[-\frac{2}{T_p} \operatorname{Im} I_T(j\omega) \right] = \frac{4I_k}{\pi} \left[1 - \frac{\omega^2 T^2}{1+\omega^2 T^2} \right]. \quad (15)$$

Ha az amplitudin vezérlőtekerésének időállandója akkora, hogy $\omega T \gg 1$, abban az esetben a valós együtthatók közelítőleg a következők lesznek:

$$A_1 \approx -\frac{4}{\pi} I_k \frac{1}{\omega T}; \quad B_1 \approx 0.$$

Az amplitudin gerjesztésének váltakozó komponense A_1 amplitúdójú koszinuszfüggvény, amely a 8-7. ábrán felvett koordináta-rendszer miatt negatív előjelű.

Az amplidin indukált feszültségét a keresztköri fluxus indukálja, ami arányos a gép telítetlen szakaszán a keresztköri árammal. Az amplidin keresztköre induktív kör, aminek megfelelően az amplidin második fokozatának átviteli függvénye:

$$Y_k(s) = \frac{A_k}{1 + sT_k} \quad (16)$$

A (16) összefüggés segítségével kifejezzük az amplidin indukált feszültségében fellépő váltakozó komponens alapharmonikusának csúcsertékét, melynek abszolút értékét U_{A1} -gyel jelöljük.

A következőkben megvizsgáljuk, hogy az U_{A1} feszültség hogyan aránylik az amplidin állandósult üzemiállapotban indukált egyenfeszültséghez, az U_A -hoz.

A hajtásokba beépített EMU 50 típusú amplidinek gerjesztőkörének időállandója (figyelembe véve a tranzisztoros erősítő kollektorköri ellenállásait) $T=0,01$ s, keresztköri időállandója $T_k=0,052$ s.

A váltakozó komponens csúcsertéke az időállandó behelyettesítése után:

$$U_{A1} = \frac{4}{\pi^2} I_k \frac{A_k}{(1 + \omega^2 T_k^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (17)$$

A hajtások tranzienst üzemiállapotában a forszírozás mértéke hatszoros, és ekkor az amplidinek kapocsfeszültsége $1,2 U_A$ névleges.

A tranzisztoros erősítőt a hibajelkorlátozó $0,5 I_k$ értékre korlátozza. Ennek megfelelően az amplidin kimenő egyenfeszültsége állandósult állapotban:

$$U_A = \frac{0,5 I_k A_k}{6};$$

A (17) egyenletbe behelyettesítve T_k értékét:

$$U_{A1} = \frac{0,4 I_k A_k}{16}.$$

Az alapharmonikus csúcsertéke: $U_{A1} = 0,3 U_A$.

A valóságban ennél jóval nagyobb lesz az amplitúdója a váltakozó komponensnek, mert a számításoknál figyelmen kívül hagyott azt, hogy az $1,2 U_{An}$ feszültséghez szükséges gerjesztés esetén az amplidin erősen a telítésben dolgozik.

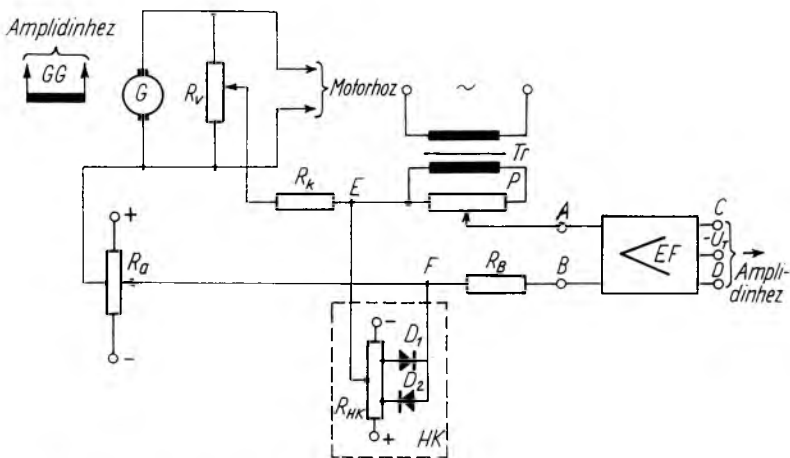
Látható az eddigiekből az, hogy igen nagy váltakozó komponens van jelen az amplidin feszültségében.

A szabályozás felépítése lehetőséget ad arra, hogy a váltakozóáramú komponens minimálisra csökkentésük. Amennyiben az EF és EA tranzisztoros erősítők bemenetére ellenfázisban kapcsoljuk rá az egyfázisú váltakozófeszültséget, az amplidin gerjesztésében megjelenő váltakozó komponensek szintén ellenfázisúak lesznek. Ha a két váltakozó komponens amplitúdóját azonosra választanánk és az erősítőket vezérlő hibajelek minden időpillanatban azonos nagyságúak és ellentétes előjelűek lennének, akkor az amplidin gerjesztése csak egyenáramú összetevőt tartalmazna.

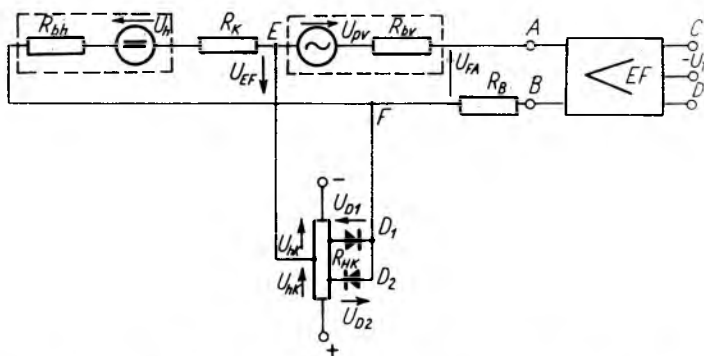
Az előbbi feltétel már eleve nem teljesül, mert a szabályozás megköveteli, hogy az áramkorlátozás nagyobb erősítéssel avatkozzon be, mint a feszültségszabályozás. A második feltételt maga a rendszer nem teljesíti.

A fenti módon alkalmazott váltakozófeszültségek tehát csökkentik az amplidin váltakozó gerjesztését, de meg nem szüntetik.

A feszültségszabályozó kör felépítését a 8-8a ábra szemlélteti. A hajtás beállított alapjelének (R_a feszültségosztó) és a G generátor visszavezetett feszültségének (R_v feszültségosztó) különbsége az EF erősítőt vezérlő egyenfeszültség. Az erősítő bemenetére kapcsoló váltakozófeszültséget a Tr transzformátorra kötött P feszültségosztóval lehet beállítani. A szabályozókörrel párhuzamosan kapcsolt HK hibajelkorlátozó limitálja a tranzienst üzemállapotban fellépő hibajel értékét. A tényleges hibajel és a korlátozott hibajel közti különbség az R_k ellenállásra jut.



8-8a ábra. A feszültségszabályozó kör felépítése



8-8b ábra. A feszültségszabályozó kör helyettesítő kapcsolási rajza

Az E és F pontra kapcsolódó hibajelkorlátozó a jól ismert telítési jelleggörbét valósítja meg, amennyiben az R_{HK} ellenállás alapterheléséhez képest elhanyagolható a diódákon keresztülfolyó áram. Tekintettel arra, hogy a szabályozás áramkörében váltakozófeszültség is jelen van, és a diódák a feszültség pillanatértékének megfelelő állapotban vannak, a hibajelkorlátozó beállítása adott maximális kivezéréshez nem a szokásos módon történik. A hibajelkorlátozó U_{HK} küszöbfeszültségének beállítása érdekében megvizsgáljuk részletesen a küszöbkapcsolás működését.

A 8-8b ábrán felrajzoltuk a 8-8a ábra szerinti szabályozókör helyettesítő kapcsolási vázlatát. A váltakozófeszültségű táplálást és a hibajelet előállító áramkört egy-egy ideális generátorral, és a vele sorbakapcsolt belső ellenállásával helyettesítettük. A szabályozókörben valamennyi potenciométer alapterhelése sokkal nagyobb a potenciométerről levett terhelésnél. Ennek megfelelően a helyettesítő kapcsolatban levő generátorok belső ellenállásai a saját generátor részére nem jelentenek terhelést.

A hibajelkorlátozó működését a 8-9a ábra szemlélteti. A 8-9a ábra görbéit a 8-8b ábrába berajzolt pozitív irányok figyelembevételével rajzoltuk meg, azonban a 8-9a ábra szerkesztésének megkönnyítése és az áttekinthetőség érdekében nem az U_{EF} , hanem a $-U_{EF}$ feszültséget ábrázoltuk. A 8-8b ábra alapján belátható, hogy az U_h egyenfeszültségnek és az U_{pv} váltakozófeszültségnek az E és F pontokra jutó része összeadódik, ezzel szemben az A és F pontokra jutó része kivonódik. Ennek a hatásá jól szemléltethető a 8-9a ábrán olyan módon, hogy a hibajelkorlátozó megszólalásának az ábrázolása céljából a koordináta-rendszer kezdőpontját függőlegesen az U_h egyenfeszültségnek az R_B és R_{bv} ellenállásokra jutó részével ($U_{FA} + U_{bv}$), az erősítő billenésének az ábrázolása céljából pedig az U_h egyenfeszültségének az R_B ellenállásra jutó részével (U_{FA}) eltoljuk. A tranzisztoros erősítő billenési pontjait A , B -vel, a szögeket α , ill. β -val jelöltük. Az EF pontok között megemelkedett váltakozófeszültség-komponenst szaggatottan jelöltük be. A vágási pontokat C -vel, a feszültségemelkedés kezdetét C_k -val jelöltük.

A korlátozó híd az alábbiak szerint működik.

Ha az EF pontok között levő feszültség pillanatértéke eléri az U_{HK} küszöbfeszültséget, a küszöbkapcsolás valamelyik előfeszített diódája kinyit és a nagyteljesítményű feszültségküzöb megakadályozza, hogy az EF pontok között tovább nőjön a feszültség. Az egyenfeszültség további növekménye R_k ellenállásra, a váltakozófeszültség további növekménye R_B ellenállásra jut. Addig, amíg a tranzisztoros erősítő hamarabb billen át, mint amikor a küszöbkapcsolás levág, a levágás nem befolyásolja az erősítő átbillenését. Az egyenfeszültség további növekedésekor elérjük azt az állapotot, amikor az erősítő egyik felének átbillenése éppen egybeesik a vágással ($A_{h1} \equiv C_{h1k}$ pontok; α_{h1} szög). A hibajel további növelésével β szög még nő, de az α már nem, sőt mint az ábrából is látható, kismértékben csökken.

Az egyenfeszültség (U_h) nagyobb értékeinél, amikor a hibajelkorlátozó az erősítő átbillenésénél korábban szólal meg, az F és A pontok között fellépő váltakozófeszültség a hibajelkorlátozó megszólalása utáni emelkedő szakaszában közel párhuzamosan fut az U_{pv} váltakozófeszültség görbéjével. Az erősítő billenési pontjai növekvő egyenfeszültség hatására $A_{h1} - A_H$ és $B_{h2} - B_H$ görbéken haladnak A_H , ill. B_H pontokig.

Az ábrába berajzoltuk a hibajelnek az $A - F$ pontokra jutó határértékeit (U_{FAh1} és U_{FAh2}), amelyeknél az erősítő egyik, ill. másik felének megszűnik a vezérelhetősége.

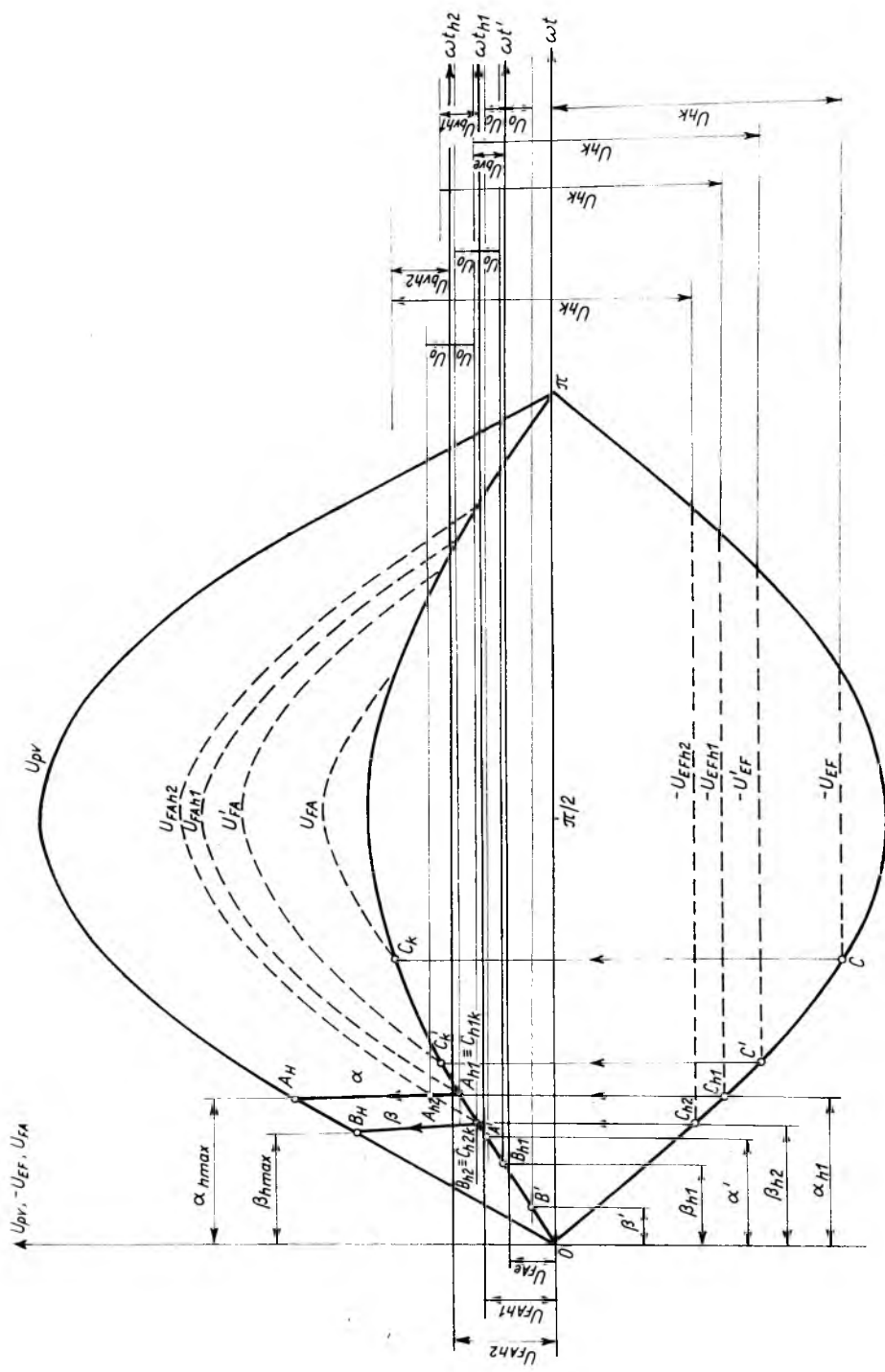
Az alábbiakban megvizsgáljuk a beállítási lehetőségeket.

A tranzisztoros erősítő billenése az alábbi egyenlet által meghatározott pontokban történik:

$$U_{FA} = \left[\frac{\hat{U}_{pv} \sin \omega t}{R_B + R_k + R_{bh}} - \frac{U_h}{R_B + R_k + R_{bv}} \right] R_B = \pm U_0. \quad (18)$$

A hibajelkorlátozó megszólalási feszültsége:

$$U_{EF} = \frac{\hat{U}_{pv} \sin \omega t}{R_B + R_k + R_{bh}} (R_k + R_{bh}) + \frac{U_h}{R_B + R_k + R_{bv}} (R_B + R_{bv}) = U_{hk}. \quad (19)$$



8-9a ábra. Hibajelkorlátozó elvi működése

A további számítások egyszerűsítésére bevezetjük a következő jelölést:

$$R_E = R_B + R_K + R_{bv} + R_{bh}.$$

A korlátozás kezdetét adott \hat{U}_{pv} , U_{hk} , U_0 és ellenállások esetén a (18) és (19) egyenletekből számítjuk ki, a pozitív előjel figyelembevételével.

A határszög:

$$\alpha_{h1} = \arcsin \left[U_{hk} + \frac{U_0(R_B + R_{bv})}{R_B} \right] \frac{R_E - R_{bv}}{U_{pv} R_E}. \quad (20)$$

A (20) egyenletet (18)-ba behelyettesítve megkapjuk a hibajel határértékét, ahol még éppen nem korlátozza a küszöbkapcsolás a tranzisztoros erősítő működését.

$$U_{h1} = \left(1 - \frac{R_{bh}}{R_E} \right) \left(U_{hk} - U_0 \frac{R_k + R_{bh}}{R_B} \right). \quad (21)$$

$U_h > U_{h1}$ esetén az α szög változását az alábbi függvénykapcsolat írja le.

$$\alpha = \arcsin \frac{U_{hk} + U_0 - \frac{U_h}{R_E - R_{bh}} R_{bv}}{\hat{U}_{pv}}. \quad (22)$$

A (22) egyenletet a (18) és (19) egyenlet segítségével a C pontok szögeinek ismeretében számítottuk ki.

A kifejezésből látható, hogy α szög értéke U_h hibajel növekedésével csökken. A csökkenést az egyfázisú váltakozófeszültséget előállító áramkörü elrendezés belső ellenállása okozza. Mindkét helyettesítő generátor belső ellenállása sokkal kisebb, mint az áramkör eredő R_E ellenállása, ami azt jelenti, hogy az α billenési szög csak kismértékben csökken, és majdnem függőleges egyenes mentén tart az A_H pontba.

Az A_H pontban $\alpha_{h\max}$ szög értéke:

$$\alpha_{h\max} = \arcsin U_{hk} \frac{\frac{R_B}{R_B + R_{bv}} + U_0}{\hat{U}_{pv}}. \quad (23)$$

Az $\alpha_{h\max}$ -hoz tartozó hibajel:

$$U_{hH} = \left(1 - \frac{R_{bh}}{R_E} \right) \left(U_{hk} - U_0 \frac{R_k + R_{bh}}{R_B} \right). \quad (24)$$

Az erősítő másik szimmetrikus felének billenését a β szög írja le. Ha az erősítő egyik fele éppen az A_{h1} határpontban — α_{h1} szögnél — billen, akkor az erősítő másik felének billenési pontja B_{h1} , szöge β_{h1} . Ekkor azonban a másik félrész még vezérelhető, mert a két erősítő félrész billenési feszültsége között $2U_0$ feszültségkülönbség van. A másik félrész vezérlésének határa B_{h2} pontban következik be. A (18), (19) egyenletekből ($-U_0$) helyettesítéssel megkaphatjuk a vezérlés határszögét:

$$\beta_{h2} = \arcsin \left[U_{hk} - \frac{U_0(R_B + R_{bv})}{R_B} \right] \frac{R_E - R_{bv}}{U_{pv} R_E}. \quad (25)$$

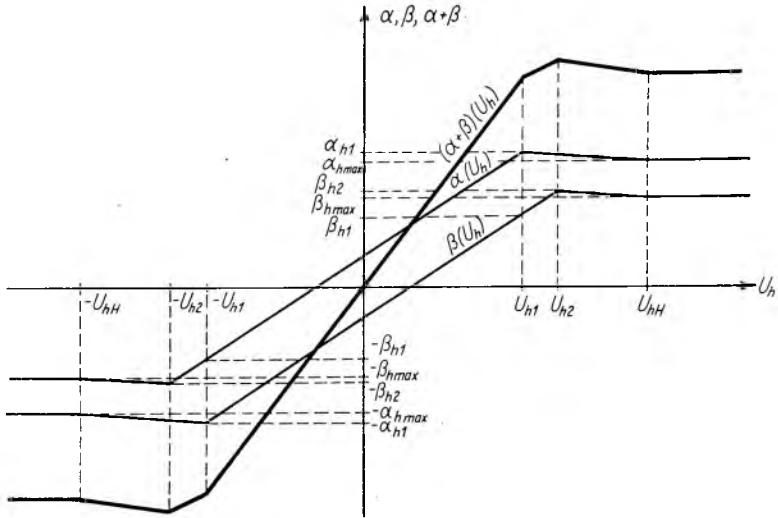
A határfeszültség:

$$U_{h2} = \left(1 - \frac{R_{bh}}{R_E} \right) \left(U_{hk} + U_0 \frac{R_k + R_{bh}}{R_B} \right). \quad (26)$$

A β szög változásának határértéke:

$$\beta_{h \max} = \arcsin \frac{U_{hk} \frac{R_B}{R_B + R_{bv}} - U_0}{\hat{U}_{pv}} \quad (27)$$

Az ehhez tartozó maximális hibafeszültség megegyezik a (24) egyenlet értékével, mert akkor már a teljes váltakozófeszültség az erősítő bemenő ellenállására jut.



8-9b ábra. A feszültség szabályozó eredő statikus jelleggörbéje

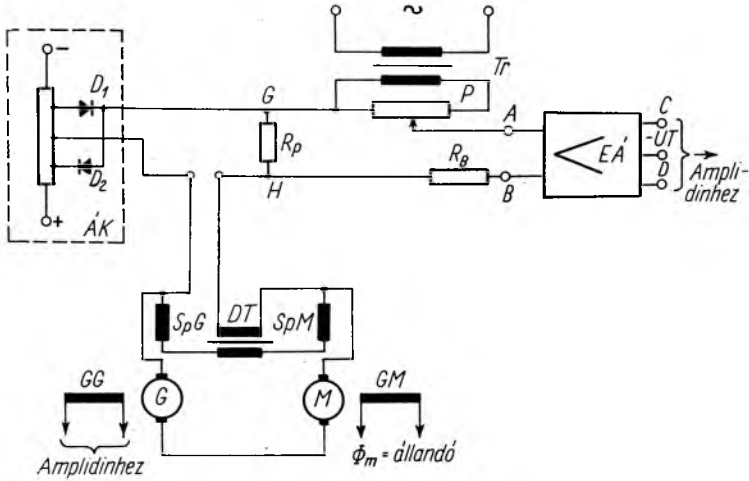
A 8-9b ábrán felrajzoltuk az $\alpha(U_h)$, $\beta(U_h)$, $\alpha(U_h) + \beta(U_h)$ összefüggéseket. Az ábrából látható, hogy a kívánt telítési jelleggörbét jól megközelíti az eredő jelleggörbe. A jelleggörbében levő töréspontok nem zavarják a szabályozást és semmiféle belengésre nem vezetnek.

A 8-9b ábra eredő jelleggörbéje tulajdonképpen az erősítő és hibajelkorlátozó együttes statikus jelleggörbéjének felel meg, más léptékben. Az $\alpha(U_h)$, ill. $\beta(U_h)$ jelleggörbe azonban csak akkor áll a 8-9b ábrán látható egyenes szakaszokból, azaz az erősítő és a hibajelkorlátozó együttes statikus jelleggörbéje csak akkor mutatja ezt a kedvező telítési jelleget, ha az erősítő 8-4. ábrán látható jelleggörbéjének csak a lineáris szakaszán dolgozunk. Ezért a hibajelkorlátozót a (24) egyenlet figyelembevételével úgy kell beállítani, hogy ez a feltétel teljesüljön.

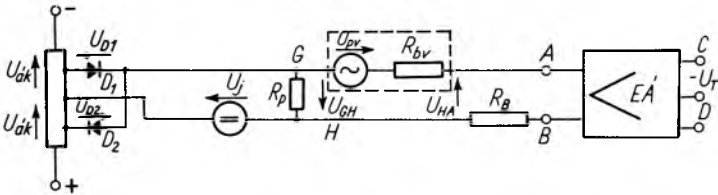
Az áramkorlátozó szabályozókörének a kapcsolási rajzát 8-10a ábra szemlélteti. A Ward—Leonard-gépcsoport segédpólusairól levett jelfeszültségből levonódik a TD differenciáló transzformátor tranzien্স üzemállapotban szolgáltatott induktív feszültsége. A jelfeszültséggel, ami az EA tranzisztoros erősítőt vezérli, sorba van kapcsolva az AK áramkorlátozó küszöbkapcsolás. A küszöbkapcsolás alapterhelése sokkal nagyobb, mint a nyitott állapotban levő diódáján keresztül folyó áram. A váltakozófeszültség jelenléte miatt a küszöbkapcsolás a szokásos egyenfeszültségű áramkörben levő küszöbkapcsolástól eltérő jelszinten működik. Az erősítő és küszöbkapcsolás együttes működésének összehangolása céljából a G és H pont közé R_p ellenállás van beiktatva, melynek feladatát a szabályozókör működésének vizsgálatakor tisztázzuk.

A 8-10b ábrán látható az áramkorlátozás helyettesítő kapcsolási rajza, amelyre érvényesek a 8-8b ábrán levő helyettesítő kapcsolási rajzra elmondottak azzal a kiegészítéssel, hogy a működtető jelet helyettesítő U_j jelgenerátor belső ellenállását a nagyteljesítményű Ward—Leonard-áramkör miatt elhanyagolhatjuk.

A 8-10b ábrán felvett pozitív irányok esetén a szabályozókör a következőképpen működik.



8-10a ábra. Az áramkorlátozó kör felépítése



8-10b ábra. Az áramkorlátozó kör helyettesítő kapcsolási rajza

Ha a hajtás állandósult üzemi állapotban van, a kis terhelőáram miatt az U_j feszültség áramköre az $U_{ák}$ feszültséggel előfeszített D_1 és D_2 diódák miatt szakadtnak tekinthető. Az erősítőt működtető U_{pv} váltakozófeszültség áramköre R_p ellenálláson keresztül záródik és az erősítő vezérlőjelet hiányában az A és B pontokban szimmetrikus α és β kapcsolási szöggel működik (l. a 8-11a ábrát).

Ha U_j a felvett pozitív irányoknak megfelelően növekedve eléri az $U_{ák} - \frac{U_{pv}}{R_B + R_p} R_p$ értéket, akkor a D_2 dióda az U_j és a $G-H$ pontok közötti váltakozófeszültség pillanatértékének összege hatására a váltakozófeszültség pozitív félhullámának csúcserőértékénél, ill. U_j további növekedésekor a váltakozófeszültség pozitív félhullámának egy szakaszán kinyit. Mindaddig azonban, amíg a D_2 dióda kinyitása a váltakozófeszültség emelkedő ágán később következik be, mint az erősítő egyik felének a lezárása az A pontban, az erősítő billenési szögét továbbra is csak a váltakozófeszültség határozza meg, tehát az erősítő vezéreltlen marad.

A vezéreltlen erősítő billenésének feltétele:

$$\frac{\hat{U}_{pv} \sin \omega t}{R_B + R_p} R_B = \pm U_0. \quad (28)$$

A vezéreltlen erősítő kapcsolási szöge, ami egyúttal a vezérlés kezdetéhez tartozó szög is, a (28) egyenletből:

$$\alpha = \alpha_{h1} = \arcsin \frac{U_0(R_B + R_p)}{\hat{U}_{pv} R_B}. \quad (29)$$

A korlátozó megszólalásának feltétele, hogy $U_{D_2} = 0$ legyen. Ebben a határesetben $U_j = U_{jk1}$, és

$$U_{jk1} = U_{ák} - \frac{U_0}{R_B} R_p. \quad (30)$$

Ha $U_{jk1} < U_j < U_{ák}$, akkor a D_2 dióda az erősítő átbillenése előtt nyit, de csak az egyen- és váltakozófeszültség együttes hatására. A dióda kinyitásától kezdve a váltakozófeszültség további növekménye teljes egészében a R_B ellenállásra jut. Az erősítő kapcsolási szögére, tehát arra a pillanatra, amikor $U_{AH} = U_0$, a nyitott D_2 diódát és az erősítő bemenetét tartalmazó hurok feszültségegyenlete alapján felírható, hogy

$$\alpha = \arcsin \frac{U_0 + U_{ák} - U_j}{\hat{U}_{pv}}. \quad (31)$$

Amikor a jelfeszültség értéke túllépi $U_{ák}$ értékét, az $U_j - U_{ák}$ feszültségekülönbség az R_p ellenállásra jut. A D_2 diódán keresztülfolyó egyenáram biztosítja a dióda nyitvatartását. Ebben az üzemállapotban az R_p ellenállásból, az U_j jelgenerátorból és küszöbkapcsolásból álló áramkör a G és H kapcsok felől nézve az egyenfeszültség szempontjából zérus belső ellenállású feszültséggenerátorként, a váltakozófeszültség szempontjából rövidzárként viselkedik. Ennek megfelelően a teljes váltakozófeszültség az R_B ellenállásra jut.

Az erősítő eddig tárgyalt félrésze tehát akkor billen, amikor az $\frac{U_j - U_{ák}}{R_B + R_{bv}} R_B$ egyenfeszültségnek és az $\hat{U}_{pv} \sin \omega t$ váltakozófeszültség pillanatértékének az összege $+U_0$ -val egyenlő. Ebből a feltételből a kapcsolási szög:

$$\alpha = \arcsin \left[\frac{U_0}{\hat{U}_{pv}} - \frac{U_j - U_{ák}}{\hat{U}_{pv}} \frac{R_B}{R_B + R_{bv}} \right]. \quad (32)$$

Az erősítő másik felének billenését (lásd 8-11a ábra B pont) a váltakozófeszültség negatív félperiódusa biztosítja. A kapcsolási szög (β), $U_j < U_{ák}$ tartományban állandó, és értékét a (28) egyenletből számíthatjuk ki $-U_0$ figyelembevételével.

Ha $U_j > U_{ák}$, akkor az egyenfeszültség által kinyitott D_2 diódán átfolyó áramot a váltakozófeszültség negatív félperiódusa által létrehozott $\frac{\hat{U}_{pv} \sin \omega t}{R_B}$ áram csökkenti, esetleg a diódát teljesen le is zárja. Ha a dióda lezárása hamarabb történik, mint az erősítő most vizsgált félrészenek az átbillenése, akkor a kapcsolási szög azonos az eddigi szöggel. Amikor azonban az erősítő átbillenése hamarabb következik be, mint a dióda lezárása, akkor a billenés pillanatát az $(U_j - U_{ák}) \frac{R_B}{R_B - R_{bv}}$

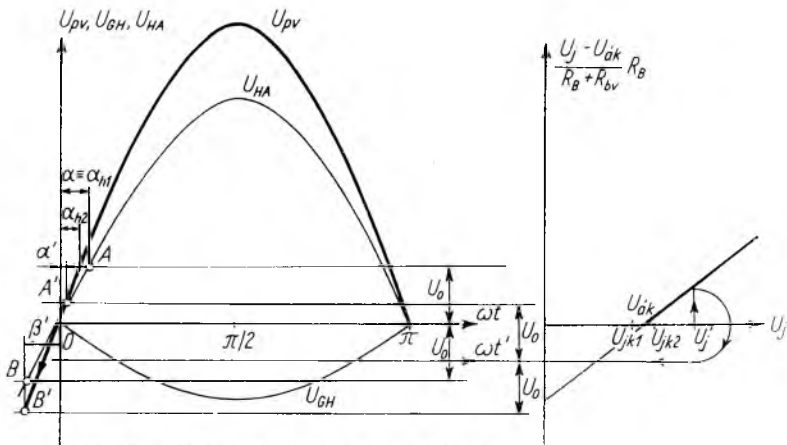
egyenfeszültségnek és az $\hat{U}_{pv} \sin \omega t$ váltakozófeszültség pillanatértékének a különbsége határozza meg, és ebből a kapcsolási szög:

$$\beta = \arcsin \left[\frac{U_0}{\hat{U}_{pv}} + \frac{U_j - U_{ák}}{\hat{U}_{pv}} \frac{R_B}{R_B + R_{bv}} \right]. \quad (33)$$

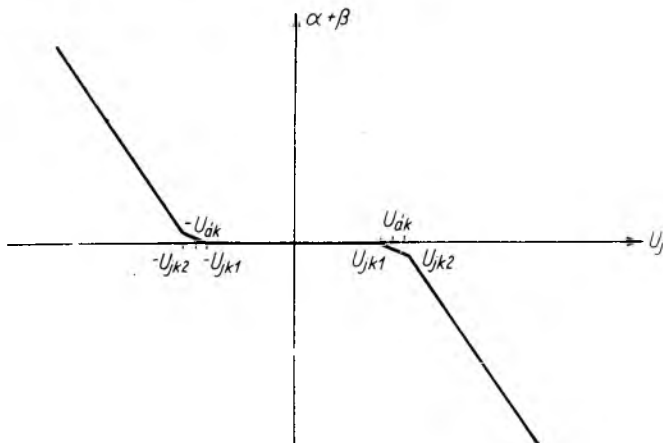
Határesetben a jelfeszültség:

$$U_{jk2} = U_{ák} + U_0 \frac{R_p}{R_B}. \quad (34)$$

Az $U_{jk1} - U_{jk2}$ tartományban csak az erősítő egyik félrészének a kapcsolási szöge változik U_j változásával, tehát az erősítő jelleggörbéjének meredeksége feleakkora, mint $U_j > U_{jk2}$ esetén. Ez a meredekségváltozás nem előnyös, ezért az R_p ellenállás értékét úgy kell megválasztani, hogy az $U_{jk1} - U_{jk2}$ szakasz a lehető legrövidebb legyen.



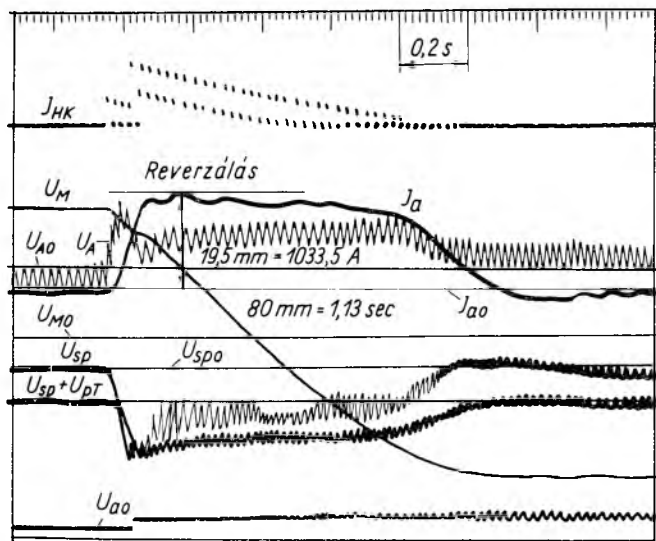
8-11a ábra. Az áramkorlátozó elvi működése



8-11b ábra. Az áramkorlátozó eredő statikus jelleggörbéje

A 8-11a ábrába berajzoltuk a tranzisztoros erősítő R_B ellenállására jutó jelfeszültség-komponenst a jelfeszültség függvényében. Adott U_j jelfeszültség esetén a jobb oldali ábrarészen látható egyszerű szerkesztéssel megismerhetjük az erősítő új nullvonalát, amitől felmérve mindkét irányban U_0 billenési feszültséget, megkaphatjuk az áramkorlátozó működésekor az erősítő A' és B' billenési pontjait és α' , β' szögeit.

A 8-11b ábrába berajzoltuk $\alpha + \beta$ szögeket a jelfeszültség függvényében. Figyelembe véve azt, hogy a jelfeszültség a hajtás áramával arányos, és a tranzisztoros erősítőnek a lineáris szakaszán dolgozunk, a 8-11b ábra az áramkorlátozó kör 8-1. ábrán látható hatásvázlatának eredő statikus jelleggörbéje.



8-12. ábra. Görgősori hajtás oszcillogramja

feszültségében levő 50 Hz váltakozófeszültség amplitúdója kb. az állandósult állapotban levő egyenkomponensnek felel meg. Az oszcillogram tartalmazza a segédpólusokról levett jelfeszültséget önmagában (U_{sp}), valamint a segédpólusok és differenciáló transzformátor együttes feszültségét ($U_{sp} + U_{DT}$). Ez utóbbi közelítőleg arányos az I_a árammal. Az U_a alapjel polaritásának megfordítása két lépésben történt, de mint az oszcillogramon jól látható, már az első alapjelugrás is elegendő ahhoz, hogy a hibajelkorlátozó megszólaljon. Tehát az I_{HK} áram alakján kívül, valamennyi mennyiség ugyanilyen alakú lenne, ha a teljes polaritásváltást egyetlen lépésben hajtottuk volna végre. Az oszcillogram szemlélteti, hogy a szabályozás tárgyalt két főrésze a hajtásokkal szemben támasztott legfontosabb követelménynek, a gyorsítóáram állandó értéken tartásának jól megfelel.

Irodalom

- Dr. Fodor Gy.: A Laplace transzformáció műszaki alkalmazása. Műszaki Könyvkiadó, 1962.
 Kiss M.: A diósgyőri blokkosor rekonstrukciója. Elektrotechnika, 1964. 15. sz.
 Kiss M.: Elektrichni pogon Manipulatora Grube pruge prikladnih i za ravnanje gredica za valjanje. Zbornik Radova Jurema 1964, druga knjiga.

9.

Szünetmentes áramforrások frekvencia- és töltésszabályozása

BENCZE JÁNOS

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk olyan berendezést ismertet, amely fontos létesítmények szünetmentes energiaellátását oldja meg. Az energiát akkumulátorok segítségével tároljuk. A szabályozott egyenáramú gép kettős feladatot lát el. Az egyik üzemmódban mint motor hajtja a szinkrongenerátort abban az esetben, ha hálózati feszültség nem áll rendelkezésre. Az egyenáramú gép másik üzemmódja az áramkorlátozással kiegészített feszültség-szabályozás, amikor a gépcsoportot aszinkron motor hajtja. Ekkor az egyenáramú gép az akkumulátorok töltését végzi. A két üzemmód közötti átmenet alatt a gépcsoport fordulatszám $\pm 3\%$ -a túrésen belül marad teljes terhelésnél is. A szabályozó körök a korszerű elveknek megfelelően tipizált áramköri elemekből vannak felépítve.

РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ И ЗАРЯДА НЕПРЕРЫВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА

Я. Бенце

Резюме

В статье описывается такое оборудование, которое решает вопрос непрерывного снабжения энергией важнейших объектов. Энергия резервируется при помощи аккумуляторов. Регулируемая машина постоянного тока выполняет две задачи. В одном режиме работы она как двигатель приводит в действие синхронный генератора в том случае, если нет в распоряжении напряжения. Регулирование дополнительного напряжения при помощи ограничителя тока, решает сети другой режим работы машины постоянного тока, когда агрегат приводится в действие асинхронным двигателем. При этом машина постоянного тока выполняет заряд аккумуляторов. Во время перехода между двумя режимами работы число оборотов агрегата остается в пределах допуска $\pm 3\%$ и при полной нагрузке. Контуры регулирования по современным принципам построены из типизированных элементов цепи.

FREQUENZ- UND LADUNGSREGELUNG VON STETIGEN STROMQUELLEN

J. Bencze

Zusammenfassung

In der Arbeit wird eine Einrichtung beschrieben, die zur ununterbrochenen Energieversorgung wichtiger Anlagen dient. Die Energie wird mittels Akkumulatoren gespeichert. Die geregelte Gleichstrommaschine erfüllt eine doppelte Aufgabe. Steht keine Netzspannung zur Verfügung, so treibt die Maschine als Motor den Synchron-generator an. Die andere Betriebsart der Maschine ist die mit Strombegrenzung ergänzte Spannungsregelung, wobei die Maschinengruppe durch einen Induktionsmotor angetrieben wird. In diesem Fall dient die Gleichstrommaschine zur Ladung der Batterie. Während des Überganges von einer zur anderen Betriebsart bleibt die Drehzahl der Maschinengruppe auch bei voller Belastung innerhalb einer Toleranzgrenze von $\pm 3\%$. Die Regelkreise sind den modernen Konstruktionsgrundlagen entsprechend aus typisierten Bauelementen aufgebaut.

FREQUENCY AND CHARGING CONTROL OF NON-STOP SUPPLIES

J. Bencze

Summary

The paper describes an equipment constructed to solve the problem of non-stop energy supply of important installations. Energy is stored by means of batteries. The controlled d. c. machine performs double duty. Either it drives the synchronous generator, as a motor if there is no supply voltage, or it performs voltage control, supplemented by current limit control, in the latter case the aggregate is driven by the asynchronous motor, and the d. c. machine performs the charging of the batteries. During the transition between the two functioning methods, the number of revolutions of the aggregate remains within a tolerance of $\pm 3\%$, even at full load. The control circuits are built up of standardized circuit elements, complying with up-to-date technics.

1. Bevezetés

Az élet számos területén felmerül igény olyan villamosenergia-forrásra, amely biztosítani tudja valamely nagyfontosságú berendezés — mint pl. kórházi műtő, mikrohullámú közvetítőlánc, repülőtéri irányítóberendezés, vasútbiztosító áramkör stb. — szünetmentes energiaellátását. Az adott probléma megoldására többféle lehetőség kínálkozik, akár az energiatárolás, akár az energiaátalakítás lehetőségeit vizsgáljuk. Az energiaellátás szünetmentességének biztosítása érdekében energiát kell tárolnunk — annak valamilyen megjelenési formájában —, hogy a hálózat kimaradása esetén rendelkezésünkre álljon visszaalakítható energia. Tárolhatunk mind villamos, mind mechanikai energiát, az előzőt akkumulátorok, az utóbbit lendítőkerék segítségével.

Az energiaátalakító lehet forgógépes vagy statikus (inverter). Az azonban kétségtelen, hogy az ilyen módon tárolható energia mennyisége — legyen az akár villamos, akár mechanikai — korlátozott. Ezért, ha a hálózati energia hosszabb szüneteivel kell számolni — az adott feladat biztonságos megoldása érdekében —, valamilyen más, segéd-energiaforrást is kell biztosítanunk. Ez célszerűen diesel- vagy benzinmotorral hajtott generátor lehet.

Az itt ismertetendő megoldásban a lehetőségek és követelmények mérlegelése után figyelembe véve a viszonylag nagy teljesítményt (30 kW) — a forgógépes átalakítót választottuk, mégpedig oly módon, hogy az energiát annak villamos formájában, tehát akkumulátorban tároljuk.

Így a célnak megfelelően az energiaátalakító gépcsoport három közös tengelyen elhelyezett gépegységből áll:

egy 30 kVA-es szinkron generátorból; egy 30 kW-os egyenáramú gépből és egy 40 kW-os aszinkron motorból. A gépcsoporthoz szervesen hozzátartozik egy nagy kapacitású akkumulátortelep, amelynek kisütési feszültsége 165 V-tól 260 V-ig változik feltöltöttségi foka függvényében. A szinkron generátor feladata szabályozott és szünetmentes 3×400 V-os, 50 Hz-es feszültség szolgáltatása.

Az egyenáramú gépnek kettős feladata van. A szükséges üzemmódnak megfelelően az első esetben, amennyiben nem áll rendelkezésre hálózat, mint motor hajtja a szinkron generátort és az előírt követelményeknek megfelelően $\pm 2\%$ pontosságra tartja a frekvenciát, illetve fordulatszámot dinamikus üzemben is, amikor előírás szerint a terheléslökés nagysága a szinkron generátor névleges teljesítményének legfeljebb 10%-a. A szinkron generátor lehetséges legkisebb terhelése

a névleges teljesítmény 66%-a. A gépcsoport egyenáramú oldalról nem indítható. Az egyenáramú gép másik lehetséges üzemállapota, ha a hálózat rendelkezésre áll, a töltésszabályozás. A töltésszabályozás áramkorlátozással kiegészített feszültség-szabályozás.

Az egyenáramú gép armatúrája az akkumulátorral állandó galvanikus kapcsolatban van.

Ha a hálózati feszültség rendelkezésre áll, akkor a szinkron generátort és az egyenáramú gépet is az aszinkron motor hajtja. Generátoros üzembről motorosra való áttéréskor az előirt pontosság a fordulatszámra $+2...-6\%$, legfeljebb 1 percen keresztül.

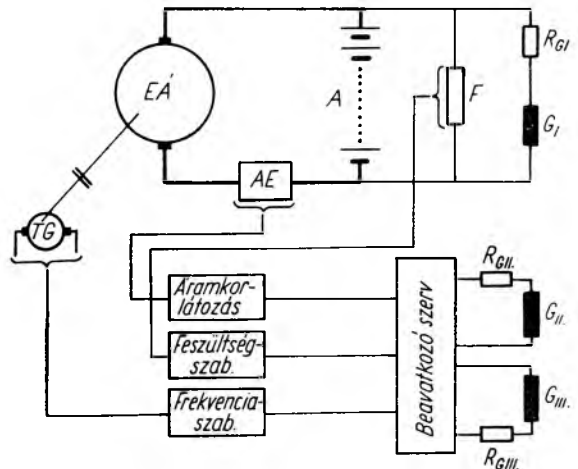
A szabályozóegységet a VILATI által kidolgozott és az EMG által gyártott STATOMAT, illetve EDS 4000-es sorozatú logikai elemekből építettük fel.

Az elemek tranzistorokból, félvezető diódákból és passzív elemekből állnak, a környezeti hatások elleni védelem céljából tokozottak. A szabályozóköri az alább felsorolt elemek kombinációjából vannak felépítve:

- jelformáló elem;
- inverter;
- „ÉS”-kapu;
- „VAGY”-kapu;
- 600 W-os nagyteljesítményű, kapcsolóüzemű tranzistoros erősítő.

A gépcsoport előzetes specifikálásakor a következő szempontokat kellett szem előtt tartani. Miután a gépcsoportot egyenáramú oldalról nem szükséges indítani, továbbá a generátoros üzemmódról motoros üzemre való áttéréskor a fordulat a névleges fordulathoz csupán 6%-ával csökkenhet, a gépcsoport lendítőnyomatékát erősen megnöveltük. Ez olyan formában érhető el, hogy speciális nagyméretű tengelykapcsolókat írunk elő az aszinkron és egyenáramú, illetve az egyenáramú és szinkron gép közé, ezek lendítőtömegei egyenként 25...25 kgm² értékűek. Ezzel a gépcsoport lendítőtömege az eredeti értéknek kb. 8...10-szeresére növekedett. Ez stabilitási szempontból is könnyebbséget jelent, mert az egyenáramú gép elektromechanikai időállandója is hasonló mértékben nőtt. A gerjesztőköri időállandót sorbakapcsolt ellenállással jelentősen lehetett csökkenteni. Így a fordulatszám-szabályozás két legfontosabb időállandója messze esik egymástól, mégpedig úgy, hogy az elektromechanikai időállandó nagyobb. Ez a körülmény a fordulatszám-szabályozás pontosságát terhelésváltozáskor, illetve generátoros üzembről motoros üzemre való áttéréskor kedvezően befolyásolja.

A másik szempont, amit figyelembe kellett venni, hogy az egyenáramú gépet



9-1. ábra. A szabályozórendszer elvi felépítése

mind generátoros, mind motoros üzemben csak a gerjesztőkörön keresztül lehet befolyásolni.

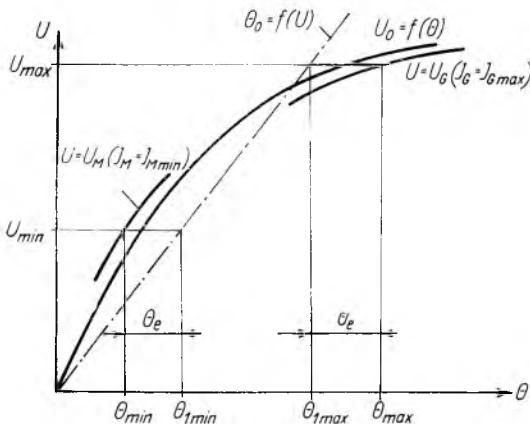
A rendszer elvi felépítése a 9-1. ábrán látható. Az $E\acute{A}$ egyenáramú gép az A akkumulátor kapcsaira van kötve. Ugyancsak az akkumulátor, illetve a gép kapcsaira van kötve az F feszültségosztó, és az R_{GI} ellenálláson keresztül a gép G_I gerjesztőtekercse. A beavatkozó szerv az R_{GII} , illetve az R_{GIII} ellenállásokon keresztül gerjeszti a G_{II} , illetve a G_{III} jelű segéd-gerjesztőtekercseket. A frekvenciaszabályozás részére a TG tachométerdinamó, a feszültségszabályozó részére az F feszültségosztó és az áramkorlátozás részére az egyenáramú gép armatúrakörébe iktatott AE egyenáramú áramváltó szolgáltatja az ellenőrző jelet.

2. Az egyenáramú gép gerjesztése

Az egyenáramú gépnek három gerjesztőtekercse van. Az első tekercs a legnagyobb eredő gerjesztés 75%-át tudja biztosítani. A második és harmadik tekercs, amelyek teljesen egyformák, a legnagyobb eredő gerjesztésnek egyenként 25...25%-át adhatják. Ilyen elrendezés mellett az első tekercset megfelelő soros ellenállás közbeiktatásával a kapocsfeszültségre, illetve ami vele azonos, az akkumulátorfeszültségre kötjük, míg a két segéd gerjesztőtekercset szintén megfelelő ellenállással sorba kötve ellentétes gerjesztésirányítással egy-egy 600 W-os kapcsolóerősítővel gerjesztjük.

Ennek a választásnak nagy előnye az, hogy a legnagyobb zavaró jelet, az armatúrafeszültség változását nagyrészt kompenzálja, mert az armatúrafeszültség változásával a fő gerjesztőtekercs gerjesztése arányosan változik. A gerjesztőfeszültségek alkalmas megválasztása lehetőséget nyújt a tekercsek időállandóinak jelentős csökkentésére, ami módot ad a gyors beavatkozásra.

A gerjesztések szükséges elosztását a gép mágnesezési jelleggörbéjéből határozhatjuk meg (9-2. ábra). Megnézzük, hogy a gép belső feszültsége $[U_0 = f(\theta)]$ milyen határok között változik. A legkisebb a belső feszültség (U_{min}) 165 V akkumulátorfeszültség esetén motoros üzemben, mégpedig névleges terhelésnél kb. 150 V. A belső feszültség felső határát (U_{max}) a generátoros üzemben szükséges legnagyobb töltőfeszültség értéke szabja meg. Ez az előírás szerint kb. 340 V, és a belső feszültség kb. 350 V. Ezek után a gerjesztések elosztását a következőképpen végezzük. Megkeressük a fenti feszültségértékekhez tartozó maximális és minimális gerjesztésszükségletet. A kapcsolóerősítő és a segéd gerjesztőtekercsek adataiból meghatározható a kapcsolóerősítő által létrehozható maximális gerjesztés. A két kapcsolóerősítő ellenütemben és ellentétes gerjesztésiránnyal dolgozik. Az egyik által létrehozott gerjesztés hozzáadódik a főgerjesztéshez, a másik kapcsolóerősítő a főmező ellen gerjeszt.



9-2. ábra. Az egyenáramú gép mágnesezési jelleggörbéi a szükséges gerjesztéselosztás meghatározására

ségértékekhez tartozó maximális és minimális gerjesztésszükségletet. A kapcsolóerősítő és a segéd gerjesztőtekercsek adataiból meghatározható a kapcsolóerősítő által létrehozható maximális gerjesztés. A két kapcsolóerősítő ellenütemben és ellentétes gerjesztésiránnyal dolgozik. Az egyik által létrehozott gerjesztés hozzáadódik a főgerjesztéshez, a másik kapcsolóerősítő a főmező ellen gerjeszt.

A fentiek alapján felírhatók a következő összefüggések:

$$\Theta_{\max} - \Theta_e \cong \Theta_{1\max}; \quad \Theta_{\min} + \Theta_e \cong \Theta_{1\min}; \quad (1)$$

és

$$\frac{\Theta_{1\max}}{\Theta_{1\min}} = \frac{340}{165}, \quad (2)$$

ahol Θ_{\max} és Θ_{\min} a 350 V, illetve 150 V belső feszültség létrehozásához szükséges eredő gerjesztés, $\Theta_{1\max}$ és $\Theta_{1\min}$ a fő gerjesztőtekercs gerjesztése az akkumulátor maximális (340 V), illetve minimális (165 V) kapocsfeszültsége esetén, Θ_e pedig a kapcsolóerősítők által létrehozható legnagyobb gerjesztés.

Az első két összefüggésben az egyenlőségjel azt a határesetet jelentené, amikor a kapcsolóerősítők által létrehozható legnagyobb Θ_e gerjesztés biztonsági tartalék nélkül éppen elegendő lenne a teljes szabályozási tartomány átfogására.

A fenti összefüggésekből a gerjesztőkörök paraméterei meghatározhatók.

3. A szabályozórendszer felépítése

A szabályozórendszer felépítésekor figyelembe kell venni a STATOMAT építőelemek illesztési szabályait. A szabályozórendszer egy fordulatszám-, illetve frekvencia-, valamint egy töltésszabályozásból áll. A töltésszabályozás is két külön rendszert tartalmaz; a feszültségszabályozást és az áramkorlátozást. A fenti három egységnek közös beavatkozó szerve van.

3.1 A beavatkozó szerv (9-3. ábra)

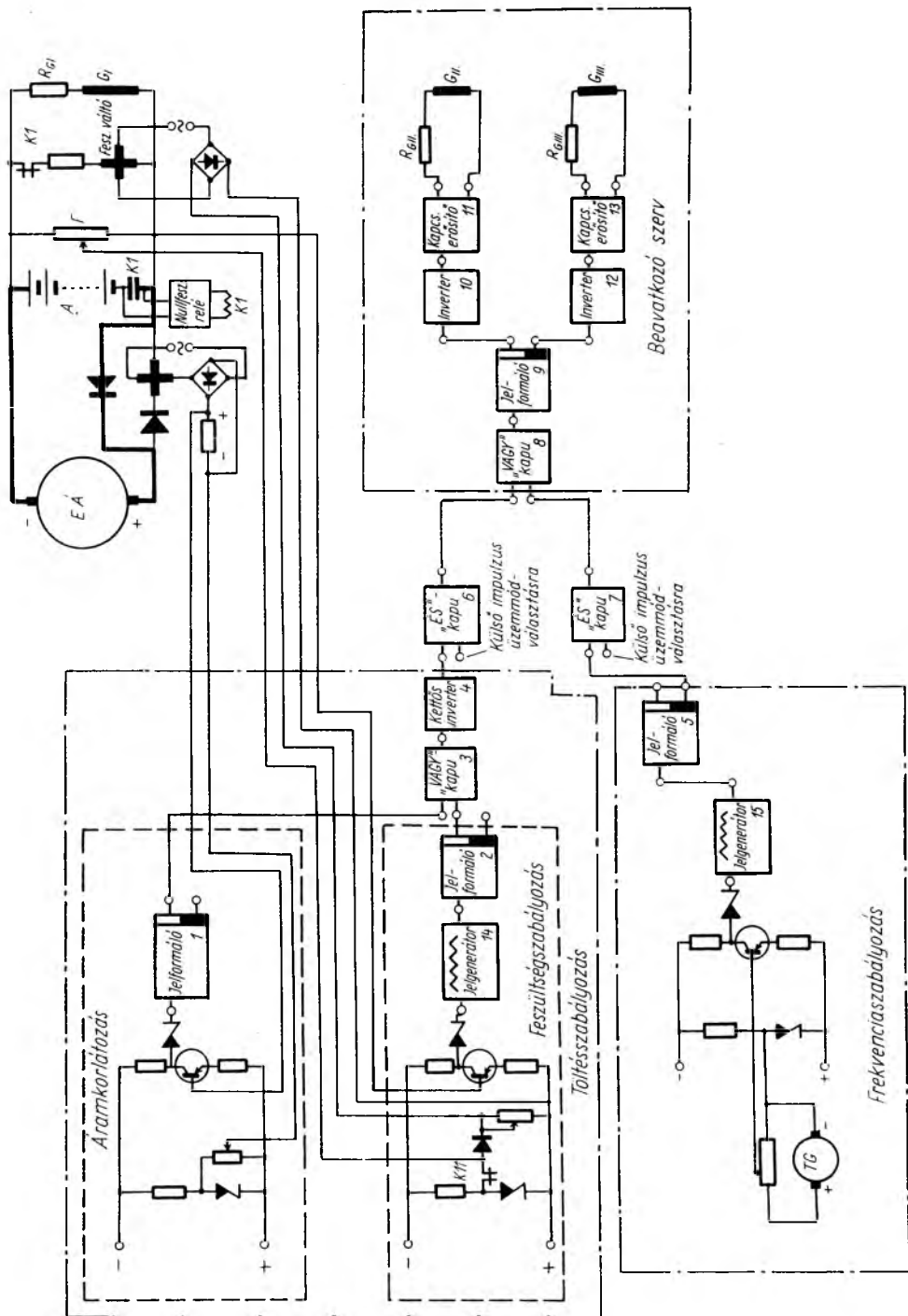
A beavatkozó szerv két 600 W-os kapcsolóerősítőből áll (11, 13), melyeket közvetve egy jelformáló elem (9) valens, illetve antivalens kimenete vezérel. A jelformáló elem és kapcsolóerősítők közé a már említett illesztési szabályok miatt egy-egy erősítő elemet (10, 12) — invertert — kell elhelyezni.

A beavatkozó szerv bemenete egy „VAGY”-kapu (8). Ez biztosítja azt, hogy vagy a töltésszabályozás, vagy a frekvenciaszabályozás — a később meghatározandó feltételek szerint — képes legyen a beavatkozó szerv helyes működtetésére.

3.2 Frekvenciaszabályozás

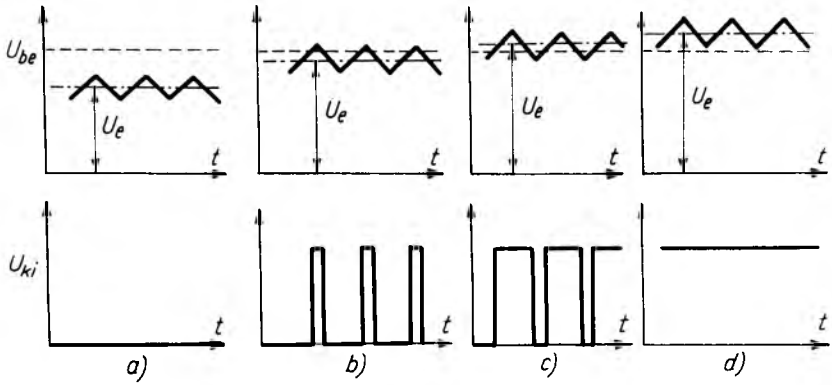
A frekvencia, illetőleg az evvel arányos fordulatszám érzékelése tachométerdinamó segítségével történik. A tachométerdinamó feszültségét potencióméterrel osztjuk le. Ennek a leosztásnak a célja a fordulatszám pontos beállíthatósága.

A fordulatszámmal arányos feszültséget — amint ez a 9-3. ábrán látható — Zener-dióda által stabilizált feszültséggel, mint alapjellel hasonlítjuk össze. A Zener-feszültség és a tachométerdinamó feszültségének különbsége, mint rendelkező jel, emitterkörü ellenállással linearizált tranzisztoros erősítőfokozat bemenetére csatlakozik. A tranzisztoros fokozat kimenetén, tehát a tranzisztor kollektorpontján a bemenettől lineárisan függő nagyságú és negatív polaritású egyenfeszültséget kapunk. Erre az egyenfeszültségre adott nagyságú háromszögjelet szuperponálunk, így oldva meg a folyamatosan változó jel impulzussorozattá való átalakítását. Az egyenfeszültségre szuperponált háromszög alakú feszültséget jelformáló elem bemenetére visszük, amelynek kimenetén már az impulzusszélesség-modulált jelsorozatot kapjuk (9-4a...d ábrák).

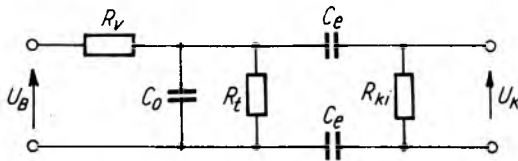


9-3. ábra. A szabályozórendszer kapcsolási vázlatja

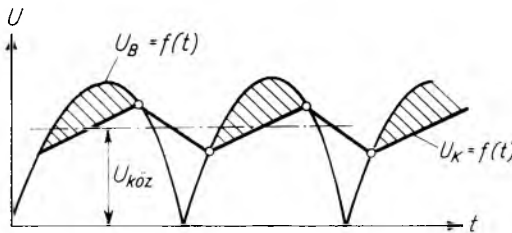
A szabályozókör bemenő és kimenő jele közötti kapcsolat akkor lesz lineáris, ha a háromszögjel oldalai egyenesek. A körerősítést a háromszög alakú feszültség amplitúdójával tudjuk változtatni. Nagyobb amplitúdóhoz kisebb körerősítés tartozik.



9-4. ábra. A folyamatosan változó rendelkezőjel impulzussorozatá váló átalakítása
 U_{be} a jelformáló elem billenési feszültsége; U_e a rendelkező jel által meghatározott egyenfeszültség;
 U_{ki} a jelformáló elem valens kimenetén megjelenő feszültség atakja



9-5. ábra. Háromszög alakú feszültséget előállító kapcsolás (passzív elemekből felépítve)



9-6. ábra. Feszültségviszonyok a 9-5. ábra szerinti kapcsolás által előállított háromszögfeszültségre

A háromszögjelet a 9-5. ábra szerinti kapcsolásban állítottuk elő. A 9-6. ábrán láthatók a feszültségviszonyok. A vonalkázott terület azt a feszültséget ábrázolja, mely az R_v ellenállásra és a feszültségforrás R_b ellenállására jut. $U_{köz}$ feszültség a jel egyenfeszültségű összetevője, melyet a C_e kondenzátorok vannak hivatva kiszűrni.

A kapcsolás töltési időállandója:

$$T_t = (R_b + R_v) C_o$$

A kapcsolás kisütési időállandója:

$$T_k = R_k C_0.$$

A háromszögjel oldalai akkor lesznek megközelítőleg egyenesek, ha mind T_i , mind T_k nagyobb lesz egy félperiódus idejénél.

Az érzékelő kör kimenetére (amint ez a 9-3. ábrán látható) ezt a háromszögjelet (15) szuperponáljuk, majd egy jelformáló elem (5) bemenetére kapcsolva impulzusszélesség-modulációt hozunk létre.

A jelformáló elem antivalens kimenetére „ÉS”-kapu (7) egyik bemenetét kell kötni, amelynek a feladata az üzemmód megválasztása. Az „ÉS”-kapu másik bemenetére külső impulzus segítségével parancsot lehet adni az „ÉS”-kapu nyitására vagy zárására. Az „ÉS”-kapu kimenete a beavatkozó szerv egyik bemenetére csatlakozik. A jelformáló elem valens kimenetének jele fehér, az antivalens kimenetének jele fekete, tehát a fehérrel jelzett kimenet a bemenettel fázisban, a feketével jelzett kimenet pedig ellenfázisban van. Az inverter fázist forgat, a kapcsolóerősítő ugyancsak fázist forgat.

A fentiek előrebocsátása után, vizsgáljuk meg a teljes fordulatszám-szabályozó kör működését (lásd a 9-3. ábrát).

A Zener-diódával előállított negatív alapjelet pozitív ellenőrző jellel hasonlítjuk össze. (Tachométer-dinamó leosztott feszültsége.) A fordulatszám csökkenése esetén az ellenőrző jel csökken, tehát a tranzisztor bázisára az emitterpotenciálhoz képest negatívabb jel kerül. Ekkor a tranzisztor jobban kinyit, kollektorpotenciálja pozitívabb lesz. Miután a rendszer negatív jelszinttel működik — a háromszögjel egyenfeszültségű összetevője csökken —, így az első jelformáló elem (5) valens kimenetén az impulzusok szélessége csökken az eredeti állapothoz képest, míg az antivalens kimeneten szélesedő impulzus-sorozat jelenik meg. Az utóbbi kimenetet használjuk fel. Ez a szélesedő impulzussorozat passzív „ÉS” — (7) és „VAGY” — (8) kapu után a beavatkozó szerv jelformáló elemére (9) kerül, ahol az inverterek (10, 12) és a kapcsolóerősítők (11, 13) kétszer 180°-os, tehát 360°-os fázisfordítása után gerjesztik a motor segédgerjesztő tekercseit, mégpedig úgy, hogy az ellengerjesztés tekercsében szélesedő, a hozzágerjesztés tekercsében keskenyedő impulzusok jelennek meg. Evvel a hozzágerjesztő áram középpértéke csökken, az ellengerjesztő áram középpértéke nő, az eredő gerjesztés csökken. A fordulatszám növekedik.

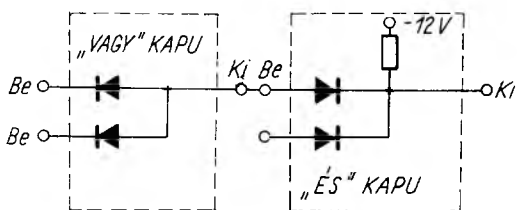
3.3 Töltésszabályozás

A töltésszabályozás a feladatnak megfelelően két független szabályozóegységből áll, a feszültségszabályozóból és az áramkorlátozóból. Mind a feszültségszabályozás, mind az áramkorlátozás a fordulatszám-szabályozásnál ismertetett közös beavatkozó szervben keresztül avatkozik be a generátor gerjesztésébe.

a) *Feszültségszabályozás.* Az ellenőrző jelet — mint az a 9-3. ábrán látható — ohmos feszültségosztó szolgáltatja. Az ellenőrző jelet Zener-dióda által előállított alapjellel hasonlítjuk össze. A két feszültség különbsége — a rendelkező jel — a frekvenciaszabályozáshoz hasonlóan tranzisztor bázisára kerül, amely a rendelkező jel függvényében nyitja vagy zárja a tranziszort. A tranzisztor változó kollektorfeszültségére azonos felépítésű elemmel, mint a frekvenciaszabályozásnál, háromszögjelet szuperponálunk, amely a csatlakozó jelformáló elem (2) bemenetére kerül és elvégzi a rendelkező jel impulzussorozattá alakítását. A jelformáló valens

kimenetére „VAGY”-kapu (3) egyik bemenete csatlakozik, ez lehetőséget ad arra, hogy a körhöz az áramkorlátozó szabályozó is csatlakozzék. A STATOMAT-rendszer építési szabályai „VAGY”-„ÉS” közvetlen logikai sorrendet kizárják, mert a „VAGY”- és „ÉS”-kapu diódái — mint a 9-7. ábrán látható — ellentétesen kapcsolódnak egymáshoz, így ezen az összekötésen keresztül sohasem folyhatna áram.

Ha azonban a „VAGY”- és „ÉS”-kapuk közé aktív elemet helyezünk el — ami célszerűen inverter lehet — a 9-7. ábrán látható probléma megoldódik. Ezért a „VAGY”-kapu után kettős inverter (4) kell elhelyezni, amely $2 \times 180^\circ = 360^\circ$ fázist forgat, tehát a jel azonos fázisban megy tovább. Az inverter kimenetére csatlakozik a második üzemmódváltató „ÉS”-kapu (6). Az „ÉS”-kapu kimenete a beavatkozó szerv bemenetén elhelyezett „VAGY”-kapu (8) második bemenetére továbbítja a felerősített és impulzusszélességmodulált rendelkező jelet.



9-7. ábra. Magyarázó ábra

A 9-3. ábra alapján kövessük a feszültség-szabályozás rendelkező jelét:

Csökkenő kapocsfeszültség esetén — miután negatív alapjelet pozitív ellenőrző jellel hasonlítunk össze — a tranzisztor bázisára negatívabb potenciál jut, a tranzisztor jobban kinyit, kollektorpotenciálja kevésbé lesz negatív, tehát az első jelformáló elem (2) valens kimenetén keskenyedő impulzusok jelennek meg. Ezek az impulzusok azonos fázisban mennek tovább a passzív „VAGY”-kapun (3), majd a kettős inverteren (4) és a passzív „ÉS”-kapun (6), ahol csatlakoznak a közös beavatkozó szervhez. Itt a keskenyedő impulzusok csökkentik az ellengerjesztést és növelik a hozzágerjesztést; a gép eredő fluxusa megnő, a gép feszültsége nő.

Az elmondottaktól eltérő szerepe van a feszültségszabályozásnak a gépcsoport indításakor. Az álló gépcsoport egyenáramú gépe természetesen nincs összekötve az akkumulátorral, és az összekapcsolás fölgyorsulás után is csak akkor lehetséges, ha az egyenáramú gép kapocsfeszültsége az akkumulátor mindenkori feszültségével megegyezik. Ezért induláskor a feszültségszabályozás alapjelét nem a már említett Zener-dióda szolgáltatja, hanem egy egyenfeszültségű feszültségváltó, amelynek bemenete az akkumulátor kapcsaira van kötve, kimenő jele tehát az akkumulátor feszültségével arányos. Így az egyenáramú gépet a feszültségszabályozás éppen az akkumulátor feszültségével azonos kapocsfeszültségre állítja be, és az összekapcsolás a *KI* kapcsolóval megtörténhet. Az összekapcsolás engedélyezését a *KI* kapcsoló főérintkezőire kötött nullfeszültségrele végzi. Az összekapcsolást követően — kis késleltetéssel — a *KII* kapcsoló beiktatja a feszültségszabályozó körbe a Zener-diódával előállított alapjelet.

b) *Áramkorlátozás.* Az egyenáramú gép a rendszer indítása után állandó galvanikus kapcsolatban van az akkumulátorteleppel. A motoros és generátoros üzemet az áram iránya különbözteti meg. Motoros üzemállapotban a gép maximális armatúraárama 200 A. Generátoros üzem esetén áramkorlátozással a gép terhelőárama 20 és 40 A között beállítható. Az áramkorlátozás működtetésére az árammal arányos jelet kell előállítani, mégpedig — hogy előerősítés nélkül az áramkorlátozás alapjellel összehasonlítható legyen — célszerűen 5...10 V nagyságú ellenőrző

jelet. Nyilvánvaló, hogy ha az áramkörbe pl. olyan söntöt iktatunk be, amely 40 A áramnál 10 V feszültségesést hoz létre, motoros üzemben 200 A áramnál ez a sönt tűrhetetlenül nagy feszültségesést és veszteséget okoz.

Ezért célszerűen azt a megoldást választottuk, hogy ellenpárhuzamos diódákkal (D_1 és D_2) különválasztottuk a motoros és generátoros áramot. Így egyszerűen megvalósítható a generátoros áram mérése. Szigetelési problémák miatt sönt helyett egyenáramú áramváltót alkalmaztunk.

Az áramkorlátozás szabályozóköre az előzőkhöz hasonló elvek alapján építhető fel. A Zener-diódáról vett alapelet a potencióméter segítségével leosztjuk, hogy az áramkorlátozás küszöbértékét a kívánt határok között változtatni tudjuk. Ezzel a leosztott feszültséggel hasonlítjuk össze az áramváltó munkaellenállásáról vett áramvisszavezetést. A különbséget tranzistoros fokozat bázisára visszük. Minthogy az áramszabályozás pontosságával kapcsolatos követelmények mérsékeltek, az áramkorlátozásnál nincs szükség külön háromszögjel alkalmazására. Így az áramkorlátozás működése esetén a kapcsolóerősítők kapcsolási frekvenciája nem 100 Hz, hanem az egész rendszer átviteli tulajdonságai által meghatározott frekvenciájú spontán kapcsolóüzem alakul ki. Itt a körerősítést a tranzistoros fokozat kollektor- és emitterkörü ellenállásviszonyainak megváltoztatásával tudjuk a megfelelő értékre beállítani.

Az áramkorlátozásnál negatív alapjellel pozitív ellenőrző jelet hasonlítunk össze. Ha az áram a beállított érték alá csökken, a visszavezetett feszültség értéke csökken, a tranzisztor bázisára negatívabb feszültség kerül. A tranzisztor jobban kinyit, kollektorán az előző állapothoz képest pozitívabb feszültség jelenik meg. A soron következő jelformáló elem (1) kimenetén keskenyedő impulzussorozat jelenik meg. Ez a jel azonos fázisban megy tovább a passzív „VAGY”-kapun (3). A kettős inverteren (4) $2 \times 180^\circ = 360^\circ$ -os fázisfordítás történik, ami a viszonyokon nem változtat. Majd ismét egy passzív „ÉS” (6), később „VAGY”-kapu (8) következik, melyeken még mindig az eredetileg keskenyedő impulzussorozat jelenik meg. Mint látható, ez a jelsorozat a beavatkozó szerven keresztül a gép főmezejét erősíti, mert a hozzáerjesztés nő, az ellengerjesztés csökken. A gép tehát megnöveli generátoros áramát.

A feszültségszabályozás és áramkorlátozás közös „VAGY”-kapuja (3) biztosítja azt, hogy a rendszer átmehet feszültségszabályozásból áramkorlátozásba és viszont.

Ha ugyanis egy beállított feszültség esetén az ugyancsak beállított áram túlhaladna a megengedett értéket, az áramkorlátozás rendelkező jelét hordozó impulzusok szélesebbé válnának. Ez maga után vonja azt, hogy a gép feszültsége és árama lecsökken. A kisebb feszültséghez keskenyedő impulzussorozat tartozik, tehát a „VAGY”-kapu bemenetén egy szélesebb és egy keskenyebb impulzussorozat jelenik meg, így a kimeneten is szélesebb impulzusok lesznek, a generátor csökkenteni fogja áramát.

Generátoros üzembről motoros üzemre — és fordítva — az áttérés külső parancsra 12 V, 1 mA-es jel segítségével történik.

A 9-3. ábrán látható, hogy mind a frekvenciaszabályozás, mind a feszültségszabályozás és áramkorlátozás érzékelő körei állandóan üzemben vannak, és az ellenőrző jel függvényében különböző szélességű impulzussorozatot továbbítanak. A szükséges üzemműködésnek megfelelően az egyik jelsorozatnak működtetni kell a beavatkozó szervet, a másik jelsorozatnak nem szabad beavatkoznia. Ezt a feladatot látják el az üzemműködésért felelős „ÉS”-kapuk, melyeket nulla feszültséggel zárni és negatív feszültséggel nyitni lehet.

A fent leírtakból látható, hogy a szabályozókör típuselemekből való felépítése könnyebbséget jelent a tervező részére. A három érzékelő szerv, valamint azok tápegységei kivételével minden elem készen kapható, így áramkörüi számításokkal — ami a tervezés legnagyobb és legfáradtságosabb munkája — csak nagyon keveset kell foglalkozni.

4. Átviteli függvény. Hatásvázlat. Stabilitás

Stabilitás szempontjából az egyenáramú gépnek, mint motornak a viselkedésével érdemes foglalkozni. Abban az esetben ugyanis, ha az egyenáramú gép mint generátor üzemel, a rendszer egyidőálló. Ilyenkor stabilitási problémák nem merülhetnek fel, a rendszer strukturálisan stabilis.

Az egyenáramú gép dinamikus tulajdonságaira jellemző átviteli függvényt — amikor az mint motor üzemel — figyelembe véve azt, hogy a beavatkozás gerjesztőfeszültséggel történik, a következő egyenletről határozhatjuk meg:

$$Y_{GN}(p) = A_{GNO}(1 - 2q_N) \frac{1 - \frac{q_N}{1 - 2q_N} pT_v}{(1 + pT_v)(1 + pT_{MN})}, \quad (3)$$

$$\text{ahol: } A_{GNO} = \frac{\Omega_{MNO}}{I_{GN}} \quad (3a)$$

az üresjárású átviteli tényező,

$$q_N = \frac{R_A I_{AN}}{C \Omega_{MNO} I_{GN}} \quad (3b)$$

a gép relatív armatúraköri ohmos feszültségesése;

$T_v = \frac{L_A}{R_A}$ az armatúraköri villamos időállandó,

$T_{MN} = \frac{J R_A}{(C_2 I_{GN})^2}$ a motor elektromechanikai időállandója;

J a gép lendítőtömege;

R_A a gép armatúraköri ellenállása;

I_{AN} a motor névleges árama;

Ω_{MNO} az I_{GN} gerjesztőáramhoz tartozó üresjárású szögsebesség;

C értékét a következő egyenletről határozhatjuk meg:

$$M_{TN} = C I_{GN} I_{AN}. \quad (4)$$

A (3) egyenlethez a következő megfontolás útján juthatunk el.

a) Az állandósult állapotokat vizsgálva:

A 9-8. és 9-9. ábrán a motor kapcsolási rajzát, illetve a szögsebesség — gerjesztőáram — jelleggörbéit láthatjuk. Ha feltételezzük, hogy a motor az N pontnak megfelelő névleges paraméterekkel dolgozik, akkor a (4) egyenleten kívül felírhatjuk a következőt:

$$U_{KN} = R_A I_{AN} + C_1 \Omega_{MN} I_{GN}. \quad (5)$$

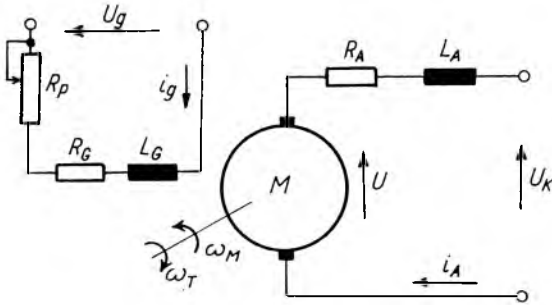
Ha az N munkapontban gerjesztőáram- és nyomatékváltozás következik be, az feltétlenül a szögsebesség és az armatúraáram megváltozását vonja maga után.

Így a munkapont egy adott P pontba fog eltolódni, melyre a (4), (5) egyenletek a következőképpen módosulnak:

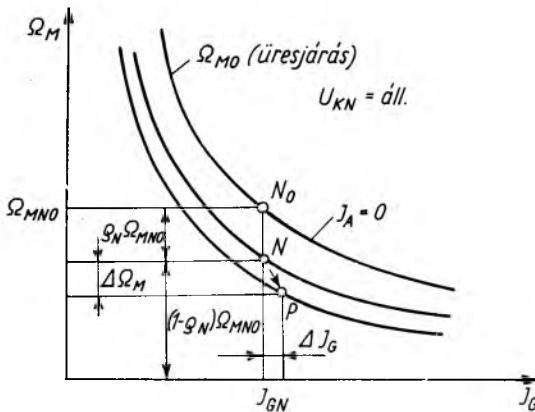
$$U_{KN} = R_A(I_{AN} + \Delta I_A) + C(\Omega_{MN} + \Delta\Omega_M)(I_{GN} + \Delta I_G), \quad (6)$$

$$M_{TN} + \Delta M_T = C(I_{GN} + \Delta I_G)(I_{AN} + \Delta I_A). \quad (7)$$

Ezek az egyenletek már alkalmasak arra, hogy — különbségüket képezve — a szabályozott jellemzőt, a módosított jellemzőt és a zavaró jellemzőt meghatározzuk.



9-8. ábra. Gerjesztőfeszültséggel szabályozott egyenáramú motor helyettesítő kapcsolási rajza



9-9. ábra. Gerjesztőfeszültséggel szabályozott egyenáramú motor külső jelleggörbéi

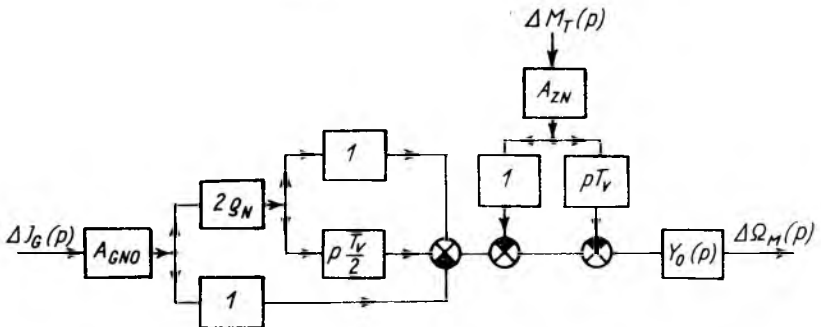
Bár ezek nem képeznek lineáris egyenletrendszert, de kis változásokat feltételezve lineárisnak tekinthetők.

b) Az átmeneti üzemet leíró egyenleteket szintén abból a feltételből írhatjuk le, hogy a változást megelőzően a gép az N munkapontban dolgozott. Ebben az eset-

ben az armatúrakörre felírt feszültségegyensúlyt kifejező Kirchhoff-törvény és a nyomatékok egyensúlyát kifejező egyenlet:

$$U_{KN} = R_A(I_{AN} + \Delta i_A) + L_A \frac{d\Delta i_A}{dt} + C_1(I_{GN} + \Delta i_G)(\Omega_{MN} + \Delta \omega_M); \quad (8)$$

$$M_{TN} + \Delta m_T + J_M \frac{d\Delta \omega_M}{dt} = C(I_{GN} + \Delta i_G)(I_{AN} + \Delta i_A) \quad (9)$$



9-10. ábra. Gerjesztőfeszültséggel szabályozott egyenáramú motor hatásvázlata

Ha (8) és (9) egyenleteket rendezzük és elvégezzük a (3a) és (3b) helyettesítéseket, a (3) egyenlethez jutunk. Ennek alapján felrajzolhatjuk az egyenáramú motorra a 9-10. ábrán látható részletes hatásvázlatot.

A megfelelő értékeket helyettesítve, az adott gép átviteli függvénye:

$$Y_{GNO}(p) = 14,15(1 - 2 \cdot 1,088) \frac{1 - \frac{1,088}{1 - 2 \cdot 1,088} \cdot 0,028p}{(1 + 0,028p)(1 + 1,89p)} =$$

$$= 14,15 \frac{-1,176 - 0,505p}{(1 + 0,028p)(1 + 1,89p)} \quad (10)$$

A gép átviteli függvénye azonban nem tartalmazza a generátor gerjesztőköri időállandóját. Ezt az időállandót a következő taggal vesszük figyelembe:

$$Y_G(p) = \frac{A_G}{1 + pT_G},$$

ahol

$A_G = 1/R_G$ a tag átviteli tényezője;

R_G a gerjesztőkör teljes ellenállása;

T_G a generátor gerjesztőköri időállandója.

A tachométer átviteli tényezője: A_{TG} .

Az erősítő átviteli tényezője: A_{sz} .

A tachométer-feszültséget leosztó potenciométer átviteli tényezője: A_p .

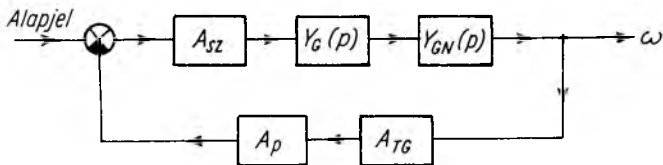
A teljes szabályozási kör egyszerűsített hatásvázlata a 9-11. ábrán látható.

A felnyitott kör erősítési tényezője:

$$K = A_{GNO} A_G A_{TG} A_{sz} A_p.$$

A 165 V kapocsfeszültségre vonatkozó értékek helyettesítésével

$$K = 28,5 \text{ dB.}$$



9-11. ábra. A teljes frekvenciaszabályozó kör egyszerűsített hatásvázlata

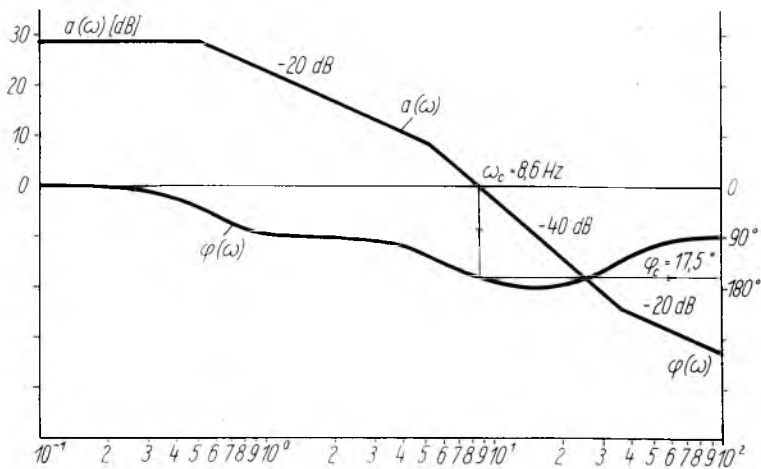
A felnyitott kör átviteli függvénye:

$$Y(p) = Y_{GN}(P) Y_G(p) A_{TG} A_{sz} A_p;$$

behelyettesítve:

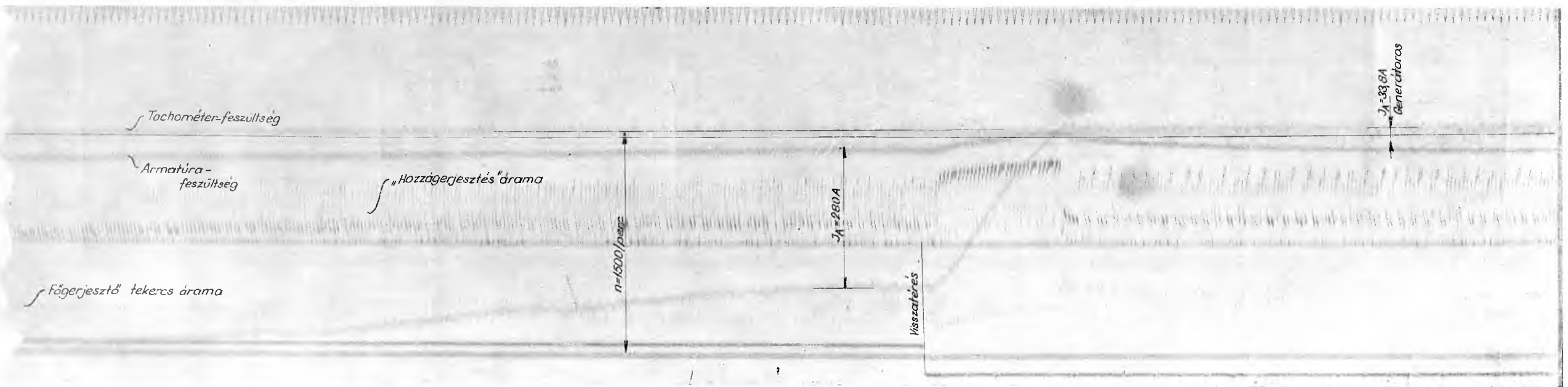
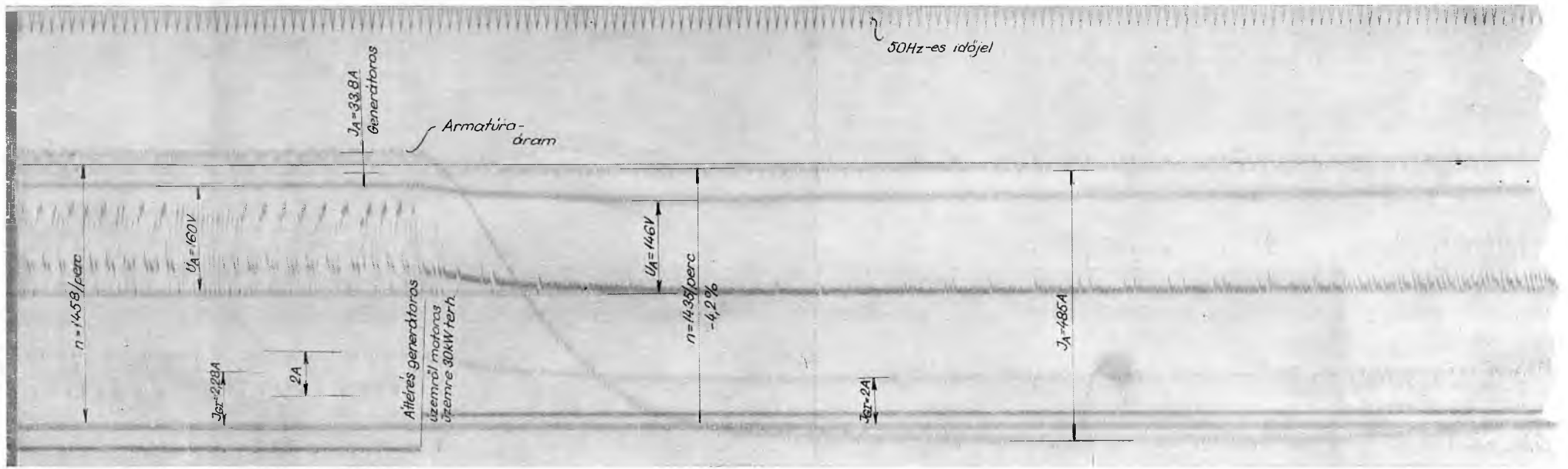
$$Y(p) = 27,85 \frac{-1,176 - 0,505p}{(1 + 0,028p)(1 + 1,89p)(1 + 0,18p)}. \quad (11)$$

A (11) egyenlet alapján fölrajzolt közelítő Bode-diagram a 9-12. ábrán látható. Ennek alapján a vágási körfrekvencia $\omega_c = 8,6 \text{ Hz}$, a szabályozási idő $\pi/\omega_c < T_s < 3\pi/\omega_c$ azaz $0,367 \text{ s} < T_s < 1,1 \text{ s}$, a fázistöbblet pedig $\varphi_t = 17,5^\circ$. Ennek alapján

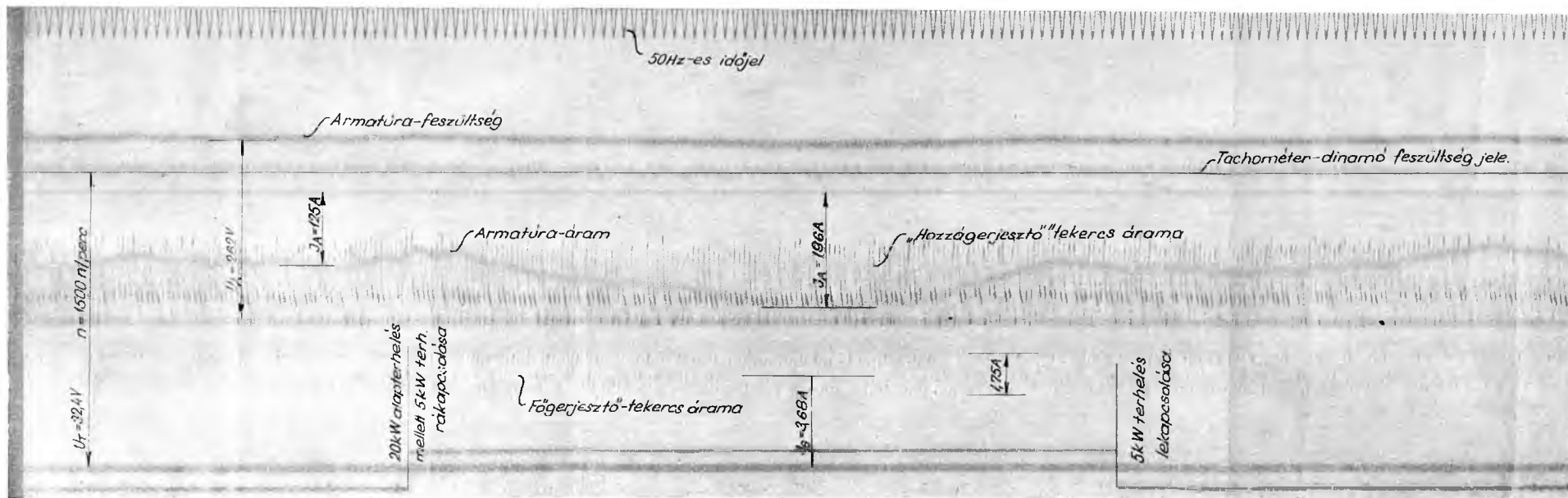


9-12. ábra. A felnyitott frekvenciaszabályozó kör közelítő Bode-diagramja

— minthogy φ_t pozitív — várható, hogy a szabályozás stabil, φ_t kis értéke miatt azonban a tranziensek lefolyása nem nagyon kedvező. A 9-13. és 9-14. ábrán látható ellenőrző oszcillogramok ezzel szemben semmiféle túllendülés jeleit nem mutatják. Ez nyilván azzal magyarázható, hogy az érintőkkel közelített ampli-



9-14. ábra. Átmeneti állapot oszcillogramja (generátoros üzemből motoros üzemre és vissza)



9-13. ábra. 260 V-os motoros üzem oszcillogramja

50Hz-es időjel

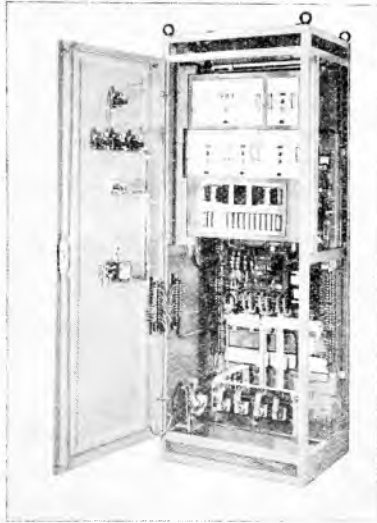
$J_A = 2A$

$J_A = 485A$

$J_A = 33.8A$
Generátoros

tűdó—frekvencia-diagramból adódó ω_c vágási körfrekvencia a valóságosnál nagyobb, és ezért a fázistöbblet a valóságosnál kisebbre adódik.

A 9-13. ábrán látható oszcillogram olyan állapotot rögzített, amikor az egyenáramú gép mint motor üzemel. 66% alapterhelés mellett 16,6% terhelést dinamikusán rá- és lekapcsolunk az egyenáramú motort terhelő szinkron generátorra. Megfigyelhető, hogy a motor fordulatszámában kiértékelhető fordulatszám-változás nem történt.



9-15. ábra.
A szabályozóberendezés fényképe

A 9-14. ábra oszcillogramja áttérést mutat generátoros üzembről motoros üzetre és vissza. A gépcsoport a névleges terheléssel, azaz 30 kW-tal volt terhelve. Látható, hogy a gépcsoport fordulatszáma az átmenet során alig változik.

A 9-15. ábra az itt ismertetett szabályozóberendezés Anód Áramirányítógyárban legyártott nullszéria-sorozatának egyik példányát mutatja.

Irodalom

Dr. Csáki F.: Szabályozástechnika II. Tankönyvkiadó Budapest, 1963.

Bencze J.: Szünetmentes áramforrások frekvencia- és töltésszabályozása. Villamos Hajtásszabályozási Ankét Előadásai. 53—66. old. MEE. Budapest, 1964.

10.

Váltakozóáramú generátoros vagonvilágítási rendszer

CSABA BÉLA

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk röviden ismerteti a vagonvilágítási áramfejlesztő berendezések fejlődését, ezen belül főleg azokat a tényezőket, amelyek lehetővé, sőt szükségszerűvé tették a váltakozóáramú rendszerek megjelenését. Részletesen tárgyalja azt a világviszonylatban is korszerű, körmöspólusú szinkrongenerátoros vagonvilágítási áramfejlesztő berendezést, amelyet az Egyesült Villamosgépgyár és Villamosipari Kutató Intézet kooperációban fejlesztett ki.

СИСТЕМА ГЕНЕРАТОРА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ДЛЯ ОСВЕЩЕНИЯ ВАГОНОВ

Б. Чабá

Резюме

В статье коротко описывается развитие генераторов для освещения вагонов и в рамках этого в основном такие факторы, которые позволили, более того, сделали необходимым появление систем переменного тока. Подробно рассматривается и в мировом отношении современный синхронный генератор с когеобразным полюсом для освещения вагонов, который разработан заводом электромашин (EVIG) в кооперации с Исследовательским Институтом Электротехнической Промышленности.

STROMERZEUGERSYSTEM MIT DREHSTROMGENERATOR FÜR EISENBAHN-BELEUCHTUNG

B. Csaba

Zusammenfassung

In der Arbeit wird kurz die Entwicklung der Stromerzeuger-Anlagen für Eisenbahn-Beleuchtung dargelegt. In diesem Rahmen werden die Faktoren beschrieben, die das Erscheinen der wechselstromsysteme ermöglichten und sogar erforderlichlich machten. Die Arbeit behandelt ausführlich die durch die Elektromaschinenfabrik „Egyesült Villamosgépgyár“ und das Forschungsinstitut für Elektrotechnik in Kooperation entwickelte, auch im Weltausmass zeitgemässe, mit Schenkelpol-Synchrongeneratoren arbeitende Stromerzeuger-Anlage für Eisenbahn-Beleuchtung.

A. C. GENERATOR SYSTEM FOR RAILWAY COACH ILLUMINATION

B. Csaba

Summary

In this paper, the development of the equipment for the illumination of railway coaches is briefly reviewed, putting into the limelight mainly the factors which enabled and more-over made indispensably necessary the introduction of the a. c. systems. The

claw-type pole synchronous generator equipment for the illumination of railway carriages developed in cooperation by the Egyesült Villamosgépgyár and the Villamosipari Kutató Intézet corresponding to the highest international standard is dealt with in detail.

A vasúti járművek világítási berendezésének áramforrásai kivétel nélkül egyenáramúak, és ez a rendszer maradt egyeduralgó annak ellenére, hogy az ipari berendezések többségében a váltakozóáramú energiaszolgáltatás honosodott meg. Az egyenáramú áramforrás használatát járműveken az energiatárolás szükségessége indokolja, ami lúgos vagy savas akkumulátorok felhasználásával történik. Az akkumulátorok töltésére és a mozgó jármű fogyasztóinak táplálására egészen a legújabb időkig kizárólagos megoldásként egyenáramú dinamókat használtak.

A vasúti járművek tengelyéről hajtott dinamóval szemben követelmény, hogy a menetsebesség, illetve tengelyfordulatszám változásának ellenére is állandó, és a menetiránytól függetlenül azonos polaritású feszültséget adjon. A legáltalánosabban elterjedt egyenáramú vagonvilágítási dinamóknál a feszültség állandóságát külön szabályozó, a változatlan polaritást pedig olyan kefehid biztosítja, amely a kefesúrlódás következtében önműködően áll be a menetiránynak megfelelő helyes állásba. Az elforduló kefehid vagy körülményes segédpólusátkapcsolást tesz szükségessé, vagy a segédpólusok elmaradását vonja maga után, ami azonban a kommutációs problémák súlyosbodását okozza, és emiatt kb. 5 kW fölötti teljesítményeknél már nem is alkalmazható. A kommutátorra és a tekercselt forgórészre ható centrifugális erő, a kommutátorra felfekvő szénkefék kopása határt szab a dinamó forgássebességének, ezzel pedig a dinamók egységnyi teljesítményre vonatkoztatott súlyának csökkentését korlátozza. Az egyenáramú dinamók üzemvitelében elkerülhetetlen a rendszeres karbantartás, az elkopott szénkefék kicserélése, a kommutátorok időszakos „szabályozása” és a gépben felgyülemlt szénpor eltávolítása. Az üzemvitel említett nehézségei ellenére az egyenáramú dinamók hosszú időn át betöltötték hivatásukat, és a feladat egyetlen megoldását képviselték.

Az utóbbi években rohamosan fejlődő technika olyan új megoldásokat tett lehetővé, amelyek sok szempontból jobb eredményt hoztak, és ma már egyértelműen megállapítható, hogy a vasúti kocsikon és a vontatószerkezőkön használt egyenáramú dinamók ideje lejárt. A korszerű vagonvilágítási áramfejlesztőgép a félvezető egyenirányítóval kiegészített váltakozóáramú generátor.

Már a szokásos felépítésű szinkron generátornak is lényeges előnyei vannak az egyenáramú dinamóval szemben. Nincsen kommutátora, csak csúszógyűrűi, így elmaradnak a kommutációs nehézségek és csapágyazott, elforduló kefehidra sincs szükség, mert az egyenirányító kimenő kapcsain a polaritás független a generátor forgásirányától. A főáramkör helyett a gerjesztőkörben alkalmazott kisebb és kevesebb szénkefe sima felületű csúszógyűrűn fut és ez a képződő szénpor mennyiségét minimálisra csökkenti. A vasúti járművek részére azonban olyan különleges kivitelű generátorok is születtek, melyeknek csúszógyűrűi sincsenek és a gép forgórésze is tekercsletlen. A centrifugális erő okozta problémák megszűnésével tág lehetőség nyílt a fordulatszám növelésre és így a töltőgenerátor súlyának csökkentésére.

Az Egyesült Villamosgépgyár által kifejlesztett váltakozóáramú töltőgenerátor is ilyen tulajdonságokkal rendelkezik. Kefe nélküli, tekercsletlen forgórészrel készült heteropólusis háromfázisú szinkron generátor, amelynek gerjesztőtekercsei a pajzson helyezkednek el. Így a gép belsejében semmiféle kopásnak, elhasználódásnak kitett alkatrész sincsen, és kezelőnyílásra sincsen szükség.

Ez a generátor a hozzákapcsolt egyenirányítóval együtt kommutátor és kefe nélküli egyenáramú áramforrást képez.

Amint említettük, a vasúti töltőgenerátorok feszültségét állandó értéken kell tartani, és ez a követelmény természetesen mind egyenáramú, mind váltakozóáramú kivétel esetén fennáll. A feszültséget az öngerjesztő kapcsolásban működő generátor gerjesztőkörébe iktatott szabályozó tartja állandó értéken. A szabályozók — a generátorhoz hasonlóan — az utóbbi években lényegesen megváltoztak. A legutóbbi időkig kizárólag mechanikus alkatrészeket tartalmazó (szénoszlopos vagy legördülő érintkezős) szabályozókkal oldották meg a feladatot. A félvezető technika fejlődése lehetővé tette vasúti üzemre különösen alkalmas, mozgó alkatrészeket nem tartalmazó szabályozók kifejlesztését. Már a váltakozóáramú generátorok megjelenése előtt készültek félvezető elemeket tartalmazó szabályozók egyenáramú dinamókhöz, nagyobb arányú elterjedésükre azonban nem került sor, mert a váltakozóáramú generátorok megjelenése magát az egyenáramú gépet kezdte kiszorítani.

A VKI az Egyesült Villamosgépgyár körmospólusú generátorához teljes vagonvilágítási áramfejlesztő rendszert fejlesztett ki, amely az alábbi egységeket tartalmazza.

1. WG 140—K 6 váltakozóáramú körmospólusú generátor
2. WE—1 Egyenirányító
3. RW—1 Szabályozó
4. SZE—1 Nemlineáris előtét.

A fenti elemekből álló összehangolt vagonvilágítási áramforrás műszaki adatai:

Névleges feszültség:	30/24 V
Névleges áram:	200 A
Bekapcsolási fordulatszám:	800/min
(Bekapcsolási fordulatszámon az áramforrás terheletlen állapotban 26 V feszültséget szolgáltat.)	

Legkisebb terhelési fordulatszám:	
30 V, 200 A terhelésnél:	1400/min
32 V, 200 A terhelésnél:	1500/min
Maximális fordulatszám:	6000/min

Névleges teljesítmény:	
1400/min-nél:	6 kW
1500/min-nél:	6,4 kW

Beállítható szabályozott jellemzők:

Akkumulátor-töltőfeszültség:	24... 32 V
Áramkorlátozás:	110...200 A

A szabályozott jellemzőket a rendszer $\pm 3\%$ pontossággal tartja terheléstől függetlenül a megadott generátor-fordulatszám tartományon belül.

A nemlineáris ellenállást (SZE-1) beiktató mágneskapcsoló meghúzása 20 és 30 V között állítható be. Maximális környezeti hőmérséklet a rendszer minden egységére: 40 °C

Védettség:

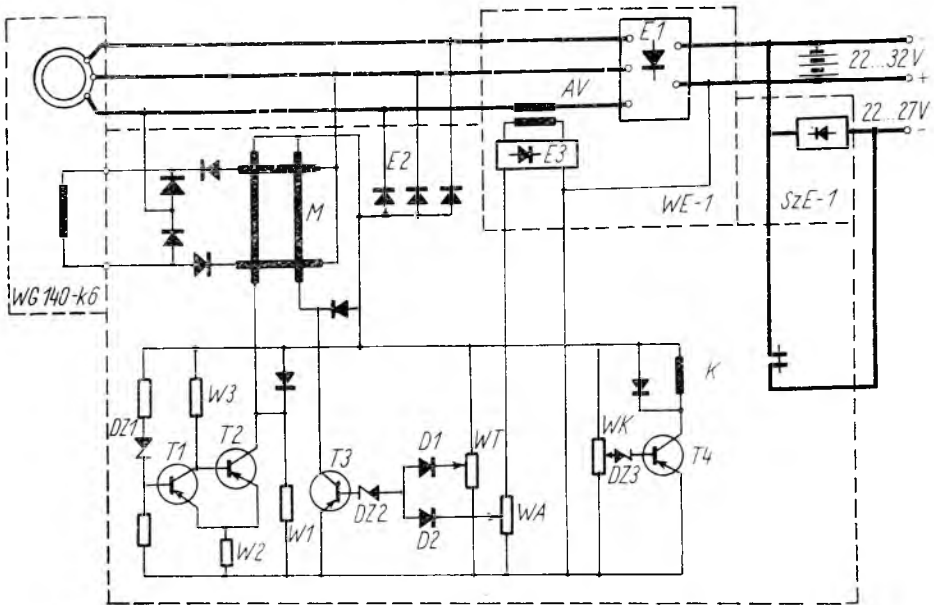
Generátor (WG 140-K6) és egyenirányító egység (WE-1): P33.

A szabályozó (RW-1) és a nemlineáris ellenállás (SZE-1) csak belsőteri elhelyezésre alkalmas.

Maximális veszteség

a szabályozóban (RW-1)	<150 W
a nemlineáris ellenállásban (SZE-1)	300 W

A teljes vonatvilágítási áramforrás egyszerűsített kapcsolási vázlatát a 10-1. ábrán látjuk. Az egyes egységeket szaggatott vonallal keretezzük be és a keret jobb alsó sarkába írtuk a típusjelet.



10-1. ábra. A teljes vagonvilágítási áramforrás egyszerűsített kapcsolási vázlat

A rendszer összehangolt elemeinek működése a következő. A generátor ön-gerjesztő kapcsolásban működik, gerjesztőtekerce az M mágneses erősítőn keresztül a generátor kapcsairól kap táplálást. Amikor a vagon mozgásba jön, sebességével és ezzel együtt a generátor fordulatszámával arányosan nő a generátor remanens feszültsége.

A remanens feszültség hatására áram kezd folyni az $E1$ egyenirányítóból a $W2$ ellenálláson, a $T2$ tranzisztor emitter—bázis-körén, a $W3$ ellenálláson és az $E2$ egyenirányítón keresztül. Ez az áram nyitja a $T2$ tranzisztor emitter—kollektorkörét. A nyitott $T2$ tranzisztor a $W2$ ellenállással söntöli $W1$ -et, az M mágneses erősítő nyitó értelemben működő előfeszítő tekercsével sorbakötött ellenállást. Ily módon a kis remanens feszültség az előfeszítő tekercsen a mágneses erősítő nyításához elegendően nagy áramot tud szolgáltatni.

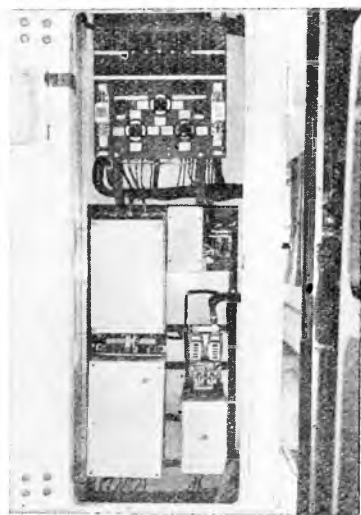
A generátor meghatározott fordulatszámmal felgerjed és miután kapcsolásfeszültsége — egyenirányítás után — 15...20 V-ot ért el, megszüntethető a mágneses erősítő forszírozott nyitó értelmű előmágnesezése, mert a tranzisztoros áramkör megnövekedett tápfeszültsége most már egyedül a $W1$ ellenálláson keresztül is elegendően nagy áramot képes áthajtani. Ekkor a $DZ1$ zenerdióda vezetni kezd, nyitja a $T1$ tranziszort, mire $T2$ tranzisztor lezár és ezzel a mágneses erősítő előfeszítő köri ellenállása az üzemszerűen szükséges $W1$ értékre nő. A vagon sebességének, illetve a generátor fordulatszámának további növekedésével a generátor az $E1$ egyenirányítón keresztül táplálni kezdi a fogyasztókat és tölteni az akkumu-

látortelepét. 24 V-os rendszerben az akkumulátor töltéséhez 31...32 V feszültség szükséges. A generátor-fordulatszám növekedése a töltési feszültség túllépését okozná, ha a *T1* tranzisztor nyitása ezt meg nem akadályozná.

A generátor feszültségét a *WT* feszültségosztón leosztott feszültséggel érzékeljük, amelyet összehasonlítunk a *DZ2* zenerdióda stabil feszültségével. Amikor a leosztott feszültség ezt túllépi, áram kezd folyni a *DZ2* zenerdiódán és *T3* tranzisztor emitter—bázis-körében. Ez az áram nyitja *T3* emitter—kollektor-körét. A *T3* tranzisztor kollektorárama a mágneses erősítő vezérlőtekerccsén folyik át és ez az áram a mágneses erősítőt zárni és ezzel a generátor gerjesztőáramát csökkenteni igyekszik. A szabályozó rendszer körerősítését úgy választottuk meg, hogy a generátor feszültségének már csekély mértékű növekedése is igen erőteljesen csökkenti a gerjesztőáramot és ezzel biztosítja a feszültség állandó értéken tartását.

Ha az akkumulátor erősen kisütött állapotban van, pl. mert a vagon hosszú ideig állt kivilágított állapotban, a névleges töltőfeszültségen olyan nagy lehet a töltőáram, hogy azt a generátor túlterhelés nélkül már nem tudja szolgáltatni. A túlterhelés megakadályozására a feszültség szabályozót áramkorlátozással egészítettük ki. Az áramkorlátozás érzékelője az egyenirányító-egységben elhelyezett *ÁV* váltakozóáramú áramváltó, amely *E3* egyenirányítón keresztül táplálja a *WA* feszültségosztót. A *WA*-n leosztott feszültség ily módon arányos a generátor áramával. Ha a feszültségosztón leosztott feszültség túllépi a *DZ2* zenerdióda stabil feszültségét, áram kezd folyni *D2* diódán keresztül és így a *WA* feszültségosztó kapcsolódik *T3* tranzisztor báziskörébe, ahonnan ezzel egyidejűleg a *D1* dióda a feszültség-érzékelő kör *WT* feszültségosztóját leválasztja. Ezt követően a rendszer áramszabályozóként működik mindaddig, amíg az akkumulátor töltőfeszültsége a beállított maximális generátoráram és a mindenkori fogyasztói terhelőáram különbségeként jelentkező töltőáram hatására el nem éri a *WT* feszültségosztóval beállított értéket. A töltőfeszültséget a szabályozó ezt követően korlátozza azzal, hogy a *D1* dióda nyit, az áramkorlátozó-kört pedig a *D2* dióda leválasztja a *T3* tranzisztor bázisköréről. Amint látható, *D1* és *D2* diódák az áramkorlátozó és a töltőfeszültség-szabályozó üzemállapotot választják szét. A korlátozni kívánt áram értékét a *WA* feszültségosztóval állíthatjuk be.

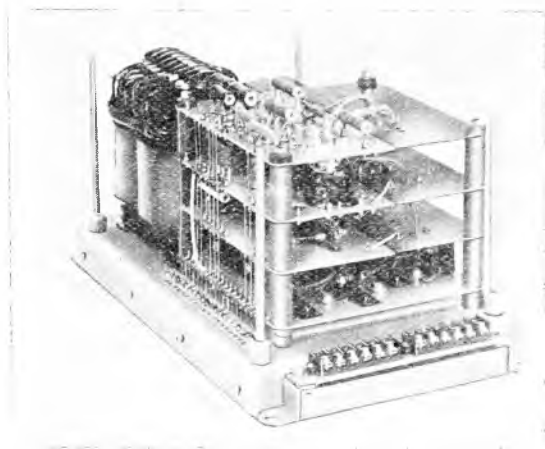
A kapcsolás eddig még nem tárgyalt része a *K* mágneskapcsoló és az azt működtető tranzisztoros áramkör. A *K* mágneskapcsoló szerepe akkor válik világossá, ha meggondoljuk, hogy az akkumulátor kapocsfeszültsége a töltési és kisütési üzemállapot között 31 V-tól 22 V-ig változik. Ez a feszültségtartomány megfelel a fénycsővilágítást tápláló központi inverteres áramforrások névleges bemenő feszültségtartományának, izzólámpák közvetlen táplálását azonban nem teszi lehetővé. A 26,5 V közepes feszültséghez képest fellépő kb. $\pm 17\%$ -os feszültségváltozás úgy csökkenthető, hogy kb. 27 V elérésekor az izzólámpás fogyasztók áramkörébe a terheléstől gyakorlatilag független 5 V-os feszültségesezt hozunk létre az *SzE*—



10-2. ábra. A vagon kapcsolófülkéje. (Baloldalt lent a szabályozó, felette a nemlineáris ellenállás)

típusú nemlineáris ellenállás beiktatásával. Ily módon elérhető, hogy az izzólámpás fogyasztók feszültsége csak 22 és 27 V között változzék, ami $\pm 10\%$ -os feszültség-ingadozásnak felel meg, és alárendelt szerepet betöltő izzólámpáknál megengedhető. A nemlineáris ellenállás beiktatását a *K* mágneskapcsoló nyugalmi érintkezője végzi.

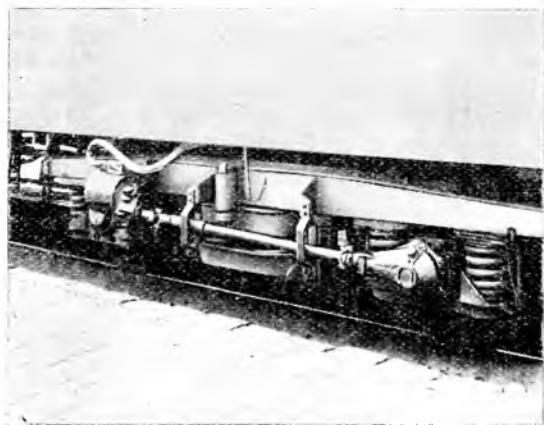
Mint már említettük, a nemlineáris ellenállást kb. 27 V akkumulátorfeszültség elérésekor kell az izzólámpákat tápláló áramkörbe beiktatni. A *K* mágneskapcsolót



10-3. ábra. A feszültszabályozó, leszerelt burkolattal

feszültség 22 és 32 V között változik, az izzólámpás fogyasztók feszültsége csak 22 és 27 V között változhat. A 10-2. ábrán az ismertetett áramforrással felszerelt vagon kapcsolófülkéje látható, baloldalt lent a szabályozó, előlött a nemlineáris ellenállás van azonos méretű dobozban elhelyezve.

A szabályozó szerkezeti felépítése a 10-3. ábrán látható. A félvezető alkatrészek



10-4. ábra. OSZZSD kocsiforgózsámolya a generátorral

a hozzájuk tartozó ellenállásokkal együtt 4 db szerelőlapon helyezkednek el. A szerelőlapok könnyen bontható csavaros kötéssel vannak emeletes elrendezésben egymással összefűzve, villamos kapcsolatot a lapok azonos szélén sorakozó forresúcok csupasz, egyenes vezetékkel való összekötése biztosít. Az egyes lapok huzalozása csupasz vezetékkel, keresztvezésmentesen, nyomtatott huzalozáshoz hasonló kivitelben készült, és ezért nyomtatott huzalozásra egyszerűen lehet áttérni.

Az ismertetett vagonvilágítási áramfejlesztő rendszer, amely

műszaki megoldásaiban felzárkózik a szakterület világszintjéhez, teljes mértékben alkalmas arra, hogy kielégítse a korszerű vagonvilágítási igényeket. A választott műszaki megoldások eredményeként a berendezés nem igényel karbantartást a vagonokra előírt felújítási perióduson belül.

A fentiekben ismertetett váltakozóáramú vagonvilágítási áramforrás első kísérleti példánya 1965 április óta üzemel kifogástalanul a MÁV vonalain. A második kísérleti példány 1965 decemberétől szintén kifogástalanul működik a Magyar Vagon- és Gépgyár új, OSZZSD típusú kocsiján. A 10-4. ábrán ennek a kocsinak a forgószámolya látható a generátorral és annak hajtóművével. Szembetűnő a 6 kW-os generátor kis mérete. 1966-ban négy darab gyárszerűen előállított berendezést (nullszéria) szereltek fel további OSZZSD típusú kocsikra és a sorozatgyártás is megindult.

Irodalom

- [1] *Dr. Vitályos L.*: Vonatvilágítási szabályozóberendezések és legújabb fejlődésük. Elektrotechnika 1961. 8. sz. 357—375 old.
- [2] *Dr. Vitályos L.*: Neue automatische Regelung in der Zugbeleuchtungstechnik. Sonderdruck. 11. Internationale Tagung der Elektrotechniker. Berlin, Nov. 1965.

Tirisztoros központi váltóirányító fénycsövek táplálására

FÜZESI ENDRE

ÖSSZEFOGLALÁS

A vasúti személykocsi világitásával szemben támasztott követelmények az utóbbi években jelentősen növekedtek. Az új követelmények kielégítése csak fénycsővilágítással lehetséges. A korábbi megoldásokban alkalmaztak közvetlenül egyenfeszültségről táplált fénycsöveket is, de az általános megoldás az volt, hogy az akkumulátor egyenfeszültségét motoros vagy tranzisztoros váltóirányítóval váltakozófeszültségé alakították és erről táplálták a fénycsöveket. E két utóbbi rendszert ma is elterjedten alkalmazzák. A tirisztor megjelenése újrendszerű váltóirányító kidolgozását tette lehetővé. A Villamosipari Kutató Intézetben 26 db 20 W-os fénycső táplálására alkalmas központi invertert dolgoztunk ki, amelyek első kísérleti példányai 1966 januárjától sikeresen üzemelnek. Az inverter ún. párhuzamos inverter, bemeneti egyenfeszültsége 17...32 V; a kimeneti feszültsége 220 V szabályozott, jó közelítéssel szinuszos, 425 Hz frekvenciájú. A kimeneti feszültség szabályozását mágneses erősítő végzi.

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ИНВЕРТОР С ТИРИСТОРОМ ДЛЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП

Э. Фюзеси

Резюме

Требования напротив освещения железнодорожных пассажирских вагонов с последними годами значительно нарастали. Удовлетворение новых требований возможно только люминесцентным освещением. В старых решениях употреблены и люминесцентные лампы, питаемые с постоянного напряжения, но общее решение было то, чтобы постоянное напряжение аккумулятора преобразовано моторным или транзисторным инвертором на переменное напряжение и этим питаются люминесцентные лампы. Оба последние решения сильно употреблены и сегодня. Появление тиристора доставляло возможность вырабатывать новых систем инвертора. В электропромышленном Исследовательском Институте выработан центральный инвертор, пригодный для питания 26 шт. Люминесцентных ламп, каждый по 20 вт, первые экспериментальные экземпляры которых успешно работают от января 1966 года. Инвертор — это так называемый параллельный инвертор, входное напряжение которого может изменяться от 17 до 32 вольт, а выходное напряжение регулированное на 220 в и имеет частоту 425 гц. Регулирование выходного напряжения исполняет дросель насыщения.

THYRISTORWECHSELRICHTER FÜR LEUCHTSTOFFLAMPEN

E. Füzesi

Zusammenfassung

Die Forderungen gegenüber der Beleuchtung von Personenzug-Wagen haben sich in letzteren Jahren wesentlich erhöht. Die Befriedigung der neuen Forderungen ist nur mit Leuchtstofflampen Beleuchtung möglich. Bei den früheren Lösungen wurden auch Leuchtstofflampen unmittelbar von Gleichspannung der Akkumulator-

rsnbatterie mittels eines transistorisierten Wechselrichters oder Maschinenumformers zu Wechselspannung umgeformt und die Leuchtstofflampen damit gespeist. Die letzteren zwei Systemen sind auch heutzutage noch verbreitet verwendet. Das Auftauchen des Thyristors hat die Ausarbeitung eines Wechselrichters neues Systems ermöglicht. Im Institut haben wir einen Wechselrichter ausgearbeitet, welcher zur Speisung von 26 Stück 20 W Leuchtstofflampen genügt. Die ersten Versuchstücke sind seit Januar 1966 erfolgreich im Betrieb. Der Wechselrichter ist ein sogenannter parallel Wechselrichter, die Eingangs-Spannung kann sich zwischen 17—32 V ändern; die Ausgangsspannung ist 220 V, mit guter Näherung sinusförmlich, mit einer Frequenz von 425 Hz. Die Regelung der Ausgangs-Spannung erfolgt durch einen Magnetenverstärker.

SCR INVERTER SUPPLY FOR FLUORESCENT LIGHTING

E. Füzesi

Summary

The requirements against the illumination of railway passenger carriages increased considerably during the last few years. The new requirements can be fulfilled only by fluorescent light. In previous designs, fluorescent lamps supplied directly by storage battery were also used but the more general solution was to convert the d. c. voltage of storage battery by motor-generator set or transistorized inverter to a. c. voltage and this a. c. voltage was used to supply the fluorescent lamps. These two systems are still widely used at present. The development of the thyristor enabled the design of inverters built on new principles. At the Research Institute of the Electric Industry, a new inverter was designed, suitable for supplying 26 fluorescent lamps of 20 W. The first experimental devices have been operated successfully from January, 1966. The inverter is parallel inverter; the input d. c. voltage may vary from 17 up to 32 V; the output voltage is regulated 220 V, its waveform is fairly sinusoidal; the output frequency is 425 c/s. The output voltage is regulated by magnetic amplifier.

A világítástechnika fejlődésével a közszolgáltatási járművek utasterének megvilágításával szemben támasztott követelmények változnak. Még tíz évvel ezelőtt a vasúti kocsik fénycsővilágítása újdonságnak számított, ma már általános követelménnyé kezd válni. Ezt fejezi ki lényegében az UIC előírása is, amelynek értelmében a nemzetközi forgalomban használt személykocsikban az utastér meghatározott pontjaiban mért megvilágításnak 150 lx-nál nagyobbak kell lennie, amit gazdaságosan gyakorlatilag csak fénycsővilágítással lehet biztosítani. A Tungstam katalógus adatai szerint a fénycsövek fényhasznosítási hatásfoka az izzólámpák fényhasznosítási hatásfokának ötszöröse is lehet, más adatok szerint ez az arány kisebb [1]. Az adatok szerint a 40 és 60 W-os fénycsövek fényhasznosítása 35 és 57 lm/W, szemben az azonos teljesítményű izzólámpák 10...20 lm/W fényhasznosításával. Ez azt jelenti, hogy ugyanolyan megvilágítás biztosításához fénycsővilágítás esetén sokkal kisebb teljesítmény szükséges, mint izzóvilágítással.

Egyenfeszültségű fénycsőtáplálás

A fénycsövek gazdaságos üzemeltetéséhez váltakozófeszültségű táplálás a kedvezőbb. Egyenfeszültségű táplálás esetén ugyanis kataforézis lép fel, a higany a katód felé sűrűsödik, ennek következtében az anódnál csökken a higanytartalom, ami az anód körüli rész feketedéséből vehető észre. Ez a fénycső fényerejének és élettartamának csökkenését vonja maga után. E hátrányt részben úgy lehet kiküszöbölni, hogy a fénycsövek polaritását időnként felcseréljük, vagy a fénycsöveket

időközönként váltakozófeszültségről üzemeltetjük. Gyökeres megoldást a különleges egyenfeszültségű fénycsövek jelentenek, amelyekben biztosítva van a katód körül összegyűlt higanynak valamilyen sönt úton az anódhoz való visszavezetése [2]. Gyakorlatilag ez azonban csak U és O alakú fénycsöveknél valósítható meg. Az egyenfeszültségű üzemeltetés hátránya továbbá, hogy csak 60...120 V tartományban alkalmazható, ugyanakkor járművilágítási rendszerekben sok esetben 12, 24 és 48 V akkumulátorfeszültséget használnak.

Az egyenfeszültségű táplálás hatásfok szempontjából sem kedvező, mivel ohmos előtétet kell alkalmazni, ami jelentős veszteséget okoz. A hatásfok általában 40...60%.

Váltakozófeszültségű fénycsőtáplálás és az alkalmazott váltóirányítók (inverterek)

A járművilágításhoz használt fénycsöveket általában váltakozófeszültségről üzemeltetik, amelyet az akkumulátor egyenfeszültségéből váltóirányító állít elő. Váltóirányítóként forgógépes vagy más mozgókontaktusú átalakítót, tranzisztoros és újabban tirisztoros átalakítókat használnak.

A fénycsővilágításhoz használt váltóirányítók gyakorlatban is jól bevált első típusai mozgókontaktusú átalakítók voltak. Nyugatnémetországban már 1950-ben alkalmaztak higanyugaras váltóirányítókat fénycsövek táplálásához vasúti kocsikon [3], amelyből több mint 15 000 darabot gyártottak. Ezek az átalakítók, mint ebbe a kategóriába tartozó minden átalakító, központi átalakítók, amelyek 1200 VA teljesítménnyel 100 Hz frekvenciájú váltakozófeszültséggel a teljes kocsifénycsővilágítást 70...80% hatásfok mellett biztosítják. Hasonló higanyugaras váltóirányítót alkalmaztak autóbuszokon is [8].

A félvezetőtechnika fejlődése új rendszerű váltóirányítók kidolgozását tette lehetővé, amelyek azonkívül, hogy nem tartalmaznak mozgó alkatrészt, a mozgókontaktusú átalakítóknál nagyobb frekvencián üzemelhetnek. A nagyobb frekvenciák alkalmazása egyrészt a fénycsövek fényhasznosítása szempontjából kedvező — mert pl. a fényhasznosítás 10 kHz-en 20%-kal jobb, mint 50 Hz-en [1] — másrészt a nagyobb frekvencia kisebb méretű fénycsőtranszformátorok és fojtók alkalmazását teszi lehetővé, aminek következtében az átalakító mérete csökken.

E fejlődés során a különböző cégek számos tranzisztoros váltóirányító-típust dolgoztak ki. Ezek általában egy vagy két fénycső táplálására alkalmasak, kis méretűek, a fénycsőelőtétellel egybeépítve a lámpatestbe szerelhetők [4, 5, 6, 7]. Frekvenciájuk különböző, 400 Hz és 10 kHz között változik. Mivel a tranzisztoros váltóirányítók alkalmazásának a tranzisztorok maximális kollektor—emitter feszültsége szab határt, ezért általában csak 24 V-os rendszerben alkalmazzák, ritkábban 48 V tápfeszültség esetén. A nagyteljesítményű tranzisztorok megjelenése központi tranzisztoros váltóirányító megépítését is lehetővé tette, de ezeket hamarosan kiszorították a tirisztoros váltóirányítók [9, 10, 11, 12].

Az ismert tranzisztoros és tirisztoros váltóirányítók szabályozatlan szinuszos feszültséget szolgáltatnak. Hatásfokuk 80...90%. A hatásfok függ az alkalmazott tápfeszültségtől, kisebb tápfeszültségnél rosszabb, mivel a kapcsolóelem feszültségése közel állandó.

A közúti és vasúti járművek világítása területén jelenleg a legkorszerűbb megoldás a félvezető váltóirányítóval táplált fénycsővilágítás. Azt nem lehet azonban egyértelműen eldönteni, hogy a félvezető váltóirányítókon belül a tranzisztor

vagy a tirisztor alkalmazása-e a kedvezőbb. Ez a kérdés egyértelmű annak eldöntésével, hogy egyedi (tranzisztoros), vagy központi (tirisztoros) váltóirányítót alkalmazunk, mivel nyilvánvaló, hogy központi váltóirányítóban a tirisztor sokkal kedvezőbb kapcsolóelem, mint a tranzisztor.

Az egyik döntő szempont, amit a választásnál figyelembe kell venni, a tápfeszültség nagysága és a tápláló oldalon keletkező túlfeszültségek. 48 V feletti tápfeszültségek esetén szinte csak a tirisztorok jöhetnek számításba, bár esetleg a szilíciumtranzisztorok is alkalmazhatók, de mivel ezek ára erősen megközelíti a tirisztorok árát és darabszámban is több szükséges, a felhasználásuk nem gazdaságos. A 48 V-os tápfeszültségnél hídkapcsolású váltóirányító esetén germániumtranzisztor még alkalmazható, a 12 és 24 V-os rendszerben feszültség szempontjából a tranzisztor és a tirisztor alkalmazása egyaránt lehetséges, bár 12 V-on a tirisztor nagyobb nyitóirányú feszültségesése és a nagyobb összárámok miatt a tirisztoros váltóirányító hatásfoka romlik.

A táplálás felőli túlfeszültségeknek gyakorlatilag két okozója van. Az egyik az esetleg tekintélyes hosszúságú egyenáramú vezetékek induktivitása által okozott túlfeszültségek, a másik a töltőrendszer által okozott túlfeszültségek az akkumulátortelep kiesése esetén. Ez utóbbi főleg a váltakozófeszültségű generátoros töltőrendszer esetén lényeges, ahol pl. 24 V-os rendszerben, ha a nagyáramú töltés során az akkumulátor a generátorról — a cellákat összekötő vezeték kiesése, vagy biztosító-kiolvadás miatt — leválik, az egyenirányító kapcsain 70...90 V nagyságú, 1...2 s időállandójú feszültség jelenik meg. Ebből a szempontból a nagyobb feszültségű tirisztorok alkalmazása a kedvezőbb, mivel nem kell külön védelemről gondoskodni.

Szerelés szempontjából a tranzisztoros átalakítók annyiban kedvezőbbek, hogy a fénycsőelöttéttel egybeépítve a lámpatestbe szerelhetők, viszont az egyenáramú tápvezeték, ami kisfeszültségű rendszerben nagy áramot vezet, rendszerint hosszú, ami nemcsak szerelés, hanem túlfeszültségek szempontjából is kedvezőtlen.

Végül nem utolsó szempont az ár kérdése. Itt lényeges, hogy hány fénycső táplálását kell biztosítani. A fénycsövek számának növelésével egyedi átalakítók esetén az összerendezés ára lineárisan, a központi tirisztoros átalakító ára lineárisnál kisebb mértékben növekszik. Ez utóbbinak az az oka, hogy a központi tirisztoros átalakító egyes egységeit, pl. a vezérlőkört, szabályozás esetén a szabályozási kör elemeinek egy részét, a kimeneti teljesítmény növelése nem befolyásolja, más elemek ára pedig a teljesítmény növelésével lineárisnál kisebb mértékben növekszik. Például magukat a tirisztorokat vizsgálva, az AEG árjegyzéke alapján megállapítható, hogy ha a tirisztor névleges áramát 50 A-ról 95 A-re növeljük, és más szempontokból a két tirisztor azonos, ez árban durván 1,2-szeres növekedést jelent. Ezek szerint adott fénycsőszám felett a központi tirisztoros egység olcsóbb. Ez a szám jelenleg a szabályozott kimeneti feszültségű központi tirisztoros átalakító és 20 W-os egyedi átalakítók esetén kb. 20...30 db.

Központi tirisztoros váltóirányító

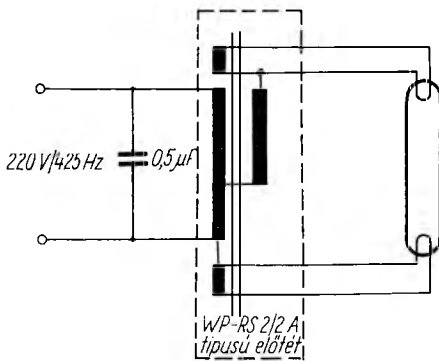
Az Intézetben kidolgozott központi tirisztoros váltóirányítónak az alábbi vonatvilágítási rendszerbe kellett beilleszkednie.

Az akkumulátor kapcsolófeszültsége 20 és 32 V között változhat.

A terhelés 6...26 db 20 W-os fénycső adott előtétekkel (11-1. ábra). A váltakozófeszültség 425 Hz frekvenciájú, szinuszos, stabilizált 220 V.

Az adott kapcsolásban a 26 db 20 W-os fénycső előtétekkel együtt 750 VA $\cos \varphi = 0,9$ terhelést jelent.

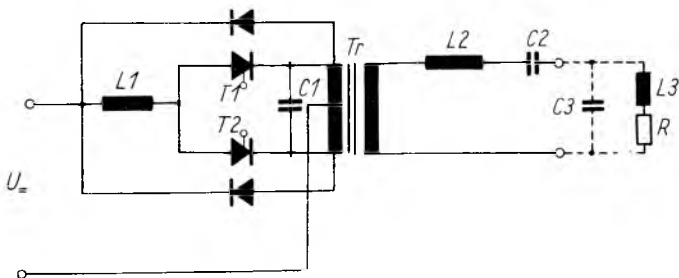
A váltóirányító alapkapsolását tekintve párhuzamos váltóirányító (11-2. ábra). Működési elve a következő. Kiindulási állapotnak tételezzük fel, hogy $T1$ tirisztor vezet. Akkor a $C1$ kondenzátor az U tápfeszültség kétszeresére feltöltődik. Ha most $T2$ tirisztor gyújtóimpulzust kap és ennek hatására vezetni kezd, akkor a $C1$ kondenzátor első pillanatban a $T1$ és $T2$ vezető tirisztorokon keresztül kezd kisülni. Ez az állapot csak rövid ideig, néhány μs -ig tart, mielőtt $T1$ tirisztorból a töltéshordozók eltávoznak. Ezután a kondenzátor $T2$ vezető tirisztoron keresztül a $T1$ lezárt tirisztorral párhuzamosan kapcsolódik. $T2$ tirisztorra mindaddig záróirányú feszültség jut, amíg a $C1$ kondenzátor polaritása nem változik meg. Ennek az időnek elég hosszúnak kell lenni ahhoz, hogy eltelje után a $T1$ tirisztor a kapsain megjelenő vezető irányú feszültség hatására ne nyisson ki. Az idő hosszát $C1$ és $L1$ elemek, valamint kisebb mértékben a terhelés határozza meg.



11-1. ábra. 20 W-os fénycsövek táplálásához adott előtétrendszer

A Tr transzformátor szekunder kapsain megjelenő négyzögfeszültség $L2$ és $C2$ elemekből álló soros és ezzel sorbakapcsolt, a terhelés által alkotott párhuzamos rezgőkörre jut. A két rezgőkör impedanciája és ezzel a feszültségosztás aránya a frekvenciával változik. Alapfrekvencián a soros rezgőkör kicsi, a párhuzamos rezgőkör nagy impedanciájú, a frekvencia növelésével a soros rezgőkör impedanciája növekszik, a párhuzamos rezgőköré csökken. Így a terhelésen közel szinuszos alapfrekvenciájú feszültség jelenik meg (11-3. ábra).

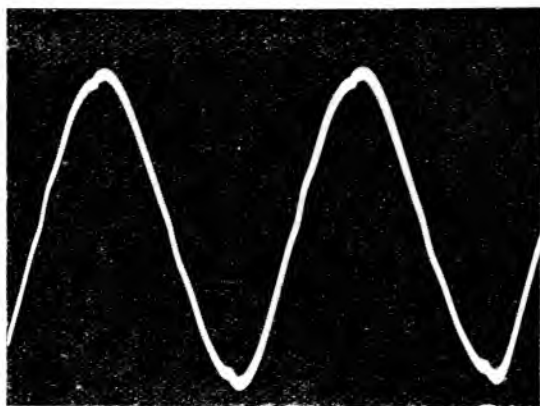
A tirisztorokat tranzisztoros váltóirányítóval előállított impulzusok vezérlik. A tranzisztoros váltóirányítót feszültségstabilizátor táplálja azért, hogy a tápfeszültség változása függvényében a frekvencia ne változzon nagy mértékben.



11-2. ábra. A váltóirányító alapkapsolása a terhelés helyettesítő elemeivel

A váltakozófeszültség szabályozását a 11-2. ábrán látható áramkörbe a $T1$ és $T2$ tirisztorok, valamint a Tr transzformátor közé beiktatott mágneses erősítő biztosítja. A mágneses erősítő vezérlőárama a kimeneti feszültség változásával arányosan változik.

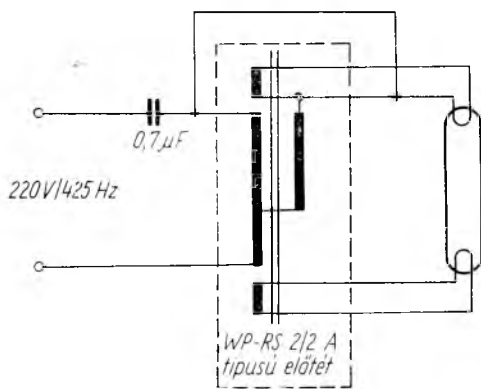
A váltóirányító kísérleti mérései során azt tapasztaltuk, hogy a 11-1. ábra szerinti fénycsőelőtét-kapcsolás esetén a váltóirányító bekapcsolásakor nagy transziens áram lép fel az előtéttel párhuzamosan kapcsolt kondenzátorok következtében. Ennek következtében egyes bekapcsolásoknál a tirisztorok kommutációja nem jött



11-3. ábra. A váltóirányító kimeneti feszültsége 26 db fénycsőterhelés esetén. A görbealak minimális terhelés (6 db fénycső) esetén kis mértékben változik.

létre, vagyis a tirisztorok együtt vezettek. Ez a 11-2. ábra szerinti primer áramkör zárlatát jelenti, amely állapotot a védelem leoldása szünteti meg. A problémát a bekapcsolási transziens áram csökkentésével igyekeztünk megoldani. Tekintettel arra, hogy a fénycsőelőtét adva volt, az előtétrendszert lényegesen átalakítani nem lehetett. Mivel a váltóirányító módosítása túl bonyolultnak látszott, e kérdést az eredeti fénycsőelőtét egyszerű átalakításával oldottuk meg.

Az új rendszerben a fénycsőveket kétféle előtétékkel láttuk el. Az egyik előtét az eredeti kapcsolástól (11-1. ábra) annyiban tér el, hogy a párhuzamos kondenzátort elhagytuk. Az ilyen előtétű fénycső tehát induktív jellegű fogyasztóvá vált.



11-4. ábra. Kapacitív fénycsőelőtét az adott WP-RS 2/2 A típusú előtét felhasználásával

A másik előtétkapcsolást az adott előtét felhasználásával úgy alakítottuk ki, hogy az ilyen előtétű fénycső kapacitív jellegű fogyasztó legyen (11-4. ábra). Amíg a fénycső nem gyújt be, a tápfeszültség nagy része ebben a kapcsolásban az előtétre jut, így az előtét biztosítja a cső fűtését. Ha a cső felfűtött és begyújt, akkor a feszültsége lecsökken, amivel együtt csökken a vele párhuzamosan kapcsolt előtét feszültsége is. Így a tápfeszültség nagy része a soros kondenzátorra jut. A kondenzátor értékét úgy választottuk meg, hogy azonos körülmények között a kapacitív és induktív előtétű fénycső ugyanazt a fényáramot biztosítsa. Ezzel

a módosítással az eredeti tranzien-
s áramot felére sikerült csökkenteni,
ami a váltóirányító bekapcsolásakor
problémát már nem jelentett.

A fénycsőelőtét módosítása
abból a szempontból is kedvező
volt, hogy csökkent az előtétek
vesztésege. A kapacitív előtétű
rendszerben ugyanis a fénycső
tápárama nem az előtéten, hanem
a kondenzátoron keresztül folyik.
Ez elég jelentős veszteségcsökken-
tést jelent, mivel egy előtét vesz-
tesége 6 W körül van. A 26 fény-
cső előtétekkel az adott kapcsolá-
sban $600 \text{ VA } \cos \varphi = 0,9$ terhe-
lést jelent.

A 11-5., 11-6. és 11-7. áb-
rákon olaj alá helyezett kivételű
váltóirányító látható, amely a
Villamosipari Kutató Intézetben
készült. A váltóirányítót sorozat-
ban az Egyesült Villamosgépgyár
fogja gyártani léghűtéses kivitel-
ben.

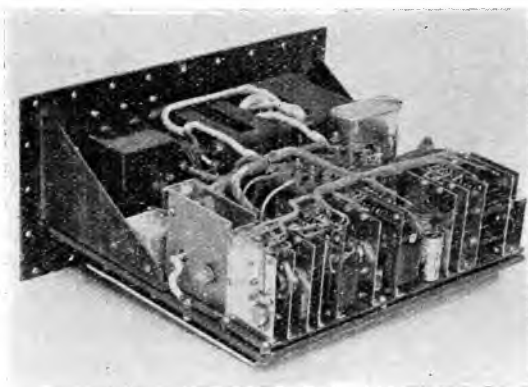
Az olajhűtésű váltóirányítók-
ból 3 db-ot vasúti kocsikon, egyet
villamoson szereltünk fel. Ezek
az átalakítók fél éve üzemelnek.

Az Egyesült Villamosgépgy-
gyár kísérleti gyártásban 8 db
léghűtéses kivételű átalakítót ké-
szített, amelyeket 1966 első fél-
évében szereltek fel vasúti ko-
csikra.

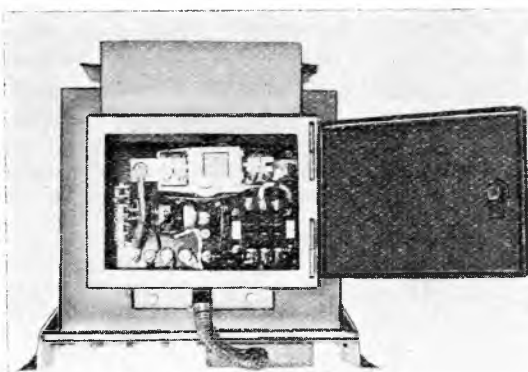
Az említett berendezések-
ben AEG gyártmányú tiriszto-
rokat alkalmazunk, de már el-
készült egy egység hazai, VKI
gyártású tirisztorokkal. Ennek
kísérleti üzemeltetésére hamarosa-
n sor kerül.

Az átalakítók jellemző pa-
ramétereinek változása a tápfe-
szültség függvényében a 11-8. áb-
rán látható.

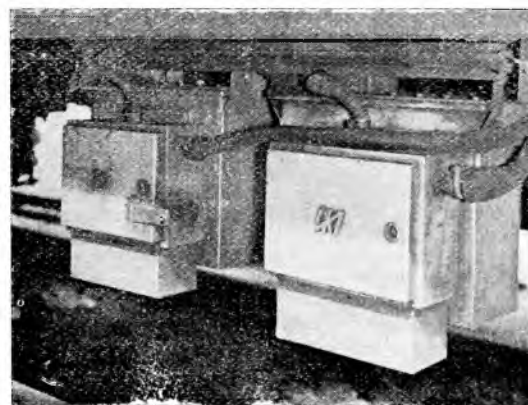
11-7. ábra. Vasúti kocsira felszerelt
váltóirányítók

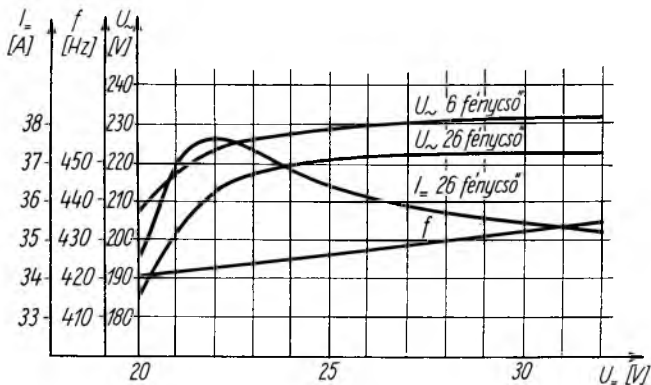


11-5. ábra. Olajhűtésű váltóirányító
a tápfeszültség-kapcsoló és a védőbiztosító nélkül



11-6. ábra. Olajhűtésű váltóirányító
összeszerelt állapotban





11-8. ábra. A váltóirányító jellemző paramétereinek változása a tápfeszültség függvényében

A váltóirányító műszaki jellemzői:

A tápláló akkumulátor kapcsolófeszültsége	20...32 V
Terhelés 26 db 20 W-os fénycső az ismertett elótételekkel	600 VA $\cos \varphi = 0,9$
A kimeneti feszültség	
névleges értéke	220 V
hullámalakja, ha a terhelés 6...26 db fénycső, jó közelítéssel szinuszos;	
változása, ha a tápfeszültség 22 V és 32 V között, a terhelés páros fokozatokban 6 és 26 fénycső között változik, a névleges értékre vonatkoztatva	$\pm 5\%$
20 V tápfeszültség, 26 db fénycsőterhelés esetén	> 180 V
névleges frekvenciája	425 Hz
frekvenciájának változása, ha a tápfeszültség 20 V és 32 V között változik	$< \pm 15$
A váltóirányító áramfelvétele 26 db fénycsőterhelés esetén, ha a tápfeszültség 20...32 V	< 38 A
A váltóirányító hatásfoka	70%

Irodalom

- [1] Ziesenis, C. H.: Transistor-Vorschaltgeräte für Leuchtstofflampen in Verkehrsmitteln. ETZ-B, 13. 18. sz. (1951), p. 490—493.
- [2] Alacsony nyomású fénycsövek. USA szabadalom 3,117,248.
- [3] Günthner, W.: Leuchtstofflampen mit Wechselspannung höherer Frequenz als 100 Hz in Eisenbahnfahrzeugen. Elektrische Bahnen, 35. 9. sz. (1965) p. 214—216.
- [4] Hehenkamp, Th—Wiltig, J. J.: Transistorumformer zur Speisung von Leuchtstofflampen. Philips Technische Rundschau, 20. (1958/59) 11. sz. p. 352—356.
- [5] Gardner, L. J.: Transistorized Inverters for Fluorescent Lights. Electronics, (1960) p. 58—59.
- [6] Stumpe, A. C.: Transistorwechselrichter. AEG Mitteilungen 59. 1/2 sz. (1960) p. 19—27.
- [7] Wiltig, J. J.: Die Entwicklung auf dem Gebiete der Transistorumformer für Fluoreszenz-lampen. Bul. SEV 53. 22. sz. (1962). p.: 1082—1091.
- [8] Wenbarth, G.: Moderne Autobusbeleuchtung mit Leuchtstofflampen. Verkehr und Technik, 12. 9. sz. (1959). p. 287—289.
- [9] Winkler, H.: Wechselrichter mit Siliziumstromtoren zum Speisen von Leuchtstofflampen in Fahrzeugen. Siemens Zeitschrift, (1963) p. 860—864.
- [10] Wiltig, J. J.: Wechselrichter mit steuerbaren Siliziumgleichrichtern für Leuchtstofflampen-Beleuchtung. Philips Technische Rundschau, 23. (1962) 718. sz. p. 265—271.
- [11] Schünemann, C.: Der selbstgeführte fremderregte Parallelwechselrichter mit Thyristoren zur Speisung von Leuchtstofflampen. Elektrische Bahnen, 37. 2. sz. (1966) p. 26—33.
- [12] Ludwig, F.: Thyristorwechselrichter für die Berliner U-Bahn. AEG Mitteilungen (1964), 718. sz. p. 583—586.

12.

Szilícium-egyenirányítók városi villamosvasutak állomásai számára

MARTI SÁNDOR

ÖSSZEFOGLALÁS

A közúti villamosvasutak, elővárosi vasutak, földalatti vasutak áramellátása szinte kizárólag egyenáramú. Erre a feladatra jól beváltak a szilícium-egyenirányítók, amelyek a jó hatásfok, az azonnali üzemkésztség, az egyszerű felépítés és a kis helyigény által nyújtott előnyeik révén a korábbi átalakító-típusokat fokozatosan felváltják.

A cikk a szilícium-egyenirányítók tervezésével, felépítésével és üzemeltetési kérdéseivel foglalkozik. Ismerteti a VKI és az ANÓD gyár közös fejlesztésében készült első hazai állomási szilícium-egyenirányító berendezést.

КРЕМНИЕВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ ДЛЯ ГОРОДСКИХ ТРАМВАЙНЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Ш. Марты

Резюме

Питание током городской трамвайной сети, пригородной „электрички”, и подземной железной дороги, почти исключительно происходит постоянным током. Для этой цели хорошо оправдали себя кремниевые выпрямители, которые постепенно становились единственным типом питания из-за своего хорошего к. п. д., немедленной готовности к работе, простой конструкции и маленькой кубатуры, вместо ранее примененных типов преобразователей.

Статья занимается вопросами проектирования, конструкции и эксплуатации кремниевых выпрямителей. Ознакомляет читателей с первым кремниевым выпрямителем отечественного производства для подстанций, развитым общими силами Исследовательского Института по Электропромышленности и завода „Анод.”

SILIZIUMGLEICHRICHTER FÜR STRASSENBAHN-UNTERWERKE

S. Marti

Zusammenfassung

Die Stromversorgung von Strassenbahnen, Vorortbahnen, U-Bahnen geschieht fast ausschliesslich mit Gleichstrom. Die Siliziumgleichrichter sind zu dieser Aufgabe besonders geeignet und durch ihren hohen Wirkungsgrad und durch ihre sofortige Betriebsbereitschaft, einfachen Aufbau und kleinen Platzbedarf ersetzen sie stufenweise die früheren Typen.

Dieses Studium beschäftigt sich mit dem konstruktiven Aufbau und Betriebsfragen der Siliziumgleichrichter. Der erste inländische Siliziumbahnspeisegleichrichter, welcher in kollektiver Entwicklung des Forschungsinstituts der Elektroindustrie und des Werkes ANÓD ausgearbeitet wurde, — wird in diesem Artikel beschrieben.

SILICON RECTIFIER EQUIPMENTS FOR POWER SUPPLY OF TRAMWAYS

S. Marti

Summary

The power supply of d. c. tramways is today provided almost exclusively by silicon rectifiers. Because of their smallness, high efficiency they gradually take the place of other, earlier types of energy converters.

The author investigates in this article with the projection problems and planning technique of these silicon rectifier equipments, describing the first hungarian equipment elaborated by Research Institute for the Electrical Industry and fabricated by the ANOD factory.

Járművek hajtómotorjai számára, mint ismeretes, a soros gerjesztésű egyenáramú motor különösen alkalmas. A közúti villamosvasutak, elővárosi vasutak, trolibuszok, bányavasutak, földalatti vasutak és ipari vasutak áramellátása ezért csaknem kizárólag egyenáramú. Az egyenáramot a leggazdaságosabban a váltakozóáramú hálózathoz csatlakozó áramátalakító állomásokban elhelyezett egyenirányítókkal lehet előállítani. Az egyenirányító egységeket a váltakozóáramú elosztó hálózathoz csatlakozó áramátalakító állomásokon helyezik el, és az egyenáramú energiát a járművek munkavezetékein osztják el.

Az átalakítás mindeddig motor—generátor—gépcsoporttal, egyarmatúrás átalakítóval (konverterrel), vagy higanykatódos egyenirányítóval történt. A Fővárosi Villamosvasút (FVV) és az Országos Villamosenergia Felügyelet (OVILEF) azonban korán felismerték azokat az előnyöket, amelyeket az utóbbi évtizedben megjelent erősáramú egykristály félvezető elemek nyújthatnak, ezért megbízást adtak a VKI-nek és az ANÓD gyárnak egy, a hazai közúti vontatási viszonyoknak legjobban megfelelő szilícium-egyenirányító berendezés típus kialakítására.

A fejlesztési munka megindításakor, 1963-ban, vizsgálat alá vettük az FVV jelenlegi közúti villamosvasút-hálózatát, az üzemi körülményeket és a berendezéssel szemben támasztott követelményeket.

A villamosvasút 550 V-os névleges feszültségét figyelembe véve, igen fontos gazdasági kérdés az átalakítási határfok mellett az elosztó hálózat minimális veszteséggel való kialakítása. Részletes vizsgálatok nélkül is belátható, hogy a leggazdaságosabb megoldást minél több, kisteljesítményű és jó hatásfokú, decentralizált átalakító létrehozása nyújtaná. A jelenleg kialakított hálózat azonban viszonylag nagy, központi áramátalakító állomásokra támaszkodik, mivel a korábbi átalakító-típusok nem tették lehetővé a decentralizálást egyrészt az állandó felügyelet szükségessége, másrészt a gazdaságosan megvalósítható viszonylag nagy egységteljesítmények következtében. Az új szilíciumegyenirányító-típust úgy kellett kialakítani, hogy alkalmas legyen egyrészt felügyelet nélküli, távvezérelt kis alállomásokra való beépítésre, másrészt a meglévő alállomásokon a korábbi átalakító-típusok felváltására. A meglévő átalakítók cseréjét gazdasági okokból ugyanis úgy kell végrehajtani, hogy a legelavultabbak, elsősorban a motor—generátorok kerülnek elsőnek sorra.

Ez azt jelenti, hogy a berendezésnek alkalmasnak kell lennie más kialakítású, régebbi típusú átalakítókkal való párhuzamos üzemeltetésre is. Ismeretes, hogy a higanykatódos egyenirányítók a visszagyűjtés során, vagy a konverterek körtűz esetén közvetlen gyűjtőszárlatot okozhatnak, ezért a zárlatvédelemre különös súlyt kellett helyezni. Ezenkívül a párhuzamos teherelosztáshoz a közel azonos külső jelleggörbéket is biztosítani kellett.

Az egyenirányító teljesítményének megválasztása

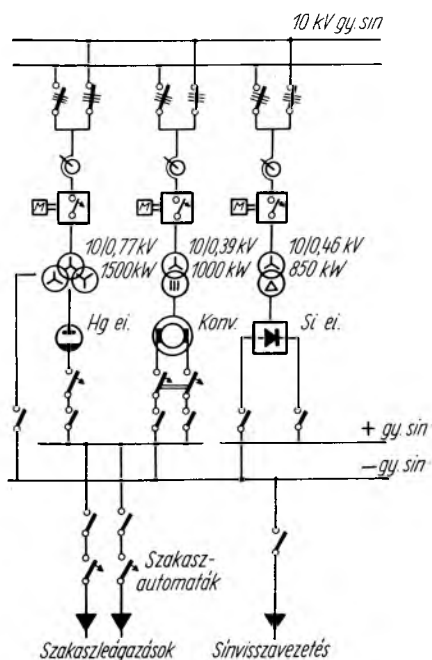
A villamosvasút munkavezeték-hálózata egymástól elszigetelt szakaszokra van osztva, és az egyes szakaszok táplálása az áramátalakító állomásról szakaszautomatákon keresztül, elosztó kábeleken át, egymástól függetlenül történik. A sín-visszavezetés hasonlóan, kábeleken és szakaszolókon keresztül van megoldva (11-1. ábra).

Az egyes szakaszok terhelése a forgalom függvényében igen erősen változik. A szerelvények esetleges együttes indítása rövid ideig, de több ezer amper árammal történhet, amely gyakran okozhatja a szakaszautomata leoldását. Gyakoriak a teljes zárlatok is, a villamoskocsik, vagy a munkavezeték műszaki hibái miatt. Ezenkívül a terhelés napi átlagban a forgalomsűrűséggel együtt erősen változik. Az állomás együttes terhelése az egyes, különböző nagyságú és forgalmú szakaszok terheléséből tevődik össze (12-2. ábra). Több szakasz esetén természetesen a csúcsterhelések kiegyenlítődnek, ezért a terhelés jellege erősen változik az állomás nagyságának függvényében is.

Az elmondottakból látható, hogy az egység teljesítmény megválasztása igen nehéz feladat. A teljesítmény alsó határát az szabja meg, hogy egyetlen vonal táplálásakor fellépő indítóáramot az egyenirányító egységnek lekapcsolás nélkül kell szolgáltatni. A felső határt a decentralizált kis állomásoknak az átalakítási és elosztási veszteségek optimumszámításából meghatározható teljesítménye szabja meg. (Egy állomás, egy egyenirányítóval.) A változó terhelés következtében a teljesítmény megadásához szorosan hozzátartozik a berendezés túlterhelhetőségének adata is.

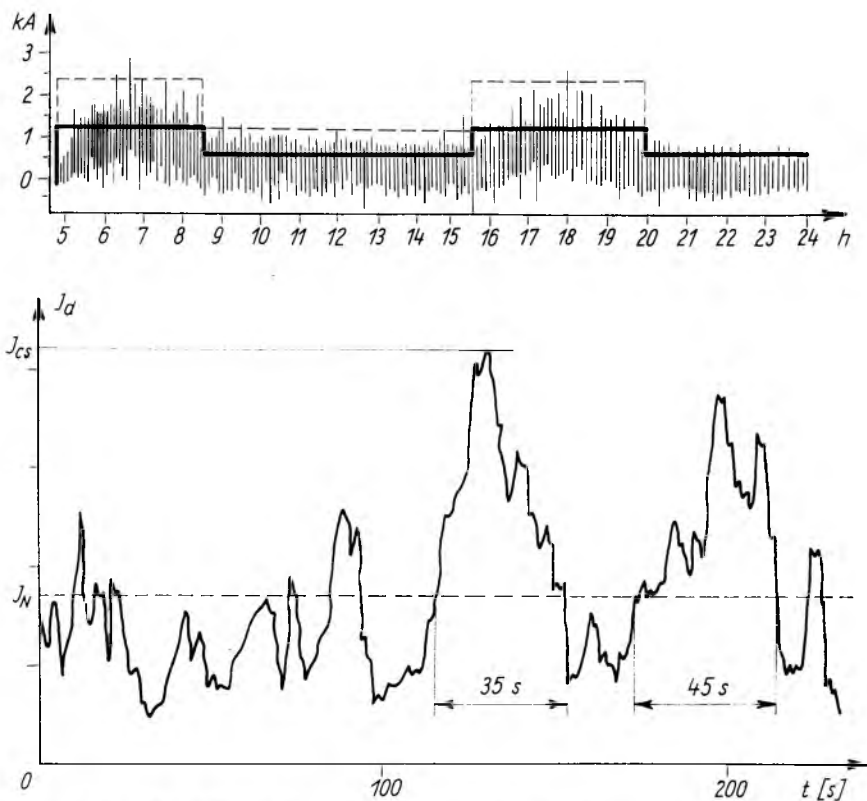
Több állomáson végzett mérések alapján, amelyekből megállapítottuk, hogy az egyenirányító átlagterhelésének és rövid idejű, üzemszerű túlterheléseinek viszonya hogyan alakul, az IEC ajánlás „Könnyű vontatási állomások E” osztályának megfelelő túlterhelhetőségi adatokat választottuk, és az egyenirányító névleges adatait 550 V, 1400 A-ben határoztuk meg. A hivatkozott „E” osztály állandó névleges terhelés után 150% árammal 2 órás, 200% árammal 1 perces túlterhelhetőséget ír elő. Mivel ez a túlterhelési viszony az átlagos adatoknak felel meg, kisebb állomásokon az átlagos terhelhetőségük csökken, nagyobb állomásokon viszont nő. Ezt az üzembe helyezéskor kell figyelembe venni.

A biztonságos üzemvitel leglényegesebb követelménye az, hogy az állomásba épített egyenirányítók védelme a szakaszautomatákhoz képest szelektív legyen. Ez azt jelenti, hogy a munkavezetéseken fellépő túlterheléseket és az állomáshoz legközelebb eső zárlatokat is a szakaszautomatáknak kell lekapcsolni úgy, hogy az egyenirányítók ezt az igénybevételt lekapcsolás — és természetesen meghibá-



12-1. ábra. Villamosvasúti áramátalakító állomás kapcsolása. Elvi vázlat

sodás — nélkül elviseljük. Ennek megoldását az nehezítette meg, hogy az FVV előírása szerint meg kellett tartani a már felszerelt MN típusú automatákat. Ezek ára az egyenáramú gyorsmegszakítókhoz képest viszonylag csekély, azonban nem rendelkeznek áramkorlátozó képességgel és teljes lekapcsolási idejük 80...120 ms.



12-2. ábra. Kis állomás áramterhelése az idő függvényében

Ezt a hátrányt némileg ellensúlyozza az a körülmény, hogy a zárlati mérések tanúsága szerint a közvetlen állomások előtti zárlatoknál sem lépett fel 5...6 kA-nál nagyobb áramerősség. Ezek alapján az egyenirányító túlterhelhetőségi előírásait azzal kellett még kiegészíteni, hogy egy berendezés 6 kA (400%) terhelést 1...3 s ideig lekapcsolás nélkül kell elviseljen.

Az egyenirányító kapcsolása

Régebben az volt az általánosan elterjedt vélemény, hogy a szilíciumdiódák túlterhelésekkel szemben igen kis mértékben ellenállóak, ezért vontatási üzemre nem alkalmasak. A részletesebb vizsgálatok azonban ezt nem támasztják alá.

Összehasonlításként a higanykatódos egyenirányítók túlterhelhetőségére szokás hivatkozni. Igaz ugyan, hogy azok egyszeri túlterheléseket jól elviselnek, de nem

szabad figyelmen kívül hagyni, hogy állandóan változó terhelés esetén 2 órás időtartam alatt megengedhető átlagterhelésükre már a $\sum I_d^{0.5} t$ áramérték jellemző, ami azt jelenti, hogy gyakran ismétlődő túlterheléseknél gyakorlatilag a csúcs-terhelésnek megfelelően kell a névleges áramukat megválasztani. A szilíciumdiódák kis hőtehetetlensége viszonylag kisebb áram-túlterhelhetőséget enged meg, de ugyanakkor éppen a gyorsabb lehűlést figyelembe véve, átlagos terhelhetőségükre a $\sum I_d^2 t$ érték a mértékadó.

Ha emellett figyelembe vesszük, hogy a szilíciumdiódák a környezeti hőmérséklet változására jóval kevésbé érzékenyek, hideg állapotban is azonnal teljes mértékben terhelhetők, kisebb egységteljesítményük következtében tetszőleges teljesítményű egységekként építhetők fel, a mérleg mindenképpen a javukra billen.

A szükséges teljesítményű egység az egyenirányító ágakban párhuzamosan kapcsolt diódák számának megválasztásával állítható elő. A túlterhelhetőség előírása szintén befolyásolja a diódák számát, amiről a 12-1. táblázat tájékoztat. Látható, hogy a névleges áramnak és az előírt túlterhelésnek megfelelő diódaszám megválasztásával a legkülönbözőbb igényeket is ki lehet elégíteni.

12-1. táblázat

150-SA-4S típusú diódákkal felépített háromfázisú, hídkapcsolású egyenirányító névleges árama a túlterhelhetőség és a diódák számának függvényében, mesterséges levegőhűtéssel

$t_{lev} = 35\text{ °C}$

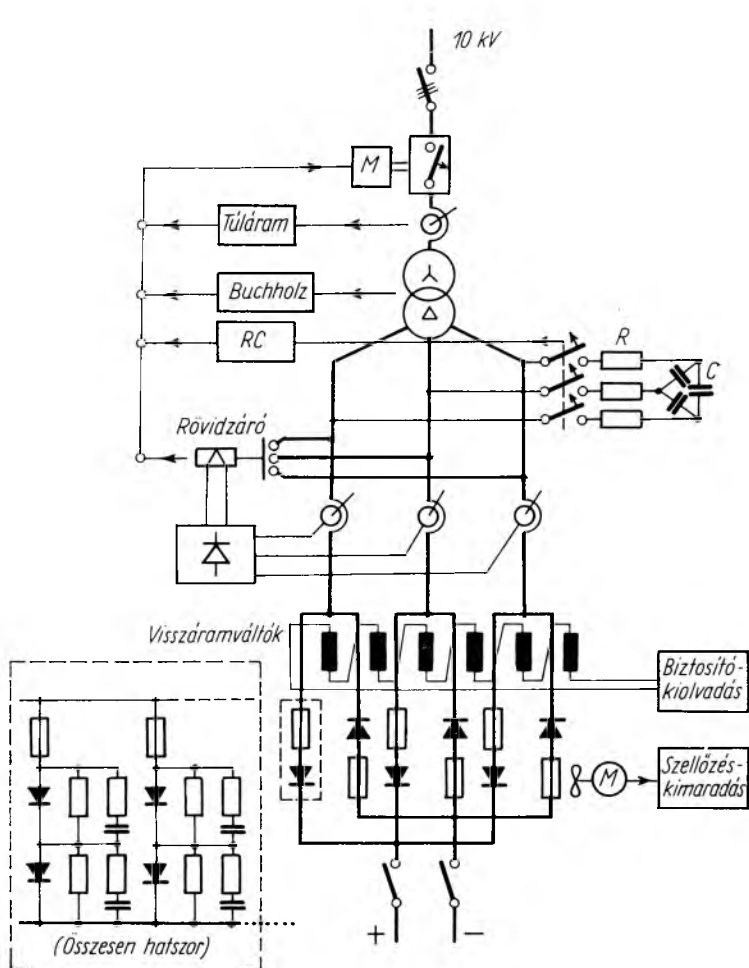
Áganként párhuzamosan kapcsolt diódák száma*				Túlterhelés (névl. terh. 100 %)				
$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$	125%	150%	200%	300%	IEC oszt
1000	1400	1800	2200	15 min	2 min	10 sec	—	—
1000	1400	1750	2100	10 min	2 min	20 sec	—	—
900	1200	1500	1800	2 h	—	1 min	—	—
850	1100	1400	1700	—	2 h	1 min	—	E
600	800	1000	1200	—	2 h	—	1 min	F
500	650	850	1000	—	2 h	—	5 min	—

* Ágankénti tartalék dióda nélkül, rövidzáró kapcsolós védelemmel

A kísérleti berendezésre előírt 1400 A névleges áram, 150% 2 h, 200% 1 min, 400% 3 s túlterhelési előírásnak megfelelően a VKI-ben kifejlesztett és az Anód Áramirányítógyárban gyártott 150—SA—4 S típusú diódákból háromfázisú híd-kapcsolásban áganként 6 párhuzamos diódát építettünk be (12-3. ábra). A háromfázisú hídkapcsolás egyúttal lehetővé teszi azt is, hogy egyszerű felépítésű, 3/3 fázisú Yd5, vagy Yy0 kapcsolású transzformátort alkalmazzunk, amelynek típusjelölését így 95%-ig ki lehet használni, szemben a higanycatódos egyenirányítóknál alkalmazott szívófojtós kapcsolású transzformátorok szívófojtóval együttesen 34%-os túlméretezésével.

A választott diódaszám lehetővé teszi azt, hogy áganként egy dióda kiesése esetén a berendezés még teljes terheléssel üzemeltethető legyen.

Az alkalmazott diódák névleges zárófeszültsége 400 V, nem periodikus, rövid idejű túlfeszültségekkel 800 V-ig vehetők igénybe. Ezt meghaladó túlfeszültségek megjelenését meg kell akadályozni, mert azok bármilyen rövid idő alatt is a diódák



12-3. ábra. 1400 A, 550 V-os szilícium-egyenirányító elvi kapcsolása

tönkrementeléhez vezethetnek. Mivel a berendezés névleges feszültsége 550 V, az egyenirányító ágakba két-két soros diódát kellett beépíteni. Ez azt jelenti, hogy az egyenirányító egység 800 V állandó zárófeszültséggel és 1600 V nem periodikus túlfeszültséggel vehető igénybe. A zárófeszültség egyenletes elosztását a diódák között a velük párhuzamosan kapcsolt ellenállások és kondenzátorok biztosítják.

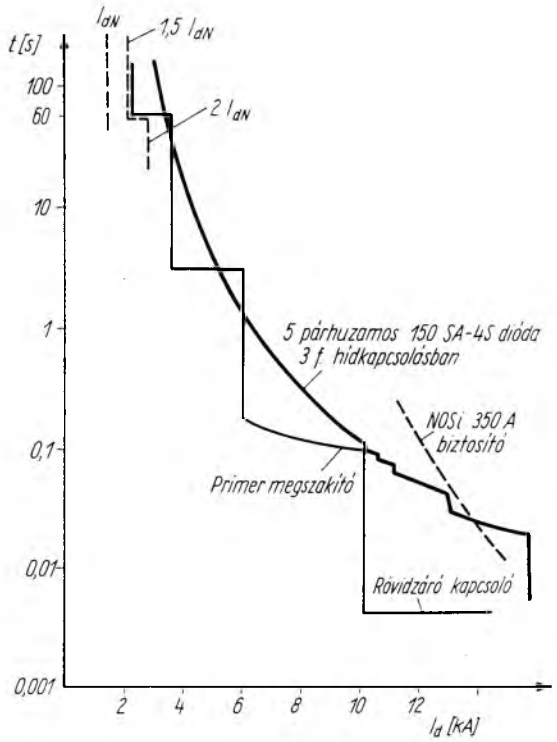
A feladat további része ezután az egyenirányító túláram-, zárlat- és túlfeszültség-védelmének kialakítása volt, a választott kapcsolásnak megfelelően.

Az egyenirányító túláram- és zárlatvédelme

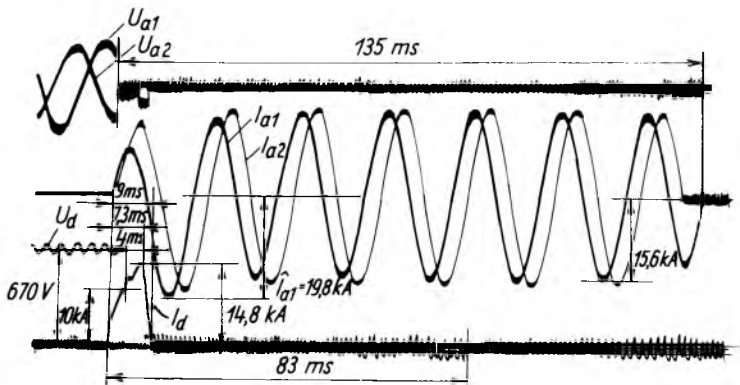
A túláram-védelem feladatát az egyenirányító transzformátor primer, 10 kV-os oldalán beépített megszakító látja el. A 10 kV-os oldalon levő áramváltóról áramreléket táplálunk, amelyek független időrelékkel kombinálva, megfelelően lépcsőzött védelmet adnak (12-4. ábra).

Itt a több lépcsőre bontás azt a célt szolgálja, hogy az egyenirányító túlterhelhetőségéhez való minél jobb illesztéssel annak optimális kihasználását biztosítani lehessen. Egyúttal meg kell feleljen a szakaszautomaták és az egyenirányító közötti szelektivitás előírásainak is.

Az egyenirányítóba beépített diódák esetleges meghibásodása, az az záróképességük elvesztése, a higanycatódos egyenirányítók visszagyújtásához hasonlóan, belső zárlatot okoz. Ez hídkapcsolás esetén nem idéz elő kapcsolzárlatot, azonban a zárlat megszüntetésére a diódákkal sorban, megfelelően gyors olvadóbiztosítókat kell elhelyezni. Átütéskor a hibás diódához tartozó biztosító kiolvad anélkül, hogy a zárlatra dolgozó ép egyenirányító ágba levő diódák vagy biztosítók megsérüljenek, és ezzel a hibás diódát szelektíven kiselejtezik. A VKI-ben erre a célra kifejlesztett 500 V-os, 350 A névleges áramú, hétszeres áramkorlátozó képességű biztosítók jól beváltak. A biztosítók névleges áramát és a védelmi rendszert úgy választottuk meg, hogy azok külső zárlatok esetén ne olvadjanak ki. Így elkerülhető az, hogy esetleg nagyszámú dióda cseréje miatt hosszabb leállásra legyen szükség. Ez a feladat teljes kapcsolzárlat esetén kétféle módon oldható meg. Az egyik megoldás az, hogy az egyenirányítók



12-4. ábra. A túlaram- és zárlatvédelem lépcsőzése. Az egyenirányító túlterhelhetősége



12-5. ábra. A rövidzáró kapcsoló működése

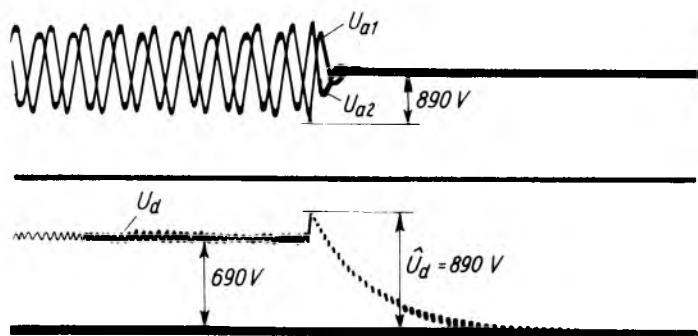
I_a egyenáram; I_a váltakozóáram a transzformátor szekunder oldalán;
 U_d egyenfeszültség; U_a váltakozófeszültség a transzformátor szekunder oldalán

egységteljesítményének, azaz a párhuzamos diódák számának növelésével a berendezés zárlatbiztonságát a primer megszakító 80...100 ms lekapcsolási idejéig növeljük, a másik — nagy, 10...12 kA-t meghaladó zárlati áramok esetén —, hogy az egyenirányítót gyorsrövidrezáró kapcsolóval néhány ms alatt tehermentesítjük, és a zárlat lekapcsolását ezután a primer oldali megszakító végzi (12-5. ábra). Ez az intézkedés azonban csak olyan alállomásokon szükséges, ahol a párhuzamos járó higanykatódos egyenirányítókon bekövetkező gyűjtőszinzárlatot előidéző visszagyűjtéskor 10 kA-t meghaladó zárlati áram léphet fel. Mivel az ilyen alállomások száma nem túl nagy, gazdaságosabb megoldás volt a szükségletnek megfelelő számú berendezést rövidrezáró kapcsolóval ellátni.

Az egyenirányító túlfeszültség-védelme

A túlfeszültségek okainak és az ellenük való védekezés vizsgálatára jelentős munkát kellett fordítani, mivel a diódák korlátozott záróképesége miatt ezek, ha az egyenirányító egység maximális megengedhető zárófeszültségét túllépi, egész egyenirányító ágak átütését idézhetik elő, ezzel jelentős üzemkiesést és anyagi kárt okozhatnak.

Túlfeszültségek léphetnek fel, mint ismeretes, az üresen járó egyenirányító transzformátor kikapcsolásakor. Ez ellen úgy lehet védekezni, hogy a transzformátor szekunder kapcsaira kötött kondenzátorokkal szabad utat biztosítunk a primer oldali megszakító által megszakított mágnesező áram számára, és a mágnesező energiát a kondenzátorral sorbakapcsolt ellenálláson emesztjük fel. A szükséges kondenzátorok és ellenállások számítására igen sok irodalmi módszer ismeretes, azonban egyértelmű és megnyugtató eredményt egyik sem ad, ezért az RC -kombináció megválasztására kellő számú kísérletet végeztünk. A beépített elemekkel sikerült a kikapcsolási túlfeszültségeket a legkedvezőtlenebb esetben is a névleges feszültség 150%-ára korlátozni (12-6. ábra).



12-6. ábra. Üresen járó egyenirányító kikapcsolása

U_d egyenfeszültség; U_a váltakozófeszültség a transzformátor szekunder kapcsain

Belső eredetű, periodikus túlfeszültséget okoz a diódák nyitóáramából záróállapotba való átmenetének tehetetlensége, amely az áram megfordulásakor első pillanatban nagy értékű záróáram hirtelen megszakítása révén a mindig jelenlévő induktivitásokon jelentős túlfeszültséget okozhat. Hasonlóan túlfeszültség oka

lehet az is, hogy a sorbakapcsolt diódák nem azonos időpillanatban nyerik vissza záróképességüket, és így az először záró diódára jut a teljes zárófeszültség. Mindkét jelenség ellen kellő védelmet nyújt a diódákkal egyenként párhuzamosan kapcsolt *RC*-kombináció.

Megengedhetetlen értékre növekedhet a munkavezeték-feszültség akkor is, ha a villamoskocsikon rekuperációs fékezést alkalmaznak, és kedvezőtlen esetben nincs a vezetékszakaszon olyan jármű, amely a visszatáplált energiát elfogyaszthatná. Mivel a korábbi kedvezőtlen tapasztalatok miatt jelenleg csak a fogaskerekű vasútnál alkalmaznak rekuperációs fékezést, a városi hálózattal kapcsolatban ezzel a kérdéssel nem kellett foglalkozni.

Külső eredetű túlfeszültségeket okozhatnak az egyenáramú oldalon történő kapcsolások. A szakaszautomaták viszonylag lassú működésük következtében itt nem játszanak szerepet. Jelentősebb, másfélszeres, kétszeres túlfeszültségek okozói lehetnek a higanykatódos egyenirányítók katódkapcsolói. A gyűjtősínen fellépő túlfeszültségek közül azonban a legveszélyesebbek a külső hálózatról behatoló, légköri eredetű túlfeszültségek, amelyek ellen megfelelő, egyenfeszültségű túlfeszültség-levezetőt kellett kidolgozni. A VKI-ben e célra kifejlesztett, 5 kA levezetőképességű, 550 V névleges egyenfeszültségű túlfeszültség-levezetőnek maximális maradék-feszültsége mindössze 1400 V, így a diódák számára biztonságos védelmet nyújt.

Az egyenirányító felépítése, működtetése, jelzései

A diódák és biztosítók mesterséges léghűtéssel ellátott vasvázaz, alumínium borítású szekrényben vannak elhelyezve. A szellőzésre egy, vagy biztonsági okokból több ventilátor szolgál. A szekrény külön részében vannak elhelyezve a működető, jelző és védelmi elemek (12-7. ábra).

A primer oldali megszakító bekapcsolásának feltételei:

1. A szellőzés három ventilátor esetén legalább két ventilátorral biztosítva van;
2. A rövidrezáró kapcsoló fel van húzva;
3. A segédüzemi feszültség mindhárom fázisban megvan;
4. A transzformátor szekunder oldali *RC*-tagja be van kapcsolva.

Ezek egyidejű fennállásakor a berendezés egyetlen nyomógombbal, vagy távműködtetésű relével bekapcsolható.

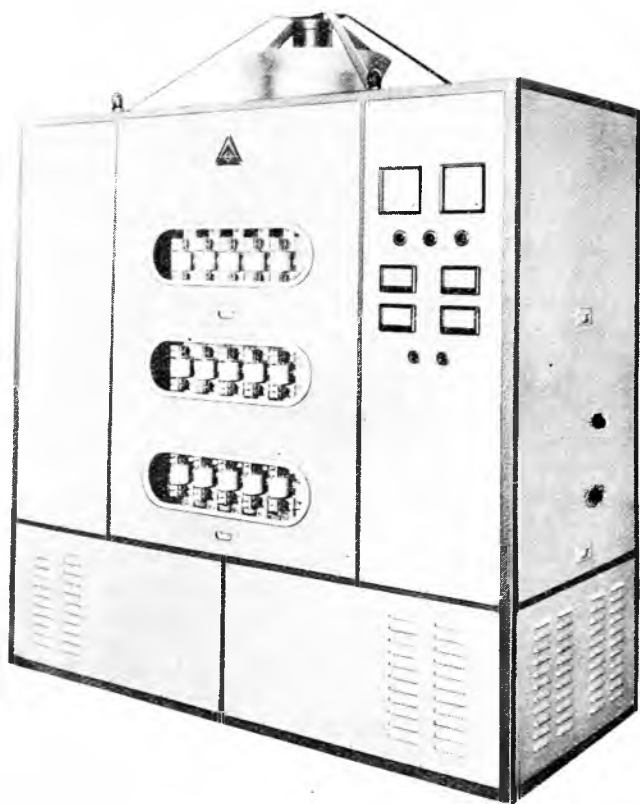
A berendezésen hibajelzés és távhibajelzés jelenik meg és a berendezés kikapcsol, ha

1. a szellőzés kimaradt, három ventilátor esetén csak egy ventilátor működik;
2. a segédüzemi hálózat egy fázisa kimarad;
3. a túláram-védelem működik;
4. a rövidrezáró kapcsoló működik;
5. a transzformátor Buchholz-védelme működik;
6. a transzformátor *RC*-tagja átüt.

Végül csak hibajelzés jelenik meg, de kikapcsolás nélkül, ha

1. három ventilátorból egy leáll;
2. dióda-védőbiztosító olvad ki;
3. a transzformátor Buchholz-védelme jelez.

A felsorolásból látható, hogy a berendezés üzembiztonságát a lehető legegyszerűbb eszközökkel igyekeztünk megvalósítani. Külön kell még azonban foglalkozni a diódák egyedi védelmével.



12-7. ábra. 1400 A, 550 V-os kísérleti szilícium-egyenirányító készülék a Fővárosi Villamosvasút áramalakító állomásai számára

Az egyedi diódvédelem felépítésekor abból indultunk ki (és ezt az eddigi tapasztalatok igazolták is), hogy a diódák üzembiztonsága igen nagy. Ennek megfelelően nem számítottunk arra, hogy egyidejűleg egy ágba egynél több dióda meghibásodhat, ami a megmaradt diódák megengedhetetlen túlterhelését okozhatná. Elegendőnek tartottuk azt, hogy a váltakozóáramú síneken elhelyezett visszáramváltókkal biztosító-kiolvadás esetén csupán jelzést adjunk. Ez, mivel áganként két dióda van sorba kötve, már csak két soros dióda átütését jelzi. Megoldható lett volna, hogy a sorbakapcsolt diódák zárófeszültség-eloszlásának ellenőrzése révén már egy dióda átütése esetén jelzést adjunk, azonban ez csak viszonylag bonyolult eszközökkel érhető el. Igaz, hogy az átütött diórával sorbakötött dióda ez esetben megmenthető lenne, azonban a dióda árának, meghibásodási valószínűségének és a jelzőrendszer árának összevetése indokolatlanná tette az aszimmetria-

védelem alkalmazását. Meg kell jegyeznünk, hogy e megállapítás ellenére az első készülékeinkben aszimmetriamérő-rendszer is be volt építve, amit — mint szükségtelenül bonyolult és drága áramkört — a későbbiekben elhagytunk.

Mérési eredmények

A részletes próbatermi és üzemi vizsgálatok eredményeiből röviden összefoglalva, az alábbiakat ismertetjük:

Az egyenirányító hatásfoka a veszteségek összegezéséből számítva:

Terhelés %	25	50	75	100	150
Hatásfok %	97,6	98	97,9	97,7	97,1

Az egyes veszteségek névleges terhelésnél, kW-ban:

A transzformátor üresjárás vesztesége:	2,5
A transzformátor rövidzárás vesztesége:	10,2
Az egyenirányítási veszteség:	6,6
A segédüzem fogyasztása:	1,0
	<u>20,3</u>

Látható, hogy a jelentős hatásfokjavulás a higanykatódos egyenirányítókhoz képest az egyenirányítási veszteség és a segédüzemi veszteség csökkenéséből ered.

A szakaszautomata és az egyenirányító védelme közötti szelektivitás ellenőrzésére végzett zárlati mérés sorozat eredményeit a 12-2. táblázatban foglaltuk össze.

12-2. táblázat

Az egyenirányító védelmének a szakaszautomatákhoz viszonyított szelektivitás vizsgálata

Zárlati áram, A	Működési idő* ms		
	Szakaszauto- mata	Primer meg- szakító	Rövidzáró kapcsoló
1900	133	—	—
4400	106	—	—
4600	103	—	—
8300	93	114	—
10000	91	124	—
13700	—	136	8,4
14000	—	134	5,7

* Az FVV népligeti állomásán történt mérések kiértékelése alapján

Az első kísérleti berendezést, amelyet 1964. november 4-én a FVV népligeti áramátalakító állomásán helyeztek üzembe, további három berendezés követte és a meglévő berendezéseket folyamatosan váltják fel az újabb egyenirányító egységek. Ezek tapasztalatai alapján folyik a Budapesti Földalatti Vasút számára gyártandó, 825 V, 1800 A-es egyenirányító berendezések, a BHÉV számára készülő 1100 V-os egyenirányítók fejlesztése is. Üzemben van több 250 és 500 V-os 250 A-es bányá-

vasúti egyenirányító és ipari üzemek vasúti hálózatát tápláló egyenirányító berendezés is. Az üzemi tapasztalatok egyértelműen bizonyítják azt, hogy a szilícium-egyenirányítók az egyenáramú vontatás területén megfelelő méretezéssel a hozzájuk fűzött reményeket teljes mértékben beváltják és rohamos elterjedésükre lehet számítani.

Irodalom

- [1] *Hartmann, L.*: Bemessung von Silizium-Bahnspisegleichrichtern. Siemens Zeitschrift 1965. nov.
- [2] *Janetschke, E.*: Silizium-Gleichrichter in Schnellbahnunterwerken. Elektrische Bahnen 1961. április.
- [3] *Kliemann, N.*: Siliziumgleichrichter für Unterwerke und Fahrzeuge elektrischer Bahnen. Glasers Annalen 1962. febr.
- [4] *Efremov, I. Sz.*: Zadaci razvitija preobrazovatelnoj tehniki i szisztem elektrosznabzszenija gorodszkovo transzporta. Elektricsesztvo 1963. nov.
- [5] *Balüberdin—Pincov*: Oпитно-promüslennüj poluprovodnikovüj vüpramitelj dlja gorodszkovo elektricsesztkovo transzporta. Elektrotehnika 1964. márc.
- [6] *Gutzwiller, F. W.*: Overcurrent protection of semiconductor rectifiers. Electrical Manufacturing 1959. ápr.
- [7] *Gutzwiller, F. W.*: The current-limiting fuse as fault protection of silicon rectifiers. Electrical Manufacturing 1958. nov.
- [8] *Corbyn—Potter*: The characteristics and protection of silicon rectifiers. Proceedings of IEE/c 1959. nov.
- [9] *Szabványok*: KGMSZ 4.65.02-63 (egy kristály egyenirányítók) VDE 0555 (Quecksilberdampfstromrichter).

FÉLVEZETŐ LABORATÓRIUM

13.

Si-SiC p-n heteroátmenetek

DR. LUKÁCS JÓZSEF

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk ismerteti a Villamosipari Kutató Intézet Félvezető Laboratóriumában Si-SiC heteroátmenetek területén 1965-ig végzett kísérletek eredményeit. Részletesen leírja a heterokötések előállítás technológiáját, majd azok elméleti és kísérleti vizsgálatait. Összehasonlító táblázatot közöl különböző típusú és fajlagos ellenállású szilícium egykristályokkal végzett kísérletek eredményeiről, továbbá közli a különböző típusú átmenetek jelleggörbéit. Végül értékeli az elvégzett kísérletek eredményeit.

ГЕТЕРОГЕННЫЕ p-n ПЕРЕХОДЫ Si-SiC

Д-р. Я. Лукач

Резюме

В статье описываются результаты экспериментов произведенных до 1965 г. в области гетерогенных переходов Si—SiC в Лаборатории полупроводники Исследовательского Института Электротехнической Промышленности.

Подробно описывается технология получения гетерогенных переходов и затем их теоретическое и экспериментальное исследование. Приводится сравнительная таблица о результатах экспериментов проведенных по кремниевым монокристаллам различного типа и удельного сопротивления, далее приводятся характеристики переходов различных типов. Наконец, производится оценка результатов проведенных экспериментов.

Si-SiC p-n HETERO-ÜBERGÄNGE

Dr. J. Lukács

Zusammenfassung

In der Arbeit werden die Ergebnisse der im Halbleiter-Laboratorium des Forschungsinstitutes der Elektroindustrie auf dem Gebiet von Si-SiC Hetero-Übergängen bis 1965 geführten Versuche beschrieben.

Der Autor beschreibt die Herstellungstechnologie der Hetero-Verbindungen und hiernach deren theoretische und Versuchsprüfungen. Es wird eine vergleichende Tabelle über die Ergebnisse der mit Silizium-Monokristallen verschiedenen Typs und spezifischen Widerstandes geführten Versuche, weiterhin die Kennlinien der Übergänge verschiedenen Typs mitgeteilt. Abschliessend werden die Versuchsergebnisse ausgewertet.

Si-SiC p-n HETERO JUNCTIONS

Dr. J. Lukács

Summary

The results of the experiments carried out in the Semiconductor Laboratory of the Research Institute of the Electrical Industry in the field of the hetero junctions up to 1965 are reviewed in the paper.

The production technology of hetero junctions, as well as their theoretical and experimental studies are described in detail. A comparative table gives information about the results of the experiments on monocrystals of various types and of different specific resistivity and in addition the characteristics of different junction types are given. Finally, the results of the experiments performed are evaluated.

Bevezetés

Régebbi, vonatkozó munkáink [1, 2, 3] polikristályos, nemlineáris ellenállásokban alkalmazott szilíciumkarbidra vonatkoztak. Ezen munkák során két lényeges szempont érvényesült: törekedtünk egyrészt az ellenállások nemlinearitásának javítására, másrészt termikus szilárdságuk fokozására. Az utóbbi volumetrikus és doppingolási kérdésekre redukálódott. Az előbbi probléma azonban előtérbe hozta a SiC szemcsék felületén lejátszódó jelenségek vizsgálatát.

Ezen a téren régebbi megállapításaink csak az alapanyag tisztításáig és az egyféle doppingolás bevezetéséig terjedtek [2]. Részletesebb megfontolások később arra vezettek, hogy a nemlinearitás lényeges fokozása csak jól definiált körülmények között kifejlődött lavina-(avalanche-) jelenségek létrehozása révén biztosítható. Fenti célra legelőnyösebb lett volna természetesen SiC egykristályban létrehozott p-n rétegeket vizsgálni, ez azonban részben kísérleti felkészültségünk jelenlegi állapota, részben a létrehozni kívánt nagy felületek miatt nem látszott járható útnak.

Ebben a helyzetben, 1964 elején vetettük fel — megalkuvásként — a Si—SiC p-n heterokötések létrehozásának lehetőségét. Tudatában voltunk annak, hogy az egykristályos Si lemezek felületén létrehozott SiC a nagy rácsállandókülönbség ($\text{Si} = 5,42 \text{ \AA}$, $\text{SiC} = 4,35 \text{ \AA}$!) miatt nem lesz egykristályjellegű. A heterokötéseket azonban még így is definiáltabb viszonyúnak tekintettük, mint két polikristályos test kontaktusviszonyait.

1. Si-SiC heterokötés létrehozásának technológiája

Fenti problémakörben számos kísérletet végeztünk a kísérleti paraméterek, valamint felhasznált anyagok jelentős variálásával. A sok technológiai variáció közül az alábbiakban leírt eljárást találtuk legcélravezetőbbnek, ill. szempontunkból a legjobb p-n, ill. n-n⁺ átmenetet biztosítónak.

Kiindulási anyagként $\varnothing 22 \times 0,5$ mm-es egykristályos p-, ill. n-típusú Si lemezt használtunk. A (111) sík eltérése a lemez geometriai síkjától maximálisan 3° volt. A lemezeken először egy, a Félvezető Laboratóriumban Salánki Tibor munkatársunk által kidolgozott módszerrel, 2000...3000 Å vastag szilíciumoxid-réteget hoztunk létre. Ennek részleges eltávolítása után (kúszóút biztosítása!) a lemezek az 1350 °C-on tartott csökemencébe kerültek. A kemencén argon (kb. 10 l/h) és metán (0,3 l/h) keverékét áramoltattuk 4...24 órán át. Így a felületen β -SiC-öt hoztunk létre.

Az „n”, ill. „p” doppingolás további izzítás mellett történt, a hordozógázhoz nitrogén, illetve trietilaluminium adagolásával. A lemezekről a főlős szenet oxigénben történő izzítással, az egyik oldalon felesleges szilíciumkarbidot pedig mechanikusan távolítottuk el. Ezután mind a SiC réteget, mind a Si lemezt arannyal vákuumgőzöltük és a felvitt rétegeket 800 °C-on hidrogén közegben beégettük.

* Irodalmi adatok szerint jó minőségű „heterojunction”-t max. 5...8% rácsállandó-különbség esetén lehet létrehozni

2. A Si-SiC heteroátmenetek elméleti és kísérleti vizsgálata

Mivel a Si-SiC heteroátmenetek energiasáv-diagramjára semmiféle adatot nem találtunk, kénytelenek voltunk azokat magunk megszerkeszteni. A szerkesztést az irodalmilag található, legvalószínűbb tiltottsáv- és kilépésimunka-értékkel végez-

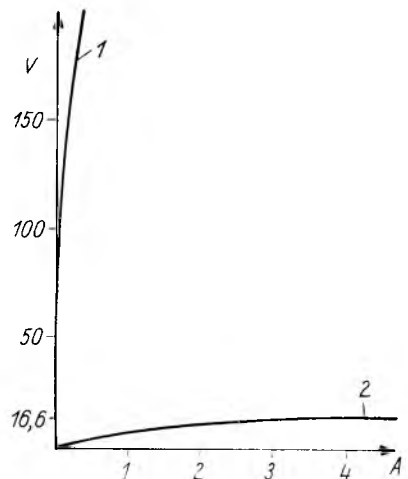
13-1. táblázat

Szám	Si lemez		SiC doppingolás	Záró-feszültség V_{cs}	Záró- és nyitóáram aránya
	vezetési típus	fajlagos ellenállás Ω cm			
2	„n”	200	—	16	1:10
1/1	„n”	200	—	20	1:15
11/2	„n”	200	—	10	1:10
45	„p”	150	—	80	1:30
46	„p”	150	—	30	1:40
47	„p”	150	nitrogén	60	1:30
53	„n”	7	nitrogén	4	1:4
57/2	„n”	2	nitrogén	4	1:4
61/2	„p”	0,5...1	nitrogén	10	1:6
65	„n”	7	nitrogén	10	1:5

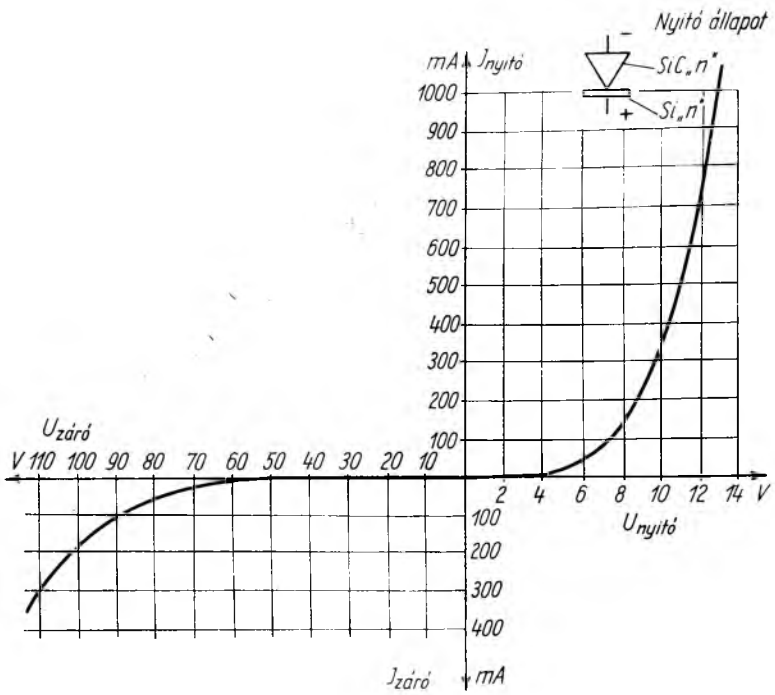
tük el. A bizonytalanság rögzítése különösen a kilépésimunkára vonatkozóan érvényes, mivel itt szilíciumkarbidra igen különböző értékek találhatók, attól függően, hogy a kilépésimunka-értéket kontaktpotenciál, termikus emisszió vagy foto-emissziós mérés alapján határozták meg.

A végzett nagyszámú kísérlet eredményeit a 13-1. táblázatban igyekeztünk összefoglalni. A táblázatban felhasznált Si lemez típusok fajlagos ellenállását, az alkalmazott doppingolást, az ún. zárófeszültséget, az egyenirányítás fellépését, ill. hiányát jelöltük. Egyenirányítás hiányának azt jelöltük, ha a jelölt zárófeszültségen, ill. azzal azonos nyitófeszültségen az áramok aránya 1:10 értéknél kisebb volt.

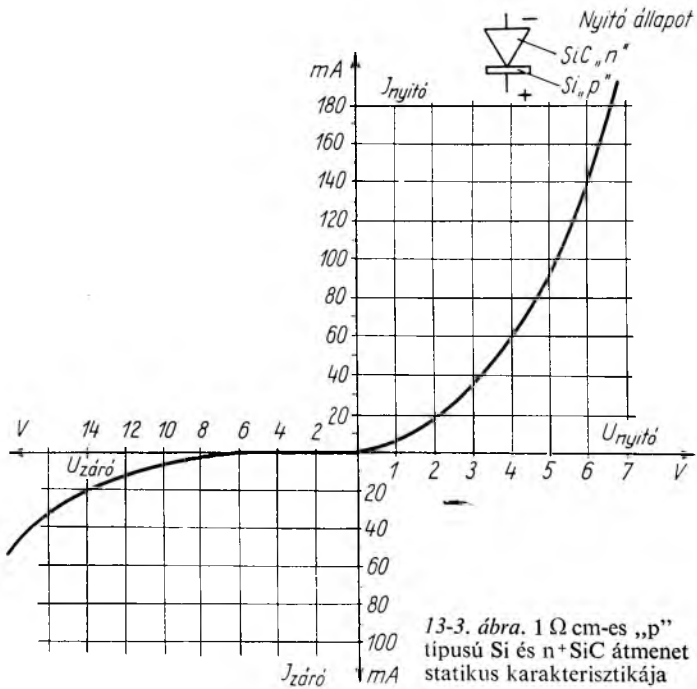
A 13-1. ábrán egy 200 Ω cm-es „n” típusú Si és n^+ SiC kötés oszcillográffal felvett nyitó- és zárókarakterisztikáját mutatjuk be, míg a 13-2. ábrán ugyanezen átmenet egyenárammal felvett statikus karakterisztikája látható. Valószínűnek látszik, hogy 10 V nagyságú nyitófeszültségben jelentős átmeneti ellenállások is szerepet játszanak. A dióda egyébként 80...100 V zárófeszültségűnek deklarálható. A 13-3. ábrán egy alacsony (1 Ω cm) „p” típusú Si és hasonlóan n^+ -ra doppingolt SiC nyitó- és zárókarakterisztikáját mutatjuk be. Látható, hogy a viszonyok az előbbieknél jóval kedvezőlenebbek.



13-1. ábra. 200 Ω cm-es „n” típusú Si- és n^+ SiC átmenet oszcillográffal felvett nyitó- (2) és záróirányú (1) karakterisztikája



13-2. ábra. A 13-1. ábrához tartozó átmenet statikus karakterisztikája



3. A vizsgálatok eredményeinek értékelése

Az eddig végzett kísérleteket tájékoztató jellegűnek kell tekinteni. Jelen időpontig a legkedvezőbb egyenirányító-karakterisztikát Si-SiC heterokötésben $n-n^+$ átmenettel értük el. A lavinaeffektusok tanulmányozása a mellékhatásoktól mentesített telítési áram létrehozásának hiánya miatt eddig nem volt lehetséges.

Irodalom

- [1] *Dr. Lukács J.*: Feszültségfüggő ellenállások túlfeszültség levezetők számára. Elektrotechnika 1952. december.
- [2] *Dr. Lukács J.—Bogoly I.*: Szilíciumkarbid jelene és jövője az erősáramú villamosiparban. Technika 1957. február.
- [3] *Dr. Lukács J.*: Weitere Verbesserung nichtlinearer Widerstände. NDK Elektrotechnikai Egyesület 10 éves jubileuma alkalmából Weimarban tartott előadás.

14.

Szilícium teljesítménydiódák p-n átmenetének termikus analízise

MOLNÁR ISTVÁN—KISS DÉNES

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk a VKI 15 éves jubileuma alkalmával (1964. dec.) Molnár István: „Szilícium-diódák p-n átmeneteinek melegezésszámítása” címmel megtartott előadásában ismertetett számítási mechanizmus leírásán túlmenően, a 150 SA típusú szilíciumdiódákra vonatkozóan, méréssel alátámasztott számításokat tartalmaz, a dióda p-n átmenetének különböző terhelési szintek melletti hőmérséklet alakulására vonatkozóan. A tranzienis hőellenállás kiértékelésén felül a túlterhelhetőség meghatározását is tartalmazza. Az általános következtetések mellett zárt alakú megoldásokat ismertet, bármely dióda melegedés-folyamatára jellemző, RC elektromos hőmodell kiértékelése érdekében.

ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ p-n ПЕРЕХОДОВ КРЕМНИЕВЫХ ДИОДОВ МОЩНОСТИ

И. Молнар—Д. Кишиш

Резюме

Помимо описания механизма расчета изложенного в докладе под наименованием „Расчет нагрева p-n переходов кремниевых диодов” (автор Иштван Молнар) зачитанного по случаю 15-и летнего юбилея Исследовательского Института Электротехнической Промышленности (1 декабря 1964 г.), в статье приведены обоснованные измерениями расчеты относительно кремниевго диода типа 150 SA в связи с образованием температуры при различных уровнях нагрузки. Сверх оценки переходного термического сопротивления приводится также и определение предела перегрузки. Наряду с общими выводами описываются решения закрытой формы в интересах оценки RC электрической термомодели характерной для процесса нагревания любого диода.

THERMISCHE ANALYSE DES p-n ÜBERGANGES VON SILIZIUM-LEISTUNGSДИОДЕН

I. Molnár—D. Kiss

Zusammenfassung

Die Arbeit enthält über die Beschreibung des in dem Vortrag von István Molnár anlässlich des 15-jährigen Jubiläums des Forschungsinstitutes der Elektroindustrie (am 1. Dezember 1964) „Erwärmungsberechnung der p-n Übergänge von Silizium-Dioden” dargelegten Berechnungsmechanismus hinaus durch Messungen belegte Berechnungen für Silizium-Dioden des Typs 150 SA in Bezug auf die Temperaturentwicklung der p-n Übergänge der Dioden bei verschiedenen Belastungspegeln. Über die Auswertung des transienten Wärmewiderstandes liegt auch die Bestimmung der Überlastbarkeit vor. Im Interesse der Auswertung eines für den Erwärmungsvorgang sämtlicher Dioden charakteristischen RC elektrischen Wärmemodells werden neben den allgemeinen Folgerungen Lösungen mit geschlossener Form beschrieben.

THERMAL ANALYSIS OF p-n JUNCTION OF SILICON POWER DIODES

I. Molnár—D. Kiss

Summary

In addition to the calculation method, given in the paper of István Molnár on the occasion of the 15th anniversary of the Research Institute of the Electrical Industry (1.12. 64) "Calculation of warming up of the p-n junctions of the silicon diodes", present paper deals with calculations based on measurements of silicon diodes type 150 SA from the point of view of temperature variations on different loading levels. The determination of possibilities of overloading is reviewed in the paper in addition to the evaluation of the transient heat resistance. Besides the general solutions there are reviewed in the paper closed solutions for the evaluation of RC electric thermal models, characteristic for warming-process of any diodes.

A teljesítménydiódák nyitóirányú áramterhelése során — ami az áram és a belső veszteségek nagyságával, továbbá a terhelés időtartamával jellemezhető — a felső határt minden esetben a p-n átmenet megengedett maximális hőmérséklete definiálja. Ez a hőmérséklet-határ szoros összefüggésben van a p-n átmenet előállítási módjával és a dióda szerkezeti felépítésével. Előzők alapján tehát — a kellő biztonságu terhelés megadása érdekében — szükséges annak ismerete, hogy a dióda p-n átmenete az adott hűtési körülmények mellett mekkora hőmérsékletet ér el a terhelés definiált időpontjában.

Ezt támasztja alá az a tény is, hogy meg nem engedett nagyságu áramterhelés esetén a p-n átmenet felületvédelmének kémiai, illetőleg az egykristálylemez mechanikai roncsolódása is végső fokon az átmenetben kialakult hőmérsékletnek a következménye.

1. Alapfeltételek

A későbbiekben részletezett számításunk a VKI Félvezető Laboratóriumában kifejlesztett és az Anód Áramirányítógyárban gyártott (14-1. ábra) 150 SA típusjelzésű ($R_b = 0,2 \text{ }^\circ\text{C/W}$ belső hőellenállású, és 150 A_K terhelhetőségű), ötvözött szilícium teljesítménydióda p-n átmenetének nyitóirányú terheléstől függő melegedésére vonatkozik.

A szilíciumdiódát léghűtéses hűtőnkre szerelt állapotban vizsgáljuk. A hűtőlevegő hőmérsékletét $T_{lev} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, sebességét pedig $v_{lev} = 5 \text{ m/s}$ értékkel vesszük figyelembe és feltételeink értelmében mindkét érték állandó marad a terhelések időtartama alatt is, a terhelés nagyságától függetlenül.

Tekintettel arra, hogy a p-n átmenet hőmérsékletét meghatározó későbbi képletekben a hűtőlevegő hőmérsékletértéke csak addicionális tagként szerepel, a $T_{lev} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ felvétel a számítások egyszerűsítését is maga után vonja.

A számításaink során 50 periódusú hálózatot, szinusz alakú nyitóirányú áramot és 180 fokokos áramvezetési szöveget tételezünk fel, továbbá a melegedéseknél a nyitóirányú veszteség mel-



14-1. ábra

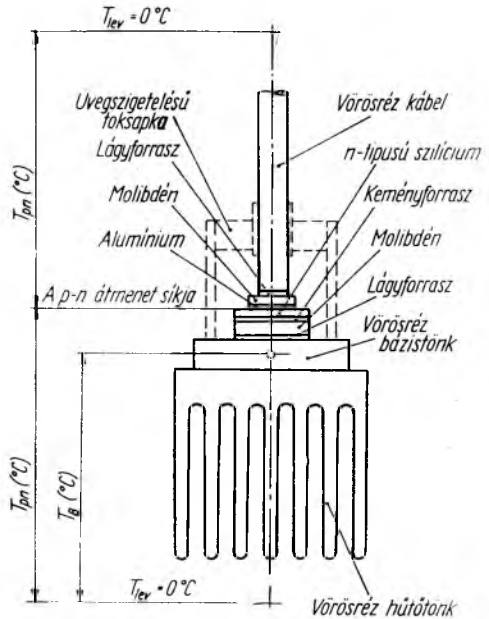
lett a záróirányú veszteséget figyelmen kívül hagyjuk ($P_z = 0$).

A 150 SA típusú dióda elvi felépítése a 14-2. ábrán látható, a legjellemzőbb hőmérsékleti pontok bejelölésével együtt.

A dióda p-n átmenetének finomabb szerkezeti elemzésére nem térünk ki, mivel az [1] hazai folyóiratban már megtörtént.

A 14-2. ábrához, illetőleg a továbbiakban tárgyalásra kerülő elektromos hőmodell felépítési gondolatmenetéhez csatlakozóan még az alábbi alapfeltételeket kell lerögzíteni:

- A p-n átmenet melegeését egyedül okozó nyitóirányú veszteséget (P_{ny}) az átmenet síkjában keletkezettnek tételezzük fel.
- A p-n átmenet, illetőleg közvetlen környezetének sugárzással történő hőleadásától eltekintünk.
- A nyitóirányú veszteség elvezetése mind a kábel, mind pedig a bázistönk irányába kizárólag hővezetés útján történik.
- A léghűtés kizárólag a hűtőtönc felületét éri és ebből kifolyólag a diódatok felületén előálló hőleadást figyelmen kívül hagyjuk.



14-2. ábra

2. Az elektromos hőmodell felépítésének alapjai

A 150 SA típusú dióda névleges terhelhetősége $i_{NK} = 150 A_K$, mely érték a szinusz alakú nyitóirányú áram teljes periódusra vonatkoztatott lineáris középértéke. A névleges terheléshez tartozó nyitóirányú karakterisztika lineáris közelítése látható a 14-3. ábrán.

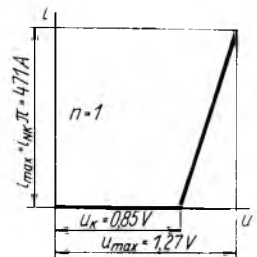
Tekintettel arra, hogy tárgyalásunk során a karakterisztika csak a nyitóirányú veszteség kiértékelése szempontjából érdekes, u_{max} értékét hőmérséklettől függetlennek tekinthetjük. Ennek következtében természetesen a nyitóirányú veszteség is — a valóságot jól közelítően — hőmérséklettől független mennyiséggé válik számításaink során.

A 14-3. ábra jelöléseit alapul véve, a nyitóirányú áramra, illetőleg feszültségesésre felírható, hogy

$$i(t) = \overline{i_{i,max}} \sin \omega t,$$

$$u(t) = \overline{u_K + (u_{max} - u_K) \sin \omega t}.$$

(A felülhúzás azt jelképezi, hogy a függvény csak a nyitóirányú félperiódusban értelmezett és a záróirányú félperiódus időtartama alatti értéke nulla.)



14-3. ábra

Fentiek alapján a névleges terhelésre vonatkozó nyitóirányú veszteség időfüggése:

$$P_{ny}(t) = u(t) \cdot i(t) = \overline{A \sin \omega t + B \sin^2 \omega t}, \quad (1)$$

ahol

$$A = u_K i_{max}$$

és

$$B = (u_{max} - u_K) i_{max}. \quad (2)$$

A névlegestől eltérő nyitóirányú terhelési állapotok vizsgálata érdekében szükséges bevezetni a terhelési tényezőt (n), ami az adott szinusz alakú nyitóirányú áram lineáris középértékének a névleges értékhez való viszonyát jelenti, tehát

$$n = \frac{i_K}{i_{NK}} = \frac{i_K}{150}. \quad (3)$$

Ennek alapján a nyitóirányú veszteség A és B együtthatóinak a terhelési tényezőtől való függését az alábbi formában írhatjuk:

$$A(n) = nA,$$

$$B(n) = n^2 B. \quad (4)$$

Végeredményben pedig az (1) és (4) összefüggések alapján a nyitóirányú veszteségfüggvény általános alakja a következő:

$$P_{ny}(t) = \overline{nA \sin \omega t + n^2 B \sin^2 \omega t}. \quad (5)$$

A (2) képletcsoport és a 14-3. ábra adatainak segítségével pedig meghatározható a dióda 150 A_K névleges terheléséhez ($n=1$) tartozó veszteségi együtthatók értéke:

$$A = 400 \text{ W},$$

$$B = 200 \text{ W}. \quad (6)$$

A dióda belsejében keletkező veszteség lineáris középértékét pedig — amit wattmérő segítségével mérhetünk — az alábbi összefüggés alapján számíthatjuk:

$$P_{nyK} = \frac{\omega \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} (nA \sin \omega t + n^2 B \sin^2 \omega t) dt}{2\pi} = \frac{nA}{\pi} + \frac{n^2 B}{4} \text{ W}. \quad (7)$$

Így tehát kiértékelhetjük a 150 SA dióda névleges nyitóirányú veszteségének középértékét, ami

$$P_{nyK}|_{n=1} = 178 \text{ W}$$

értékre adódik, a mérésekkel teljes összhangban.

Ezután határozzuk meg azt a Q_{ny} hőtöltést (hőmennyiséget), amit a nyitóirányú veszteség egyetlen félperiódusban létrehoz a p-n átmenetben. Ez az alábbi képlet szerint számítható:

$$Q_{ny} = \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} P_{ny}(t) dt = \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} (nA \sin \omega t + n^2 B \sin^2 \omega t) dt = \frac{2nA}{\omega} + \frac{n^2 B \pi}{2\omega} \text{ Ws}. \quad (8)$$

Diódánk esetében pedig ennek névleges terhelés melletti értéke:

$$Q_{ny}|^{n=1} = 3,55 \text{ Ws.}$$

Mivel pedig a hőtöltés időegységre eső része a hőáram (I), érthetően a hőáram és nyitóirányú veszteség időfüggvénye azonos lesz. Tehát írhatjuk, hogy

$$I(t) = \frac{dQ_{ny}}{dt} = P_{ny}(t) = \overline{nA \sin \omega t + n^2 B \sin^2 \omega t}. \quad (9)$$

Az előzők alapján az is nyilvánvaló, hogy a hőáram teljes periódusra vonatkoztatott lineáris középértéke azonos a nyitóirányú veszteség hasonlóan értelmezett középértékével, tehát:

$$I_K = \frac{\omega Q_{ny}}{2\pi} = P_{nyK} = \frac{nA}{\pi} + \frac{n^2 B}{4} \text{ W.} \quad (10)$$

A későbbi számításainkhoz szükséges még a dióda egyes szerkezeti elemére vonatkozó hőellenállás (R) és hőkapacitás (C) nagyságának az ismerete is. A felsorolt jellemzők a termodinamikai szabályok alapján számíthatók. Ennek megfelelően a figyelembevett test hőellenállása:

$$R = \frac{1}{\lambda} \sum \frac{l}{F} \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}},$$

ahol:

λ a hővezetési tényező $\left(\frac{\text{W}}{^\circ\text{C cm}} \right)$;

l a hővezetési hossz (cm);

F a hőáramlási keresztmetszet (cm²).

A szerkezeti elem hőkapacitása pedig:

$$C = Gc \frac{\text{Ws}}{^\circ\text{C}},$$

ahol:

G a test súlya (p);

c fajhő $\left(\frac{\text{Ws}}{\text{g } ^\circ\text{C}} \right)$.

Itt meg kell jegyezni, hogy a későbbiekben felépített RC elektromos hőmodellnél a hőellenállások és hőkapacitások értékeit a hőmérséklet és hőáram nagyságától függetlennek tekintjük.

Az elektromos hőmodellnek a hőáram betáplálási helyére vonatkoztatott eredő hőimpedanciája (Z) az elektrotechnikai szabályok alapján képezhető.

Végeredményben pedig a p-n átmenet hőfeszültsége (U) — ami a hőmérséklettel (T), még dimenziójában is azonos mennyiség — a Laplace-transzformáció igénybevételével az alábbi formában adódik:

$$U(t) = T(t) = \mathcal{L}^{-1}\{Z(p) \cdot I(p)\}.$$

Itt természetesen $I(p)$ a hőáram transzformáltja, $Z(p)$ pedig az elektromos hőmodell eredő, operátoros hőimpedanciája.

A 14-2. ábra szerinti összeállításnak megfelelő és a léghűtést is figyelembe vevő három időállandós RC hőmodellt a 14-4. ábra tartalmazza. Láthatóan a hűtési rendszer itt egyidőállandós modellként szerepel, ami a valóságos helyzetet csak kielégítően közelíti meg. Ez a felvétel azonban számításaink során megfelelő, mivel:

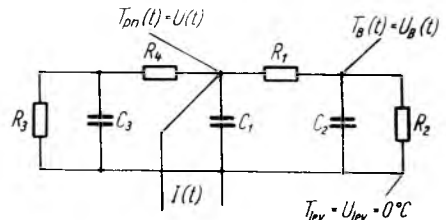
- A különböző terhelések melletti, állandósult állapotra vonatkozó hőmérséklet kiértékelések eredményét nem befolyásolja.
- A névleges és állandósult előterhelést követő túlterhelésre vonatkozó adataink maximálisan 100 periódusnak megfelelő időtartamig kerültek kiértékelésre. Említett időtartományon belül pedig a valóságban több időállandós hűtési rendszer legkisebb időállandós tagja sem gyakorol lényeges hatást a p-n átmenet hőmérsékletének alakulására.
- A „belső hőellenállások bekapcsolási tranziensét” ugyan kerekén 10^4 periódusnak megfelelő időtartamig értékeltük ki, azonban ennek értéke a hűtési rendszer jellemzőitől gyakorlatilag független. Itt kell még megjegyezni, hogy számítási eljárásunkat kizárólag az $n=0,5$ és $n=4$ terhelési tényezőkkel jellemzett áramterhelési tartományon belül tekintjük kielégítő pontosságúnak (az elvégzett mérésekkel összhangban), mivel:
- Kis n értékek mellett a valójában exponenciális jellegű nyitóirányú karakterisztika lineáris közelítése már nem megfelelő.
- Az A és B veszteségi együtthatók nem tekinthetők a terheléstől és hőmérséklettől minden határon túl független állandónak.
- Nagy n értékek mellett vizsgálathoz elkerülhetetlen a több időállandós hőmodell alkalmazása, ami különösen a kábeloldal finomabb leképezéséből következik.

3. Névleges terhelés alatti melegedési folyamat

A hűtőtönkre szerelt 150 SA típusú dióda komplett elektromos hőmodellje a 14-4. ábrán látható.

Az egyes hőkapacitás- és hőellenállás-értékekkel kapcsolatban az alábbiakat kell lerögzíteni:

- a szilícium lemez és alumínium réteg számított, együttes — a p-n átmenet síkjában koncentrált — hőkapacitása;
- a hűtőtönc és bázistönc eredő — a bázistönc hőmérsékletmérést biztosító furatának síkjában koncentrált — hőkapacitása;
- a diódatok belsejében levő flexibilis kábelrész — p-n átmenet felőli végére koncentrált — hőkapacitása;
- a bázistönc furata és a p-n átmenet között mért $R_b = 0,2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ értékű eredő belső hőellenállásból számítással korrigált érték, ami a fémfélvezető átmenetek összes hővillamos-effektusának hatását is [2 és 3] magában foglalja.
- a bázistöncfurattól a hűtőlevegőig értelmezett, mért eredő hőellenállás.



$$\begin{array}{l}
 R_1 = 0,22 \text{ } ^\circ\text{C/W} \\
 R_2 = 0,15 \text{ } ^\circ\text{C/W} \\
 R_3 = 8,4 \text{ } ^\circ\text{C/W} \\
 R_4 = 0,04 \text{ } ^\circ\text{C/W} \\
 C_1 = 0,2 \text{ Ws/}^\circ\text{C} \\
 C_2 = 1000 \text{ Ws/}^\circ\text{C} \\
 C_3 = 20 \text{ Ws/}^\circ\text{C}
 \end{array}$$

14-4. ábra

Ez az érték a hűtőbordák sugárzási és felületi hőátadási ellenállásait is tartalmazza;

R_3 a kábelszerkezet teljes, számított hőellenállása;

R_4 a p-n átmenettől a flexibilis kábel belső végéig értelmezett, számított hőellenállás, ami az alumínium, molibdén és forraszréteg ellenállásainak az eredője;

Meghatározva hőmodellünknek — a hőáram szempontjából bemenő — eredő, operátoros hőimpedanciáját, a következő eredményre jutunk:

$$Z(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{5p^2 + 6,33p + 0,0679}{p^3 + 149p^2 + 30,8p + 0,1865} \quad (11)$$

Az $X(p)$ nevező gyökei:

$$p_1 = -0,00625,$$

$$p_2 = -0,20047,$$

$$p_3 = -148,79301.$$

A Függelékben közöltek felhasználásával pedig a (9) képlet szerinti, névleges terheléshez tartozó hőáram Laplace-transzformáltjának periodikus tagja

$$I_{\text{per}}(p) = \frac{M(p)}{N(p)} = \frac{Ap\omega(p^2 + 4\omega^2)(1 + e^{-p\frac{\pi}{\omega}})}{p(p^2 + \omega^2)(p^2 + 4\omega^2)} + \frac{2B\omega^2(p^2 + \omega^2)(1 - e^{-p\frac{\pi}{\omega}})}{p(p^2 + \omega^2)(p^2 + 4\omega^2)} \quad (12)$$

Az $N(p)$ nevező gyökei:

$$p_0 = 0,$$

$$p_{4,5} = \pm j\omega,$$

$$p_{6,7} = \pm j2\omega.$$

Feltételezve ezek után azt, hogy a hőáram bekapcsolásának időpontjában ($t=0$) a p-n átmenet hőfeszültsége a levegőével megegyező [$U(0) = U_B(0) = U_{\text{lev}} = 0^\circ\text{C}$], meghatározhatjuk a p-n átmenet hőfeszültségének alakulását az első bekapcsolási periódus idejére. Ennek értéke:

$$U(t)|_1 = \mathcal{L}^{-1}\{Z(p)I_{\text{per}}(p)\} = \sum_{i=0}^7 \frac{Y(p_i)M(p_i)e^{p_i t}}{X'(p_i)N(p_i) + X(p_i)N'(p_i)}$$

[összegezés $X(p)$ és $N(p)$ gyökei szerint].

Figyelembe véve azonban a (12) képlet $(1 + e^{-p\frac{\pi}{\omega}})$ és $(1 - e^{-p\frac{\pi}{\omega}})$ záróirányú félperiódusra érvényes leképezési utasításait, $U(t)|_1$ megoldását célszerű különböztetni mind a nyitó-, mind pedig a záróirányú félperiódusra.

Ennek megfelelően az első nyitóirányú félperiódusra érvényes megoldás:

$$\begin{aligned}
 U(t)|_1^{\text{ny}} = & A \cdot 0,000003 e^{-\frac{t}{160}} + \\
 & + A \cdot 0,00011 e^{-\frac{t}{5}} + \\
 & + A \cdot 0,0129 e^{-\frac{t}{0,00672}} + \\
 & + A \cdot 0,00622 \sin \omega t - \\
 & - A \cdot 0,013 \cos \omega t + \\
 & + B \cdot 0,182 - \\
 & - B \cdot 0,0788 e^{-\frac{t}{160}} - \\
 & - B \cdot 0,0865 e^{-\frac{t}{5}} - \\
 & - B \cdot 0,0158 e^{-\frac{t}{0,00672}} - \\
 & - B \cdot 0,00378 \sin 2\omega t - \\
 & - B \cdot 0,0009 \cos 2\omega t
 \end{aligned} \tag{13}$$

($t=0$ a nyitóirányú félperiódus elején).

Hasonlóan az első záróirányú félperiódusra érvényes képlet:

$$\begin{aligned}
 U(t)|_1^{\text{z}} = & A \cdot 0,000006 e^{-\frac{t}{160}} + \\
 & + A \cdot 0,00022 e^{-\frac{t}{5}} + \\
 & + A \cdot 0,0158 e^{-\frac{t}{0,00672}} + \\
 & + B \cdot 0,01225 e^{-\frac{t}{0,00672}}
 \end{aligned} \tag{14}$$

($t=0$ a záróirányú félperiódus elején).

Végeredményben pedig A és B számszerű behelyettesítése és az elhanyagolások után írható, hogy:

$$\begin{aligned}
 U(t)|_1^{\text{ny}} = & 3,38 + \\
 & + 2 e^{-\frac{t}{0,00672}} + \\
 & + 2,49 \sin \omega t - \\
 & - 5,2 \cos \omega t - \\
 & - 0,756 \sin 2\omega t - \\
 & - 0,18 \cos 2\omega t \quad ^\circ\text{C}
 \end{aligned} \tag{15}$$

és

$$\begin{aligned}
 U(t)|_1^{\text{z}} = & 0,09 + \\
 & + 8,76 e^{-\frac{t}{0,00672}} \quad ^\circ\text{C}
 \end{aligned} \tag{16}$$

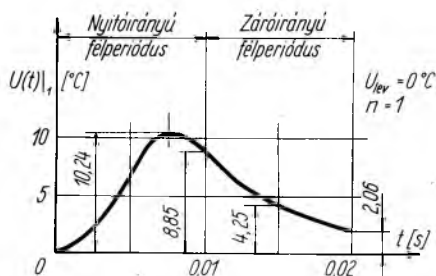
Előzők alapján felrajzolható a p-n átmenet hőmérsékletének alakulása a névleges terhelés első periódusában, $T_{lev} = 0^\circ\text{C}$ környezeti hőmérséklet mellett értelmezve (14-5. ábra).

Miként a Függelékben elmondottakból következik, az $U(t)|_1 = T_{pn}(t)|_1$ hőmérséklet a p-n átmenet periodikus $U_{per}(t)$ és tranzien $U_{tranz}(t)$ hőmérsékleti függvényeinek az első periódus alatti összege. Ennek alapján a periodikus hőfeszültségfüggvény az alábbiak szerint határozható meg:

$$U_{per}(t) = U(t)|_1 - U_{tranz}(t)|_1.$$

Szükséges tehát a számítás folytatása érdekében kiértékelni a p-n átmenet tranzien hőfeszültségének az egyenletét. Ez a (47) képlet alapján:

$$U_{tranz}(t) = \sum_{i=1}^3 \frac{Y(p_i) I_{per}(p_i) e^{p_i t}}{\left(1 - e^{-p_i \frac{2\pi}{\omega}}\right) X'(p_i)}$$



14-5. ábra

(összegezés kizárólag $X(p)$ gyökei szerint).

A számítást végrehajtva a következő megoldást nyerjük:

$$\begin{aligned}
 U_{tranz}(t) = & -A \cdot 0,0503 e^{-\frac{t}{160}} - \\
 & -A \cdot 0,055 e^{-\frac{t}{5}} - \\
 & -A \cdot 0,00376 e^{-\frac{t}{0,00672}} - \\
 & -B \cdot 0,0395 e^{-\frac{t}{160}} - \\
 & -B \cdot 0,043 e^{-\frac{t}{5}} - \\
 & -B \cdot 0,00291 e^{-\frac{t}{0,00672}}
 \end{aligned} \tag{17}$$

($t=0$ a bekapcsolás időpontjában).

A és B veszteségi tényezők értékének behelyettesítése után pedig a végeredmény:

$$\begin{aligned}
 U_{tranz}(t) = & -28 e^{-\frac{t}{160}} - \\
 & -30,6 e^{-\frac{t}{5}} - \\
 & -2,08 e^{-\frac{t}{0,00672}} \text{ } ^\circ\text{C}.
 \end{aligned} \tag{18}$$

Ezután meghatározható a p-n átmenet periodikus hőfeszültségének az egyenlete, amit a nyitó- és záróirányú félperiódusokra különbontva adunk meg.

A nyitóirányú félperiódusban:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{per}}(t)|^{\text{ny}} &= U(t)|_{\infty}^{\text{ny}} = \\
 &= T_{\text{pn}}(t)|_{\infty}^{\text{ny}} = 61,98 + \\
 &+ 4,08 e^{-\frac{t}{0,00672}} + \\
 &+ 2,49 \sin \omega t - \\
 &- 5,2 \cos \omega t - \\
 &- 0,756 \sin 2\omega t - \\
 &- 0,18 \cos 2\omega t \quad ^\circ\text{C}.
 \end{aligned} \tag{19}$$

A záróirányú félperiódusban pedig:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{per}}(t)|^{\text{z}} &= U(t)|_{\infty}^{\text{z}} = T_{\text{pn}}(t)|_{\infty}^{\text{z}} = \\
 &= 58,69 + 9,23 e^{-\frac{t}{0,00672}} \quad ^\circ\text{C}.
 \end{aligned} \tag{20}$$

A (19) és (20) összefüggések birtokában felrajzolható a p-n átmenet periodikus hőfeszültségének — $T_{\text{lev}}=0^\circ\text{C}$ melletti — alakulása. Ez a 14-6. ábrán látható és lényegében a p-n átmenet hőmérsékletét mutatja a névleges terhelés állandósult állapotában. Ábránkon feltüntettük a zárófélperiódus alatti hőmérséklet-alakulás mért eredményeit is, a számított és mért eredmények nagyfokú egyezésének szemléltetése céljából.

A Függelékben vázoltak alapján pedig a periodikus és tranziens hőfeszültség-egyenletek ismeretében meghatározható a p-n átmenet hőmérsékletének alakulása a bekapcsolási folyamat bármely (x -edik) periódusában, mivel:

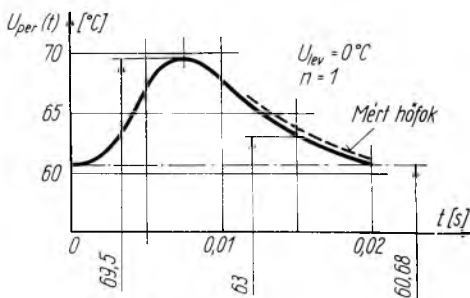
$$T_{\text{pn}}(t)|_x = U(t)|_x = U_{\text{per}}(t) + U_{\text{tranz}}(t)|_x.$$

Az ilyen jellegű kiértékelés helyett azonban célirányosabb a p-n átmenet és a bázistönk hőmérsékletértékének különbségeként számított belső hőmérsékletesés (ΔT) bekapcsolási tranziensének a megadása, mivel így a megoldás általánosabb érvényű.

Határozzuk meg tehát a bázistönk hőmérsékletének $T_{\text{B}}(t) = U_{\text{B}}(t)$ bekapcsolási egyenletét $T_{\text{lev}}=0^\circ\text{C}$ levegőhőmérséklet és névleges terhelés mellett. A bázistönk hőmérsékletét biztosító furata és a hűtőlevegő között értelmezett hűtési rendszer elektromos hőmodelljét a 14-4. ábra C_2 hőkapacitása és R_2 hőellenállása adja.

Mivel a kábelszerkezet rendkívül nagy (R_3) hőellenállása ismeretében jogosan tételezzük fel, hogy a hőáram teljes egészében a hűtőtönk irányába folyik, $T_{\text{B}}(t)$ kiértékelése érdekében vizsgáljuk meg az $I(t)$ névleges hőáram hatását, kizárólag a párhuzamosan kapcsolt $R_2 C_2$ körre.

A már ismertetett számítási menetet megismételve, az alábbi eredmények adódnak:



14-6. ábra

Az első periódusban:

$$U_B(t)|_1 \approx 0.$$

A tranziens hőfeszültség:

$$U_{B \text{ tranz}}(t) = -28,5 e^{-\frac{t}{160}} \text{ } ^\circ\text{C}.$$

A tranziens hőfeszültség első periódus alatti értéke:

$$U_{B \text{ tranz}}(t)|_1 \approx -28,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Ezek után a bázistönk periodikus hőfeszültsége

$$U_{B \text{ per}}(t) = U_B(t)|_1 - U_{B \text{ tranz}}(t)|_1 = 28,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Végeredményben tehát a bázistönk hőfeszültségének bekapcsolási egyenletét az alábbi összefüggés adja:

$$T_B(t) = U_B(t) = U_{B \text{ per}}(t) + U_{B \text{ tranz}}(t) \approx 28,5 \left(1 - e^{-\frac{t}{160}}\right) \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (21)$$

Bár a zárt alakú megoldások csak az 5. fejezetben kerülnek ismertetésre, azok felhasználásával a (21) összefüggést már itt szükséges általános alakban felírni, a rendkívül érdekes eredmény miatt. Figyelembe véve az $R_2 C_2 = 160$ s időállandó-értéket és a (31) képletben elvégezve az egyszerűsítéseket, a (21) eredmény az alábbi összefüggés számszerű megoldásaként adódik:

$$T_B(t) \approx \left(\frac{A}{\pi} + \frac{B}{4}\right) R_2 \left(1 - e^{-\frac{t}{R_2 C_2}}\right) = P_{nyk} R_2 \left(1 - e^{-\frac{t}{R_2 C_2}}\right) \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (22)$$

Ezzel pedig bebizonyítottuk, hogy a bázistönk hőfeszültségének bekapcsolási egyenletét a hőáramnak csak a lineáris középértéke befolyásolja.

A (22) egyenlet ismeretében a (21) összefüggést összehasonlítva a (18) összefüggés 160 s időállandós tagjával, nyilvánvaló, hogy a bázistönk hőfeszültségének pontos bekapcsolási egyenletét — a kábelszerkezet hatását is figyelembe véve — az alábbi összefüggés adja:

$$T_B(t) \approx 28 \left(1 - e^{-\frac{t}{160}}\right) \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (23)$$

A (18), (19), (20) és (23) összefüggések birtokában most már meghatározhatjuk a névleges terheléshez tartozó belső hőmérsékletesés bekapcsolási tranziensét. A számítási eredményeket a 14-1. táblázat tartalmazza. A nyitóirányú félperiódus alatt, a maximális hőmérséklet helyén kiértékelt belső hőmérsékletesést $\Delta T_{ny \text{ max}}$, a záróirányú félperiódus közepén, illetőleg végén kiértékelt hőmérsékleteséseket pedig $\Delta T_{Z 90}$, ill. $\Delta T_{Z 180}$ jelöléssel szerepeltetjük a táblázatban. (A Z 90 és Z 180 index a záróirányú félperiódus alatti kiértékelés helyét jelenti villamos fokokban kifejezve.)

Amennyiben a 14-1. táblázat ΔT értékeit rendre elosztjuk a névleges terheléshez tartozó nyitóirányú veszteség lineáris középértékével (esetünkben 178 W), úgy megkapjuk a 14-7. ábrán látható „belső hőellenállások bekapcsolási tranziensét”. Az R hőellenállások indexeinek jelentése a ΔT indexeivel megegyező. Ábránkon feltüntet-

14-1. táblázat

Periódusszám	1	10	10 ²	10 ³	∞
$\Delta T_{ny \text{ max}} \text{ } (^\circ\text{C})$	10,24	12	20,8	40,9	41,5
$\Delta T_{Z 90} \text{ } (^\circ\text{C})$	4,25	5,6	14,5	34,4	35
$\Delta T_{Z 180} \text{ } (^\circ\text{C})$	2,06	3,28	12,2	32,1	32,7

tük $R_{Z 180}$ alakulásának mért értékeit is. Láthatóan a mért és számított értékek egyezése kielégítő.

Nyilvánvaló az, hogy adott dióda belső hőellenállásának kiértékelésénél az állandósult állapotban előálló p-n átmenet hőmérséklet teljes periódusra vett átlagával ($\overline{T_{pn}}$) és a nyitóirányú veszteség lineáris középértékével kell számolni. Mivel azonban a nyitóirányú félperiódus alatt a p-n átmenet hőmérséklete egyszerűen nem értékelhető ki, ezért előírásaink értelmében 50 periódus, szinuszos viszonyok és 180 fokos vezetési szög esetén, továbbá állandósult állapotban a p-n átmenet átlaghőmérséklete a záróperiódus közepén kialakult hőmérsékletével veendő azonosnak, tehát:

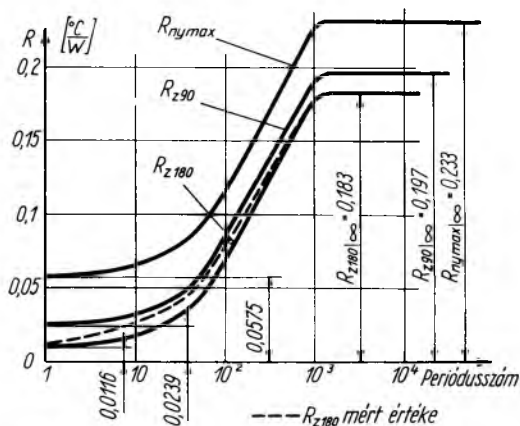
$$\overline{T_{pn}} \equiv T_{Z90} \quad (24)$$

Állandósult állapotra vonatkozóan a belső hőellenállás értéke pedig az

$$R_b = R_{Z90}|_{\infty} = \frac{T_{Z90} - T_B}{P_{nyK}} \quad \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \quad (25)$$

összefüggés alapján határozandó meg.

Tekintettel arra, hogy a számításunk tárgyát képező 150 SA típusú dióda (25) összefüggés szerint kiértékelte, mért belső hőellenállása



14-7. ábra

$R_b = 0,2 \text{ } ^{\circ}\text{C/W}$ értékű, ugyanakkor az ennek megfelelő számított adat a 14-7. ábra alapján:

$$R_{Z90}|_{\infty} = 0,197 \quad \text{ } ^{\circ}\text{C/W}$$

értékre adódott, tulajdonképpen egyrészt a (24) előírás jogosságát igazoltuk, másrészt pedig a 14-4. ábra szerinti elektromos hőmodell leképezésének helyességét támasztottuk alá.

A 14-7. ábra szerinti „hőellenállás-tranziensek” ismeretében nyilvánvalóan közvetlenül a nyitóirányú veszteség lineáris középértékével végzett szorzás útján megkapjuk a belső hőmérsékletesés értékét a kívánt periódusban, sőt a p-n átmenet hőmérsékletének ugyanazon perióduson belüli hullámossága is kiértékelhető. Az ábrából az is leolvasható, hogy a 150 SA dióda belső hőmérsékletesése a bekapcsolást követő 20. s-ban (10^3 periódus) már közelítően eléri állandósult értékét.

Bár a későbbiekben a „hőellenállás-tranziensek” sokrétű felhasználására ismételten felhívjuk a figyelmet, már itt szükséges megemlíteni, hogy a görbék segítségével a névlegestől eltérő terhelések esetén is — kizárólag a bázistönk hőmérséklet—időfüggvényének ismeretében — a p-n átmenet hőmérsékletét helyesen értékelhetjük ki.

Tekintettel arra, hogy a 150 SA dióda esetében, állandó terhelés mellett a p-n átmenet megengedett határhőmérséklete:

$$\overline{T_{pn}}|_{\text{max}} = T_{Z90}|_{\text{határ}} = 135 \text{ } ^{\circ}\text{C},$$

az $R_{Z_{90}}|_{\infty} \approx R_b = 0,2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ belső hőellenállás és a (7) képlet birtokában meghatározhatjuk diódánk határáram—bázistönkhőmérséklet összefüggését is, ami fontos diódajellemző.

4. Névlegestől eltérő terhelések melletti vizsgálat

Meghatározva a dióda p-n átmenet hőmérsékletének alakulását az $n=0,5$ és $n=1,4$ terhelési tényezőkkel jellemzett tartományon belüli állandósult terhelések és $T_{lev} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ környezeti hőmérséklet mellett, eredményeinket a 14-2. táblázatban foglaljuk össze.

14-2. táblázat

n		0,5	0,8	1	1,2	1,4
i_K (A _K)		75	120	150	180	210
Számított értékek	$T_{ny,max}$ (°C)	29,9	52,7	69,5	88	109
	$T_{Z_{180}}$ (°C)	26,1	46	60,7	77	95
	T_B (°C)	12,2	21,5	28	36	44
Mérési eredmény	$\Delta T_{Z_{90}}$ (°C)	15,5	26,5	36	46	57
	P_{nyK} (W)	75	134	180	227	282

Számításainkat a (13), (14), (17), illetve a (22) képletek segítségével végeztük el és természetesen a veszteségi tényezőknél figyelembe vettük a (4) képletsoport előírásait. Megjegyezhető egyébként, hogy amennyiben a nyitóirányú veszteségek lineáris középértékét a (7) képlettel értékeljük ki, és a hűtésre jellemző $R_2 = 0,16 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ hőellenállás (lásd 14-4. ábrán), továbbá a 14-7. ábra szerinti belső hőellenállások „állandósult” értékeivel számolunk, úgy a 14-2. táblázat számított adataival teljesen egyező eredményre jutunk.

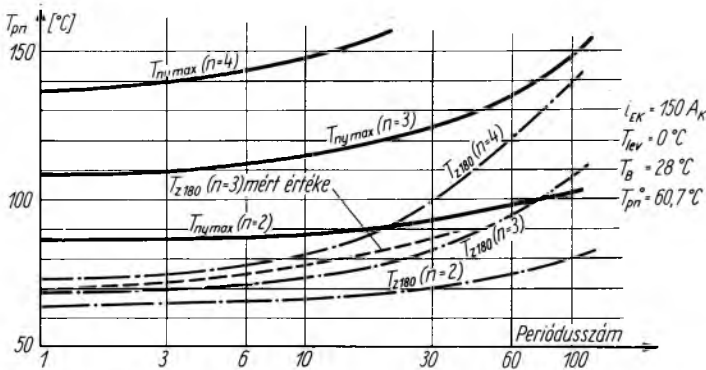
A táblázatban feltüntettük $\Delta T_{Z_{90}}$ és P_{nyK} mért értékeit is. Láthatóan a belső hőmérsékletesés mért és számított értékei jó egyezést mutatnak.

Amennyiben $\Delta T_{Z_{90}}$ és P_{nyK} névleges terhelés melletti értékeit 100%-nak tekintjük, úgy a mérési eredményekből megállapítható, hogy a $\Delta T_{Z_{90}}(\%) = f(n)$ és a $P_{nyK}(\%) = f(n)$ függvények gyakorlatilag azonos lefolyásúak. Ez pedig annyit jelent, hogy mérési úton is igazoltuk annak a megelőző feltételünknek a helyességét, mely szerint az elektromos hőmodellnél a hőellenállások értékei (tehát R_1 is) a hőmérséklet és hőáram nagyságától függetlennek tekintendők.

Itt megjegyezhető még, hogy a $P_{nyK} = f(n)$, továbbá a $P_{nyK}(\%) = f(n)$ összefüggés elméleti értékeit a (7) képlettel számolva, majd azokat a 14-2. táblázat mért adataival összehasonlítva, a mért és számított értékek nagyfokú egyezését tapasztalhatjuk.

Vizsgáljuk meg ezután a névleges terhelés (előterhelés) állandósult állapotában bekövetkező túlterhelés hatását a p-n átmenet hőmérsékletének alakulására. A környezeti hőmérséklet a túlterhelés időtartama alatt is $T_{lev} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ marad. Figyelembe véve továbbá azt, hogy a túlterhelési vizsgálatunk csak 100 periódusnak megfelelő időtartamig terjed ki és négyszeresnél ($n=4$) nagyobb túlterhelést nem veszünk

számításba, a (23) képlet ismeretében kijelenthető, hogy a bázistönk hőmérséklete a névleges előterhelés ($i_{EK} = i_{NK} = 150 \text{ A}_K$) során állandósult $T_B = 28^\circ \text{C}$ értéken marad a túlterhelés időtartama alatt is. A 14-6. ábra ismeretében az is nyilvánvaló, hogy a túlterhelés megindulásának pillanatában a p-n átmenet hőmérséklete $T_{pn}^\circ = 60,7^\circ \text{C}$ nagyságú, vagyis megegyezik a (20) periodikus hőmérsékletfüggvény zárófélperiódus végén kialakult értékével.



14-8. ábra

Az állandósult névleges előterhelést követő túlterhelésre vonatkozó számításainkat a szuperpozíció elve alapján végezzük. Ennek megfelelően a p-n átmenet névleges terhelés melletti periodikus hőmérsékletfüggvényét (a 14-6. ábrának megfelelően) a túlterhelés során is folyamatosnak vesszük, majd erre szuperponáljuk a túlterhelés és névleges előterhelés különbségéből adódó „különbségi terhelés” hatására előálló bekapcsolási, új hőmérsékletfüggvényt. A számításokat a már ismertetett módon végeztük el és a különbségi terhelésre jellemző veszteségi tényezőket a

$$\Delta A = (n - 1) A$$

és

$$\Delta B = (n^2 - 1) B \quad (26)$$

összefüggések szerint vettük figyelembe.

A számítási eredményeket a 14-8. ábra tartalmazza. Az ábrán feltüntetjük a háromszoros túlterhelés ($n = 3$) esetén, a zárófélperiódusok végén kialakuló p-n átmenet hőmérsékletek ($T_{z,180}$) mért értékeit is, a mért és számított adatok kielégítő egyezésének szemléltetése céljából.

Itt ismét fel kell hívni a figyelmet arra, hogy a 14-7. ábra szerinti belső hőellenállások tranzienseivel számolva és a szuperpozíció előbbiekben leírt módját követve a 14-8. ábra számított hőmérsékletértékeivel megegyező eredményre jutunk, amennyiben a túlterhelési hőmérsékletemelkedés számításánál a különbségi nyitóirányú veszteség lineáris középértékét a

$$\Delta P_{nyK} = \frac{(n - 1) A}{\pi} + \frac{(n^2 - 1) B}{4} \text{ W} \quad (27)$$

képlettel vesszük figyelembe.

Tekintettel arra, hogy a 14-8. ábra kizárólag a névleges előterhelést követő túlterhelések során előálló p-n átmenet melegedésre ad felvilágosítást, a 14-7. ábra szerinti görbék ismeretének fontossága újból kidomborodik. Használatukkal ugyanis,

a (7) és (27) képletek segítségével tetszőleges előterhelést követő túlterhelések melegedési folyamata is gyorsan kiértékelhető.

A 14-8. ábra ismeretében már csak a túlterhelés során megengedhető $T_{ny,max}$ hőmérséklet-határadatait kell előírni és máris meghatározható diódák túlterhelhetőségi karakterisztikája. A 150 SA dióda esetében a $T_{ny,max}|_{I_{jm}}$ megengedhető határhőmérsékletet a túlterhelési periódusok számának függvényében — a kémiai és mechanikai szempontok figyelembevételével és mérési eredményeinkkel összhangban — az alábbi értékpárok adják:

$$\frac{190^{\circ}\text{C}}{1 \text{ periódus}}, \quad \frac{180^{\circ}\text{C}}{10 \text{ periódus}}, \quad \frac{170^{\circ}\text{C}}{100 \text{ periódus}}$$

Ezek után, a $T_{lev}=0^{\circ}\text{C}$ hőmérséklet mellett értelmezett 14-8. ábra segítségével példaképpen kiértékelhető, hogy az általunk alkalmazott hűtési rendszer esetén és a $T_{lev}=35^{\circ}\text{C}$, $T_B=63^{\circ}\text{C}$, $T_{pn}^{\circ}=95,7^{\circ}\text{C}$, $i_{EK}=150 A_K$ összetartozó értékekkel jellemzett állandósult előterhelést követően

$$\frac{600 A_K}{8 \text{ periódus}} \quad \text{ill.} \quad \frac{450 A_K}{62 \text{ periódus}}$$

nagyságú túlterhelés engedhető meg a $0,2^{\circ}\text{C}/\text{W}$ belső hőellenállású 150 SA diódánál.

5. Zárt alakú megoldások

A 14-4. ábra szerinti lineáris RC modellünk a Foster-tétel értelmében átalakítható párhuzamos RC tagok soros kapcsolására úgy, hogy az új RC elektromos hőmodell mind az eredő impedancia, mind pedig az időállandók tekintetében változatlan marad. Az átalakítást az ismert módon [4] elvégezve, az új R és C adatokat, az időállandókat (τ) és a kapcsolást a 14-9. ábrán adjuk meg.

Az átalakítási feltételek teljesülése az ábra adatainak ismeretében nyilvánvaló. A pontos leképezés helyett célszerűbb azonban az alábbi, jó közelítést eredményező képletek alkalmazása az átalakítás során:

$$R_I = \frac{R_1 R_4}{R_1 + R_4}$$

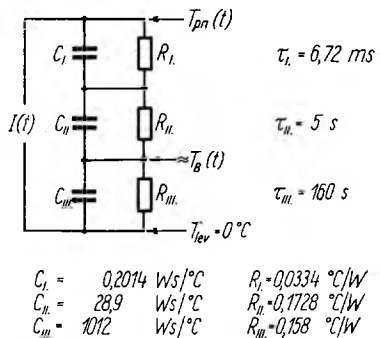
$$C_I = C_1$$

$$R_{II} = \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} - R_1 - R_2$$

$$C_{II} = \frac{C_3 R_3 (R_1 + R_4)}{R_{II} (R_1 + R_3 + R_4)}$$

$$R_{III} = R_2$$

$$C_{III} = C_2$$



(28) 14-9. ábra

A (28) képletcsoporttal tehát egyszerű és általánosítható kapcsolatot teremtünk a 14-4. és 14-9. ábrák szerinti hőmodellek között. Ezzel pedig egyrészt elő-

készítettük a p-n átmenet hőmérsékletének zárt alakú megoldását, másrészt a három különböző időállandójú kört befolyásoló hőellenállások és hőkapacitások hatását érzékelhetővé tettük.

Tekintettel arra, hogy a három kör időállandója és hőkapacitás-értéke nagyságrendben különböző, továbbá a hőellenállások értékei közel azonos nagyságrendűek, az 50 frekvenciás hőáram eredő hatását a szuperpozíció alkalmazásával lehet kiértékelni. Ennek megfelelően meg kell határozni mindhárom párhuzamos RC körre külön-külön a teljes hőáram okozta hőmérsékletfüggvényt, majd ezek szuperpozíciójával képezhető a p-n átmenet eredő hőmérsékletfüggvénye. Természetesen az ilyen megoldás is $T_{lev} = 0^\circ\text{C}$ hőmérséklet mellett érvényes.

A p-n átmenet hőmérsékletének zárt alakú kiértékelése érdekében az alábbiakban foglaljuk össze az egyetlen párhuzamos RC körre és névleges terhelésre érvényes képleteinket.

A hőmérsékletfüggvény a bekapcsolás első nyitóirányú félperiódusában:

$$\begin{aligned}
 T(t)|_I^{ny} &= \frac{A\omega R^2 C e^{-\frac{t}{RC}}}{1 + \omega^2 R^2 C^2} - \\
 &\quad - \frac{A\omega R^2 C}{1 + \omega^2 R^2 C^2} \cos \omega t + \\
 &\quad + \frac{AR}{1 + \omega^2 R^2 C^2} \sin \omega t + \\
 &\quad + \frac{BR}{2} - \\
 &\quad - \frac{2B\omega^2 R^3 C^2 e^{-\frac{t}{RC}}}{1 + 4\omega^2 R^2 C^2} - \\
 &\quad - \frac{BR}{2(1 + 4\omega^2 R^2 C^2)} \cos 2\omega t - \\
 &\quad - \frac{B\omega R^2 C}{1 + 4\omega^2 R^2 C^2} \sin 2\omega t
 \end{aligned} \tag{29}$$

($t=0$ a nyitóirányú félperiódus elején).

A hőmérsékletfüggvény a bekapcsolás első záróirányú félperiódusában:

$$\begin{aligned}
 T(t)|_I^z &= \frac{A\omega R^2 C \left(1 + e^{-\frac{\pi}{\omega RC}}\right)}{1 + \omega^2 R^2 C^2} e^{-\frac{t}{RC}} + \\
 &\quad + \frac{2B\omega^2 R^3 C^2 \left(1 - e^{-\frac{\pi}{\omega RC}}\right)}{1 + 4\omega^2 R^2 C^2} e^{-\frac{t}{RC}}
 \end{aligned} \tag{30}$$

($t=0$ a záróirányú félperiódus elején).

A tranziens hőmérsékletfüggvény pedig:

$$T_{\text{tranz}}(t) = \frac{A\omega R^2 C e^{-\frac{t}{RC}}}{(1 + \omega^2 R^2 C^2) \left(1 - e^{-\frac{\pi}{\omega RC}}\right)} - \frac{2B\omega^2 R^3 C^2 e^{-\frac{t}{RC}}}{(1 + 4\omega^2 R^2 C^2) \left(1 + e^{-\frac{\pi}{\omega RC}}\right)} \quad (31)$$

($t=0$ a bekapcsolás pillanatában).

A (29), (30) és (31) képletek segítségével a periodikus hőmérsékletfüggvényt a már több ízben ismertetett módon kell meghatározni.

Érdekességként még meg kell jegyezni a következőket. Amennyiben a (29) képlet segítségével kiszámoljuk az $R_1 C_1$ körre az első nyitóirányú félperiódus alatti hőmérsékletfüggvényt és eredményünket a (13) képlet adataival összevetjük, megállapítható, hogy a 150 SA dióda esetében a p-n átmenet hőmérsékletfüggvényében szereplő szinuszos és koszinuszos tagokért gyakorlatilag teljes egészében az $R_1 C_1$ kör felelős. Ebből pedig — a (28) képletcsoport és a 14-4. ábra alapján — az következik, hogy állandó belső hőellenállás esetén a dióda túlterhelhetőségét legérzékenyebben az R_4 ellenállással tudjuk befolyásolni. A dióda nagy túlterhelhetőségének biztosítása érdekében célszerű tehát a p-n átmenet és kábelszerkezet közötti hőellenállás minimális értéken tartása. A fentiek alapján az is nyilvánvaló, hogy a kábelszerkezet C_3 hőkapacitása révén döntő szerepet játszik a túlterhelések során a periódusonként fellépő nagyértékű hőtöltések elnyelésében.

6. Összefoglalás

Cikkünk lényegét tekintve elmondhatjuk, hogy a számítási mechanizmus ismeretében túlmenően olyan általános összefüggéseket is nyújtottunk a műszaki olvasógárda részére, melyek segítségével egyszerű és viszonylag gyors módon elvégezhető az adott terhelésű dióda p-n átmenet hőmérsékletének kiértékelése. Ezáltal pedig további gyakorlati kiegészítést adunk a vonatkozó szaktanulmányokhoz [pl. 5 és 6], amelyek döntően a melegedési folyamatok számítógép segítségével történő meghatározásához nyújtottak tudományos alapot.

A 150 SA típusú diódára vonatkozó példaképpeni számítások és a párhuzamosan lefolytatott mérések eredményeinek összehasonlításával igazoltuk a számított eredmények kielégítő pontosságát és egyúttal bebizonyítottuk, hogy a gyakorlati terhelési körülmények mellett a háromidőállandós elektromos hőmodell (mint a lehetséges legkevesebb időállandós közelítés) alkalmazása megfelelő.

Megemlíthető még, hogy a (29), (30) és (31) képletek segítségével meghatározható a dióda határáramának frekvenciafüggése is, ami ugyancsak fontos diódajelmező. Említett összefüggés pl. az 50 Hz alatti frekvenciatartományban a határáram szükséges csökkentésének mértékét adja meg, állandó bázistönk-hőmérséklet és belső hőmérsékletesés mellett. Szinuszos alakú határáram és 180 fokos vezetési szög esetén, háromidőállandós hőmodell alapján a határáram frekvenciafüggése helyesen értékelhető ki képleteinkkel a kb. 400 Hz felső frekvenciahatárig is.

7. Függelék

$$\text{Egy} \quad Z(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} \quad (32)$$

impedanciafüggvénnyel leírható lineáris, koncentrált paraméterű RC -hálózat kapcsain fellépő feszültség Laplace-transzformáltja

$$U(p) = Z(p)I(p) \quad (33)$$

alakban írható fel.

Az $I(p)$ kifejezés a befolyó áram Laplace-transzformáltja, melyet a transzformáció műveleti szabályai segítségével számítunk ki. Először előállítjuk a (9) időfüggvény első periódusát ($n=1$ esetén) a szinusz- és koszinuszfüggvények transzformáltjaival és az eltolási tétel alkalmazásával. Végeredményben:

$$I_{\text{per}}(p) = \frac{\omega A \left(1 + e^{-p \frac{\pi}{\omega}}\right)}{p^2 + \omega^2} + \frac{2\omega^2 B \left(1 - e^{-p \frac{\pi}{\omega}}\right)}{p(p^2 + 4\omega^2)}. \quad (34)$$

Ez a függvény az első félperiódus után azonosan nullává válik. A (9) időfüggvény transzformáltja ($n=1$ esetén) tehát

$$I(p) = I_{\text{per}}(p) \left(1 + e^{-p \frac{2\pi}{\omega}} + e^{-2p \frac{2\pi}{\omega}} + \dots\right) \quad (35)$$

alakban, a periodikussá tétel segítségével nyerhető. A (35) összefüggés jobb oldala $\text{Re } p > 0$ esetén biztosan konvergens és zárt alakba írható:

$$I(p) = I_{\text{per}}(p) \frac{1}{1 - e^{-p \frac{2\pi}{\omega}}}. \quad (36)$$

A kapcsolokon fellépő feszültséget az

$$U(t) = \mathcal{L}^{-1}\{Z(p)I(p)\} \quad (37)$$

inverz Laplace-transzformáció szolgáltatja. Mint ismeretes, egy racionális törtfüggvényt egyszeres pólusok esetén az ún. kifejtési tétellel lehet visszatranszformálni. Ennek megfelelően:

$$\mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{C(p)}{D(p)} \right\} = \sum_{i=1}^n \frac{C(p_i)}{D'(p_i)} e^{p_i t}, \quad (38)$$

ahol p_i a nevező gyökeit jelenti.

A (36) kifejezés nevezőjében azonban az $1 - e^{-p \frac{2\pi}{\omega}}$ periodicitást okozó operátornak végtelen, a $j\omega$ tengelyen periodikusan elhelyezkedő gyöke van. Így a (38) formulát alkalmazva, a feszültséget végtelen Fourier-sor alakjában kapnánk. Ez a direkt módszer alkalmazása azonban kényelmetlen és céljainknak nem felel meg.

Az $U(t)$ függvényt zárt alakban az alábbi, ismert [7] szellemes módszer segítségével kaphatjuk.

A keresett feszültség — periodikus gerjesztés esetén — nyilván egy periodikus (stacioner) és egy aperiodikus (tranzien) komponensből áll. Laplace-tartományban tehát:

$$U(p) = U_{\text{stac}}(p) + \frac{Q(p)}{X(p)}, \quad (39)$$

ahol

$$U_{\text{stac}}(p) = \frac{U_{\text{per}}(p)}{1 - e^{-p \frac{2\pi}{\omega}}}.$$

Lényeges megjegyezni, hogy az $U_{\text{per}}(t)$ időfüggvény $t > 2\pi/\omega$ esetén nullává válik, mert csak így lehet a periodicitást okozó operátort alkalmazni. A (39) összefüggés jobb oldalának második tagja értelemszerűen egy végtelenben eltűnő időfüggvény transzformáltja. Ezért a számlálóját a nevezőnél alacsonyabb fokú és a tranziensek elméletéből következik, hogy a nevezője az RC -hálózat impedanciafüggvényének nevezőjével megegyező.

Helyettesítsük a (32) és (36) eredményeket a (33) összefüggésbe és tegyük egyenlővé (39) egyenlettel. Ekkor írható, hogy:

$$\frac{I_{\text{per}}(p)Y(p)}{\left(1 - e^{-p \frac{2\pi}{\omega}}\right)X(p)} = \frac{U_{\text{per}}(p)}{1 - e^{-p \frac{2\pi}{\omega}}} + \frac{Q(p)}{X(p)}. \quad (40)$$

Kifejezve $U_{\text{per}}(p)$ értékét:

$$U_{\text{per}}(p) = \frac{Y(p)I_{\text{per}}(p)}{X(p)} - \frac{Q(p)\left(1 - e^{-p \frac{2\pi}{\omega}}\right)}{X(p)} \quad (41)$$

A (41) összefüggésben ismeretlenek a $Q(p)$ és $U_{\text{per}}(p)$ függvények. Tudjuk azonban, hogy $U_{\text{per}}(t)$ időfüggvény $t > 2\pi/\omega$ tartományban nullává válik. Ebből a feltételből pedig a $Q(p)$ együtthatói meghatározhatók. Így $t > 2\pi/\omega$ esetén írható:

$$U_{\text{per}}(t) = 0 = \sum_{i=1}^n \frac{Y(p_i)I_{\text{per}}(p_i) - Q(p_i)\left(1 - e^{-p_i \frac{2\pi}{\omega}}\right)}{X'(p_i)} e^{p_i t}, \quad (42)$$

ahol p_i csupán az $X(p)$ gyökeit jelenti. Az $I_{\text{per}}(p)$ nevezőjének gyökeinél ugyanis az $I_{\text{per}}(p)$ számlálójának nullának kell lenni, mert különben nem teljesülne a $t > 2\pi/\omega$ esetén az $I_{\text{per}}(t) = 0$ feltétel.

Transzformáljuk vissza a $0 < t < 2\pi/\omega$ tartományban a (41) egyenletet. Az eredmény:

$$U_{\text{per}}(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{Y(p)I_{\text{per}}(p)}{X(p)} \right\} - \sum_{i=1}^n \frac{Q(p_i)}{X'(p_i)} e^{p_i t}. \quad (43)$$

A $Q(p_i)$ értékeket a (42) egyenletből számítva:

$$Q(p_i) = \frac{Y(p_i)I_{\text{per}}(p_i)}{1 - e^{-p_i \frac{2\pi}{\omega}}}. \quad (44)$$

Ezt behelyettesítve (43)-ba kapjuk az állandósult állapotot leíró feszültségfüggvény [$U_{\text{stac}}(t)$] első periódusát:

$$U_{\text{per}}(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{Y(p)I_{\text{per}}(p)}{X(p)} \right\} - \sum_{i=1}^n \frac{Y(p_i)I_{\text{per}}(p_i)}{\left(1 - e^{-p_i \frac{2\pi}{\omega}}\right)X'(p_i)} e^{p_i t}. \quad (45)$$

A (45) kifejezés második tagjában csak $X(p)$ gyökei szerint kell összegezni, míg az első tagnál $I_{\text{per}}(p)$ pólusait is figyelembe kell venni, hiszen $t < 2\pi/\omega$ tartományban vagyunk.

Végeredményben a teljes feszültség két komponensből adódik:

$$U(t) = U_{\text{stac}}(t) + U_{\text{tranz}}(t), \quad (46)$$

ahol $U_{\text{stac}}(t)$ első periódusát a (45) egyenlet adja, a tranziens feszültség pedig az alábbi összefüggésből számítható:

$$U_{\text{tranz}}(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{Q(p)}{X(p)} \right\} = \sum_{i=1}^n \frac{Y(p_i) I_{\text{per}}(p_i)}{\left(1 - e^{-p_i \frac{2\pi}{\omega}} \right) X'(p_i)} e^{p_i t}. \quad (47)$$

Irodalom

- [1] *Salánki T.*: Néhány megjegyzés nagyfelületű p-n átmenetek előállításával kapcsolatban. *Elektrotechnika* **57**. (1964) 234—240. old.
- [2] *Dr. Lukács J.*: Hővillamos generátorok — félvezető anyagokból. *Elektrotechnika* **50**. (1957) 121—130. old.
- [3] *J. N. Shive*: A félvezetők fizikája. Műszaki Könyvkiadó Budapest, 1963.
- [4] *Géher K.*: Lineáris hálózatok I. rész. Tankönyvkiadó Budapest, 1965.
- [5] *E. C. Bell—D. A. German—G. W. Parkinson*: The Periodic Variation of Junction Temperature in a Transistor. The Institution of Electrical Engineers Paper No. 3988 M (1962) p. 497—503.
- [6] *J. Dolezal—A. Kloss—O. Lacina*: Metoda pocetni kontroly otepleni kremikovyh ventilu namáhaných zkratovými proudy při použití cislicového samocinného pocitace. *Elektrotechn. Obz.* **53**. (1964) p. 78—82.
- [7] *Dr. Fodor Gy.*: A Laplace-transzformáció műszaki alkalmazása. Műszaki Könyvkiadó Budapest, 1966.

15.

Erősáramú vezérelt diódák konstrukciós és technológiai problémái

SALÁNKI TIBOR

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk ismerteti azokat a konstrukciós és technológiai problémákat, melyek alapulvételével fejlesztették ki a VKI Félvezető Laboratóriumában az SNV 50 típusú vezérelt diódák technológiáját.

A cikk első részében összefoglalja a vezérelt diódák jelleggörbe-szakaszait leíró egyenleteket, majd ezek felhasználásával olyan összefüggéseket közöl, melyek segítségével a különböző technológiai problémák tárgyalhatóvá válnak. Részletesen tárgyalja a zárófeszültséget, a billenőfeszültséget és az áramerősítési tényezőket befolyásoló jelenségeket, majd a vezérlő áramkör kialakításával kapcsolatos kérdéseket. Ismerteti a gallium diffúziója, továbbá 1% Sb tartalmú aranyfólia ötvözései révén előállított p-n-p-n átmenetek technológiai és konstrukciós problémáit. Végül értékeli az e téren elvégzett munkát.

КОНСТРУКЦИОННЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЯЕМЫХ СИЛЬНОТОЧНЫХ ДИОДОВ

Т. Шаланки

Резюме

В статье описываются такие конструкционные и технологические проблемы на основании которых в Лаборатории Полупроводники Исследовательского Института Электротехнической Промышленности была развита технология управляемых диодов типа SNV 50.

В первой части статьи обобщаются уравнения выражающие отдельные отрезки кривых управляемых диодов и затем с использованием их приводятся такие зависимости, с помощью которых становятся трактуемыми различные технологические проблемы. Подробно рассматриваются явления влияющие на обратное напряжение, напряжение опрокидывания и факторы усиления тока и затем вопросы, связанные с осуществлением управляющей цепи. Излагаются технологические и конструкционные проблемы диффузии галлия и p—n—p—n переходов, полученных посредством легирования фольги золота с содержанием 1% Sb. Наконец производится оценка проведенной в этой области работы и их результатов.

PROBLEME DER KONSTRUKTION UND TECHNOLOGIE BEI GESTEUERTEN STARKSTROM-DIODEN

T. Salánki

Zusammenfassung

In der Arbeit werden die Probleme der Konstruktion und Technologie beschrieben, unter deren Zugrundelegung im Halbleiter-Laboratorium des Forschungsinstitutes der Elektroindustrie die Technologie der gesteuerten Dioden vom Typ SNV 50 ausgearbeitet wurde.

Im ersten Teil der Arbeit sind die Gleichungen der Kennlinien-Abschnitte der Dioden zusammengefasst. Dann werden unter Verwendung derselben Zusammenhänge mitgeteilt, mit deren Hilfe die verschiedenen technologischen Probleme behandelt werden können. Anschliessend werden Erscheinungen, die einen Einfluss auf die Sperrspannung, die Kippspannung und die Stromverstärkungsfaktoren ausüben, und die mit der Gestaltung des Steuerstromkreises verbundenen Fragen ausführlich behandelt. Dann werden Probleme der Technologie und Konstruktion von durch die Diffusion von Gallium, weiterhin durch Legierungen von Goldfolien mit 1% Sb-Gehalt hergestellten p-n-p-n Übergängen behandelt. Schliesslich werden die auf diesem Gebiet verrichtete Arbeit bzw. deren Ergebnisse eingeschätzt.

DESIGN AND TECHNOLOGICAL PROBLEMS OF POWER CURRENT CONTROLLED DIODES

T. Salánki

Summary

In this paper there are described the design and technological problems which served as bases for the development of the manufacturing technology of the controlled diodes type SNV 50 in the Semiconductor Laboratory of the Research Institute of the Electrical Industry.

In Part I, there is given a summary of the equations representing the sections of the characteristics of the controlled diodes and by making use of these equations, relations are derived which enable the discussion of the various technological problems. The phenomena influencing the reverse voltage, the triggering voltage and the current amplification factors and eventually the questions connected with the design of the control circuit are dealt with in detail. The problems arising during the design and production technology of the p-n-p-n junctions made by gallium diffusion and alloying of 1 per cent Sb content gold foils are expounded. Eventually the work, resp. the result of the work carried out in this sphere is evaluated.

A vezérelt dióda az egyik legkorszerűbb félvezető elem. Jelen cikkben azokat a konstrukciós szempontokat kívánjuk összefoglalni, melyek figyelembevételével alakítottuk ki a VKI Félvezető Laboratóriumában a vezérelt diódák technológiáját. A cikk első részében a vezérelt diódák működését leíró egyenleteket ismertetjük, majd a második részben az egyenletekhez kapcsolódó konstrukciós és technológiai problémákat tárgyaljuk.

1. Általános rész

A négyrétegű diódák és vezérelt diódák működésének leírásával kapcsolatban számos cikk jelent meg [1, 2, 3]. Ezen elemek karakterisztikáinak szakaszait leíró egyenleteket többnyire azonos alapokból kiindulva határozták meg. A vezérelt diódák teljes karakterisztikáját a 15-1. ábra, míg elvi felépítésüket a 15-2a ábra mutatja.

A 15-2a ábra szerinti p-n-p-n négyrétegű átmenetet a karakterisztikaszakaszokat leíró egyenletek meghatározása céljából a 15-2b ábra szerinti két tranzisztorral szokás helyettesíteni. Az ábrán az egyes tranzisztorokat I, ill. 2 számjegy jelöli; a későbbiek során az egyes betűjelzések mellé írt számindex alapján az azonosítás könnyen elvégezhető.

Amint a 15-1. ábrából látható, a vezérelt dióda karakterisztikája négy szakaszra bontható: *I*: záróirányú zárószakasz, *II*: nyitóirányú zárószakasz, *III*: negatív ellenállású szakasz, vagy nyitási szakasz, *IV*: nyitóirányú, vagy áteresztő szakasz.

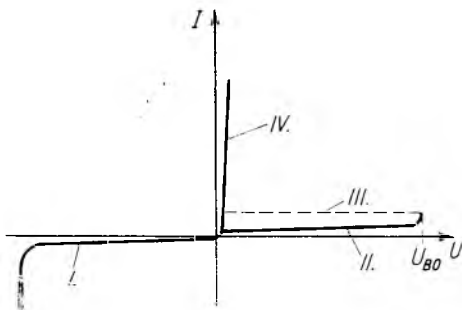
A zárótartományban (I) a feszültség—áram összefüggést gyakorlatilag az 1-1 átmenet jellege határozza meg. A 2-2 átmenet, mint zárórég, technológiai okok miatt nem jön számításba, így az áram értéke:

$$I_I = I_{011} \left(e^{\frac{qU_z}{kT}} - 1 \right);$$

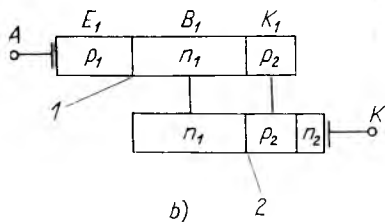
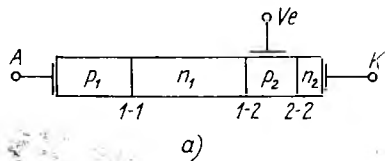
a 0 index $I_g = 0$ esetére utal a későbbiek során is. I_{011} az 1-1 átmenet telítési árama, értéke:

$$I_{011} = \left[\frac{D_p N_{n1}}{L_{p1}} + \frac{D_n N_{p1}}{L_{n1}} \right] q,$$

ahol D_n és D_p a töltéshordozók diffúziós állandói; N_{p1} és N_{n1} a többségi töltéshordozók koncentrációja a p_1 illetve n_1 zónában; végül L_{n1} és L_{p1} a kisebbségi töltéshordozók szabad úthossza a p_1 illetve n_1 zónában. A konstrukciós szempontból elérendő feladat: kis visszáram mellett nagy zárófeszültség.



15-1. ábra. Vezérelt dióda nyitó- és zárókarakterisztikája



15-2. ábra. p-n-p-n átmenet elvi elrendezése

A nyitóirányú zárószakasz működés közben addig a pillanatig érvényesül, amíg a vezérlő impulzus hatására át nem billen az áteresztő szakaszba. A visszáram alacsony értéken való tartásának nincs különösebb szerepe, e karakterisztika fő jellemzője az U_{B0} billenőfeszültség (lásd később). A nyitóirányú zárószakasz (II), az alábbi egyenlettel jellemezhető:

$$I_{II} = A I_g + B I_{012},$$

ahol I_{012} jelenti az 1-2. átmenet telítési áramát, I_g pedig a vezérlőáram értékét.

A negatív ellenállású szakasz (III) valójában a nyitási tartománynak felel meg. A nyitási jelenség a következő egyenlettel írható le:

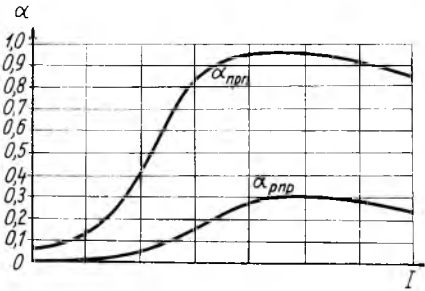
$$I = \frac{\alpha_2 M_n I_g + I_{012} K}{1 - (\alpha_1 M_p + \alpha_2 M_n)}, \quad (1)$$

ahol M_p és M_n a multiplikációs faktorok (lásd később) és α_1 , α_2 a két tranzisztor földelt bázisú áramerősítési tényezője.

A tényleges nyitás akkor következik be, amikor $(\alpha_1 M_p + \alpha_2 M_n)$ értéke megközelíti az egységet. Abban az esetben, ha az 1-2. átmenetre kapcsolt zárófeszültség értéke jóval kisebb, mint az átmenet lavina-feszültsége $M = 1$, így írható, hogy

$$I = \frac{\alpha_2 I_g + I_{012} K}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

Ebben az esetben a nyitás feltétele: $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$. A nyitás mindkét esetben az áramerősítési tényezők növekedése révén következik be. Az áramerősítési tényezők az emitteráram növekedésével nőnek. Különösen rohamos ez a növekedés az n-p-n tranzistor áramerősítési tényezője (α_2) esetén, mint ahogy az a 15-3. ábrán látható. Az I_g vezérlőáram hatása az α_2 növelésében jelentkezik.



15-3. ábra. Áramerősítési tényezők áramfüggése

A vezérelt diódák nyitása az előzőktől eltérően a négyrétegű diódák nyitásával analóg módon is bekövetkezik. Ebben az esetben az 1-2. átmenet feszültsége megközelíti az átmenet lavina-feszültségét, az M multiplációs tényezők egynél nagyobb értéket érnek el, a kiűritett zónában létrejön a töltéshordozó sokszorosodása, azaz megnő az átmenet árama és így az α_2 is, mely folyamat az át-

menet nyitásához vezet. A fenti jelenségek összessége határozza meg a konstrukcióra jellemző U_{B0} , azaz $I_g = 0$ esetén jelentkező billenőfeszültség értékét.

A vezérelt diódák esetén éppen a vezérelhetőség miatt arra törekszünk, hogy U_{B0} értéke minél nagyobb legyen.

Végül meg kell jegyezni, hogy gyújtóáram esetén is felléphet töltés-sokszorozódás abban az esetben, ha az átmenetre kapcsolt zárófeszültség értéke nagy, és ugyanakkor a gyújtóimpulzus fázisban elég nagy értékkel el van tolva. Ilyenkor a két folyamat erősíti egymást.

A nyitóirányú áteresztő szakasz (IV) jellemző paramétere a nyitóirányú feszültségesés, amely az alábbi egyenlettel írható le:

$$U_{ny} \approx \frac{q}{KT} \left(\ln \frac{I}{I_{012}} + \ln \frac{2}{\beta_1} \right),$$

ahol β_1 a p-n-p tranzistor transzportfaktora, gyakorlati értéke 0,5 körüli.

2. Konstrukciós és technológiai problémák

A konstrukciós és technológiai problémákat az előzőekben ismertetett egyenletek szemszögéből tárgyaljuk. Kizárólag a legfőbb paramétereket vizsgáljuk, melyek a következők: záróirányú zárófeszültség, billenőfeszültség, áramerősítési tényezők (nyitási mechanizmus), vezérlő áramkör jellemzői, nyitóirányú feszültségesés, belső hőellenállás.

Az erősáramú vezérelt diódák előállítási technológiai két csoportba sorolhatók: a) tisztán diffúziós eljárás, b) diffúziós és ötvözeses eljárás. Ez utóbbinál a negyedik,

katód-átmenetet ötvözéssel hozzák létre. Tárgyalásunk alapját a diffúziós és ötvözéses technológia képezi abban a változatban, hogy n-típusú alapanyagban (n_1 réteg) gallium diffúziója révén hozzuk létre a p_1 és p_2 réteget, majd antimóntartalmú aranyfólia ötvözésével az n_2 réteget.

2.1 Zárófeszültség—billenőfeszültség

Az elméletileg elérhető maximális zárófeszültség-értéket az alapanyag fizikai jellemzői és a diffúziós réteg tulajdonságai szabják meg. Az általában alkalmazott diffúziós eljárásnál a diffúzió forrása, azaz a felületi koncentráció állandó, így a diffúzió mechanizmusát az alábbi egyenlet írja le [4]:

$$\frac{N_p(x)}{N_p(0)} = \operatorname{erf}(x\sqrt{Dt}). \quad (3)$$

A diffúzió utáni koncentráció-eloszlást — a lemezre merőleges tengelyen mérve — a 15-4. ábra mutatja. Az ábrán levő jelölések értelme:

$N_p(0)$ a „p” típusú diffúziós réteg felületi koncentrációja;

$N_n(0)$ az „n” típusú alapanyag donor koncentrációja;

x_0 az alaplemez vastagsága.

Az ábra alapján látható, hogy a p-n átmenet helye ott alakul ki, ahol $N_n(0) = N_p(x)$. (Közelítésként feltételeztük, hogy $\mu_n \approx \mu_p$.) A zárófeszültség maximális értékét az átmenetre kapcsolt feszültség (U_a) és a kiürített zóna szélessége (W) közötti függvénykapcsolat határozza meg. Ezt a függvényt a Poisson-egyenlet és a semlegességi feltétel felhasználásával határozhatjuk meg. A kiürített rétegre felírt Poisson-egyenlet:

$$\frac{d^2 U}{dx^2} = \frac{qN(x)}{\varepsilon},$$

ahol $N(x)$ a töltéshordozók koncentrációja x mentén, ε a szilícium dielektromos állandója. A (3) egyenlet alapján közelítő megoldásként [5] a koncentráció-eloszlást a növekvő koncentráció irányába felírva az alábbi egyenletet kapjuk:

$$N(x) = N_n(0)e^{\frac{x^2}{4Dt}}$$

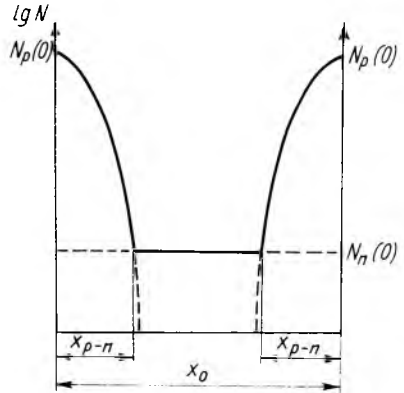
Bevezetve az

$$a = \frac{1}{4Dt}$$

helyettesítést, valamint az e^{ax^2} függvényt Taylor-sorba fejtvé és a magasabbrendű tagokat elhanyagolva, a differenciálegyenlet megoldása az

$$x = d_n; \quad \frac{dU}{dx} = 0;$$

$$x = d_n; \quad U = 0$$



15-4. ábra. p-n-p átmenet koncentráció-eloszlása

határfeltételek esetén:

$$U_A \approx \left[\frac{1}{2} x^2 - \left(d_n + a \frac{1}{3} d_n^3 \right) x + \frac{1}{2} d_n \right] \frac{q N_n(0)}{\varepsilon}, \quad (4)$$

ahol d_n és majd a későbbiek során alkalmazott d_p az n-, illetve p-rétegre eső kiürített zónarész szélessége (lásd 15-5. ábra). A (4) képletbe $x = d_n$, illetve $x = d_p$ helyettesítésekkel az U_n és U_p feszültségek, illetve azok összegezésével az U_D könnyen meghatározható. Felhasználva az alábbi összefüggéseket:

$$w \approx \frac{a}{3} d_p^3,$$

$$U_{Amax} = E_{max} d_n,$$

ahol w a kiürített réteg teljes szélessége (meghatározása a semlegességi feltétel alapján történt).

Az átmenet maximális feszültségére a következő közelítő képletet nyerjük:

$$U_{Amax} = \frac{qN(0)}{\varepsilon} \left[\left(\frac{\varepsilon E}{qN_n(0)} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{3E\varepsilon}{qN_n(0)a} \right)^{\frac{1}{3}} \right].$$

Az alábbi fizikai állandókat behelyettesítve a technológia kialakításához felhasználható képlet adódik.

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$\mu_n = 1400 \text{ cm}^2/\text{V s}$$

$$\varepsilon = 1,04 \cdot 10^{-12} \text{ A s/Vm}$$

$$E = 10^5 \text{ V/cm}$$

$$D_{\text{GaII}} = 6 \cdot 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s} \quad (T = 1250 \text{ }^\circ\text{C-on}).$$

$$U_{Amax} = 14 \varrho + 0,16 \varrho^{-1/3} t^{2/3},$$

illetve

$$U_{Amax} = A \varrho + B \varrho^{-1/3} t^{2/3},$$

ahol A független a diffúzió hőmérsékletétől, és így a diffúziós állandótól, míg

$$B = 4,91 D^{2/3}.$$

Példaként megemlítve $t = 50 \text{ h}$, $T = 1250 \text{ }^\circ\text{C}$ és $\varrho = 160 \text{ } \Omega \text{ cm}$ esetén

$$U_{Amax} = 2442 \text{ V}.$$

Az elérhető maximális zárófeszültség tehát (az alapanyag fajlagos ellenállását rögzítve) a választott diffúzióhoz — a diffúziós állandó következtében — a hőmérséklettől és az időtől függ. Az így meghatározott érték azonban csak elméletinek tekinthető, azt nagymértékben befolyásolják az átmenet határvonalának felületi viszonyai és kisebb mértékben az anyag belsejében levő inhomogenitások, miután diffúziós átmenet esetén — a hosszú diffúziós idő következtében — az átmenet határrétege közel síknak tekinthető.

A fenti záróréteg-érték a p-n-p átmenet mindkét irányára természetesen érvényes.

Az 1. pont alapján nyilvánvaló, hogy vezérelt diódák esetén az átmenet billenőfeszültsége minél nagyobb értékű kell, hogy legyen. Általában mondható, hogy a billenőfeszültség értéke határozza meg a vezérelt diódák záróirányú igénybevehetőségét. Mint az 1. pontban említettük, a billenőfeszültségnél a négyrétegű átmenet a szekunder emisszió hatására előálló áramnövekedés következtében nyit ki. A szekunder emisszió mérőszáma az ún. multiplifikációs faktor (M), melynek értéke:

$$M = \frac{1}{1 - \left[\frac{U_z}{U_L} \right]^v},$$

ahol U_z az átmenetre kapcsolt zárófeszültség, U_L az átmenet lavina-feszültsége, jelen esetben az előzőkben kiszámított maximális elméleti zárófeszültség. v értéke lineáris átmenet esetén 4, mellyel jelen esetben is jó közelítést érünk el. Látható, hogy ha az U_z/U_L viszony 0,5-nél kisebb, úgy M értéke közelítőleg 1. Ez azt jelenti, hogy a lehetőséghez mérten minél nagyobb fajlagos ellenállású alapkristályból kell kiindulni, ugyanakkor nagymélységű diffúziós réteget kell előállítani, hogy az átmenet lavina-feszültsége nagy legyen és M értéke 1-hez közeledjen, vagyis a vezérelhetőség kerüljön előtérbe. Mint látni fogjuk, a nyitóirányú feszültségesés ellenkező követelményeket kíván.

2.2 Áramerősítési tényezők

Az általános részben elmondottak szerint a vezérelt dióda nyitása $M(\alpha_1 + \alpha_2) = 1$ esetén következik be, illetőleg $M = 1$ esetén akkor, ha $(\alpha_1 + \alpha_2) = 1$. Így meg kell vizsgálnunk, hogy az α értékek hogyan befolyásolhatók a technológia során. A földelt bázisú áramerősítési tényező az alábbiak szerint fejezhető ki:

$$\alpha = \beta \gamma \delta,$$

ahol β a transzportfaktor, γ az emitterhatásfok, δ a kollektorhatásfok.

Az egyes tényezők az alábbi kifejezések alapján határozhatók meg n-p-n tranzisztor esetén [6]:

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{q_n W}{q_p L_p}},$$

ahol q_n az emitter fajlagos ellenállása, q_p a bázis fajlagos ellenállása, W a bázis szélessége, L_p a lyukak szabad úthossza az emitterben;

$$\gamma = 1 - \frac{W^2}{2L_n^2},$$

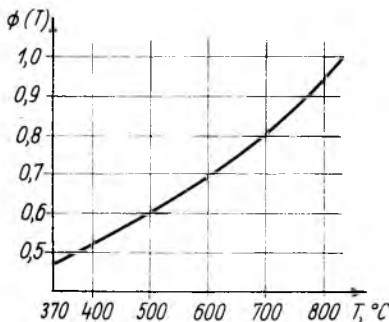
ahol L_n az elektronok szabad úthossza a bázisban.

$$\delta = 1 + \frac{p_c \mu_p}{2n_c \mu_n},$$

ahol p_c a kollektor lyukkonzentrációja, n_c a kollektor elektronkonzentrációja.

ahol a V_{Au} az aranyfólia vastagsága, $\Phi(T)$ függvény a Si-Au állapotábra alapján számítható (15-8. ábra). Az előzőekben ismertetett egyenletek alapján a fajlagos ellenállások értéke, illetve a szennyezéskonzentrációk, valamint az egyes rétegek vastagsága számítható, technológiai adatokkal behatárolható.

Technológiailag megvalósítható adatokat alapul véve δ_1 és δ_2 egynek vehető, miután a kifejezés második tagja mindkét esetben elhanyagolható. A γ és β tényezők számításakor nyitott kérdés marad az egyes rétegekre jellemző kisebbségi töltéshordozók diffúziós szabad úthossza. Ez az az adat, amit számítani nem lehet, csak kísérleti úton lehet beállítani. Általában mondható, hogy a különböző félvezető elemek technológiai kialakítása során az L értékek bizonytalanok, ugyanakkor jelentős szerepük van a különböző paraméterekre vonatkozó gyártási szórásokban. Jelen esetben kizárólag a kiindulási alapanyag L_{n1} értékét ismerjük exaktul, azonban a különböző technológiai lépések során ez az érték jelentős mértékben csökken. Valójában csak a kész átmenet alapján tudjuk az egyes rétegek effektív L értékét meghatározni, majd ennek ismeretében a technológiát módosítani.

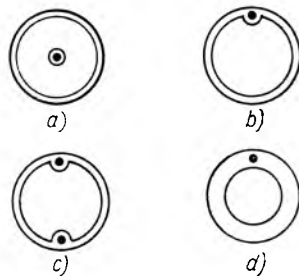


15-8. ábra. Szilícium—arany olvadákonysági görbe

2.3 A vezérlő áramkör kialakítása

Az előző ponthoz szorosan kapcsolódó kérdés a vezérlő elektród és a katód kialakításának a problémája. E vonatkozásban két lehetséges megoldás van. Az egyik esetben a vezérlő elektród és a katód koncentrikusan helyezkedik el, a másik esetben a vezérlő elektród — vagy elektródok — a katód szélén van. (15-9. ábra.)

A vezérlő elektród elhelyezése nagyban befolyásolja a töltéshordozók szétterjedési idejét és ezen keresztül a dU/dt nyitóirányú feszültségmeredekséget. Az átmenet nyitása a kezdeti időpontban a vezérlő elektród környezetében következik be, majd ezt követően szétterjed az egész katódfelületre. Technikai szempontból igen lényeges a teljes koncentrikusság biztosítása, ugyanis ha a vezérlő elektród valamely irányba kissé eltolódik, akkor egy kezdeti „vezetőcsatorna” alakul ki ott, ahol a vezérlőelektród a katódhoz legközelebb van, mely jelenség helyi felmelegedéshez, esetleg az eszköz tönkremeneteléhez vezethet. E tekintetben a *d)* megoldás a legrosszabb.



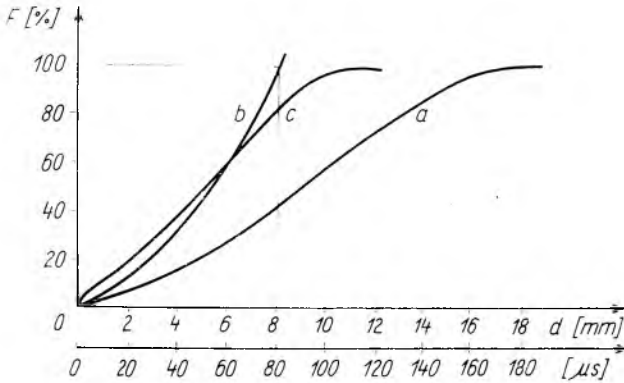
15-9. ábra. Vezérlő elektród elhelyezésének módjai

Irodalmi adat szerint [7] a szétterjedés sebessége $0,1 \text{ mm}/\mu\text{s}$ -nek vehető. Ezen adatot alapul véve a 15-10. ábra mutatja a különböző vezérlőelektród-elhelyezésekre vonatkozó „bekapcsolható” felületeket, illetve a felületeket definiáló átmérőket.

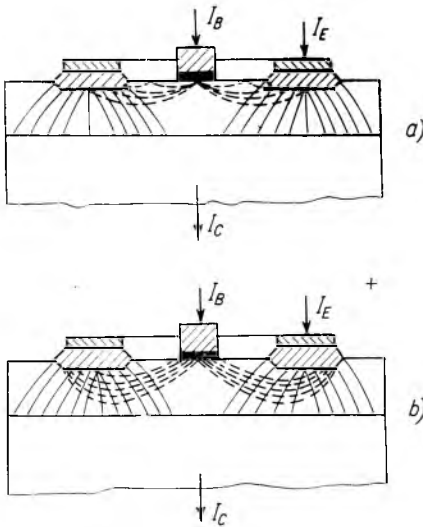
Lényeges tényező a vezérlő elektród és a katód közötti távolság, illetve e távolság függvényében W_2 értéke. E viszonyokat a 15-11. ábra mutatja.

A 15-11a ábrán látható a vezérlő áram áramfonal-eloszlása, függetlenül az anód-, katódfeszültségtől, valamint az áteresztő tartományban folyó anód- és katód-

áramfonal-eloszlástól. A 15-11b ábra az anód—katód-feszültségnek a vezérlő áram eloszlására gyakorolt hatását mutatja. Látható hogy az elektromos tér hatására az áramvonalak megnyúlnak, közel kerülnek az 1-2 átmenethez, így β_2 értéke nő, azaz kisebb vezérlő áram esetén is kinyit az átmenet. Hasonló hatása van a vezérlő elektród és katód közötti távolságnak is, ugyanis e távolság csökkenése esetén az áramfonalak közelebb kerülnek az 1-2 átmenethez.



15-10. ábra. Különböző vezérlőelektród-elhelyezésekre vonatkozó töltéshordozó-szétterjedés a felület %-ában kifejezve



15-11. ábra. Áramfonal-eloszlás a vezérlő elektród és a katód környezetében

Lényeges szerep jut a p_2 rétegben levő τ_n értéknek az elektronok terjedése szempontjából, mind vízszintes, mind függőleges irányban. Ezek a megállapítások kísérleti eredményekre támaszkodnak, mely kísérletek még nem nyertek befejezést.

2.4 Nyitóirányú feszültségesés és belső hőellenállás

Az általános részben tárgyaltak szerint a vezérelt dióda nyitóirányú feszültségesése (U_{ny}) lényegileg a p_2-n_1 „dióda” nyitóirányú feszültségesésével egyezik meg. U_{ny} értékét technológiai szempontból az n_1 réteg vastagságával (W_1), annak fajlagos ellenállásával, továbbá az n_1 rétegre jellemző τ_{pn1} értékével lehet befolyásolni. U_{ny} értéke annál kisebb, minél kisebb az n_1 réteg fajlagos ellenállása, és minél kisebb e réteg vastagsága, illetve minél nagyobb a τ_{pn1} értéke. Ezen feltételek önmagukban is kompromisszumot kívánnak, mely kompromisszumot azonban ki kell terjeszteni az előzőekben tárgyalt U_z , α_1 , α_2 esetére is.

A belső hőellenállás az alábbi képlettel fejezhető ki:

$$R_{th} = \frac{T_{pn} - T_b}{P},$$

ahol T_{pn} a záróréteg maximális üzemi hőmérséklete,

T_b a bázistönk maximális üzemi hőmérséklete,

P a dióda diszipált teljesítménye névleges áram esetén.

A számláló a záróréteg és a bázistönk közötti rétegek hővezetőképességétől függ, amelyben a forrasztások is jelentős szerepet játszanak. A nevezőt döntő mértékben a p_2-n_1 „dióda” nyitóirányú feszültségesése befolyásolja. A vezérelt dióda maximális T_{pn} hőmérsékletét az U_{B0} hőmérsékletfüggése határozza meg. Az U_{B0} letörése általában 100...120 °C-on következik be, így adott diszipált teljesítmény és belső hőellenállás esetén a bázistönk maximális hőmérséklete kiszámítható.

Összefoglalva elmondható, hogy egy vezéreltdióda-típus konstrukciójának, illetve annak megvalósításához szükséges technológiának kialakításához kompromisszumok szükségesek. Különösen igaz ez a megállapítás, ha meggondoljuk, hogy a tárgyalt paramétereken kívül továbbiakat is figyelembe kell vennünk, pl. túláramterhelhetőség, túlfeszültség-terhelhetőség, kiürülési idő, záróréteg-kapacitás stb. Kísérleteink és eredményeink alapján azt a tanulságot vontuk le, hogy bár a közölt egyenletek jól alkalmazhatók a konstrukció tervezésekor, a végleges technológia kialakítása mégis nagyszámú kísérletet igényel.

Irodalomjegyzék

- [1] Mackintosh, I. M.: The electrical characteristics of Silicon PNP triodes. Proc. Pre. Vol. 46 (1958) p. 1229.
- [2] Alderich, R. W.—Holonyak, N.: Multi terminal PNP switches. Proc. IRE. 46 (1958) p. 1236.
- [3] Sassier, M.: Structures PNP et thyatron solide an Silicium. L'ONDE ÉLECTRIQUE 41 (1961) p. 239—246.
- [4] Dr. Szép. I.: Rétegt tranzisztorok gyártásának fizikai, kémiai problémái. Mérnöki Továbbképző Intézet Budapest, 1956.
- [5] Jost, W.: Diffusion in solids, liquids and gases.
- [6] Hunter, L. P. et al.: Handbook of Semiconductor Electronics (1956) New-York Mc Graw-Hill.
- [7] Karl-Heinz Ginsbach—Beleche-Möhne: Die steuerbare Siliziumzelle Elektrotechnik und Maschinenbau 82 (1965) p. 451—457.

16.

Termovillamos mechanizmus

JARÁCS GYÖRGY

ÖSSZEFOGLALÁS

Termovillamos fémek termovillamos feszültségének és hővezetőképességének stationárius állapotát energiátranzportálási mechanizmus-modellekkel lehet megközelítőleg leírni. A mechanizmusok az elektronok és fononok kinetikus és potenciális energiáinak, valamint momentumainak szuperponálásával, a kölcsönhatások fokozatos, korrekciós figyelembevételével építhetők fel. A közelítő számítások kvantum-mechanikai perturbációs-elméleten alapszanak. A termovillamos hűtéshez használt valóságos, ötvözött kristályok paramétereinek kvantitatív előreértékelésére általános érvényű módszer még nem áll rendelkezésre, mert az alapjelenségeket leíró függvények csak gyenge kölcsönhatásokra alkalmazhatók.

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ

Д. Ярач

Резюме

Стационарное состояние термоэлектрического напряжения и теплопроводимой способности термоэлектрических полуметаллов можно приближенно описать с помощью моделей механизма транспортирования энергии. Механизмы могут быть построены путем накладывания кинетической и потенциальной энергии электронов и фононов, а также их моментов при последовательном коррекционном учете взаимодействий. Приближенные расчеты основываются на квантово-механической пертурбационной теории. В настоящее время еще нет общедействительного метода предварительной количественной оценки параметров истинных легированных кристаллов, используемых для термоэлектрического охлаждения, так как описывающие основные явления функции могут применяться только при слабых взаимодействиях.

THERMOELEKTRISCHER MECHANISMUS

Gy. Jarács

Zusammenfassung

Der stationäre Zustand der thermoelektrischen Spannung und Wärmeleitfähigkeit von thermoelektrischen Halbmetallen kann mit Hilfe von Energietransport-Mechanismus-Modellen annähernd beschrieben werden. Die Mechanismen können durch Überlagerung der kinetischen und potentialen Energien und Momente der Elektronen und Phononen unter gradueller und korrigierender Berücksichtigung der Wechselwirkungen aufgebaut werden. Die annähernden Berechnungen beruhen auf der Quantenmechanischen-Perturbations-Theorie. Zur quantitativen Vorbewertung der Parameter der zur thermoelektrischen Kühlung verwendeten realen legierten Kristalle steht z. Zt. noch keine allgemein gültige Methode zur Verfügung, da die die Grunderscheinungen beschreibenden Funktionen nur für schwache Wechselwirkungen angewandt werden können.

THERMOELECTRIC MECHANISM

Gy. Jarács

Summary

The steady state of the thermoelectric power and that of the thermal conductivity of the thermoelectric semi-metals can be described approximately by the aid of models of energy transfer mechanism. The setting up of the mechanisms can be performed by superposing the kinetic and potential energies of electrons and phonons, taking into account the interactions with step by step correction. The approximate calculations are based on the perturbation principle of the quantum mechanics. There exists yet no general method for preliminary quantitative evaluation of the parameters of actual alloyed crystals, used for the thermoelectric cooling, because the functions describing the basic phenomena, can be applied only for weak interactions.

A termovillamos hűtés továbbfejlesztése azon múlik, mennyire sikerül a jövőben új ötvözetek előállításával a jósági szám növelése. Az elméleti becslésekkel megadott maximális értékeknél a jelenlegi ötvözetek teljesítménye lényegesen kevesebb. Ennek fő oka abban keresendő, hogy nincs elméletileg kidolgozott egységes számítási módszer, mellyel a jósági számot megadó paraméterek megfelelő pontossággal becsülhetők lennének a kristályszerkezetekben lejátszódó jelenségek leírása alapján. Alábbiakban lényeges irányvonalaiiban kerül ismertetésre a jósági szám két félvezetős paraméterének, a termovillamos feszültségnek és a hővezetőképességnek számítási módszere, melyek főleg a perturbált energiakvantálást használják fel. A számítások egyszerű és ideális egységcellák esetén is jelentős nehézséget jelentenek. A módszer elhanyagolásai magukban rejtik kiterjesztésük irányában elhelyezkedő korlátaikat.

Termovillamos feszültség

Szilárd vezetőben termovillamos feszültség fellépése entropiagradiens okozta elektronenergia-transzportálás eredménye. Ha szigorúan csak az elektronokat vesszük figyelembe, akkor a vezetési elektronok fahőjével operálva — amint azt a diffúziós termovillamos elmélet teszi (Thomson-elv) —, a jelenség úgy tárgyalható, mint elektronoknak többé-kevésbé hőegyensúlyban levő rácsrezgéseken, illetve normál állapotú szennyező atomokon való szóródása. Ez az elmélet nem ad kvantitatív magyarázatot a termovillamos feszültség nagyságának kialakulásáról. Ha viszont egyéb entrópiagradiens-források is jelen vannak — melyek lokális hőmérsékletgradiensén keresztül szintén elektrontranszportáláshoz vezetnek — a vezetési elektronoknak tulajdonított felszökken termovillamos feszültség tulajdonképpen szuperponált entrópiagradiens eredményeként fogható fel. Gerjesztett rácsrezgések, fononok esetében fononáramlásról lehet beszélni s amennyiben ez olyan hőmérséklet-tartományban lép fel, hogy vele összemérhető fonon—elektron csatolás is keletkezik, akkor ez valóban entrópiánövekményhez vezet és a vezetési töltéshordozó elektronok számított termofeszültségének okául tételezhető fel. Ezt tükrözi a rácsfahő (C') megjelenése a termovillamos feszültség fonon-drag (fonon kollíziójából eredő) kifejezésében:

$$\alpha' = \frac{1}{3Ne} C', \quad (1)$$

itt. α , a járulékos termovillamos feszültség, N a töltéshordozó részecskék (elektronok) száma az egység-térfogatban, e az elemi töltés.

A rácshő okozta termovillamos feszültség növekmény $T \cong \Theta$ hőmérsékleteken (Θ : Debye hőmérséklet) tisztafémre számítva is

$$\alpha' = \frac{k}{e} \frac{l_{ff}}{l_{ff} + l_{fe}}, \quad (2)$$

ahol l szabad úthosszat jelent, k a Boltzmann-konstant, az indexben ff fonon—fonon kölcsönhatást, fe fonon—elektron kölcsönhatást jelez. Mivel

$$l_{ff} \propto \frac{1}{T}, \quad \alpha' \propto \frac{1}{T}.$$

Termovillamos félfém ötvözeteknél ez a 300 °K-os környezetben 5...10% termovillamos feszültségjárulékot jelent az elektrondiffúziós elméletből számolt termovillamos feszültséghez képest.

Ugyanez a tárgyalásmód közvetlenül alkalmazható a szennyező atomokra is, és valamennyi kölcsönös dragmechanizmus figyelembevételével a termovillamos feszültség anomáliája eltűnik akkor, ha a Thomson-megfogalmazást kiterjesztjük úgy, hogy az elektromosság fajhőjéből definiált termovillamos feszültség helyett valamennyi gerjesztett kölcsönhatásból származó entrópiagradienst tüntetjük fel a termovillamos feszültség forrásául.

A mérések azt igazolták, hogy csak az ún. „Umklapp” elektron—fonon kollíziók adnak termovillamos feszültségnövekményt, a normál kollíziók csökkentik a diffúziós elméletből számított termovillamos feszültséget.

Normál kollízió esetén $\mathbf{k} - \mathbf{k}' \pm \mathbf{q} = 0$, ahol \mathbf{q} a fonon hullámvektora, \mathbf{k} és \mathbf{k}' az elektron hullámvektora ütközés előtt, illetve után; Umklappkollízió esetén $\mathbf{k} - \mathbf{k}' \pm \mathbf{q} = \mathbf{g}$, ahol $\mathbf{g} \neq 0$, azaz \mathbf{g} -vel jellemzett járulékos momentumváltozás és ezzel együtt járulékos elektromos tér lép fel.

Hővezetőképesség

A hővezetés energiatranszportálási processzus: egy kristály két pontja közti hőmérsékletkülönbség kiegyenlítését végzi. Homogén izotróp kristályban a hőáramlás a hőmérsékletgradiens irányába esik.

$$\mathbf{w} = -\varrho \text{ grad } T, \quad (3)$$

ahol a ϱ arányossági tényező a hővezetőképesség, dimenziója: $[\text{W cm}^{-1} \text{ grad}^{-1}]$.

Anizotróp kristályban, mint amilyenek a termovillamos szerkezetek, a hővezetést általánosabban kell felírni.

$$w_i = - \sum_{k=1}^3 \varrho_{ik} \frac{\partial T}{\partial x_k} \quad (i = 1, 2, 3), \quad (4)$$

ahol a ϱ_{ik} tenzor, 9 komponenssel. Casimir levezetése alapján a mátrix szimmetrikus és ezért csak legfeljebb 6 egymástól eltérő komponenssel rendelkezik. Ezek egymástól nem függetlenek, a kristályszimmetriától függően köztük lineáris összefüggések állnak fenn. A kristályosztályok csoportelméleti rendszerezése alapján, mely a lehetséges kristálytranszlációs invarianciákat használja fel; egyes osztályokra kiszámították az egymástól független komponensek számát, mely 6, 4, 3, 2 vagy 1 lehet.

Mielőtt a hővezetőképességek kiszámításához hozzá lehetne fogni, definiálni kell a részecskékből, illetve kvázirészecskékből (elektron, fonon) álló stacionárius rendszer hővezetési mechanizmusát. Ezért első közelítésben az egész rendszer helyett egységcellái állapotára érvényes (egyatomos rács N rács-, n elektronrészecskével), részecskék szerinti, Hamilton-operátorral szorzott Schrödinger-egyenletek sajátértékeit kell kiszámítani a részecskék közti dinamikus kölcsönhatások figyelembevétele nélkül (adiabatikus közelítés). Hamilton-operátorok tartalmazzák az elektronok és fononok kinetikus és potenciális energiáit és a kölcsönhatásokat. Ha \mathbf{R} a fononok \mathbf{R}_j helyzetvektorú ($j = 1, 2, \dots, N$ részecskéjének) és \mathbf{r} az elektronok \mathbf{r}_i helyzetvektorú ($i = 1, 2, \dots, n$ részecskéjének) kollektív helyvektora, a sajátfüggvény $\Psi(\mathbf{R}, \mathbf{r})$, a Schrödinger-egyenlet:

$$\mathcal{H}\Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}. \quad (5)$$

Az egész rendszer Hamilton-operátora

$$\mathcal{H} = \sum_i \frac{p_i^2}{2m} + \sum_{i,j} v(\mathbf{r}_i - \mathbf{R}_j) + \frac{1}{2} \sum_{i,k} \frac{e^2}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_k|} + \mathcal{H}_{\text{rács}} \quad (6)$$

tartalmazza az elektronok kinetikus energiáját, Coulomb-kölcsönhatását a rácsrészecskékkal, az egymásközi Coulomb-kötésenergiát és a rács Hamilton-operátorát, mely

$$\mathcal{H}_{\text{rács}} = \sum_j \frac{p_j^2}{2M} + \mathcal{H}_{\text{rács}}(\mathbf{R} - \mathbf{R}_0) + \mathcal{H}_{\text{rács}}(\mathbf{R}_0) \quad (7)$$

alakú és tartalmazza a rácsrészecske kinetikus és potenciális energiáját és az egyen-súlyi helyzetbeli kölcsönhatásokat.

Az egész rendszer Hamilton-operátora kiegészülhet még egyéb polarizációs potenciálokkal és nem rácsperiodikus kölcsönhatás-potenciálokkal is.

Az egész rendszer sajátfüggvénye a következő szorzat:

$$\Psi'(\mathbf{R}, \mathbf{r}) = f(\mathbf{R}) \Psi(\mathbf{R}, \mathbf{r}) \exp\left(-\frac{i}{\hbar} \varepsilon t\right), \quad (8)$$

ahol $\Psi(\mathbf{R}, \mathbf{r})$ a teljes elektron-sajátfüggvény adiabatikus közelítése (a kölcsönhatások elhanyagolásával), ε a teljes energia, f a fononos sajátfüggvény, melyben az elektron potenciális energiája szerepel, $\hbar = h/2\pi$: ahol h a Planck-konstans, t az idő. A (8) egyenlet természetesen nem tekinthető (5) pontos megoldásának. A sajátfüggvények periodikusak és a részecskék \mathbf{k} hullámvektorai szerint a megfelelő Schrödinger-egyenletekből a határfeltételek alapján kvantálhatók. Például egy egyszerű esetben, köbös rácsban szabadon mozgó ($\mathbf{k} = 0$ helyzetvektorú) elektron esetén az energia

$$\varepsilon_n(\mathbf{k}) = \varepsilon_n(0) + \frac{\hbar^2}{2m^*} (\mathbf{k})^2, \quad (9)$$

ahol m^* az elektron effektív tömege. A rácsenergia kvantálása az elektronéhoz hasonlóan végezhető.

A fonon—részecske kölcsönhatásokat a perturbációs számítás veszi figyelembe. Míg ugyanis az energiaszámítás kiindulásául szolgáló, Bose—Einstein statisztika

szerinti $[\hbar\omega(\mathbf{q}, s)]$ energiájú fononok átlagos száma, kölcsönhatások figyelembevétele nélkül:

$$N_0(\mathbf{q}, s) = \frac{1}{\exp[\hbar\omega(\mathbf{q}, s)/kT] - 1}, \quad (10)$$

a perturbációkat figyelembe vevő $\mathbf{g}(\mathbf{q}, s)$ függvénnyel

$$N(\mathbf{q}, s) = N_0(\mathbf{q}, s)\{1 + [N_0(\mathbf{q}, s) + 1]\mathbf{g}(\mathbf{q}, s)\}. \quad (11)$$

Itt $s = 1, 2, 3$ koordináták, k a Boltzmann-konstans. A \mathbf{q} terjedési vektorok geometriai tulajdonságai azonosak a \mathbf{k} vektorokéval.

A függvény kiszámításának adott esetben nagy matematikai nehézségei vannak. Ugyanis a \mathbf{q} vektorok szummázásánál bonyolult integrálegyenletet kell megoldani és a fononos kölcsönhatást leíró

$$\left. \frac{\partial N(\mathbf{q}, s)}{\partial t} \right|_{f-f} = \frac{N(\mathbf{q}, s) - N_0(\mathbf{q}, s)}{\tau(\mathbf{q}, s)} \quad (12)$$

összefüggésben $\tau(\mathbf{q}, s)$ relaxációs idő (a szabadon futó részecske két ütközés közti ideje) sem adható meg egzaktul.

Általában egy valóságos kristályban alacsony hőmérsékleten (30...100 °K-ig) egyes szóródási processzusok összeadhatók. Mérések szerint az eredő relaxációs időre kielégítő jó közelítés az

$$\frac{1}{\tau(\mathbf{q}, s)} = \frac{1}{\tau_1(\mathbf{q}, s)} + \frac{1}{\tau_2(\mathbf{q}, s)} + \dots \quad (13)$$

definíció. De az átlag relaxációs időkre (és a hővezetőképesség ezzel arányos) az

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} + \dots \quad (14)$$

már rossz approximáció, ha az egyes relaxációs idő \mathbf{q} -függése lényegesen különböző.

A hővezetés rácselméletét Peierls alapozta meg. E szerint a fonon-kölcsönhatás egymástól függetlenül rezgő oszcillátorok szuperpozíciójával állítható elő, az időfüggő átmeneti valószínűségek Dirac elméletének alkalmazásával. Így a transzportálás úgy fogható fel, mint fononállapotok valószínűségfüggvénye, melyet a hőmérsékletgradiens és a fonon-fonon kölcsönhatás irányít.

Három egymással összefüggő Boltzmann-egyenletet lehet felírni a perturbált eloszlási függvények reprezentálására [$N(\mathbf{q}, s) = 1, 2, 3$], melyekben a perturbálatlan eloszlási függvények momentán állapotát a részecskék átlagos száma approximálja. Ha a három $N(\mathbf{q}, s)$ függvény ismeretes, a hőáramlás sűrűségét

$$\mathbf{w} = \frac{1}{V} \sum_{\mathbf{q}, s} N(\mathbf{q}, s) \hbar\omega(\mathbf{q}, s) \mathbf{u}_g(\mathbf{q}, s) \quad (15)$$

adja, ahol V a periodikus cella térfogata, melyben N atom helyezkedik el. $\mathbf{u}_g = l/\tau$ a részecske sebessége; ahol l a szabad úthossz, τ a relaxációs idő. A $N(\mathbf{q}, s)$ függvényt a potenciális energia alkalmas sorbafejtése állítja elő.

A (11) egyenletben a Peierls által levezetett

$$g(\mathbf{q}, s) = \text{const}(\mathbf{q} \text{ grad } T), \quad (16)$$

mint a vektor szummázásánál fellépő integrálegyenlet egyik nem triviális megoldása, a feltétlenül figyelembe veendő Umklapp-processzusra nincs tekintettel. Ennek korrekciójára a perturbált állapotra jellemző függvény szolgál:

$$g(\mathbf{q}, s) = \text{const}(\mathbf{q} \text{ grad } T) + h(\mathbf{q}, s), \quad (17)$$

ahol a $h(\mathbf{q}, s)$ járulékos függvényt esetenként mérésekből állapítják meg.

Peierls eredményeinek felhasználásával például köbös kristályra az izotróp hővezetőképesség jól számítható:

$$\varrho = \sum_{\mathbf{q}, s} c_v(\mathbf{q}, s) u_g^2(\mathbf{q}, s) \tau(\mathbf{q}, s) \cos^2 \vartheta \quad (18)$$

alapján, ahol ϑ a \mathbf{q} és $\text{grad } T$ közti szög, c_v az egységterfogatnyi fajhő, u_g a részecske ütközések közti sebessége; és ez tulajdonképpen a Debye-megfogalmazás általánosítása:

$$\varrho = \frac{1}{3} u c_v l, \quad (19)$$

mely a rácshullámok sűrűségváltozásokon való szóródásának figyelembevételével számítja a hővezetőképességet.

Hering számította longitudinális és tranzverzális fononok relaxációs idejét rugalmas izotróp és anizotróp kristályokban a fonon energia- és momentummegmaradásának feltételezésével.

A relaxációs idő térpozicionális eloszlását természetesen az esetlegesen anizotróp rugalmassági modulus eloszlásával módosítottan kell figyelembe venni. Elektron—fonon kölcsönhatásnál pl. a longitudinális relaxációs időt kell alapul venni, mert a fonondeviációkból indukált termovillamos feszültség az elektronpályákra gyakorolt ilyen irányú sodrása mellett a többi perturbáció elenyésző.

A hővezetőképesség pontos, teljes kifejezésében ($\varrho = \varrho_0 + \Delta\varrho$) szereplő $\Delta\varrho$ -val figyelembe veszik az elektron—fonon kölcsönhatásból származó hővezetőképességet is. Bloch elve szerint elektronok longitudinális fononokkal lépnek csak kölcsönhatásba, és ennek megfelelően a teljes rendszer két eloszlási függvénnyel jellemezhető. Ezeket a függvényeket Boltzmann-egyenletek határozzák meg. Minthogy a hőmérsékletgradiens egyirányú (x_1), az elektron—fonon kölcsönhatás időfüggvénye:

$$\begin{aligned} \frac{-\hbar}{m^*} \frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} K_1 \left[eE + T \frac{\partial}{\partial x_1} \frac{\zeta}{T} + \frac{\varepsilon}{T} \frac{\partial T}{\partial x_1} \right] &= \left. \frac{\partial f}{\partial t} \right|_{\varepsilon=f} \\ u \frac{\partial N_0}{\partial t} \frac{\partial T}{\partial x_1} &= \left. \frac{\partial N}{\partial t} \right|_{f=f}^{\varepsilon=f}, \end{aligned} \quad (20)$$

ahol $f(\mathbf{k})$ és $N(\mathbf{q})$ a fonon, illetve elektron eloszlási függvények, ζ a Fermi-energia, E a térerősség. Egyensúlyi állapotra:

$$\begin{aligned} f(\mathbf{k}) &= f_0(y) - \frac{\Phi(\mathbf{k})}{kT} \frac{\partial f_0}{\partial y}, \\ N(\mathbf{q}) &= N_0(z) - \frac{\Psi(\mathbf{q})}{kT} \frac{\partial N_0}{\partial z}, \end{aligned} \quad (21)$$

ahol $y = \varepsilon(\mathbf{k})/kT$ és $z = \hbar\omega(\mathbf{q})/kT$, úgyhogy az eloszlási függvények idő szerinti deriváltjai, két, csak φ és ψ -től függő lineáris operátortól való függéssel írhatók fel:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial t} \right|_{e-f} = -L_1(\Phi) - L_2(\Psi), \quad (22)$$

$$\left. \frac{\partial N}{\partial t} \right|_{f-f} = -L_3(\Phi) - L_4(\Psi).$$

Amennyiben más elektron- és fononszóródásokat is figyelembe vesznek, az L -ekhez addicionális termek járulnak. Így nem degenerált, izotróp anyagnál

$$\Phi(\mathbf{k}) = K_1 c(\mathbf{k}) \quad \text{és} \quad \Psi(\mathbf{q}) = q_1 b(\mathbf{q}) \quad (23)$$

jelöléssel az egyenletek szimultán megoldása szóródási integráloperátorok bevezetésével lehetséges és jelentős nehézségekkel jár még megszorításokkal is. Az L_n operátorok alakja ($n = 1, 2, 3, 4$):

$$L_1(\Phi) = \frac{a}{2\hbar l_e} K_1 \int_0^{2K} \frac{q^3}{K^3} f_0(K) c(K) dq$$

$$L_2(\Psi) = \frac{a}{2\hbar l_e} K_1 \int_0^{2K} \frac{q^3}{K^3} f_0(K) b(q) dq \quad (24)$$

$$L_3(\Phi) = \frac{a}{\hbar l_e} q_1 \int_{q/2}^{\infty} \frac{K}{q} f_0(K) c(K) dK$$

$$L_4(\Psi) = -\frac{a}{\hbar l_e} q_1 \int_{q/2}^{\infty} \frac{K}{q} f_0(K) b(q) dK$$

ahol $a = \hbar^2/2m^*kT$; l_e töltéshordozó átlagos szabad úthossza fononkollízió esetén.

Vegyes elektron—fonon és elektron—idegen ion szóródások figyelembevételével ΔQ kiszámításához nyolc

$$K_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_0^{\infty} \frac{\exp(-y)}{y^2 + \beta^2} y^{n/2} dy \quad (25)$$

típusú integrált kell kiszámítani, ahol a β paraméter a szóródásban résztvevő részecskék mobilitás arányait jelenti.

Elektronos hővezetés

Félvezető kristályok hővezetőképességét az elektronos és fononos hővezetőképességek összegeként szokták a legegyszerűbben megadni:

$$\varrho_0 = \varrho_e + \varrho_f. \quad (26)$$

Hozzá kell tenni, hogy ez csak akkor lenne pontosnak tekinthető, ha az elektronos

és fononos rendszer egymástól függetlenül transzportálna. Speciális esetekben azonban további transzportálási módokat is figyelembe kell venni a hővezetőképesség meghatározásánál. Termovillamos anyagoknál a hűtési tartományoknál a teljes hővezetőképesség:

$$\varrho_e + \varrho_f + \varrho_{exc}, \quad (27)$$

ahol a ϱ_{exc} gerjesztett elektronok (excitonok) által létesített hővezetőképesség.

Az elektronos hővezetés extrinsic esetben a Wiedemann—Franz—Lorenz-törvény alapján:

$$\varrho = L\sigma T, \quad (28)$$

L a Lorenz-szám, σ a villamos vezetőképesség. A képlet elektronokra vagy lyukakra egyértelműen alkalmazható.

Goldsmid számításai szerint Bi_2Te_3 -ra:

$$L = \frac{1}{e^2 T^2} \left[\frac{J_3}{J_1} - \left(\frac{J_2}{J_1} \right)^2 \right], \quad (29)$$

ahol

$$J_n = \frac{16\pi (2m^*)^{\frac{3}{2}}}{3h^3} \int_0^{\infty} \tau(\varepsilon) \frac{\partial f_0(\eta)}{\partial \varepsilon} \varepsilon^{n+\frac{1}{2}} d\varepsilon, \quad (30)$$

itt $\tau(\varepsilon)$ a kollíziós idő, $\eta = \zeta/kT$, ζ a Fermi-energia. Ha az elektronok csak fononokon szóródnak $\tau(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-1/2}$, nem degenerált állapotban $\eta \rightarrow -\infty$ és mivel $\sigma \propto T^{-3/2}$ az az elektronos hővezetőképesség: $\varrho_e \propto T^{-1/2}$.

A számítás lényeges további eredményei a következők: p-típusú anyagra a τ elektron—fonon relaxációs időt a mobilitás—hőmérséklet-függvényből lehet számítani, n-típusnál nem, mert a villamos vezetőképesség növekedésének függvényében nő a fononok halogén atomokon való szóródása is. A számított és mért $\varrho = f(\sigma)$ függvény egyezéséből bizonyítást nyert, hogy a fonon—elektron szóródás nem csökkenti észlelhetően a hővezetőképességet.

Rácsenergiával gerjesztett elektronok egy adott koncentráció- és elég nagy diffúziós sebesség esetén a hővezetőképességre is befolyással vannak. Ha ugyanis rácsenergia egy adott hőmérséklettartományban szabad töltéshordozó létesítésére még nem elég, de hordozó gerjesztésére már igen — amennyiben ilyen gerjesztési szintek előfordulnak — akkor az excitonok a hőmérséklet- és koncentrációgradiens függvényében a kristályban való áthaladás közben a transzferált translációs hőenergia egy részét belső gerjesztett energiaként mutatják fel. A transzferálásból keletkezett gerjesztési energiának megfelelő hővezetőképesség:

$$\varrho_{exc} = \frac{16\pi}{3} \left(\frac{k}{h} \right)^3 T^3 m_{exc} l_{exc} \left[\left(\frac{\Delta\varepsilon_{exc}}{kT} \right)^2 + 2 \right] \exp \left(-\frac{\Delta\varepsilon_{exc}}{kT} \right), \quad (31)$$

ahol m_{exc} az exciton effektív tömege, $\Delta\varepsilon_{exc}$ a belső excitált energia. Az l_{exc} szabad úthosszat többen is számították azon az alapon, hogy feltételezték az excitonok rugalmas szóródását a fononokon. Akusztikus fononok túlnyomó jelenléte esetén, mint az termovillamos hűtésnél fennáll, ezek a szóródások többnyire elhanyagolhatók.

Az elmélet korlátai

p- és n-típusú vezetőkből álló termovillamos hűtőelemmel elérhető maximális hőmérsékletdifferencia:

$$(\Delta T)_{\max} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{[\sqrt{\varrho_1} \sigma_1 + \sqrt{\varrho_2} \sigma_2]^2} \frac{T_h^2}{2}, \quad (32)$$

ahol

α_p és α_n az abszolút termovillamos feszültségek,

σ és ϱ a villamos, illetve hővezetőképességek,

T_h a hidegoldal hőmérséklete.

A termovillamos hűtés megvalósításához kis hővezetőképességű, nagy villamos vezetőképességű és nagy termovillamos feszültségű fémek, illetve ötvözetek jönnek számításba. A |Bi Sb-Te Se| rendszerű szilárd oldatok az optimális doppingolás függvényében maximumokat mutatnak fel, más összetételekhez képest. Ilyen szilárd oldatok hővezetőképességének kialakulására csak gyakorlati szabályok adhatók meg (Cornish, Goldsmid). Ugyanis vegyes kristályok hővezetőképességeinek elméleti számítása az eddig vázolt számítási eljárásokhoz képest az alábbi okokból kifolyólag tovább komplikálódik.

1. A fonon—fonon kölcsönhatás tökéletes kristályban sem írható le pontosan a relaxációs idővel, illetve a szabad úthosszakkal. Ezért még, ha egy tökéletes kristályban meg is határoznánk a fononok idegen atomokon való szóródásából származó relaxációs időt, ebből nem lehet megállapítani az eredő relaxációs időt. Tökéletes kristályba, két vagy több komponensű ötvözetbe idegen atomokat helyettesítéssel bevive, a járulékos fononszóródás nem állapítható meg a szabad úthosszal, mert az az időfüggő perturbációs elmélettel számítható. Stacionárius állapotok perturbációja, mint amilyen a tömegek különbségéből adódó rácsdiszperzió-változás és a rácscrészecskék közti kapcsolatának változásából adódó rácsdimenzió-változás oly erős kölcsönhatás, hogy a perturbációs számítást használni nem megengedhető.
2. Termovillamos ötvözetek vegyes kristályaiban a szabad töltéshordozók koncentrációja $10^{18} \dots 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ nagyságrendű. Emiatt kis hőmérsékleten is degeneráció indul meg és a fononoknak elektronokon való szóródásából származó rácshővezetőképesség-változást figyelembe kell venni. Ez további nehézséget jelent az előzőkben vázolt eljárásokhoz képest akkor, ha összetett rácsrendszerű kristályokról van szó. Ez a helyzet áll fenn a jelenleg használt termovillamos anyagoknál.

Irodalom

- Casimir, H. B. G.*: Rev. mod. Phys. **17**, (1945) p. 343.
Winston, H.—Halford, R. S.: J. Chem. Phys. **17**, (1949) p. 607.
Kane, E. O.: J. Phys. Chem. Solids **8**, (1958) p. 38.
Becker, R.—Leibried, G.: Z. Phys. **125**, (1948) p. 347. Phys. Rev. **60**, (1946) p. 34.
Süssmann, G.: Z. Naturf., **11a** 1 (1956) pü. 1.
Herring, C.: Phys. Rev. **95**, (1954) p. 954.
Klemens, P. G.: Hbuch d. Physik **14** (1956) Proc. roy. Soc., A **208**, (1951) p. 108.
Leibfried, G.—Schlömann, E.: Nachr. Akad. Wiss. Göttingen, **11a**, (1954) p. 71.
Pomerancsuk, I.: Phys. Rev., **60**, (1941) p. 821.
Berman, R.—Forster, E. L.—Ziman, J. M.: Proc. roy. Soc., A **231**, (1955) p. 130. Proc. roy. Soc., **237**, (1956) p. 344.
Slack, G. A.: Rev., Phy. **105**, (1957) p. 827.
Fischer, G.—White, G. K.—Woods, S. B.: Phys. Rev. **106**, (1957) p. 480.
Klemens, P. G.: J. Phys. Chem. Solids, **8**, (1959) p. 345.
Carruthers, J. A.—Geballe, T. H.—Rosenberg, H. M.—Ziman, J. M.: Proc. Phys. Soc. **238**, (1957) p. 502.
Haken, H.: Fortschr. Phys. **6**, (1958) p. 271.
Pikus, G. E.: J. Tech. Phys. **26**, (1956) p. 49.
Deviatkova, E. D.: J. Tech. Phys. **27**, (1957) p. 661.
Birkholz, U.: Z. Naturf. **13a**, (1958) p. 780.
Appel, J.: Progress in Semiconductors, **5**, (1960) p. 141.
MacDonald: Thermoelectricity, Wiley, 1962.
Bailyn, M.: Phil. Mag. **5**, (1960) p. 1059.
Pauli, W.: Handbuch der Physik, V. **1**, (1958) p. 1.
Jarács Gy.: Elektrotechnika, **57**, (1964) 532 old.

17.

A szilíciumkarbid felületi viszonyai és ezek változásainak kihatása a villamos tulajdonságokra

BOGOLY ISTVÁN

ÖSSZEFOGLALÁS

A szilíciumkarbid kristályok felületi viszonyaival különböző szempontból foglalkoztak. Megállapították, hogy a szemcséket SiO_2 tartalmú hártya borítja, melynek vastagsága normális körülmények között 10^{-6} cm nagyságrendű. A rétegnek döntő kihatása van a SiC ellenállások villamos tulajdonságaira. A szerző két kísérletsorozatot kapcsán megváltoztatta az eredeti állapotokat, s nagyáramú lökéshullámokkal vette igénybe a nyert mintákat. A mérések jól alátámasztják a kristályokat borító réteg fontos szerepét.

УСЛОВИЯ ПОВЕРХНОСТИ КАРБИДА КРЕМНИЯ И ВЛИЯНИЕ ИХ ИЗМЕНЕНИЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

И. Боголь

Резюме

Условия поверхности кристаллов карбида кремния рассматривались с различных точек зрения. Было установлено, что зерна покрыты пленкой с содержанием SiO_2 , толщина которой в нормальных условиях составляет 10^{-6} см. Этот слой имеет решающую роль в определении электрических свойств SiC сопротивления. Автор в процессе осуществления двух циклов экспериментов изменил их первоначальное состояние и полученные образцы подверг воздействию сильноточным ударным волнам. Измерения хорошо подтверждают важную роль покрывающего кристаллы слоя.

OBERFLÄCHEN-VERHÄLTNISSE VON SILIZIUM-KARBID UND AUSWIRKUNG IHRER VERÄNDERUNGEN AUF DIE ELEKTRISCHEN EIGENSCHAFTEN

I. Bogoly

Zusammenfassung

Die Oberflächen-Verhältnisse von Silizium-Karbid-Kristallen wurden aus verschiedenen Gesichtspunkten behandelt. Es wurde festgestellt, dass die Körnchen durch einen SiO_2 -haltigen Film überdeckt sind, dessen Stärke unter normalen Bedingungen in der Größenordnung von 10^{-6} cm liegt. Dieser Schicht kommt bei der Bestimmung der elektrischen Eigenschaften von SiC Widerstände eine entscheidende Rolle zu. Im Laufe der Versuchsserie wurden die ursprünglichen Zustände durch den Autor verändert und die erhaltenen Proben durch Starkstrom-Stosswellen beansprucht. Die wichtige Rolle der Schicht welche die Kristalle bedecken wurde durch die Messungen gut unterstützt.

SURFACE CONDITIONS OF THE SILICON CARBIDE AND INFLUENCE OF THEIR VARIATIONS ON THE ELECTRICAL CHARACTERISTIC

I. Bogoly

Summary

The surface conditions of the silicon carbide crystals have been dealt with from various points of view. It was found that the film covering the grains, contains SiO_2 ; the thickness of the film is normally of the order of 10^{-6} cm. This layer plays a definitive role in the determination of the electrical characteristic of the silicon carbide resistors. When performing two series of experiments, the author changed the initial conditions and the samples were loaded with shock waves of heavy current. The measurements conform the important role of the layer covering the crystals.

A nagyfeszültségű hálózatok és elosztóberendezések túlfeszültség-védelmére szolgáló szelephatású levezetők egyik lényeges alkotórészét képezik a szilícium-karbid-alapanyagú nemlineáris ellenállások. A kérdéssel korábban már foglalkoztunk [1, 6], és részletesen ismertettük azokat a követelményeket, amelyeket e fontos erőáramú iparcikkal szemben támasztanak.

Jelen dolgozatban a levezető ellenállások és általában a szimmetrikus varisztorok alapanyagával, pontosabban a polikristályos szilíciumkarbid (SiC) felületét borító réteg mibenlétével és a felhasználás során bekövetkező változásokkal kívánunk foglalkozni. E kérdés ismerete több oknál fogva lényeges:

— A levezető ellenállásoknak nagyáramú lökőhullámok hatására nem szabad káros változást szenvedniök sem mechanikus, sem villamos szempontból. [IEC Publication 99—1 (1958) sz. előírás.]

— Feszültség—áram-jelleggörbéjüknek előírt nemlineáris vezetőképességet kell biztosítani. Ez részben a levezető névleges levezetőáramához tartozó maradékfeszültség max. értékének tartása, részben a helyes üzemi működés (utánfolyóáram korlátozása) szempontjából fontos.

Ilyen ellenállások előállítására csak meghatározott minőségű szilíciumkarbid alkalmas. Előfordulnak azonban esetek, amikor az egyébként megfelelő anyag-tételek a felhasználás során olyan változásokat szenvednek, melyek alkalmatlanná teszik a gyártmányt a kívánt célra való felhasználásra. Ezeknek eltérő okai lehetnek. Ilyenek: a kemence atmoszférahatása, a kötőanyag vegyi tulajdonságai, nem kívánatos szennyezések jelenléte. A káros hatás a szilíciumkarbid kristályok oxidációjában, vagy egyéb reakciók formájában jelentkezik, különösen nagyobb hőmérsékleten.

Mivel az említett kérdésekkel kapcsolatban ilyen természetű dolgozat még nem jelent meg, megkíséreljük a problémát összefoglalni. Igyekszünk az idevonatkozó irodalom áttekintése után — kutatásaink során szerzett tapasztalataink felhasználásával — rámutatni azokra a jelenségekre, amelyek előidézését célszerű mellőzni, vagy hasznosítani.

A SiC borítórétege és kémiai tulajdonságai

A szilíciumkarbid, vagy karborundum felületi viszonyait, s annak különböző sajátosságait számos szerző tanulmányozta. A borítóréteg módosulati formájának megállapítására kiválóan alkalmasak az elektronsugarak, mivel behatolási mélységük csekély és így a mélyebben fekvő rétegek zavaró hatása nem érvényesülhet. Náray-

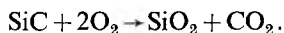
Szabó (1944) megállapítása szerint [7] kb. 15 Å vastagságú amorf rétegről van itt szó, hasonlatosan a fémek oxidált felületeihez. Kamencev [5] és más szerzők [2] „kovasav” hártjáról (SiO_2) írnak, s ennek tulajdonítják a szilíciumkarbid kristályok vegyi állandóságát.

A SiC oxidációjának részletes vizsgálata során Jorgensen [8] kimutatta, hogy az amorf SiO_2 réteg 1200 °C felett kristobalittá alakul át. A réteg védőhatását hasonlatosnak tartja az Al oxidrétegéhez, mely a további pusztulástól megvédi az anyagot. Dillon [8] SiC forszírozott oxidációja során tapasztalta, hogy a kristályok különböző lapjai eltérően viselkednek a külső réteg képződése szempontjából. Kísérletei szerint az eredeti rétegvastagság többszörösére növelt SiO_2 réteg már olyan védőhatást fejt ki a SiC-ra, hogy a további oxidáció lényegesen lecsökken. A keletkezett réteg feloldható (HF-ben), s utána újra visszaáll az eredeti oxidációs sebesség.

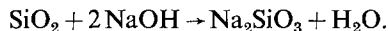
Levegőáram hatására a SiC oxidációja 800 °C alatt lassú lefolyású, a hőmérséklet növekedésével azonban fokozatos nő. Kb. 1200 °C körül következik be a „billenés”; ekkor az oxidációs folyamat igen intenzívvé válhat. Wiebke [11] részletesen tanulmányozta a jelenséget az idő függvényében, különböző szemcseméretű és minőségű SiC mintákon. Kísérletei során O_2 és levegő—vízgőz atmoszférát alkalmazott. Több mintát megvizsgált különböző oxidákkal keverve, O_2 atmoszférában. Megállapította, hogy az oxidáció a szemcseátmérővel fordítottan arányos, továbbá, hogy 1500 °C körül a különböző színű szemcséknél már nincs lényeges eltérés az oxidáció mértékében. 1200 °C alatt a fekete és általában a sötét SiC szemcsék oxidációja erősebb. A vízgőzzel telített levegő hatását 1100 és 1300 °C-on vizsgálta. Utóbbi esetben kb. háromszorosára nőtt az oxidáció. A SiC mellett alkalmazott oxidok közül 1300 °C-on a B_2O_3 , CaO, továbbá 1 Mol%-nyi PbO okozott hevesebb oxidációt.

Több kutató tanulmányozta e tényeket, a felsoroltaktól eltérő gázközegekben is. Ezekből a 17-1. ábrán mutatjuk be a Max—Planck-Institut für Silikatforschung (Würzburg) idevonatkozó mérési adatait [2]. A SiC minták mellett két eltérő üveg szerepel, 10 s% mennyiségben. Valamennyi anyag szemcsenagysága 0,2 mm. Meglepően eltérő hatást fejt ki a levegő és a széndioxid, s ezekhez mérten a 20/80%-os hidrogén—nitrogén-gázkeverék. A folyamatok itt különösen bonyolultak, s részben nem egyértelműek (redukálógáz és védőcső jelenléte miatt). A levegő és CO_2 gázok 1000, ill. 1400 °C-os pontjainak csökkenésére nem találtak magyarázatot.

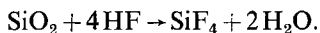
A szilíciumkarbid oxidációját az alábbiak szerint képzeljük el:



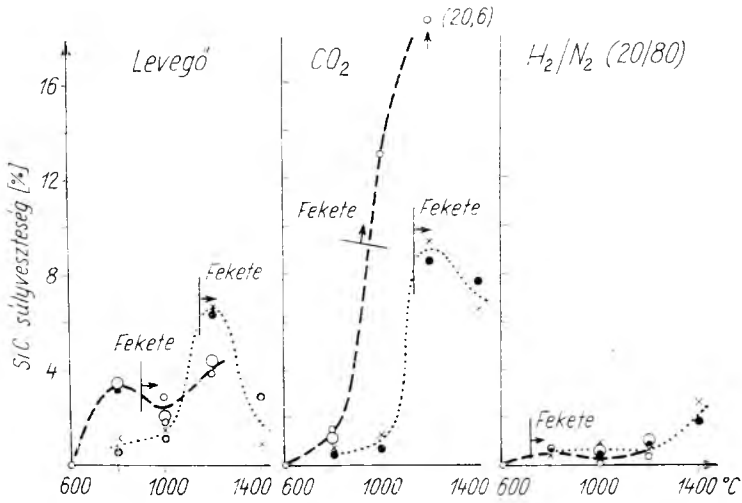
A SiC felületén keletkezett SiO_2 réteg — nátronlúgban főzve — nátriummeta-szilikáttá (vízüvegge) alakítható át:



Hidrogénfluorid esetében pedig szilíciumtetrafluorid képződhet:

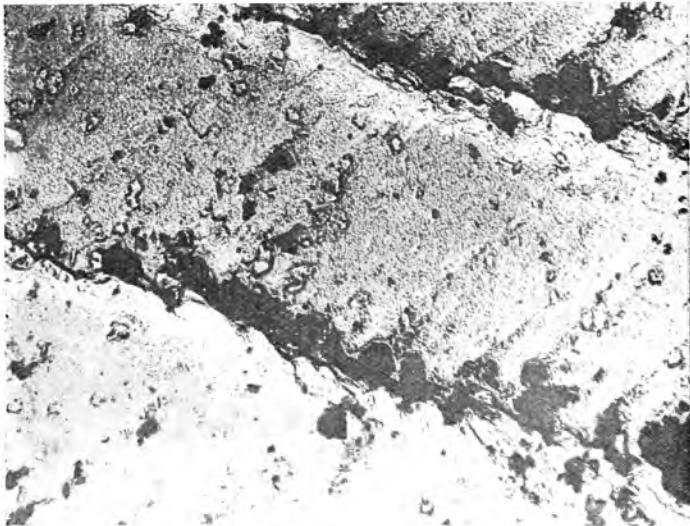


A SiC felbontása megvalósítható salétromsav (HNO_3) és hidrogénfluorid (HF) keverékében. Az előbbi erélyes oxidációs hatást fejt ki (felületi SiO_2 képződés), az utóbbi pedig — mint említettük — feloldja a képződő kovasavat.



17-1. ábra. Szilíciumkarbid reakciója különböző atmoszférában és kötőanyaggyúban. A mérési pontokat 3 órás hevítés után rögzítették.
 --- $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--B}_2\text{O}_3\text{--Na}_2\text{O}$ üveg $\circ \times$ a SiC veszteségből számítva
 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--BaO--CaO}$ üveg $\bullet \circ$ a képződött SiO_2 -ből számítva

Fentiek alapján a SiC kristályok vegyi behatásokkal szemben való ellenállóképességét lényegében az SiO_2 vegyi tulajdonságai szabják meg. Bázikus olvadékok könnyen, savanyú olvadékok kevésbé, de szintén támadják a SiC-ot. Pl. a klór már 100°C -tól, az ortofoszforsav (H_3PO_3) kb. 230°C -on reakcióba képes lépni a SiC-dal. Általában megállapítható, hogy azok az olvadékok, melyek roncsolják



17-2. ábra. Elektronmikroszkópiai felvétel 220-as „Extra” SiC-ről (Nagyítás: $11200\times$ Készítette: dr. Pócza — MTA Műszaki Fizikai Kutató Intézet)

a tűzálló béléseket, a szilíciumkarbidra is veszélyt jelentenek. A helyzet gyakran még rosszabb, mivel a SiO_2 hártját diszlokációs vonulatok zavarják meg, eltérő minőségű szennyezésekkel (17-2. ábra). Az ilyen és ehhez hasonló hibahelyek magartartása nincs kellően tisztázva, s ugyanúgy a megnövelt SiO_2 réteg deformálhatósága, repedések képződésének viszonyai, valamint a kristályélek és csúcsok helyzete sem.

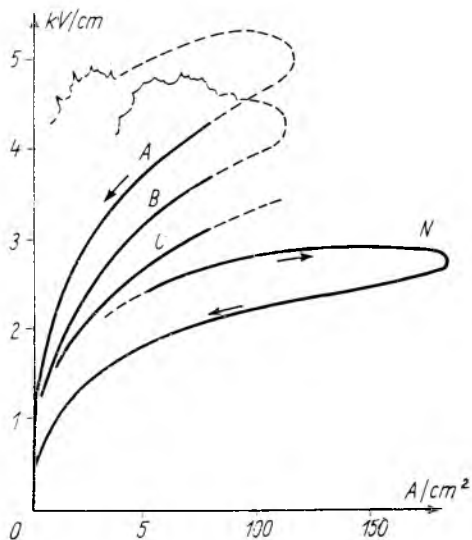
A réteg létezését olyan szerzők is elismerik [3, 6, 9, 10], akik kizárólag villamos vezetési szempontból vizsgálták a kérdést. Eddig több elméletet állítottak fel az ott végbemenő folyamatokra, azonban ma sincs eldöntve, hogy melyik elmélet felel meg leginkább a valóságos helyzetnek. Ennek okát abban látjuk, hogy több tényező játszik szerepet, mint gondoljuk, s ezek egy részét még nem sikerült kellően bizonyítani.

Mi a problémát két kísérletsorozat kapcsán előállított felületi változások villamos mérése útján próbáltuk megközelíteni, amit szimmetrikus SiC varisztorok kutatása során nyertünk. Az egyik esetben bizonyos mértékű oxidációnak tettük ki a SiC szemcséket, míg a másik esetben nagymértékű szemcsenedvesítést értünk el. A tapasztalt változások jelentősek voltak, melyek alkalmasak az ismertetett borítóréteg fontos szerepének bizonyítására.

SiC oxidációja és ennek villamos kihatása

$\varnothing 55 \times 10$ mm méretű SiC próbatesteket készítettünk, sík táblaüveghez hasonló vegyi összetételű szemcsés üveggel kötve. A kötőanyag bázikus hatásának kompenzálására 1600°C -on kalcinált timföldet alkalmaztunk, amit az üveggel együtt őrlöttünk meg, 10μ körüli finomságra. A villamos célra szolgáló, osztályozott SiC szemcsék Fe_2O_3 tartalmát kb. 2%-ra állítottuk be, nagyrészt a felületekre tapadó szennyezés formájában. A SiC és kötőanyag keverékét 75/25%-os arányban készítettük el és gondoskodtunk annak olyan mértékű vízpárával való telítéséről, aminőt 30°C -os és kb. 96%-os relatív nedvességtartalmú levegő tartósan előidézni képes. Az anyagot acél présformába töltöttük, majd 750 kp/cm^2 fajlagos nyomással tömörítettük. Ezt — a formával együtt — 2 órán keresztül 860°C -ra hevítettük, s ezen a hőmérsékleten az előbbi nyomást alkalmaztuk. Az így készült próbadarabokat kisebb nyomóerő alkalmazása mellett levegőn hagytuk lehűlni. Később felületüket letisztítottuk, majd homloklapjaikat fém-szórással borítottuk.

A 17-3. ábrán feltüntettük azt a jellegzőgörbét, amit a leírt módon készült próbadarabok átlaga mutatott (A). Ezek a minták 7...15 alkalommal viselték el a rájuk bocsátott kb. 20/40 alakú áramhullámot,



17-3. ábra. Oxidált szemcsés SiC ellenállás jellegzőgörbéje (A) és változása az áramhullámok hatására (B, C). Normális (oxidálatlan) kivételben (N) a dinamikus karakterisztika gyakorlatilag helyben marad; az ismétlődő lökőhullámok hatására minimális mértékben a növekvő térerősség felé tolódik

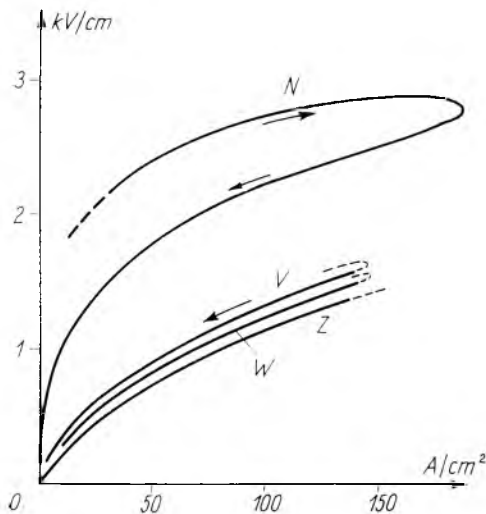
miközben körtűz kíséretében, széleik mentén sötét pontok képződtek. Az igénybevétel során több teljes átütési csatorna képződött. Az első impulzusok hatására a karakterisztika az ábrázolt értelmű változást mutatta (*B, C*).

Ellenőrzésképpen készítettünk olyan mintákat is, melyeknél az oxidációt nagymértékben lecsökkentettük. (A szilíciumkarbid felületén kimutatható vasoxid-tartalom kisebb volt, mint 0,1%; továbbá előzetesen szárított anyagkeverékekkel dolgoztunk; a hevítés során pedig CO_2 atmoszférát alkalmaztunk.) A közepes értékeket jelölő feszültség—áram-görbét a 17-3. ábrán szintén feltüntettük (*N*). Az ily módon, valamint külön e célra kidolgozott üvegszemcsés kötőanyaggal készített minták többszörös számú áramhullámot viseltek el, az említett körtűz kísérete nélkül.

A SiC borítórétegének nedvesítése és ennek villamos természeti következményei

Hasonló módon állítottuk elő újabb próbadarabjainkat, de nagy alkáli- és bór-tartalmú kötőüvegek alkalmazásával. Itt a lágyulási ponttól függően 650...720 °C hőmérsékletig hevítettük az anyagot. A kötés igen tömör, selymesen csillogó szövet-szerkezetet eredményezett. Míg az előbbi minták relatív porozitása 92% körül volt, itt 97...98,5% értékeket mértünk.

Nagyáramú impulzusok egymás után következő igénybevételei a 17-4. ábrán bemutatott változásokat okozták (*v, w, z*). 35...40 alkalommal rábocsátott 20/40 alakú és jelölt mértékű áramigénybevétel külső sérülési nyomot nem hagyott, s gyakorlatilag 6 impulzus után teljesen stabil karakterisztikát tapasztaltunk. Hiszterézishurkot — a stabilizálás után — csak minimális mértékben észleltünk.



17-4. ábra. SiC szemcsék felületének nedvesítése a nemlineáris vezetőképesség romlásához vezet. Amódszer — ideális kontaktusviszonyok mellett — felhasználható az anyag belső ellenállásának meghatározására. Az *N*-görbe normál SiO_2 réteggel borított szemcsés SiC ellenállástre vonatkozik

A jelenségek értékelése

Az oxidációs kísérletek során elsősorban a szemcséket borító réteg vastagságának növelésére törekedtünk. Itt természetesen egyéb reakciók is megindultak a SiC oxidációja mellett. A kívánt hatást azonban elértük, mely az ellenállásstruktúra fajlagos vezetőképességének csökkenéséhez és az impulzus-szilárdság romlásához vezetett. A hiszterézisgörbe által alkotott terület megnövekedett, egyúttal labilissá is vált, az egymás után következő lökhullámok hatására.

A SiC borítórétegek és szemcsétestek nedvesítésével, ill. oldásával lényegében megszüntettük azokat a külső átmeneteket, melyek ilyen varisztorok nemlineáris vezetőképességét biztosít-

ják. A kötőanyagként alkalmazott olvadék bizonyos számú szemcsekontaktust jól biztosított, bizonyos részt azonban lezárt. A szigetelőrétegek átütése után a SiC szemcsék belső vezetőképességét észleltük, ill. azokkal együtt, a sértetlenül maradt belső átmenetek eredőjét mértük.

Azon mintáknál, melyeknél elkerültük a SiC szemcsék borítórétegének megváltoztatását, vagy legalábbis káros mértékben nem befolyásoltuk azt, s gondoskodtunk megfelelő áramkontaktusok kialakításáról, olyan eredményt kaptunk, mint amit nyomás alatt tartott SiC szemcséken szokás mérni, nemlinearitást növelő térkitöltő anyag alkalmazása mellett.

Az eredményeket az alábbiakban foglalhatjuk össze:

- a) A feszültségtől függő SiC ellenállások alapanyagának forszírozott oxidációja hátrányokkal jár mind nemlineáris vezetőképesség, mind impulzus-szilárdság szempontjából.
- b) Az oxidáció villamos kihatásának mértékét meghatározhatjuk etalon ellenálláshoz, vagy megfelelő nyomás alá helyezett SiC szemcsehalmazhoz való hasonlítás útján (l. 17-3. ábra).
- c) A szilíciumkarbid szemcsék felületének nedvesítésével nagyrészt SiO_2 borítórétegtől mentes kontaktusviszonyokat teremthetünk. Ez önmagában nem teszi tönkre az anyag áramhullámokkal szembeni ellenállóképességét. Az eljárás azonban a lineáris ellenállások jelleggörbéjének közelítéséhez vezet, mely közmerten ellentétben áll a szelephatású levezetőben alkalmazható ellenállás villamos követelményeivel (17-4. ábra). A még észlelhető nemlinearitást (v , w és z görbe) a szemcsék belsejében levő átmenetek okozzák [8], s ez lényegesen kedvezőtlenebb, mint amit az anyag a külső borítóréteggel biztosít.
- d) A külső réteg megszüntetésével kialakított szemcseközi kontaktusok összességén mért feszültség—áram-jelleggörbe jó tájékoztatást ad a SiC szemcsék belső vezetőképességéről. A nyert adatok ismeretében számítások végezhetők a levezető ellenállás maradékfeszültségének várható alakulására. Az elvégzett vizsgálat tehát döntő anyagi sajátosság megállapítására alkalmas.

A szilíciumkarbid borítórétegének tanulmányozása további elmélyülést kíván, különösen annak egyenletessé tétele és hibahelyeinek alaposabb megismerése szempontjából. Ez a hálózati levezető ellenállások továbbfejlesztésének egyik alapvető problémája.

Irodalom

- [1] *Bogoly I.*: Túlfeszültségvédelmi célokra szolgáló szilíciumkarbid alapanyagú ellenállások és azok gyártásával kapcsolatos kérdések. Mérnöki Továbbképző Intézet, Budapest 1958.
- [2] *Dietzel, A.—Jagodzinski, H.—Scholze, H.*: Untersuchungen an technischem Siliziumcarbid. Westdeutscher Verlag, Köln und Opladen 1959.
- [3] *Goffaux, R.*: Propriétés du carbure de silicium en régime d'impulsions électriques. Revue Générale de l'Électricité, 1957 szept.
- [4] *Jevsztropjev, K. Sz.—Toropov, N. A.*: A szilícium kémiája és a szilikátok fizikai kémiája. Tankönyvkiadó, Budapest 1951.
- [5] *Kamencev, M. V.*: Mesterséges csiszolóanyagok. Nehézipari Könyv- és Folyóiratkiadó Vállalat, Budapest 1951.
- [6] *Lukács J.—Bogoly I.*: A szilíciumkarbid jelene és jövője az erősáramú villamosiparban. Technika, 1957. 2.
- [7] *Náray-Szabó I.*: Kristálykémia. Egyetemi Nyomda, Budapest 1944.
- [8] *O'Connor, J. R.—Smiltens, J.*: Silicon Carbide. Pergamon Press, Oxford 1960.
- [9] *Shive, J. N.*: A félvezetők fizikája. Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1963.
- [10] *Teszner, S.*: Semi-conducteurs électroniques et complexes dérivés. Gauthier-Villars, Imprimeur-Éditeur, Paris 1950.
- [11] *Wiebke, G.*: Die Oxidation von Siliziumkarbid. Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft e. V., 1960. Heft 5.

18.

Kompenzációfok meghatározása szilíciumon, Hall-mérésből*

GADÁNYI PÉTER

ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen cikk először röviden a használt mérési technikát ismerteti, majd az e technikával elérhető mérési pontosságot tárgyalja, különös tekintettel a kompenzációfok meghatározására. Ezután n- és p-típusú szilíciumra $10^2 \dots 10^{-1} \Omega \text{ cm}$ fajlagos ellenálláshatárok között 1...99%-os kompenzációs tartományban bór és foszfor szennyezőre kiszámolt görbeseregéből levonható következtetéseket ismerteti, a kompenzációfok megállapítási lehetőségeire, $300^\circ \dots 58^\circ \text{K}$ hőmérséklettartományban. Különböző kiértékelési módszerek. Néhány kísérleti eredmény ismertetése és a belőle levonható következtetések.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПЕНСАЦИОННОЙ СТЕПЕНИ НА КРЕМНИИ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ХОЛЛИА

П. Гадани

Резюме

В данной статье сначала кратко описывается использованная техника измерения и затем рассматривается точность измерения достигаемая посредством этой техники с особым вниманием на определение компенсационной степени. После этого относительно кремния типа N и P описываются выводы из семейства кривых, составленных по примесям бора и фосфора в диапазоне компенсации от 1 до 99% в пределах удельного сопротивления $10^2 \text{—} 10^{-1} \text{ омсм}$ в связи с возможностями определения компенсационной степени при температуре $300^\circ \text{—} 58^\circ \text{K}$. Различные методы оценки. Описание результатов нескольких экспериментов и выводы из них.

BESTIMMUNG DES KOMPENSATIONSGRADES IN SILIZIUM DURCH HALL-MESSUNG

P. Gadányi

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird zunächst kurz die angewandte Messtechnik beschrieben und hiernach die mit dieser Technik erzielbare Messgenauigkeit unter besonderer Rücksicht auf die Bestimmung des Kompensationsgrades behandelt. Dann werden aus der für Silizium des Typs N und P zwischen den spezifischen Widerstandsgrenzen von $10^2 \text{—} 10^{-1} \text{ ohmcm}$ im Kompensationsbereich von 1—99% für Bor- und Phosphor-Dotierungen berechneten Kurvenschar die abziehbaren Folgerungen für die Feststellungsmöglichkeiten des Kompensationsgrades im Temperaturbereich von $300 \text{—} 58^\circ \text{K}$ beschrieben. Verschiedene Auswertungsmethoden. Beschreibung einiger Versuchsergebnisse und die daraus zu ziehenden Folgerungen.

* Ez a munka egy részét képezi a BME Villamosmérnöki Karának Félvezető Szakmérnöki tagozata keretében készülő diplomatervek

DETERMINATION OF THE DEGREE OF COMPENSATION IN SILICON, FROM HALL MEASUREMENT

P. Gadányi

Summary

In this paper there is first reviewed in short the measuring technique and subsequently the accuracy of the measurements to be attained with this method is dealt with, with particular respect to the determination of the degree of compensation. Then the conclusions to be drawn on the possibility of the determination of the degree of compensation, in the temperature range from 300° up to 58 °K, from the set of curves computed for boron and phosphorus doping in N- and P-type silicon for the specific resistance range from 10^3 up to 10^{-1} Ohmcm, in the compensation range from 1 up to 99 per cent. Various methods for the evaluation are dealt with and then some experimental results and the conclusions to be drawn therefrom are described.

1. Bevezetés

Az erősáramú célokra szolgáló szilícium egykristályok kutatása során szükségessé vált a szilícium-alapanyag bórszintjének megállapítása. Ez az anyag kompenzációfokának meghatározását jelenti, adott (szobahőmérsékletű) fajlagos ellenállás mellett. A legmegbízhatóbb és legpontosabb módszer a Hall-állandó hőmérsékletfüggésének mérésén alapul. A módszer jól ismert és már sokan [1], [2], [3], [4] tárgyalták mind általánosságban, mind n- és p-típusú szilíciumra. Lényege az, hogy a mind donort, mind akceptort tartalmazó félvezetőkre vonatkozó elméleti hordozósűrűség—hőmérsékletfüggési-görbéket összehasonlítják a Hall-adatokból nyert kísérleti görbével.

2. Kísérleti technika

A Hall-állandóra vonatkozó méréseket 58 °K és 300 °K, ill. 350 °K között végeztük több n-típusú szilícium mintán, amelyek bórszintje 10^{-1} és 10^3 Ω cm között változott. A mintákat egy folyékony N_2 -vel, vagy folyékony levegővel hűtött fém kryosztátba szereltük be, egyébként a mérőberendezés a mérés során betartandó feltételek, valamint a minták alakja és kontaktírozása teljesen megegyezett a [4]-ben leírtakkal. A minta hőmérsékletét egy réz-ellenálláshőmérő mérte. A mágneses teret egy MTA KUTESZ gyártmányú 5×5 cm felületű pofákkal bíró akkumulátortáplálású elektromágnes állította elő, a mágneses teret egy Siemens-gyártmányú Hall-szondával mértük. Minden Hall-mérést 4300...4500 Gs térerősséggel végeztünk. A kontaktusok linearitását (ohmosságát) oszcilloszkópos karakterisztikarajzolóval ellenőriztük szobahőmérsékleten és az elért legkisebb hőmérsékleten. Ezt a hőmérsékletet (58 °K) folyékony N_2 szivattyúzásával értük el.

3. Az elérhető pontosság

A Hall-állandó képlete és egyben mérési utasítása [4]:

$$|R| = \frac{V_H b}{10^{-8} B_z I_x}, \quad (1)$$

ahol R a Hall-állandó (cm^3C^{-1});

V_H a Hall-feszültség (V);

b a minta B_z irányú vastagsága (cm);

B_z a mágneses indukció a mintában (Gs);

I_x a mintán átfolyó áram (A).

A Hall-állandó relatív hibája:

$$\frac{\Delta R}{R} = \sqrt{\left(\frac{\Delta V_H}{V_H}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta B_z}{B_z}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_x}{I_x}\right)^2}. \quad (2)$$

$\frac{\Delta I_x}{I_x}$, $\frac{\Delta V_H}{V_H} = 0,03$ -nak adódik (3%) leolvasási, beállítási és linearitási (ohmossági) hibák összegeződéséből, nagy pontosságú etalonokkal ellenőrizve. $\frac{\Delta b}{b} = 0,05$, becslésünk szerint ez a mikrométerrel történő mérés pontossága, a minta alakjának szabálytalanságai miatt; $\frac{\Delta B_z}{B_z} = 0,1$ ezt a gerjesztőáram beállítási pontatlansága és a minta helyének ki- és beszerelés közötti kisméretű megváltozása okozza a tér inhomogenitása folytán.

Ezek alapján (2)-ből:

$$\frac{\Delta R}{R} = 1,2 \cdot 10^{-1} \quad (12\%)$$

A többször, nagy gondossággal ismételt mérések eltérései alapján megbecsülve is ezt kaptuk. A részletes számítások szerint a hőmérsékletfüggést is figyelembe vevő képletből számolva a hordozósűrűséget, $\frac{\Delta n}{n} = 1,7 \cdot 10^{-1}$ (azaz 17% hiba adódik). A hőmérséklet beállítási pontossága tapasztalataink szerint legalább $\pm 2^\circ\text{K}$. Tehát $\frac{\Delta T}{T} = 0,03$ a legrosszabb esetben. Vagyis a kísérleti és elméleti hordozósűrűség-görbék összeillesztésénél az abszcisszát pontosnak fogadjuk el (tekintve, hogy mérés alatt a hőmérséklet nem változik) az ordinátán pedig egy $\frac{\Delta n}{n} = 0,1$, $n \pm 0,1n$ sávon kívül eső pontokat kell szignifikánsan eltérőknek tekinteni.

A hordozósűrűség a Hall-állandóval az ún. r Hall-faktoron keresztül függ össze [3]:

$$n = \frac{r}{Rq}, \quad (3)$$

$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ és $r = \mu_H / \mu_d$ a Hall- és a drift-mozgékonyság aránya. (4)

A továbbiakban az egyszerűség kedvéért mindig $r = 1$ -et tételezünk fel. Tehát amikor kísérletileg megállapított hordozósűrűségekről beszélünk, mindig $n = \frac{1}{Rq}$ képletből számoltuk ki azokat. (5)

4. Kiértékelési módszerek

Tegyük fel, hogy a mintában csak N_D donor és N_A akceptor van cm^3 -ként, n_0 a szabad elektronok száma cm^3 -ként. A semlegesség egyenlete

$$n_0 + N_A = N_D [1 + \beta_D^{-1} \exp(\varepsilon_D + \eta)]^{-1}, \quad (6)$$

ahol β_D a spin-degenerációs faktor;

$$\varepsilon_D = \frac{E_D}{kT}, \quad (E_D \text{ az ionizációs energia}) \quad (7)$$

$$\eta = \frac{\Phi - E_c}{kT}, \quad (8)$$

(Φ a Fermi-nívó, E_c a vezetési sáv alja és az energiaskála E_V -től E_c felé növekszik, a 0-pont E_c -nél van.)

Ha nincs degeneráció

$$\exp \eta = \frac{n_0}{N_c}, \quad (9)$$

ahol

$$N_c = 2 \left[\frac{2\pi m_c kT}{h^2} \right]^{3/2} \quad (10)$$

a szokásos jelölésekkel:

m_c az elektron effektív tömege;

$k = 1,38 \cdot 10^{-16}$ (erg/fok);

$h = 6,62 \cdot 10^{-27}$ (erg s);

$$\text{és} \quad \frac{n_0(n_0 + N_A)}{N_D - N_A - n_0} = \beta_D N_c \exp(-\varepsilon_D) = K_D. \quad (11)$$

Ezt rendezve egy másodfokú egyenletet kapunk:

$$n_0^2 + n_0(N_A + K_D) - K_D(N_D - N_A) = 0. \quad (12)$$

A megoldás:

$$n_0 = -\frac{N_A + K_D}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_A + K_D}{2}\right)^2 + K_D(N_D - N_A)}. \quad (13)$$

Teljesen hasonlóan írható fel a p-típusú félvezetőre:

$$p_0 = -\frac{N_D + K_A}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_D + K_A}{2}\right)^2 + K_A(N_A - N_D)}, \quad (14)$$

ahol

$$K_A = \beta_A N_V \exp(-\varepsilon_A) = 2\beta_A \left[\frac{2\pi m_V kT}{h^2} \right]^{3/2} \exp\left(-\frac{E_A}{kT}\right). \quad (15)$$

Ezek az egyenletek, nagyon kis hőmérséklettől (amíg degeneráció nem lép fel) érvényesek, amíg az intrinsic vezetés be nem áll.

Nézzük meg e közelítések határait. Teljesen általánosan degenerált esetben is érvényes:

$$n_0 = \int_0^{\infty} f(\varepsilon) g(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (16)$$

ahol $f(\varepsilon)$ a Fermi—Dirac energiacloszlási függvény, $g(\varepsilon)$ pedig az állapotok sűrűsége. A legegyszerűbb esetben

$$g(\varepsilon) = \frac{4\pi(2m^*)^{3/2}}{h^3} \varepsilon^{1/2}, \quad (17)$$

ahol m^* az effektív tömeg, n-típusnál $m^* = m_c$, p-típusnál $m^* = m_v$.

Si-ra: $m_c = 0,33 m_0$, $m_v = 0,6m_0$. (18)

$$n_0 = 4\pi \frac{(2m^*kT)^{3/2}}{h^3} F_{1/2}(\eta). \quad (19)$$

Az $F_j(\eta)$ függvényeket Fermi—Dirac integráloknak nevezik és $-4 \cong \eta \cong 20$ értékei között McDougall és Stoner kiszámították és táblázatba foglalták őket:

$$F_j(\eta) = \frac{1}{\Gamma(j+1)} \int_0^{\infty} \frac{\varepsilon^j d\varepsilon}{1 + \exp(\varepsilon - \eta)}. \quad (20)$$

Ezekre számos közelítő formula található az irodalomban. $-\infty < \eta \cong -2$ között

$$F_{1/2}(\eta) = \exp \eta \quad (21)$$

$\eta = -2$ -nél 5%-os hibával állítja elő a függényt. Ahogy $\eta \rightarrow -\infty$, a hiba csökken. $-2 < \eta < +1,3$ között a legjobb közelítés [5] szerint:

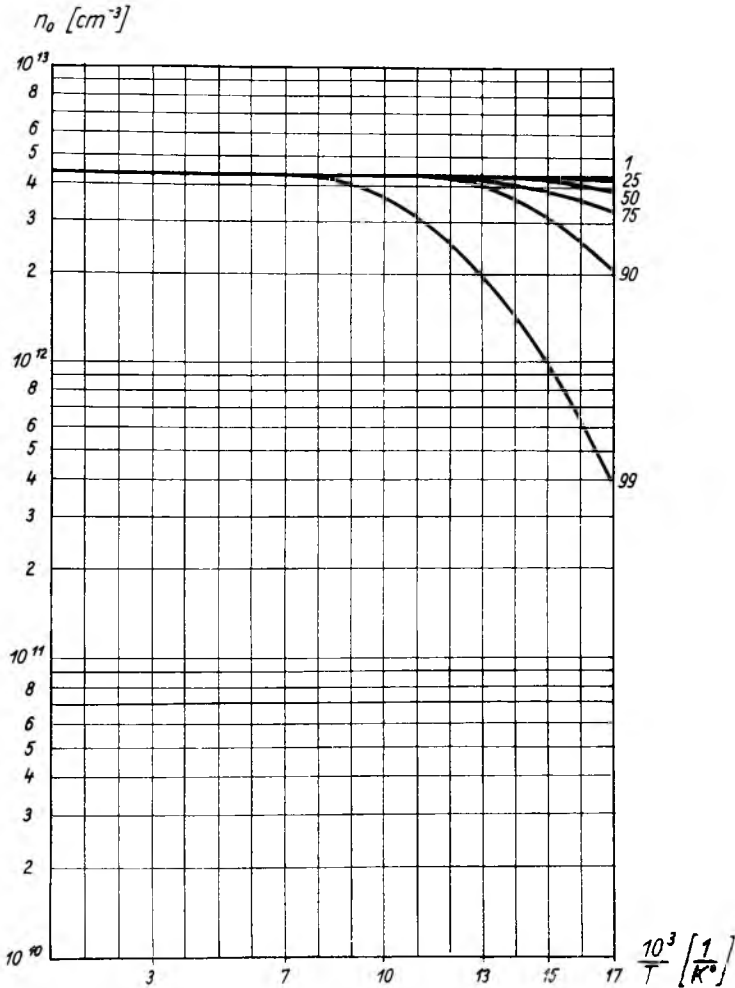
$$F_{1/2}(\eta) = \frac{\exp \eta}{1 + 0,27 \exp \eta}. \quad (22)$$

Egy $m^* = m_0$ effektív tömegű félvezető anyagra [6] szerint a degeneráció szobahőmérsékleten $3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ -nél, 20°K -on pedig $5,5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ -nél kezdődik meg. Szabályként fogadhatjuk el, hogy 10^{17} cm^{-3} hordozókoncentráció fölött nem érvényesek a (9) feltétel alapján egyszerűsített képleteink. Mint később látni fogjuk, szobahőmérsékleten ez a koncentráció kb. $0,1 \Omega \text{cm}$ fajlagos ellenállású szilíciumnak felel meg felső határként. Az intrinsic koncentráció: n_i , 300°K -en $1,01 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, s ha 1% hibát engedünk meg, akkor a koncentráció alsó határa 10^{12} cm^{-3} lesz. Ezt a határt 300°K -on az n-típusú szilícium $44\,000 \Omega \text{cm}$ -nél ($\mu_n = 1425 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) a p-típusú szilícium pedig ($\mu_p = 500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) $122\,000 \Omega \text{cm}$ -nél éri el. Bizonyos hibát követtünk el azonban, amikor nem az intrinsic szilíciumra érvényes ambipoláris mozgékonyaságokat használtuk. Az ezen mozgékonyaságtérések okozta hiba azonban nem befolyásolja azt a tényt, hogy a saját vezetés éppen csak hogy itt fog jelentkezni először.

Visszatérve (6) alapképletünkre, még ismernünk kell $\beta_{A,D}$ és E_D illetőleg E_A értékeit. Nagytisztaságú (többször zónázott) szilíciumra elfogadhatjuk azt a feltevést, hogy a p-típusú kristályok bört, az n-típusúak foszfort tartalmaznak típusmeghatározó szennyezőként.

A bór nívószerkezete alapján szilíciumban [7] szerint $\beta_A = 1/4$, $E_A = 0,0445$ eV foszforra pedig [8] szerint: $\beta_D = 1/2$, $E_D = 0,044$ eV. Mindkét esetben csak az alapállapotot vettük figyelembe.

A kísérleti hordozósűrűség ($1/Rq$) hőmérsékletfüggési görbéit különböző kompenzáció eseteire kiszámolt elméleti görbékkel hasonlíthatjuk össze. Ezért $0,1 \Omega \text{ cm}$ -től $10^3 \Omega \text{ cm}$ -ig terjedő ellenállásértékek között 10 egészszámú hatványainak megfelelő lépésekben vettük a szobahőmérsékleten a megfelelő hordozósűrűségeket és ezekkel, valamint 1—25—50—75—90—99%-os kompenzációkkal, mint paraméterekkel kiszámoltuk az elméleti hordozósűrűségeket a (13), illetve (14) képlet alapján, 6 hőmérsékletre. A képletekben a négyzetgyököt, ha az alábbi feltételek teljesültek, binomiális sorba fejtettük.



18-1. ábra. P-al doppolt n-Si $10^3 \Omega \text{ cm}$

Az ábrán feltüntetett számok a kompenzációfokot adják meg %-ban

Az $\frac{N_A + K_D}{2} = a$, $K_D(N_D - N_A) = x$ jelöléseket bevezetve (13) így írható fel:

$$n_0 = -a + \sqrt{a^2 + x}. \quad (23)$$

Ha $-1 \cong \frac{x}{a^2} \cong 1$:

$$(24)$$

$$a \sqrt{1 + \frac{x}{a^2}} = a \left(1 + \frac{x}{2a^2} - \frac{1}{8} \frac{x^2}{a^4} + \dots \right). \quad (25)$$

Ekkor $n_0 \approx \frac{x}{2a} = \frac{K_D(N_D - N_A)}{N_A + K_D}$, (26)

csak az első két tagig menve el a sorbafejtésben.

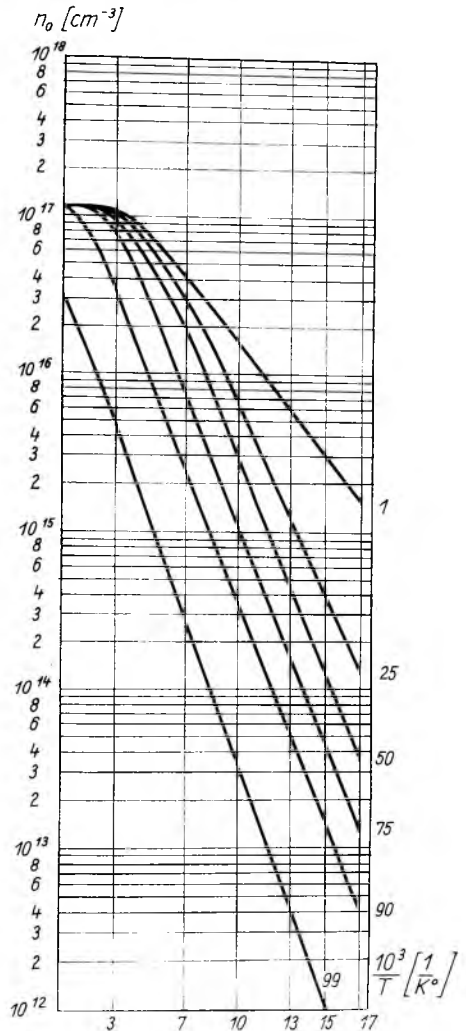
A görbeseregek alapjául szolgáló hordozósűrűségek kiszámítását a következőképpen végeztük. A [9] 527. oldalán látható ábrából a névleges vezetőképességhez szobahőmérsékleten tartozó N_D -t, ill. N_A -t kikerestük, majd az 529. oldalon látható görbéből a hozzátartozó mozgékonyságokat megállapítottuk. Ezekkel a most már „névleges”-nek tekintett mozgékonyságokkal az adott fajlagos ellenállás lépéseknél a pontos hordozósűrűségeket kiszámoltuk, s ezek szolgáltak az elméleti hordozósűrűség—hőmérséklet-görbék kiindulási alapjául. Ezek, mint láttuk az érvényességi határon belül vannak degeneráció és sajátvezetés szempontjából. Az alábbiakban néhányat bemutatunk e görbeseregek közül.

A görbeseregekből megállapítható, hogy az adott hőmérséklet határok között 75% alatti kompenzáció $10^3 \Omega \text{cm}$ fajlagos ellenállású n-típusú foszfortartalmú szilíciumon nem mérhető. Nagyobb fajlagos ellenállás esetén tehát kisebb hőmérsékleten kell mérni. A p-típusú börtartalmú szilíciumnál a helyzet valamivel kedvezőbb. Megállapítható továbbá az is, hogy a szennyezéskonzentrációt növelve, ilyen hőmérséklettartományban is lehetséges az ionizációs energia mérése a görbe kis hőmérsékletre vonatkozó, egyenes szakaszából.

Ekkor az alábbi egyszerű közelítés alkalmazható (26) alapján:

$$K_D \ll N_A, \quad K_D \ll N_D, \quad (27)$$

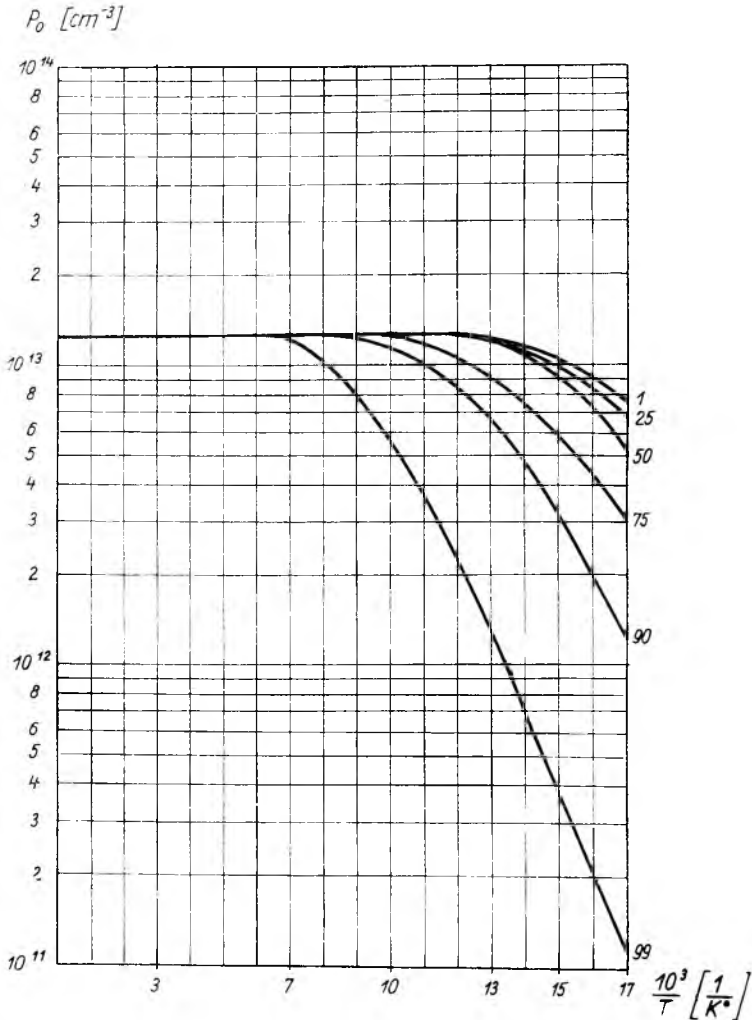
$$n_0 = \frac{K_D(N_D - N_A)}{N_A}. \quad (28)$$



18-2. ábra. P-al doppolt n-Si $10^{-1} \Omega \text{cm}$ Az ábrán feltüntetett számok a kompenzációfokot adják meg %-ban

A $\ln n \approx f(1/T)$ görbe lineáris szakaszára (28) alkalmazható és segítségével az E_D ionizációs energia is számolható.

A teljesen exakt kiértékelés éppen ennek alapján történhet. A szobahőmérsékletű szakaszból megállapíthatjuk $N_D - N_A$ -t, majd (28) alapján E_D -t, ezután (28)-ból $N_D - N_A$ és E_D ismeretében N_A -t számítjuk ki. Ezt a kiértékelési módszert az általunk használt hőmérséklet-tartományban már $10^3 \Omega\text{cm}$ fajlagos ellenállásnál sem alkalmazhatjuk, kis kompenzáció foknál. Ezért célszerű a fentebb már említett elméletileg kiszámított görbéket felrajzolva, azokat grafikusán összevetni a tapasztalattal. Így egy gyors és gyakorlatban jól használható becslő módszert nyerünk, feltéve, hogy a szennyezőt ismerjük.



18-3. ábra. B-al doppolt p-Si $10^8 \Omega\text{cm}$

Az ábrán feltüntetett számok a kompenzációfokot adják meg %-ban

Egy még gyorsabb és egyszerűbb kiértékelési módszer (amelynél a szennyezőt szintén ismertnek fogadjuk el) a következő: a tapasztalati hordozósűrűség—hőmérséklet-görbének csak a két végpontját tekintjük. A T_1 szobahőmérsékleten:

$$n_0(T_1) = N_D - N_A = n_{01}. \quad (29)$$

A T_2 legmélyebb hőmérsékleten:

$$n_0(T_2) = n_{02} = -\frac{N_A + K_{D2}}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_A + K_{D2}}{2}\right)^2 + n_{01} K_{D2}}. \quad (30)$$

Itt $K_D(T_2) = K_{D2}$ -t ismertnek tételezzük fel (30)-ból, ekkor

$$N_A = K_{D2} \left(\frac{n_{01}}{n_{02}} - 1 \right) - n_{02}, \quad (31)$$

$$N_D = n_{01} + N_A. \quad (32)$$

A kompenzációfok pedig:

$$K = \frac{N_A}{N_D} 100 = \frac{100}{1 + \frac{n_{01}}{N_A}} = \frac{100}{1 + \frac{n_{01}}{K_{D2} \left(\frac{n_{01}}{n_{02}} - 1 \right) - n_{02}}}. \quad (33)$$

Ez a módszer különösen n_{01} és n_{02} kis eltérései esetén, vagyis kis kompenzációfokoknál ad pontos eredményt.

Egy másik egyszerű eljárás Lee-től származik [1]. Itt szintén ismerni kell a szennyező atom fajtáját. Kiszámítjuk azon T_0 hőmérsékletet, ahol

$$K_D = N_D - N_A. \quad (34)$$

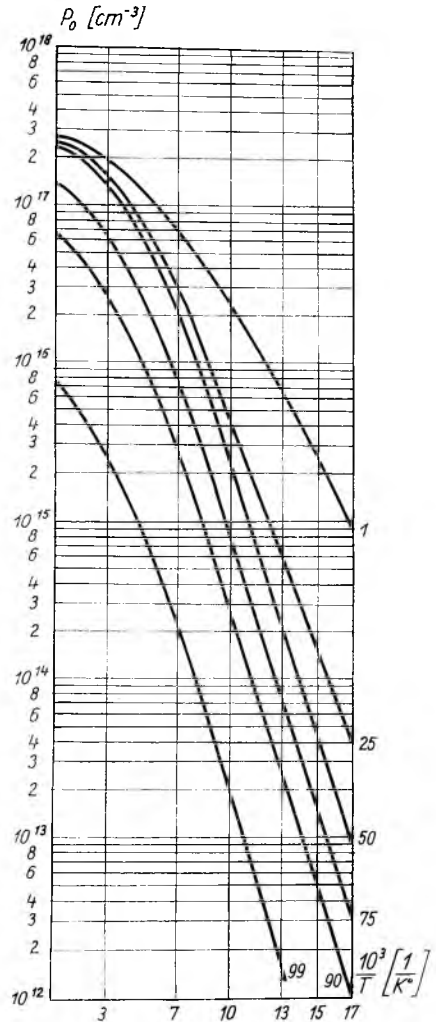
Megkeressük a kísérleti hordozósűrűség-görbe ezen hőmérséklethez tartozó értékét, jelöljük ezt n_{03} -mal:

$$n_0(T_0) = n_{03}. \quad (35)$$

Ekkor:

$$N_D = \frac{K_D^2 - n_{03}^2}{n_{03}}. \quad (36)$$

Ez a módszer 50% alatti kompenzációknál ad pontos eredményt és egy közbenső



18-4. ábra. B-al doppolt p-Si $10^{-1} \Omega \text{ cm}$,

Az ábrán feltüntetett számok a kompenzációfokot adják meg %-ban

hőfoktartományra érvényes közelítésen alapszik, ahol

$$N_D \gg N_A \quad (37)$$

vagy pontosabban:

$$N_D - N_A \gg K_D \quad \text{és} \quad K_D \gg N_A. \quad (38)$$

Ebben az esetben:

$$\frac{4K_D(N_D - N_A)}{(K_D + N_A)^2} \gg 1 \quad (39)$$

és így

$$n = [K_D(N_D - N_A)]^{1/2}. \quad (40)$$

Ennek az $N_D - N_A$ egyenessel való metszése adja a T_0 pontot és a (13)-mal együtt ebből kapjuk a (36) egyenletet.

Végül egy különleges eljárásról tegyünk említést [7], amelyhez a vezetőképesség hőmérsékletfüggésének ismerete is szükséges. E módszernél a Hall-faktor hőmérsékletfüggését leválasztjuk a Hall-adatokról és így a szennyezőnívók kiürítését tisztán elkülönítve kapjuk meg. Itt speciális — közvetlen a telítési érték közelébe eső — hőmérsékletekre érvényes közelítést alkalmazunk. A (13) megoldást újra felírva a $K_D \gg N_A$ és $K_D \gg 4(N_D - N_A)$ feltétellel és binomiális sorfejtést alkalmazva kapjuk:

$$n \approx (N_D - N_A) \left(1 - \frac{N_A}{K_D} \right). \quad (42)$$

Vegyük mindkét oldal logaritmusát:

$$\ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \dots \quad (43)$$

A (43) sorból csak az első tagot véve figyelembe:

$$\ln \frac{n}{N_D - N_A} = -\frac{N_A}{K_D}. \quad (44)$$

R és r szobahőmérsékletre vonatkozó értékei legyenek R_0 és r_0 . Ekkor

$$N_D - N_A = \frac{r_0}{R_0 q} = n_0 \quad (45)$$

és

$$\ln \frac{n_0}{n} = \ln \frac{r_0}{R_0} - \ln \frac{r}{R} = \frac{\exp - \frac{E_0}{kT} \left(\frac{T}{300} \right)^{3/2}}{2,51 \cdot 10^{19} \sum_i \left(\frac{g_i}{g_0} \right) \exp \frac{E_i - E_0}{kT}}, \quad (46)$$

ahol E_0 a dónor nívószerkezetében az alapállapot, az E_i -k pedig rendre az 1, 2, ... gerjesztett állapotok energiái, a g_i -k pedig a hozzájuk tartozó spinfaktorok. A gerjesztett állapotoktól eltekintve, ha r hőmérsékletfüggését ismernénk, R hőmérsékletfüggéséből E_0 meghatározható lenne, ekkor pedig N_A szintén meghatározhatóvá válik. Az r Hall-faktor hőmérsékletfüggésére feltesszük, hogy

$$r = r_0 \left(\frac{T}{300} \right)^\alpha \quad (47)$$

alakú. A szobahőmérsékletű mozgékonyosság értékét feltételezve, r_0 kiszámítható, az α kitevő pedig:

$$r = \frac{\mu_H}{\mu_d} \approx T^\alpha. \quad (48)$$

A (48) összefüggés alapján $\mu_H = R\sigma$ és σ görbékből grafikusán meghatározható. Itt σ -ra feltesszük, hogy

$$\sigma(T) = qn \cdot \mu_H(T), \quad (49)$$

tehát σ hőmérsékletfüggése tisztán a mozgékonyosság hőmérsékletfüggéséből származik. Mint előzőleg láttuk, ha az anyag alacsony kompenzációfokú és ha a hőmérséklettel nem megyünk lejjebb, mint kb. 150 °K, ez mindig teljesül. E módszer egyrészt igen nagy pontosságú méréseket kíván, mert a (46) képleten alapuló kiértékelési eljárás a kísérleti görbék szórását kinagyítja, másrészt bonyolultabb, mint az eddigiek, mert σ -t is kell mérni.

5. Az eredmények analízise

A mért Hall-állandókból $n_0 = \frac{1}{Rq}$ képlettel kiszámítottuk a hordozósűrűséget és ezt, mint $10^3/T$ függvényét lin—log papíron ábráztuk. Ilyen mérési eredmények láthatók az A₂, A₄-gyel jelzett mintákon. Az ábrák alapján megállapítható a becslött kompenzációfok (foszfor szennyező esetén), $N_D - N_A$, ezekből pedig N_D és N_A .

Az alábbi táblázatban összegeztük N_D , N_A , a borszintre jellemző fajlagos ellenállás (ρ_n) és a minták mért fajlagos ellenállása (ρ_n) értékét. A kompenzációfokot a (33) képlet segítségével számítottuk ki.

18-1. táblázat

Minta	N_A cm ⁻³	N_D cm ⁻³	ρ_p Ωcm	ρ_n Ωcm	$K = \frac{N_A}{N_D} 100$ %
A ₂	$5,7 \cdot 10^{12}$	$1,97 \cdot 10^{13}$	2200	440	29,4
A ₄	$5,5 \cdot 10^{12}$	$1,58 \cdot 10^{13}$	2273	425	34,8

A 18-7. ábrán egy SA jelű mintán végzett mérés és annak kiértékeléséhez szükséges segédgörbék láthatók.

A mintát csak a $10^3/T$: 0—6 tartományban értékeltük ki, de kimértük $10^3/T = 17$ -ig. Itt a szokásos viselkedést mutatja (közepes kompenzáció), ezért ezzel most nem foglalkozunk. Érdekes azonban a minta szobahőmérséklet körüli viselkedése. Ezt a viselkedést csak két, különböző ionizációs energiájú dónorral lehet megmagyarázni. A kísérleti görbe kiértékelését [10] alapján végeztük el. A kiértékelés alapjául szolgáló elméleti modell a 18-8. ábrán látható.

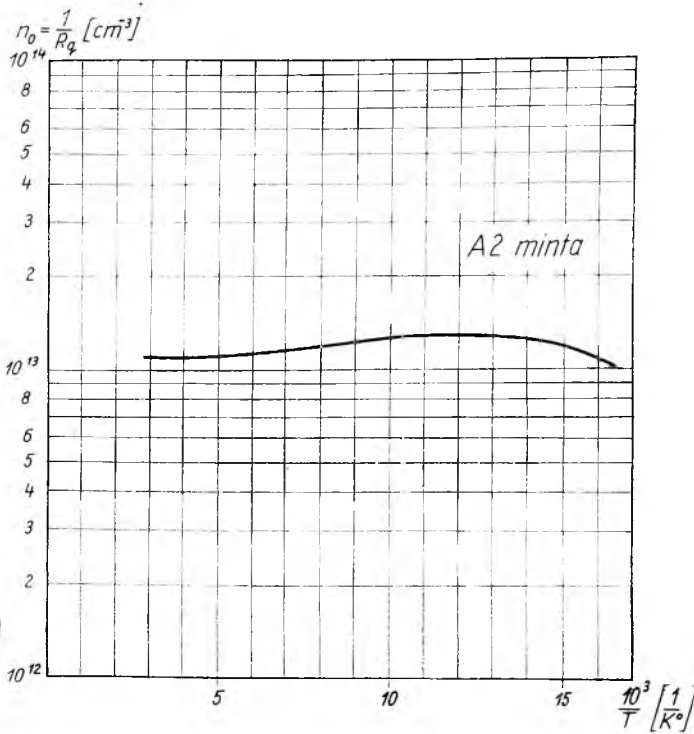
A 18-8. ábra $T=0$ °K-on ábrázolja a viszonyokat. A semlegességi egyenlet:

$$n_0 = N_c \exp \eta = N_{D1} - N_A - N_{D1} [1 + \beta_1 \exp -(\epsilon_{D1} + \eta)]^{-1} + \quad (49)$$

$$+ N_{D2} [1 + \beta_2^{-1} \exp (\epsilon_{D2} + \eta)]^{-1},$$

ahol a jelölések a (6) jelöléseivel egyeznek.

A (48) felírása kissé eltér (6)-tól annyiban, hogy a 2-es nívónál a szokásos be nem töltöttségi valószínűséget írtuk fel, az 1-es nívónál pedig levontuk a betöltöttségi valószínűségeket.



18-5. ábra. A2 minta $n_0 = \frac{1}{Rq} = f\left(\frac{10^3}{T}\right)$ görbeje

A (49) megoldása harmadfokú egyenletre vezet a szokásos nemdegenerált esetben. A harmadfokú egyenlettel való bajlódást közelítő képletek alkalmazásával kerüljük el, amelyek csak a kísérleti görbe egyes szakaszait állítják elő. Kiindulásul szükségünk van az E_{D2} energiára. Mint azt [10]-ben részletesen tárgyalták, ennek pontos megállapítása igen nehéz feladat. Mi az $n_0 - (N_{D1} - N_A)$ görbe iránytangenséből számoltuk ki E_{D2} -t. Amint az a 18-7. ábrán látható, a görbéhez érintőt húztunk. Az érintési pontot az n_0 görbének a

$$\beta_2 N_c \exp - \frac{E_{D2}}{kT} = N_{D1} - N_A \quad (50)$$

egyenletet kielégítő hőmérsékletű pontjából levetítve az $n_0 - (N_{D1} - N_A)$ görbére kaptuk meg. Ebben a pontban húztuk meg azután a görbéhez az érintőt. Az n_0 görbe vízszintesbe fut be kis hőmérsékleten, s ennek értéke éppen $N_{D1} - N_A$. Nagy hőmérsékleten a görbe $N_{D2} + N_{D1} - N_A$ -ba fut be. Tehát az n_0 görbéből és a belőle rajzolt $n_0 - (N_{D1} - N_A)$ görbéből N_{D2} , $N_{D1} - N_A$ és E_{D2} is meghatározható. Most már csak az egyes közelítő képletek alapján kiszámolt görbedarabok minél jobb illesztése szükséges a kísérleti n_0 görbéhez.

Az n_0 görbe egyes szakaszai az alábbiakkal közelíthetők (csökkenő hőmérséklet irányába haladva):

$$n_0 = N_{D2} + N_{D1} - N_A, \quad \text{ha} \quad \beta_2 N_c \exp\left(-\frac{E_{D2}}{kT}\right) \gg N_{D1} - N_A; \quad (51)$$

$$n_0 = \sqrt{(N_{D2} + N_{D1} - N_A)(N_{D1} - N_A)}, \quad \text{ahol} \quad \beta_2 N_c \exp\left(-\frac{E_{D2}}{kT}\right) = N_{D1} - N_A; \quad (52)$$

$$n_0 = (N_{D1} - N_A) + \frac{2N_{D2} + N_{D1} - N_A}{2(N_{D1} - N_A)} \beta_2 N_c \exp\left(-\frac{E_{D2}}{kT}\right), \quad (53)$$

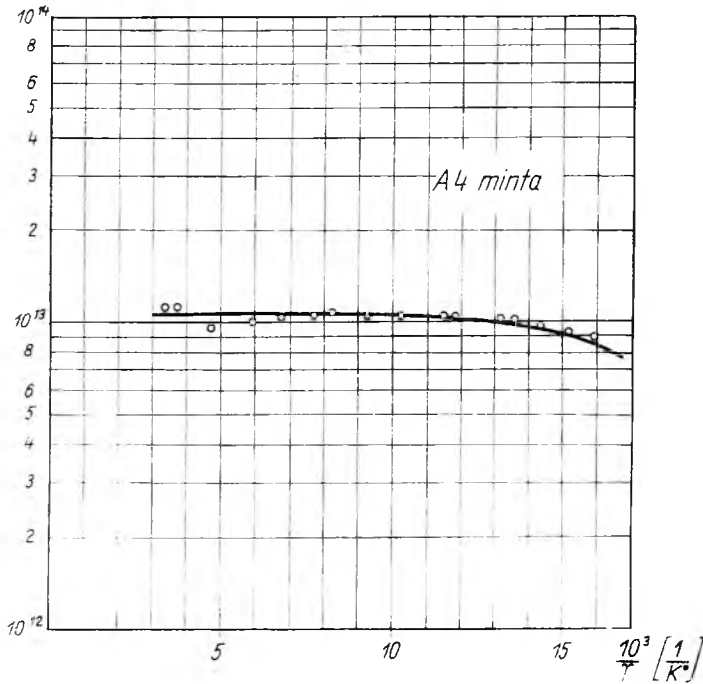
ha

$$\beta_2 N_c \exp\left(-\frac{E_{D2}}{kT}\right) = N_{D1} - N_A;$$

$$n_0 = \frac{N_{D1} - N_A - \beta_2 N_c \exp\left(-\frac{E_{D2}}{kT}\right)}{2} + \quad (54)$$

$$+ \frac{1}{2} \sqrt{\left[\beta_2 N_c \exp\left(-\frac{E_{D2}}{kT}\right) - (N_{D1} - N_A)\right]^2 + 4\beta_2 N_c \exp\left(-\frac{E_{D2}}{kT}\right) (N_{D2} + N_{D1} - N_A)},$$

$$n_0 = \frac{1}{Rq} \text{ [cm}^{-3}\text{]}$$



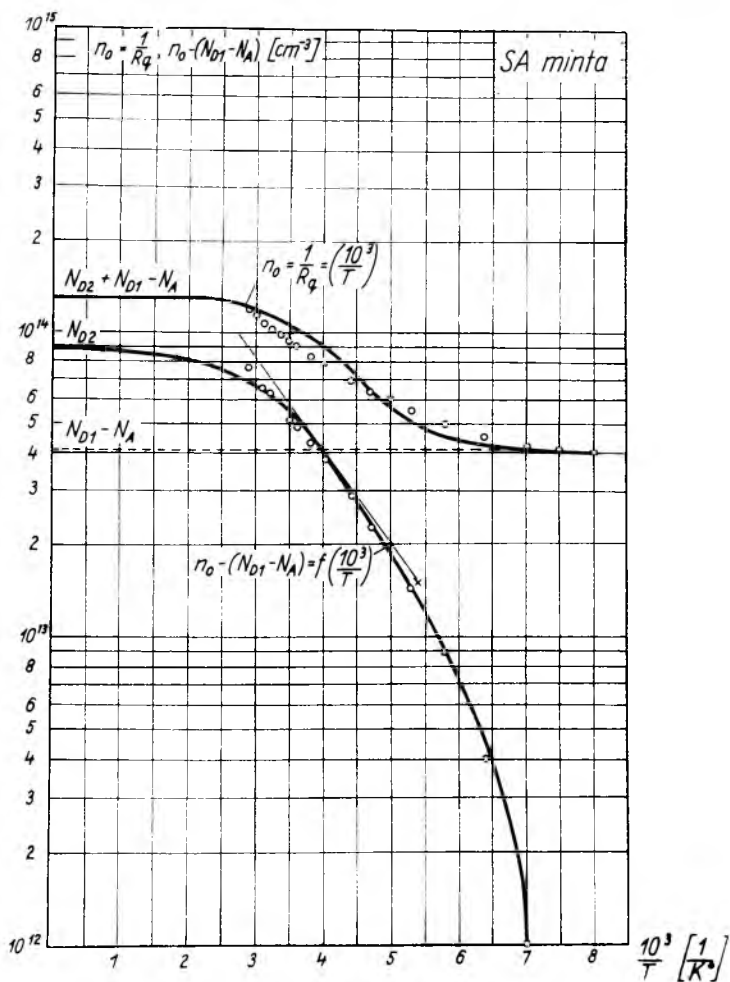
18-6. ábra. A4 minta $n_0 = \frac{1}{Rq} = f\left(\frac{10^3}{T}\right)$ görbéje

ha a gyök alatti összeg két tagja összemérhető nagyságú;

$$n_0 = N_{D1} - N_A, \quad \text{ha} \quad \beta_1 N_c \exp - \frac{E_{D1}}{kT} \gg N_{D1} - N_A; \quad (55)$$

$$n_0 = \sqrt{\beta_1 (N_{D1} - N_A) N_c} \exp - \frac{E_{D1}}{2kT}, \quad \text{ha} \quad \beta_1 N_c \exp - \frac{E_{D1}}{kT} \approx N_{D1} - N_A; \quad (56)$$

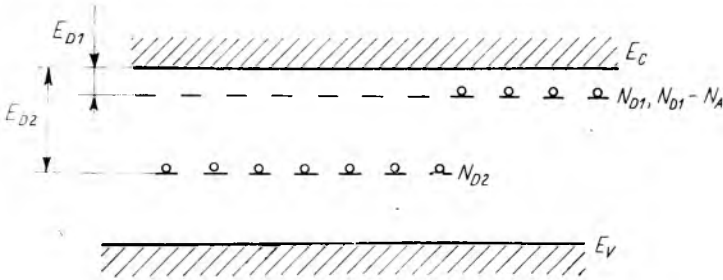
$$n_0 = \beta_1 N_c \exp - \frac{E_{D1}}{kT} \cdot \frac{N_{D1} - N_A}{N_A}, \quad \text{ha} \quad \beta_1 N_c \exp - \frac{E_{D1}}{kT} \ll N_A, N_{D1}. \quad (57)$$



18-7. ábra. SA minta $n_0 = \frac{1}{Rq} = f\left(\frac{10^3}{T}\right)$ görbéje

Az (55), (56), (57) képleteket a számításokhoz nem használtuk fel, csak a teljesség kedvéért írtuk fel őket. Az E_{D2} kiszámítható az $n_0 - (N_{D1} - N_A)$ görbéhez húzott érintő két pontjából az alábbi képlet segítségével:

$$10^3 \frac{d \ln n}{d \left(\frac{10^3}{T} \right)} = - \frac{1}{2} \left(\frac{E_{D2}}{k} + \frac{3}{2} T \right). \quad (58)$$



18-8. ábra. Az SA minta sávszerkezeti modellje

Az E_{D2} magából az n_0 -görbéből is megállapítható a (58) képlettel [10] alapján, ha az $n_0 - (N_{D1} - N_A)$ görbe meredeksége túl kicsi:

$$E_{D2} = 10^3 \frac{d \ln n}{d \left(\frac{10^3}{T} \right)} \cdot \frac{2k}{\left[1 - \frac{N_{D1} - N_A}{\sqrt{(N_{D2} + N_{D1} - N_A)(N_{D1} - N_A)}} \right]} - \frac{3}{2} kT. \quad (59)$$

Ezzel az energiával megpróbáltuk az (51), (52), (53) és (54) képletek segítségével n_0 -t előállítani. A 18-7. ábrán a folytonos vonal jelzi az n_0 görbéhez elméletileg kiszámított közelítést, a körök pedig a mérési pontokat jelentik. A legjobb egyezést az alábbi adatokkal kaptuk.

18-2. táblázat

E_{D2} eV	N_{D2} cm ⁻³	$N_{D1} - N_A$ cm ⁻³	β_2
0,172	$8,9 \cdot 10^{13}$	$4,1 \cdot 10^{13}$	1/4

6. Következtetések

Az A2 és A4 minta Hall-mérési görbéiből megállapítható, hogy az adott tisztaságú mintákon egy elért legmélyebb hőmérsékleten a dónornívók deionizációja éppen kimutatható, de ionizációs energia nem állapítható meg, itt feltevésekre vagyunk utalva. Emiatt a megállapított kompenzációfok is kérdésessé válik. Az n_0 görbék felhajlása a szobahőmérsékleten az irodalomból ismert jelenség [3], különösen nagy-tisztaságú mintákon és r hőmérsékletfüggésével magyarázható.

Az SA-minta mérési eredményei alapján egy közösleges sekély dónor-szennyezőre és egy mélyen fekvő nívóra lehet következtetni. Miután ez az ionizációs energia egyetlen általunk ismert nívóval sem egyezik meg teljesen, gerjesztett nívóra vagy diszlokáció okozta nívóra is lehet gondolni. A fentieket alátámasztja az a tény is, hogy az SA jelű kristály nem felelt meg erősáramú célokra. A kompenzációfok megállapítása Hall-mérésből tehát lehetséges a $10^{-1} \dots 10^3 \Omega\text{cm}$ fajlagos ellenállású szilícium egykristályok esetében, azzal a kikötéssel, hogy a magasabb fajlagos ellenállások esetén indokolt vagy a mélyebb hőmérséklet használata, vagy a típus szennyező fajtájának ismerete. A 18-7. ábrán látható viselkedés kétdónoros modellel leírható. Ennek alapján Hall-mérésből olyan nehézfém-koncentrációk is mérhetők és nehézfémek azonosíthatók, amelyet más úton csak igen nagy nehézséggel, vagy egyáltalán nem lehetne megmérni.

7. Köszönetnyilvánítás

Az elvégzett munka támogatásáért elsősorban Molnár István laboratóriumvezetőnek, az egykristályok készítéséért Török Tivadar tudományos munkatársnak, a mérések elvégzésében nyújtott segítségért Jámbor Kornél, Túrós György és Hargitai Gábor technikusoknak, a minták kontaktírozásában nyújtott segítségért Salánki Tibor tudományos osztályvezetőnek és Jókuthy Zoltán tudományos munkatársnak, a minták kivágásában nyújtott segítségükért Zanati Tibor (Egyesült Izzólámpa Rt.) és Szebeni Péter (MÜFI, MTA) tudományos kutatóknak tartozom köszönettel. Végül, de nem utolsósorban a munka elméleti részében nyújtott segítségéért és az értékes tanácsokért Beleznyay Ferenc (MÜFI, MTA) tudományos kutatónak köszönetemet fejezem ki.

Irodalom

- [1] Lee, P. A.: Brit. J. Appl. Phys. **8**, (1957) p. 340.
- [2] Putley, E. H.: Proc. Phys. Soc. (London) **72**, (1958) p. 917.
- [3] Long, D.—Myers, J.: Phys. Rev. **115**, (1959) p. 1107.
- [4] Dr. Giber J.—Andrási A.—Puskás L.—Szölgyémi L.: Félvezető laboratóriumi praktikum. II. Budapesti Műszaki Egyetem. Villamosmérnöki kar, Szakmérnöki tagozat. MTI. V. 61. 162—178. old.
- [5] Blakemore, J. S.: Semiconductor Statistics. Pergamon Press, 1962. p. 359—360.
- [6] Putley E. H.: The Hall effect and related phenomena. London Butterworths, 1960. p. 91.
- [7] Ultrapurification of Semiconductor Materials. Proceedings of the Conference on Ultrapurification of Semiconductor Materials Boston, Massachusetts. April 11—13, 1961.) Edited by M. S. Brooks and J. K. Kennedy. p. 401.
- [8] Long D.—Myers J., Phys. Rev. **115**, (1959) p. 1119.
- [9] Dr. Szép I.—dr. Giber J.: Félvezetőeszközök konstrukciója és technológiája, 527. és 529. old.
- [10] Vítovszkij, N. A.—Masovec, T. V.—Rivkin, Sz. M.: Fizika Tvjordovo Tyela. **4**, (1962) p. 2849.

19.

Szilícium egykristályok készítése függőzónás egykristályhúzó gépen

TÖRÖK TIVADAR

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk szilícium egykristályok előállításának egy olyan módszerét tárgyalja, ami lehetővé teszi kis diszlokáció sűrűségű szilícium egykristályok előállítását függőzónás egykristályhúzó gépen. Az eljárás lényege, hogy kis átmérőjű magkristályokat használ, amikre nagy növesztési sebességgel indítja a húzást, és 30° -nál kisebb vállszöggel — a húzási sebesség folyamatos csökkentése mellett — éri el az állandó kb. 20 mm-es átmérőt.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ В МАШИНЕ ДЛЯ БЕСТИГЕЛЬНОЙ ЗОННОЙ ПЛАВКИ.

T. Török

Резюме

В статье рассматривается такой метод получения кремниевых монокристаллов, который позволяет изготовить кремниевые монокристаллы маленьких плотности дислокации в машине для бестигельной зонной плавки. Существо процесса заключается в том, что используются ядра кристаллов с небольшим диаметром, на которое производится наращивание при большой скорости и при угле плеча менее 30° и при постоянном уменьшении вытяжной скорости достигается постоянный диаметр прилб. 20 мм.

HERSTELLUNG VON SILIZIUM-EINKRISTALLEN MIT TIEGELFREIEN ZONENSCHMELZMASCHINE

T. Török

Zusammenfassung

Die Arbeit behandelt eine Methode, die die Herstellung von Silizium-Einkristallen mit geringer Dislokationsdichte ermöglicht mit tiegelfreien Zonenschmelzmaschine. Das wesentliche des Verfahrens besteht darin, dass Impfkristalle geringen Durchmessers verwendet werden, auf welche das Schmelzen mit hoher Geschwindigkeit der Kristallzüchtung eingeleitet wird und die Kristalle bei stetiger Verminderung der Schmelzgeschwindigkeit mit einem Kegelöffnungswinkel kleiner als 30° den konstanten Durchmesser von etwa 20 mm erreichen.

PRODUCTION OF SILICON MONOCRYSTALS ON A FLOATING-ZONE CRYSTAL DRAWING MACHINE

T. Török

Summary

The paper describes a method of producing silicon monocrystals, by the aid of which, silicon monocrystals of low dislocation density can be produced on a floating-zone crystal drawing machine. The main part of the process is the application of crystal seeds with small diameter, and the crystal growth starts with a high speed and the constant diameter of about 20 mm is reached with a shoulder angle less than 30° (continuously decreasing the drawing speed).

Az erősáramú célokra felhasznált szilícium egykristályokkal szemben támasztott egyik fontos követelmény az alacsony diszlokáció-sűrűség, és annak egyenletes eloszlása a kristály keresztmetszetében. Alacsony diszlokáció-sűrűségű kristályok készítésére Czochralski módszere volna alkalmas, ez gyakorlatilag hibahelymentes kristályok előállítását is lehetővé teszi. A kvarctégelyből történő húzásnál azonban a nemkívánatos szennyezők leoldódása a tégely anyagából, és a megfelelő kristály-átmérő elérése jelent nehézséget. A szilícium piederesztálról való húzással, bár a tégely szennyező hatását kiküszöböljük, a megfelelő átmérő nehezen érhető el [1].

Megfelelő tisztaságú és átmérőjű szilícium egykristályokat az úgynevezett függőzónás módszerrel lehet előállítani, de ennél a módszernél általában a diszlokáció-sűrűség igen magas ($4 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^5$ hibahely/cm²) [3], [4].

A következőkben egy olyan módszert fogunk tárgyalni, amellyel sikerült $6 \cdot 10^3 \dots 1,5 \cdot 10^4$ hibahely/cm² diszlokáció-sűrűségű szilícium egykristályokat előállítani közönséges függőzónás egykristályhúzó gépen, noha a húzásokhoz felhasznált magkristályok nem voltak különösen jó minőségűek.

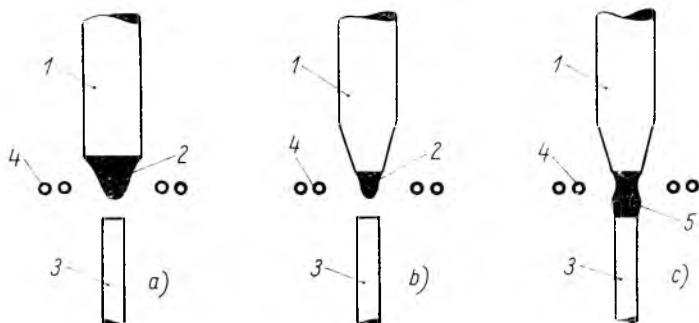
A berendezés, amin a kísérleteket végeztük, egy Radyne gyártmányú függőzónás zónázó és egykristályhúzó berendezés, amit átalakítottunk úgy, hogy a szilíciumrúd és a nagyfrekvenciás fűtőkercs közös vákuumtérben helyezkedik el. Ez az elrendezés lehetőséget nyújt a kristálynövesztés jó megfigyelésére, és előnyös a nagyfrekvenciás hevítés szempontjából is. A nagyfrekvenciás generátor 12 kW bemenő teljesítményű, 4 MHz frekvencián működik; az induktor kétmenetes tányértékercs, 3 mm külső átmérőjű rézcsőből hajlítva. A vákuumot egy olajdiffúziós szivattyú biztosítja, amely a munkatérben $5 \cdot 10^{-5}$ torr-nál jobb vákuumot állít elő.

A módszer lényege a következő: A kristályt a függőzónás berendezés lehetőségeihez képest igen kis átmérőjű magkristályra húzzuk, és a húzási előtolások optimális megválasztásával minimális görbültségű szilárd—folyadék határfelület kialakítására törekszünk. A kis magkristályátmérő kis kezdeti diszlokációforrást jelent, és egyben megakadályozza a diszlokációk felszaporodását a magkristályban, a húzás elindítása előtti szakaszban. Ez az alábbiakkal indokolható. A diszlokációk keletkezéséért a függőzónás egykristályhúzás során a nehezen befolyásolható sugár és tengelyirányú hőmérsékletgradienseket tehetjük felelőssé, amelyek főleg a húzási folyamat megindítása előtt, görbült folyadék—szilárd határfelületet, és ezzel összefüggésben mechanikai feszültségeket eredményeznek [4], [5], [6]. (A mechanikai feszültségek a diszlokációk felszaporodásához vezetnek.)

Az olvadék—szilárd határfelület alakját Braun és Pellin [6] szerint a nagyfrekvenciás hevítés skinmélysége és a befagyó szilícium által leadott fagyáshő határozza meg. Mint ismeretes, a határfelület alakját a megfagyó szilícium mennyiségével, azaz a kristály növesztési sebességével befolyásolhatjuk. Álló zóna esetén azonban — pl. a szilícium rúd átolvasztásakor — a határfelület alakját csak a skinmélység befolyásolja. Ebben az esetben megfelelően sík határfelületet csak akkor kaphatunk, ha a kristályátmérő közel egyezik a skinmélység kétszeresével. 4 MHz-es nagyfrekvenciás hevítésnél a skinmélység, irodalmi adatok szerint, kb. 1 mm [6].

A húzási kísérletekhez magkristálynak a rendelkezésünkre álló, függőzónás módszerrel készült egykristályokat használtuk. Ezek diszlokáció-sűrűsége $3 \cdot 10^4$ /cm³ körüli érték volt. A húzáshoz ezeket $4 \times 4 \times 80$ mm-es négyzet alapú hasábokra szeleteltük. A magkristályok kivágásakor gondosan ügyeltünk arra, hogy az [111] irány a hasáb tengelyébe essen. A magkristályok felületéről a vágás okozta sérüléseket Dash [2] szerint 1:3:6 arányú HF:HNO₃:jégecet eleggyel eltávolítottuk, majd kémiaileg políroztuk őket 1:3 arányú HF:HNO₃ elegyben.

A feldolgozásra kerülő polikristály átmérője 19...20 mm. A magkristály és a polikristály nagy átmérőkülönbsége miatt a két darab összeolvasztásakor a következőképpen járunk el. A polikristály mag felőli végére egy akkora szilícium cseppet olvasztunk, amekkorát az olvadék felületi feszültsége még elbír (19-1a ábra), majd a cseppet a fűtőtekercsből való lassú kihúzással részben bedermesztjük. Így a polikristály vége kúposan elkeskenyedik és a végén egy olvadt csepp marad (19-1b ábra). Ebbe az olvadt cseppbe mártjuk bele az áttisztított magot, és a nagyfrekvenciás teljesítmény megfelelő beállításával kialakítjuk az olvadt zónát a mag és a polikristály között (19-1 c ábra).

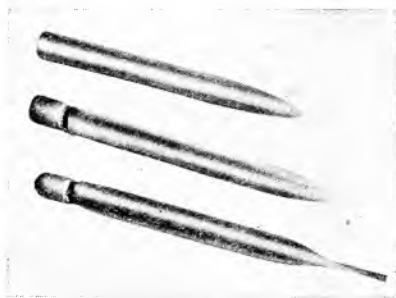


19-1. ábra. A polikristály összeolvasztása a maggal
1 szilícium polikristály; 2 olvadt szilícium csepp; 3 magkristály;
4 induktortekercs; 5 olvadt zóna

Rövid várakozási idő után — amire az egyensúlyi szilárd—folyadék határfelület kialakulásához van szükség — megindíthatjuk az előtolást, és közben a polikristály emelésével vagy süllyesztésével a zóna alakját és méretét úgy szabályozzuk, hogy néhány milliméter hosszú, 2...3 mm átmérőjű nyak után, a befagyó rész átmérője lassan növekedjék.

A kristálynövesztés szempontjából a magkristály és polikristály között igen menetelesen változó átmérő volna előnyös, míg gyors átmérváltoztatással hosszabb, az eszközkészítő által használható átmérőjű kristályt kapnánk. A gyakorlat azt mutatja, hogy 30°-nál nagyobb válszöggel nem érdemes növelni a kristályátmérőt, mivel a gyors átmérváltozás erősen befolyásolja a szilárd—folyadék határfelület alakját, és a diszlokációk szaporodásán kívül makroszkopikus kristályhibák képződéséhez vezethet, továbbá nehézségeket okoz az indukciós fűtés szabályozásában is.

A növesztés sebessége a nyakon nagy (35...40 cm/h), az átmérő növekedtével fokozatosan csökkentjük; az állandó 19...20 mm-es átmérő elérésekor 16...18 cm/h, és változatlan marad a zóna bedermesztéséig. A 19-2. ábra, három, ezzel a módszerrel készült kristályt mutat. A képen jól látszik a magkristály utáni rövid elkeskenyedés, és a növekvő átmérőjű szakasz.



19-2. ábra. A tárgyalt módszerrel húzott szilícium egykristályok. A húzáshoz használt magkristályok 4×4×80 mm-es hasábok. A képen jól látható az egykristályok mag felőli végének kúpos elkeskenyedése és a „nyakrészt” kialakítása

A 19-1. táblázatban foglaltuk össze néhány, ezzel a módszerrel végzett egykristályhúzás fontosabb adatait. Ezen kristályok diszlokáció-sűrűségének eloszlását az átmérő mentén a 19-3. ábra mutatja. Látható, hogy ezek az egykristályok jelentősen kevesebb hibahelyet tartalmaznak, mint a magkristályok. A felületi rétegektől eltekintve a hibahelysűrűség sehol sem haladja meg a 18 000 hibahely/cm², sőt a XX/3 kristálynál a 10 000 hibahely/cm² értéket sem. Várható, hogy az eljárás további finomításával, és főleg egyre jobb minőségű magkristályok használatával elérhető lesz az átlagban 1000 hibahely/cm² diszlokációsűrűség-érték.

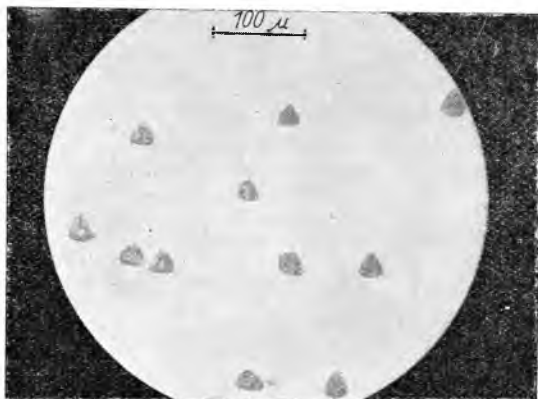
19-1. táblázat

A kristály jele	Húzási sebesség cm/h		Forgatás fordulat/min	Kristályátmérő mm	„Nyak”- átmérő mm	Hibahelysűrűség hiba/cm ²	
	nyakon	névleges átmérőn				kristály	mag
XII	15	15	14	19	3	13 500	30 000
XVII	35	16	8	21	3	10 000	30 000
XX/3	35	16	18	16	3	6 000	16 000



19-3. ábra. A diszlokáció-sűrűség eloszlása az átmérő mentén, a tárgyalt módszerrel húzott egykristályokon

A fenti adatok a szilícium egykristályok kezdeti szakaszára vonatkoznak. A közölt méréseket a magkristálytól számított 10 cm-es szakaszon belüli keresztmetszeteken végeztük, olyan helyen, ahol a kristályátmérő névleges értékét már elérte. A kristály hossza mentén a diszlokáció-sűrűség fokozatosan növekszik, és a magtól kb. 15 cm-re eléri a 20 000...25 000 hibahely/cm² értéket. Ennek okai szerintünk a nagyfrekvenciás fűtésen levő 150 Hz-es moduláció által, és a berendezés forgórészei által okozott rezgések.



19-4. ábra. Tipikus mikroszkópi kép az (111) síkon, dekoráló marás után. A fényképezett terület 0,16 mm²

Ezen a helyen szeretném köszönetemet nyilvánítani a laboratórium vezetőinek — dr. Lukács József laboratóriumvezetőnek és Molnár István tudományos osztályvezetőnek — munkám lehetővé tételéért és támogatásáért, Gadányi Péter tudományos munkatársnak hasznos tanácsaiért és az egykristályokon végzett mérésekért, és végül Túrós György technikusnak az egykristályhúzások gyakorlati előkészítésében és kivitelezésében nyújtott segítségért.

Irodalom

- [1] Dash, William C.: Silicon Crystals Free of Dislocations. *J. Appl. Phys.* **29** (1958) p. 736.
- [2] Dash, William C.: Growth of Silicon Crystals Free from Dislocations. *J. Appl. Phys.* **30** (1959) p. 459.
- [3] Kosler, S.—Uher, E.: Szilícium monokristályok nagyteljesítményű egyenirányítókhoz. *Elektrotechnicki Obzor* **11** (1960) p. 575.
- [4] Goss, A. J.: Experiments with Floating Zone Silicon. *Ultrapurification of Semiconductor Materials* p. 534. (Proceedings of the Conference on Ultrapurification of Semiconductor Materials. Boston. Massachusetts. April 11—13. 1961.) M. S. Brooks & J. K. Kennedy New-York, 1963. 2. ed.
- [5] Akyama, K.—Yamaguchi, J.: Dislocations of Silicon Single Crystals Grown by the Floating-Zone Method. *Ultrapurification of Semiconductor Materials*. p. 521.
- [6] Braun, J. H.—Pellin, R. A.: The Shape of Melt-Crystal Interfaces During Float-Zoning of Silicon. *J. El. Chem. Soc.* **108** (1961) p. 969.

VILLAMOS
KÉSZÜLÉK
LABORATÓRIUM

20.

Áramkorlátozó olvadóbiztosítók különleges olvadószálainak előállítására

DR. MOCSÁRY JÓZSEF—BÁNYAI BÉLA

ÖSSZEFOGLALÁS

Az IEC TC 32—SC 32A kategorizálása szerinti „általános célú biztosítók”-nak (general-purpose-fuses) a teljes áramtartományban — a túláramok, kis és nagy zárlati áramok tartományában — kifogástalanul kell működniök. E biztosítók kialakítása csak a többszörös megszakítást eredményező olvadószál-szerkezetekkel lehetséges. Az Intézetben kidolgozott sűrű osztású, folyamatosan változó keresztmetszetű olvadószál-konstrukció az előbbi követelményeket teljes mértékben kielégíti.

A tanulmány ismerteti az Intézetben a sűrű osztású, folyamatosan változó keresztmetszetű olvadószálak előállítására kidolgozott eljárást és berendezést.

ПОЛУЧЕНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПЛАВКИХ НИТЕЙ ДЛЯ ПЛАВКИХ ПРЕДОГРАНИТЕЛЕЙ ОГРАНИЧИТЕЛЯ ТОКА

Д-р. Й. Мочару—Б. Баняи

Резюме

По категоризации МЭУ TC 32 „Предохранители общего назначения” (general-purpose-fuses) в полном диапазоне тока — в диапазоне сверхтоков, токов короткого замыкания с небольшим и большим значением — должны работать безукоризненно. Получение таких предохранителей возможно только при помощи структуры плавких нитей дающих выдерживающих многократный разрыв. Разработанная в Институте конструкция плавкой нити с постепенно изменяющимся поперечным сечением и плотным делением в полной мере удовлетворяет указанным выше требованиям.

В труде описываются разработанные в институте процесс и оборудование для получения плавких нитей с постепенно меняющимся поперечным сечением и плотным делением.

HERSTELLUNG VON SPEZIELLEN SCHMELZLEITERN FÜR STROMBEGRENZENDE SCHMELZSICHERUNGEN

Dr. J. Mocsary—B. Banyai

Zusammenfassung

Die „Universal-Sicherungen” (general-purpose-fuses), gemäß der Kategorisierung der SC 32A der TC 32 der IEC, sind strombegrenzende Sicherungen, die im ganzen Strombereich — im Bereich der kleinen Überströme, der kleinen und großen Kurzschlußströme — einwandfrei funktionieren. Die Ausbildung derartiger Sicherungen ist nur mit Schmelzleiterkonstruktionen mit Mehrfachunterbrechung möglich. Die im Schaltgerätelaboratorium des Institutes ausgearbeitete spezielle Schmelzleiterkonstruktion — modulierter Schmelzleiter mit Mehrfachunterbrechung — erfüllt die früher erwähnten Anforderungen.

In der Arbeit wird das im Institut für die Herstellung der modulierten Schmelzleiter mit Mehrfachunterbrechung entwickelte Verfahren und die erforderlichen Einrichtungen beschrieben.

PRODUCTION OF SPECIAL FUSIBLE-FILAMENTS OF CURRENT-LIMITING FUSES

Dr. J. Mocsáry—B. Bányai

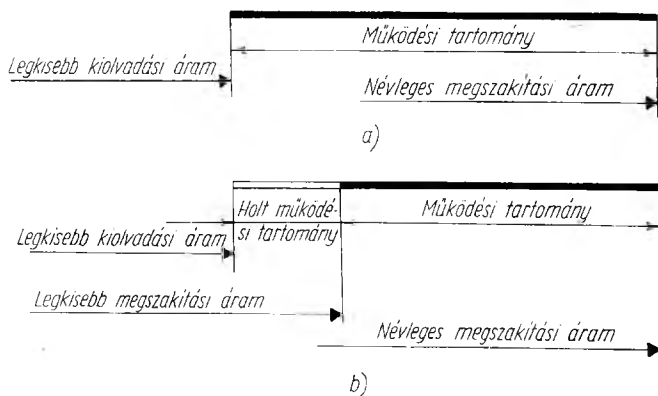
Summary

According to the classification of IEC TC 32—SC 32A, the general-purpose-fuses should operate in the whole current-range, in the ranges of the overcurrents, low and high short-circuit currents satisfactorily. Such fuses can be designed only by applying fusible-filament constructions resulting multiple current-interruption. The close-pitched fusible-filament-design with continuously changing cross-section developed by the Institute fulfils the aforementioned requirements perfectly.

In this study, there are described the process and equipment elaborated in the Switchgear-Laboratory of the Institute for the production of close-pitched melting-filaments of continuously changing cross-section.

1. A középvezettségű áramkorlátozó olvadóbiztosítók osztályozása működés szempontjából

Az IEC 32 Műszaki Bizottság 32A albizottsága által kidolgozott nemzetközi szabványtervezet [1, 2, 3] ajánlása szerint a középvezettségű áramkorlátozó olvadóbiztosítók — a túláramok és a kis értékű zárlati áramok tartományában történő különböző viselkedésükre való tekintettel — két kategóriába sorolhatók. Az 1. kategóriába tartoznak az ún. *általános célú biztosítók* (general-purpose-fuses), amelyek a *teljes áramtartományban* — a kb. 1 órás kiolvadási időt eredményező túláramoktól a biztosítók névleges megszakítási áramáig bezárólag — megbízhatóan működnek. A 2. kategóriába az ún. *zárlatvédelem céljaira használatos biztosítók* (back-up fuses) tartoznak. Ezekre jellemző, hogy általában csak egy meghatározott, ún. *legkisebb megszakítási áramértéktől* (minimum-interrupting current) a *névleges megszakító-képesség-értékekig* terjedő áramtartományban működnek megbízhatóan, az ún. *holt működési tartományban* pedig gyakorlatilag használhatatlanok. A középvezettségű áramkorlátozó biztosítóknak az IEC kategorizálása szerinti működési tartományát a 20-1. ábra szemlélteti.

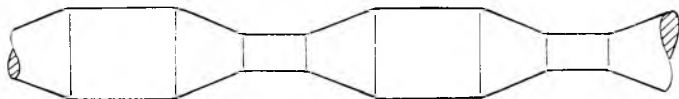


20-1. ábra. Középvezettségű áramkorlátozó olvadóbiztosítók működési tartománya

2. A korszerű áramkorlátozó olvadóbiztosítókkal szemben támasztott követelmények. Új olvadószál-konstrukció kifejlesztésének szükségessége

A korszerű középfeszültségű, nagy megszakítóképeségű áramkorlátozó olvadóbiztosítókkal szemben támasztott lényeges követelmény, hogy a teljes áramtartományban (túláramok, kis és nagy zárlati áramok tartományában) megbízhatóan működjenek. Ez alatt azt kell érteni, hogy a biztosítóknak az egészen kis értékű túláramoktól kezdve a szavatolt megszakítóképeség-értéknek megfelelő zárlati áramokig bezárólag az áramkört hiba nélkül meg kell szakítani tudniok. Ezenkívül még a következő követelményeket kell kielégíteniök: nagy megszakítóképeséggel és nagy áramkorlátozó-képeséggel rendelkezzenek, működésükkor ne okozzanak veszélyes túlfeszültséget, és névleges terhelésen ne melegedjenek a szabványokban megengedett-nél nagyobb mértékben.

A korábban kidolgozott, NNG-típusú középfeszültségű olvadóbiztosítók az előbbieken felsorolt követelményeket nem tudják teljes mértékben kielégíteni; e biztosítók a kis zárlati áramok tartományában, legfőképpen pedig a kis túláramok hatására nem működnek megfelelően, különösen olyan esetekben, amikor a biztosítók a legnagyobb üzemi feszültségnek megfelelő egyfázisú feszültségigénybevételnek vannak alávetve. E biztosítók elektrolitikus hegesztési eljárással készülő olvadószálai úgy vannak kialakítva, hogy az olvadószálak keresztmetszete az aránylag hosszú, legvékonyabb (legkisebb keresztmetszetű) szálrész két oldalán a végek felé lépcsősen növekszik [4]. A hosszú szakaszokból álló, lépcsősen változó keresztmetszetű olvadószálak használata esetén, a vizsgálatok tanúsága szerint előfordul, hogy a vékonyabb szálrészek helyén keletkezett szintercsatorna a hosszú ívű alatt túlhevül, vezetővé válik és ily módon az elégtelen ellenállás miatt az áram megszakadása nem következhet be és a biztosító felrobban. E biztosítók az előbbieken leírt hátrányos tulajdonságaik miatt az 1. pontban leírt 2. kategóriájú biztosítókhoz tartoznak, így gyakorlatilag csak zárlatvédelemre használhatók és a középfeszültségű terhelésszakaszokkal való kombinálhatóság szempontjából — a túláramok és a kis zárlati áramok tartományát magában foglaló „holt működési tartomány”-uk következtében — nem jöhetnek szóba.



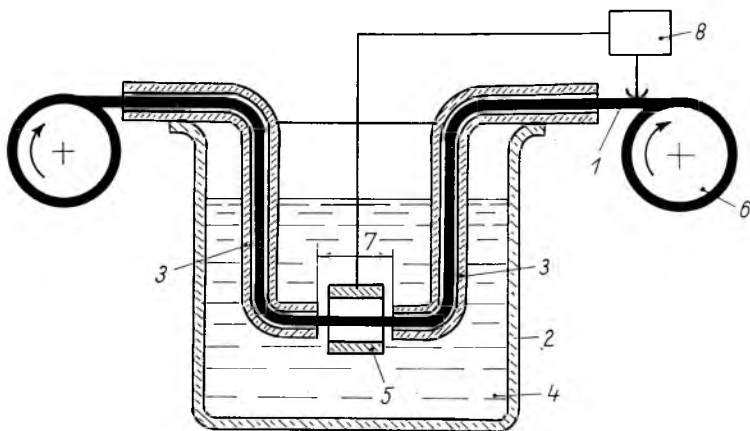
20-2. ábra. Sűrű osztású, folyamatosan változó keresztmetszetű olvasószál

Az elmúlt évek folyamán a kutatás feladata tehát olyan olvadószál-konstrukció, és ennek felhasználásával olyan középfeszültségű biztosítósorozat kidolgozása volt, amely a korszerű szabványokban foglalt igen szigorú követelményeket minden szempontból ki tud elégíteni. A lépcsősen változó keresztmetszetű szálkonstrukcióval készülő NNG-típusú olvadóbiztosítók ismertett hátrányainak kiküszöbölésére — előnyös tulajdonságainak megtartásával — az Intézet Villamos Készülék Laboratóriumában kidolgozták a sűrű osztású, folyamatosan változó keresztmetszetű olvasószál-szerkezetet (20-2. ábra), az annak előállítására alkalmas eljárást és az ezen olvasószálakkal készülő újfajta NNG-típusú olvadóbiztosítókat [5, 6, 7, 8, 9].

3. Az újfajta olvadószálak előállítása

A tetszés szerinti osztású, folyamatosan változó körkeresztmetszetű olvadószálak használata — ismertetett előnyös tulajdonságaiknál fogva — már régebben is kívánatos lett volna, azonban a középfeszültségű olvadóbiztosítókhoz az ilyen kiképzésű olvadószálak előállítására, az olvadószálak igen kis átmérője ($\varnothing 0,08 \dots 0,35$ mm) miatt, nem volt mód. Ha a 20-2. ábrán feltüntetett, sűrű osztású, folyamatosan változó keresztmetszetű olvadószál alakját és a kívánt méreteket is figyelembe vesszük, érthetővé válik, hogy az ismert *mechanikai módszerekkel* az újfajta olvadószál előállítása, illetőleg a végig azonos keresztmetszetű olvadószál megmunkálása nem valósítható meg. Gyártás szempontjából nem jöhet szóba a különböző átmérőjű olvadószálak sűrű osztásban történő *összehegesztése* sem. A huzalnak *galvanikus úton való keresztmetszet-növelése* sem vezethet eredményre, mert a kívánt szálátfutási sebességhez szükséges nagy áramsűrűség durvaszemcsészetű (szivacsos, pikkelyes) felrakódást okoz, és így nem biztosítható a szál homogén szerkezete. A finomabb anyagfelvitel eléréséhez a rácsapatás sebessége csak igen kicsi lehetne, ami a tömeggyártás szempontjából előnytelen. A ráakásos módszer ellen szól még az is, hogy az ezüst felviteléhez cianfürdőt kellene alkalmazni, és ez különleges biztonsági előírások betartását tenné szükségessé, ami ugyancsak megnehezítené a tömeggyártást.

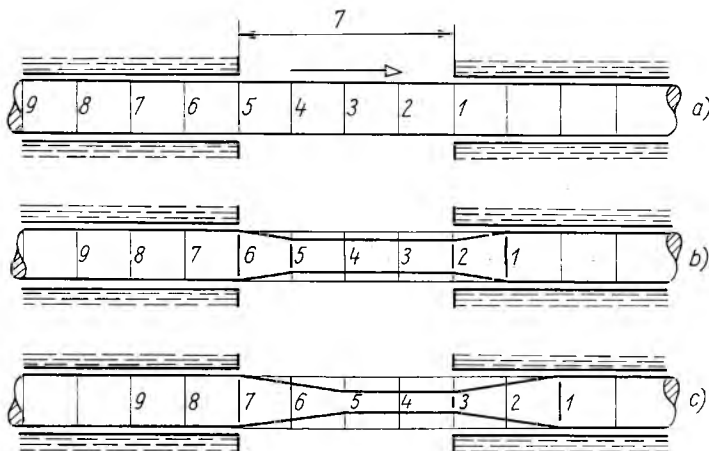
A sűrű osztású, folyamatosan változó keresztmetszetű olvadószálak előállítására a *szárlól anyag eltávolító elektrolízis módszere* a kívánt eredményt hozta. Az újfajta olvadószálakat úgy állítjuk elő, hogy a szálát elektroliten vezetjük át és az osztásoknak megfelelően anyagot eltávolító elektrolízisnek vetjük alá [9].



20-3. ábra. A sűrű osztású, folyamatosan változó keresztmetszetű olvadószálak előállítására alkalmas eljárás és berendezés elvi vázlata

Az új típusú olvadószálak előállítására alkalmas eljárást vázlatosan a 20-3. ábra szemlélteti. A végig azonos keresztmetszetű *1* színezüst alapszálat a *6* mechanikus húzószervelet segítségével állandó sebességgel húzzuk a *2* kádban levő *4* elektroliten (AgNO_3) keresztül. Az *1* szál vezetésére üvegből készült *3* szálvezető csövek a *4* elektrolitbe merülnek úgy, hogy egymással szemben elhelyezkedő szájnylásaik között *7* elektrolizáló szakasz van. Az *5* katódot színezüst huzalból készült spirális,

vékony színezüst lemezből készült henger, vagy egyéb megfelelő alakú elektród képezi. Az 1 színezüst alapszálat a 8 impulzusgenerátor, mint áramforrás pozitív pólusához kapcsoljuk. Az olvadószal periodikus vékonyításához szükséges elektrolitikus hatást a 8 impulzusgenerátorral előállított impulzusok sorozata váltja ki. Az áramimpulzusok nagyságának, időtartamának és gyakoriságának, az elektrolizáló 7 szakasz hosszúságának, valamint a húzási sebességnek a megfelelő megválasztásával az osztás sűrűsége, valamint a keresztmetszetváltozás jellege tetszés szerint változtatható.



20-4. ábra. A sűrű osztású, folyamatosan változó keresztmetszetű olvadószal kialakulása

A következőkben a 20-4. ábrán vázlatosan bemutatjuk a szál folyamatosan változó keresztmetszetének a kialakítását. Az eddig elmondottakból nyilvánvaló, hogy az elektroliten meghatározott sebességgel áthúzott ezüstszal keresztmetszete mindaddig változatlan marad, amíg az elektródok között potenciálkülönbség nincs, azaz a fürdőn áram nem folyik át. Az ezüstszal kívánt keresztmetszet-változása az előbbieken ismertetett tényezők együttes hatására jön létre.

A 20-4a ábra az állandó sebességgel a nyíl irányában haladó szálat mutatja, amint annak 1...5 szakasza az üvegcsövek szájnyílása közötti helyzetben van. Az áramkört akkor zárjuk, amidőn a szál 1 és 5 pontja a szájnyílást elhagyja és ekkor a szál 1...5 szakasza az elektrolízis hatásának van kitéve.

Amint a szál állandó sebességgel a nyíl irányában halad, annak 1—2 és 5—6 szakaszán folyamatos átmenetű rész alakul ki (20-4b ábra), mivel az 5—6 szakasz egyes részei fokozatosan — az állandó húzási sebességnek megfelelően — az elektrolitikus effektusnak vannak kitéve, míg az 1—2 szakasz — ugyancsak az állandó húzási sebességnek megfelelően — fokozatosan kikerül az áram elektrolizáló, tehát esetünkben anyagot eltávolító hatása alól. A folyamatos átmenet azért alakul ki, mert pl. az 5,—6 szakasz egyes részei egyenletesen növekvő ideig vannak az elektrolízis hatásának kitéve.

A 20-4b ábra azt a helyzetet tünteti fel, amikor az elektrolízis hatásának kitétt olvadószal a 7 elektrolizáló szakasz $\frac{1}{4}$ -ének megfelelő utat tette meg. E közben a szál 1—2 és 5—6 szakaszán folyamatosan változóan alakult ki, amint azt az

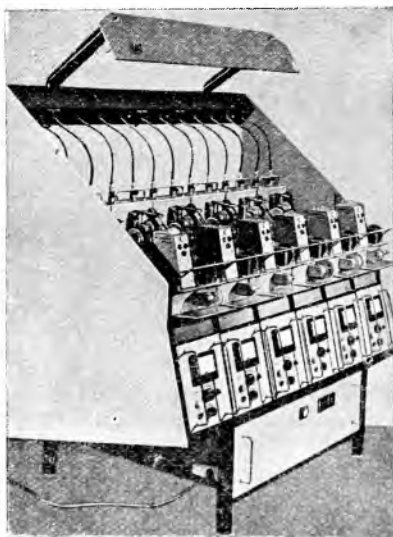
előbbieken már említettük, míg a 2...5 szakasz keresztmetszete — hengeres alakjának megtartása mellett — csökkent, mivel ezen szálrész minden egyes pontja azonos ideig volt az elektrolízis hatásának kitéve.

A szál további, állandó sebességgel történő előrehaladása során az előbbieken leírt folyamat folytatódik és mindaddig tart, amíg az áramkört meg nem szakítjuk. Így alakul ki a 20-4c ábrán feltüntetett olvadószál-alak. Az olvadószál változatlan és változó keresztmetszetű részeinek hosszát, ami együttesen egy osztás hosszának felel meg — adott haladási sebesség esetén — az áramimpulzus és az árammentes idő összege határozza meg.

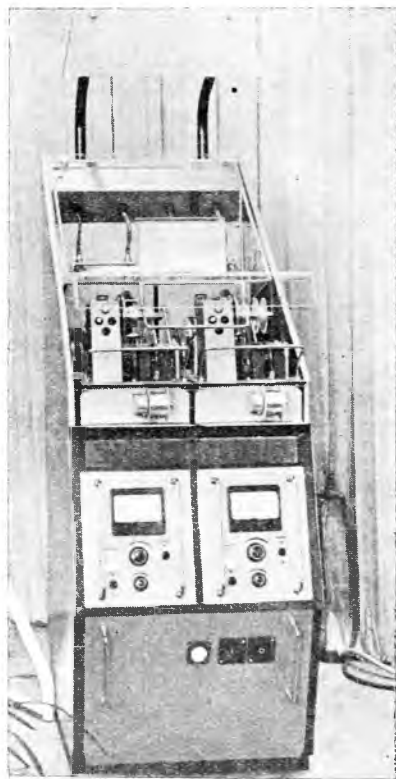
4. Az újfajta olvadószálak előállítására szolgáló berendezés

A 3. pontban ismertetett eljárásnak gyártási szempontból az a nagy előnye van, hogy segítségével a tetszés szerinti osztású, folyamatosan változó kör keresztmetszetű olvadószálak — az eddig ismert egyedi olvadószál előállítási módszerekkel szemben — *gyakorlatilag végtelen hosszban* állíthatók elő.

Tekintettel arra, hogy az újfajta olvadószálak felhasználásával készülő NNGf-típusú közép feszültségű olvadóbiztosítók gyártásának előfeltétele a különleges kiképzésű olvadószálak nagyüzemi méretekben történő előállítása volt, a mielőbbi gyártásbevezetés biztosítása érdekében az Intézet Villamos Készülék Laboratóriumában a Villamos Berendezés és Készülék Művek (VBKM) 8. sz. Világítástechnikai Gyára



20-5. ábra. A sűrű osztású, folyamatosan változó keresztmetszetű olvadószálak nagyüzemi előállítására szolgáló berendezés



20-6. ábra. Két olvadószál egyidejű megmunkálására alkalmas berendezés

részére kidolgozták és elkészítették a *nagyüzemi gyártásra alkalmas olvadószálmegmunkáló készüléket*, amelyet a 20-5. ábra mutat. A készülék 6, egymástól független húzóegységből áll és így 6 darab azonos, vagy különböző átmérőjű színezüst olvadószal egyidejű megmunkálására alkalmas.

A gép feladata az NNGf-típusú biztosítók teljes sorozata számára szükséges különféle méretű olvadószalak folyamatos előállítására. A géppel az előbbieken ismertetett eljárást valósítjuk meg nagyüzemi méretekben. A megmunkálandó ezüstszalakat a gép mechanikus húzóegysége folyamatosan és állandó sebességgel továbbítja. Az ezüsthuzal üvegcsöveken átvezetve ezüstnitrát oldatot tartalmazó kádba merül. A megmunkálandó szál a megfelelő intenzitású és mechanikusan vezérelt időtartamú áramimpulzusok hatására létrejövő elektrolízis következtében a kívánt szakaszokon, folyamatosan átmenettel az előírt méretre vékonyodik. A húzóegység a megmunkált olvadószalát öblítő edényen vezeti át, majd orsóra gombolyítja. Az elektrolizáló áram beállított, állandó értéken tartását az egyes húzóegységekhez tartozó áramstabilizátorok biztosítják. A gép felépítése építőszekrényrendszerű, amellyel elérhető, hogy a meghibásodott egységek a helyükre betolt tartalékegységgel igen rövid időn belül kicserélhetők és így a sorozatgyártás során az olvadószal-megmunkálás folyamatossága minden körülmények között biztosítható. A meghibásodott egységek javítása a szálmegmunkáló készüléken kívül történik és emiatt a gépet nem kell üzemben kívül helyezni.

Az olvadószal-megmunkáló készülékkel — mind a 6 egység működését figyelembe véve — 8 órás műszakban kb. 1200 méter sűrű osztású, folyamatosan változó keresztmetszetű olvadószalát lehet előállítani, ami naponta pl. 250 darab 20 kV feszültségű, háromszálas olvadóbiztosító előállítását teszi lehetővé.

Kutatási munkáink céljaira a Villamos Készülék Laboratóriumban egy további, két olvadószal egyidejű megmunkálására alkalmas berendezést is készítettünk, amelyet a 20-6. ábra mutat. A készülék az 1965. évi Budapesti Nemzetközi Vásáron az Országos Találmányi Hivatal pavilonjában, majd ugyancsak 1965. év második felében a „20 év magyar találmányai” kiállításon is bemutatásra került.

5. Az új olvadószal-konstrukcióval készült biztosítókkal elért eredmények

A 2. pontban ismertetett újfajta, sűrű osztású, folyamatosan változó keresztmetszetű olvadószalakkal készült *NNGf-típusú* középfeszültségű, áramkorlátozó biztosítók a csehszlovákiai bechovicei és a hollandiai KEMA zárlati laboratóriumokban elvégzett zárlatbiztossági, valamint a BFEM Tutaj-utcai hálózati próbaállomásán lefolytatott túlárambiztossági vizsgálatok tanúsága szerint *teljes mértékben kielégítik a British Standard BS 2692:1956 angol szabvány [10] igen szigorú előírásait, valamint az IEC 32A tervezet [1, 2, 3] ajánlásaiban foglalt követelményeket*. A vizsgálatok eredményeinek tanúsága szerint a biztosítók a teljes áramtartományban kifogástalanul működnek.

Az előbbieken leírtakat figyelembe véve az újfajta olvadószalakkal készülő, *NNGf-típusú, nagy megszakítóképeségű áramkorlátozó olvadóbiztosítók* — a korszerű olvadószal-szerkezetükből adódó előnyös tulajdonságaik következtében — az IEC 32A szerinti *általános célú biztosítók* kategóriájába tartoznak és az összes védelmi feladat megoldására, így a gyakorlatban szóba jöhető összes területen használhatók.

A hazai és külföldi vizsgálatok eredményei alapján megállapítható, hogy az újfajta olvadószal-konstrukcióval készült középfeszültségű biztosítók a jelenleg

gyártott külföldi típusok között is a legkorszerűbbnek nevezhető megoldást képviselik és e biztosítók működési tartományuk, valamint megszakítóképesség szempontjából *a legtöbb ismert külföldi típusnál jobbak*, így versenyképes exportcikket is jelentenek.

6. Összefoglalás

Az IEC 32A kategorizálása szerinti *általános célú biztosítók* (general-purpose fuses) kialakítása csak a *többszörös megszakítást eredményező olvadószál-szerkezetekkel* lehetséges. Az Intézetben kidolgozott *sűrű osztású, folyamatosan változó keresztmetszetű olvadószál-konstrukció* felhasználásával készült NNGf-típusú biztosítók minden szempontból kielégítik az általános célú biztosítókkal szemben támasztott követelményeket.

Az Intézet Villamos Készülék Laboratóriumában az újfajta konstrukciójú olvadószálak előállítására kidolgozott eljárás és berendezés lehetővé teszi a tetszés szerinti osztású, folyamatosan változó keresztmetszetű olvadószálak gyakorlatilag végtelen hosszban történő nagyüzemi előállítását és biztosítja a termelékeny nagyüzemi gyártás feltételeinek teljesítését.

Irodalom

- [1] *IEC 32A (Secretariat) 6* — May 1965. Report from WG1 to Sub-Committee 32A.
- [2] *IEC 32A (Secretariat) 7* — June 1965. Draft for Recommendations for High Voltage Fuses. Part I.
- [3] *IEC RM 934/SC 32A* — February 1966. Unconfirmed minutes of the meeting held in Tokyo from 11th to 14th October 1965.
- [4] *Rusznýk E.—Mocsáry J.*: Nagyfeszültségű, nagy megszakítóképességű biztosítók. *Elektrotechnika* **51** (1958) 93—102. old.
- [5] *Mocsáry J.*: Középfeszültségű, nagy megszakítóképességű áramkorlátozó olvadóbiztosítók elméleti és gyakorlati kérdései. Kandidátusi értekezés, Budapest 1961.
- [6] *Dr. Mocsáry J.*: Középfeszültségű, nagy megszakítóképességű áramkorlátozó olvadóbiztosítók újfajta olvadószál-konstrukciói. *Elektrotechnika* **57** (1964) 554—560. old.
- [7] *Dr. Mocsáry J.*: Schmelzleiterkonstruktionen strombegrenzender HH-Sicherungen und ihr Verhalten bei Unterbrechung kleiner Ströme. *Elektrie* **19** (1965) 7, p. 310—312.
- [8] *Dr. Mocsáry J.*: Medium-Voltage Current-Limiting Fuses of Extra-High Rupturing-Capacity (realized by the application of New Fuse-Element-Design) *Transelektro News*, Nov. 1965 (No 3) p. 21—28.
- [9] *Dr. Mocsáry J.—Kondor T.—Bányai B.*: Eljárás és berendezés villamos biztosítószál előállítására. 150.812 sz. magyar szabadalom.
- [10] *British Standard B.S. 2692—1956* Fuses for Alternating Current Circuits above 660 Volts.

21.

Kombinált ívöltási mód alkalmazása kifeszültségű áramkorlátozó olvadóbiztosítóknál

DR. MOCSÁRY JÓZSEF

ÖSSZEFOGLALÁS

A félvezető (germánium és szilícium) egyenirányítók védelmére felhasznált áramkorlátozó olvadóbiztosítóktól megkövetelik, hogy a közönséges biztosítóknál lényegesen gyorsabban olvadjanak ki túlterhelések hatására is, továbbá ivedejük és ezzel teljes működési idejük is nagyon rövid legyen.

Az előbbi követelmények kielégítése részben az Intézetben kidolgozott különleges olvadóelem-kialakítással, részben a szemcsés ívöltőközeg közismert ívöltő hatásának és a nyomáseffektusnak a kombinációjával érhető el.

ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ДУГОГАСИТЕЛЬНОГО МЕТОДА ПО ПЛАВКИМ ПРЕДОХРАНИТЕЛЯМ ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКА НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Д-р. Й. Мочари

Резюме

От плавких предохранителей ограничения тока используемых для защиты полупроводниковых выпрямителей (германий и кремний) требуют, чтобы они намного быстрее, чем обычные предохранители расплавились под воздействием сверхнагрузок и чтобы их дуговое время и вместе с тем общее время действия было бы очень коротким.

Удовлетворение указанных выше требований достигается отчасти за счет разработанного в Институте специального плавкого элемента, а отчасти комбинированием общеизвестного дугогасительного эффекта и эффекта давления зернистой дугогасительной среды.

ANWENDUNG VON KOMBINIERTEM LICHTBOGENLÖSCHEFFEKT BEI STROMBEGRENZENDE NIEDERSPANNUNGS-SICHERUNGEN

Dr. J. Mocsáry

Zusammenfassung

Es wird von den Halbleiter-Schutzsicherungen gefordert, dass sie auch bei niedrigen Überlastströmen überflink arbeiten. Ausserdem soll ihre Lichtbogenzeit und dementsprechend ihre totale Abschaltzeit möglichst kurz sein.

Die vorstehenden Anforderungen werden zum Teil durch die spezielle Ausbildung des Reinsilber-Schmelzelementes, teilweise durch die Kombination der wohlbekanntesten Löschwirkung des körnigen Löschmittels (Quarzsand) und den Druckeffekt erfüllt.

APPLICATION OF COMBINED ARC-QUENCHING METHOD AT LOW VOLTAGE CURRENT-LIMITING FUSES

Dr. J. Mocsáry

Summary

It is required from the current-limiting fuses, applied for the protection of semiconductor (germanium and silicon)-rectifiers, to blow faster than the normal fuses at overloads and to have very short arcing-time and as a consequence of these, a very short whole (total) breaking-time.

The requirements, mentioned above, are fulfilled partly by the special construction of the fusing-element, developed by the Switchgear-Laboratory of the Institute and partly by the combination of the wellknown arc-quenching effect of the granular arc-quenching medium and of the pressure effect.

1. Követelmények

A félvezető (germánium és szilícium) egyenirányítók védelmére felhasznált áramkorlátozó olvadóbiztosítókkal szemben, a szokásos áramkorlátozó olvadóbiztosítóhoz viszonyítva, általában lényegesen szigorúbb követelményeket támasztanak. Az egykristály-egyenirányítók védelmére felhasznált áramkorlátozó olvadóbiztosítóktól ui. megkövetelik, hogy a közönséges olvadóbiztosítóknál lényegesen gyorsabban olvadjanak ki túlterhelések hatására is, és ennek folytán már a túláramok tartományában is érvényesüljön áramkorlátozó hatásuk (ez a hatás ui. a szokásos áramkorlátozó biztosítóknál csak a zárlati áramok tartományában érvényesül!), továbbá ividejük és ezzel teljes működési idejük (kiolvadási és ividő) is nagyon rövid legyen, ezáltal a félvezető egyenirányítók p-n átmenetét a káros túlmelegedések ellen biztosan megvédjék.

Ezenkívül igen fontos, hogy a biztosítók nagy megszakítóképesseggel rendelkezzenek, működésükkor ne okozzanak a védendő félvezető cellákra veszélyes túlfeszültséget, kicsi legyen a veszteségmelegük, tehát névleges áramukkal lehetőleg járulékos hűtés nélkül terhelhetők legyenek és kicsi legyen a teljes működési időre számított i^2t értékük. Mindezek a feltételek a szokásos áramkorlátozó olvadóbiztosítókkal nem elégíthetők ki. A megkívánt *igen gyors működés (rövid kiolvadási idő)* és *hatásos áramkorlátozás*, továbbá a kis túláramok tartományában is *rövid ividő* és ezzel *rövid működési idő* elérésére az Intézet Villamos Készülék Laboratóriumában különleges kiképzésű olvadóelem-konstrukciót és kombinált ivoltási módot dolgoztak ki [1, 2, 3, 4].

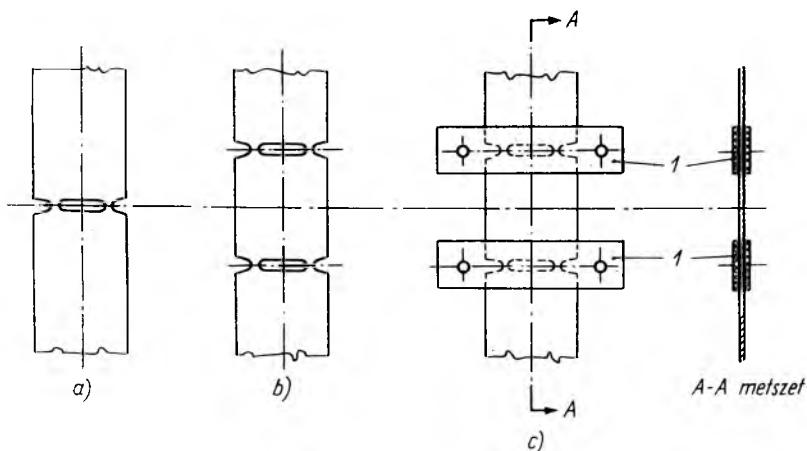
A következőkben ismertetjük a különleges olvadóelem-konstrukcióval és a kombinált ivoltási mód alkalmazásával készült félvezetőegyenirányító-védőbiztosítók szerkezeti felépítését és a biztosítók működésének mechanizmusát.

2. A félvezetőegyenirányító-védőbiztosítók szerkezeti kialakítása

A 250 és 500 V névleges feszültségű, NOGe és NOSi típusú félvezetőegyenirányító-védőbiztosítók lemez alakú, színezüst olvadóelemekkel készülnek. Az olvadóelemek kialakítása olyan, hogy az olvadóelem hossza mentén erősen leszűkített és változatlan keresztmetszetű részek váltogatják egymást, amint azt a 21-1. ábra szemlélteti. A leszűkített keresztmetszetű részek száma a biztosító névleges feszültségétől függően változik. A 21-1a ábra a 250 V_{eff} névleges feszültségű NOGe-típusú

biztosítók, a 21-1b ábra pedig az 500 V_{eff} névleges feszültségű NOSi-típusú biztosítók olvadóelemének keresztmetszeti kialakítását mutatja.

Az igen gyors működést az biztosítja, hogy az olvadóelem leszűkített keresztmetszetű helyein az áramsűrűség az egyéb áramkorlátozó olvadóbiztosítókhoz viszonyítva azokénak többszöröse. A védelemtechnikai és egyéb szempontból is



21-1. ábra. Félvezetőgyenirányító-védőbiztosítók olvadóelemei

a) 250 V feszültségű, NOGe-típusú biztosítók olvadóeleme; b) 500 V feszültségű, NOSi-típusú biztosítók olvadóeleme; c) 500 V feszültségű, NOSi-típusú biztosítók üvegszövet-szilikon réteggel lemezek közé szerelt olvadóeleme

leszűkített keresztmetszetű résznek a névleges áramot üzemszerűen, kiolvadás nélkül vezetnie kell. Ez csak a leszűkített keresztmetszetű rész igen intenzív hűtésével érhető el, amelyet a gyakorlatban a szemcsés ivoltóanyag, az olvadóelem változatlan, nagy keresztmetszetű és nagy felületű részei, valamint a biztosító viszonylag nagy tömegű fémalkatrészei (pl. áramvezetőkések) biztosítanak. A hűtőhatás további növelése és az ivoltóhatás fokozása érdekében az olvadóelem leszűkített keresztmetszetű részei szervesetlen szigetelőanyagból (üvegszövet-szilikon) készült I lapocskák közé vannak beszerítve, amint azt például az 500 V névleges feszültségű biztosítókra vonatkozóan a 21-1c ábra mutatja.

A biztosítótétét olvadóelemeit jó hőállóságú szigetelőanyagból készült tokozatba helyezik be. Az olvadóelemekkel párhuzamosan kapcsolt nagy ellenállású szál a biztosítótétét kiolvadásának jelzésére szolgáló szerkezetet működteti. A mikrokapcsolóval kombinált kivitelnél a biztosító kiolvadását jelző szerkezet rugója a mikrokapcsolót működteti és így módon a megtörtént működés optikai vagy akusztikai jelzését teszi lehetővé.

Ivoltóanyagként tiszta kvarchomokot használnak. Az ivoltóhatás fokozását szolgálják az előbbieken már említett — az olvadóelem leszűkített keresztmetszetű részeinek közrefogására is alkalmazott — szervesetlen szigetelőanyagból készült lapocskák. Az áram hozzávezetésére ovális furattal ellátott ezüstözött vörösréz csatlakozókések szolgálnak, amelyek csavarozással erősíthetők az áramvezető sínekhez. Változatban profilkéses megoldás is készíthető. Ebben az esetben az olvadóbetétek, az egyéb késes-rendszerű olvadóbiztosítókhoz hasonlóan, rugózott érintkezőkkel ellátott aljzatba helyezhetők.

3. A biztosítók működése. Kombinált ívöltési mód alkalmazása

A biztosítók működésének mechanizmusát illetően csak a szokásos áramkorlátozó olvadóbiztosítóktól eltérő sajátosságokkal kívánunk részletesebben foglalkozni.

A közönséges, szemcsés ívöltőanyaggal (pl. kvarchomok) töltött olvadóbiztosítóknak, mint ismeretes, az olvadószál kiolvadása és elgőzölgése után létrejött *villamos ívet* a környező szemcsés ívöltőanyag jól hűti. A *jó hűtés* következménye a *nagy ívfeszültség* és az *áramkorlátozás*. (Ha az ívfeszültség nagyobb, mint a visszatérő feszültség csúcserőteke, az olvadószál kiolvadása következtében létrejött áramlevágás után az áram tovább csökken.) A szemcsés ívöltőanyag az ív hűtésén túlmenően a fémgőzök számára kondenzáló felületet is képez, és a fémgőzök az ívből elvezetve a lecsapódás során leadják energiájukat. A szemcsés ívöltőközeggel töltött olvadóbiztosítók képesek igen nagy zárlatok ívenergiáját igen kis térfogatú biztosítóbetétben megsemmisíteni, de nagy hátrányuk az, hogy a kis és közepes túláramok hatására történő működéskor az ívidejük viszonylag hosszú (több félperiódus). A *kis túláramok* hatására ugyanis az olvadóelem először csak rövid szakaszon olvad ki és e rövid szakasz helyén létrejött ív addig hosszabbodik, amíg az ív oltásához szükséges teljes hosszát el nem éri; ehhez pedig általában e biztosítóknál több félperiódusnak megfelelő idő szükséges. Ekkor az áramkör végleges megszakításáig természetesen a teljes, vagy az ívellenállás által bizonyos mértékben csökkentett áram tovább folyik az íven keresztül.

A félvezető egyenirányítók védelmére szolgáló biztosítóknál az *igen gyors kiolvadáson* túlmenően — amelyet az olvadóelem nagy keresztmetszetű részeinek és a biztosító egyéb nagy tömegű fémalkatrészeinek a hűtőhatása, továbbá a rátétlemezek járulékos hűtőhatása eredményeképpen igen nagy mértékben lecsökkentett keresztmetszetű olvadóelemrészek biztosítanak — döntő fontosságú követelmény a *rövid ívidő*, a kis és közepes túláramok megszakítása esetén is. A szokásos, kvarchomok ívöltésű olvadóbiztosítók a félvezető egyenirányítók védelmére általában 100%-ig nem alkalmasak azért, mert nem elég gyors kiolvadásúak, a túlterhelések megszakításakor hosszú az ívidejük és áramkorlátozó-képességük sem elég nagy az egykristály-egyenirányítók védelmére.

A NOGe- és NOSi-típusú, igen gyors működésű olvadóbiztosítók a félvezető egyenirányítók védelmére szolgáló szerkezetekkel szemben támasztott, az 1. pontban ismertetett követelményeket a 21-1. ábrán bemutatott és a 2. pontban leírt előnyös szerkezeti kialakításuk következtében teljes mértékben kielégítik. Az olvadóelemek különleges kialakításával, valamint a leszűkített keresztmetszetű olvadólemez-részen alkalmazott szervesetlen szigetelőanyagból készült rátétlapokkal nemcsak az igen gyors kiolvadás, hanem az igen rövid ívidő is biztosítható. Az ívöltés szempontjából ugyanis itt nemcsak a *kvarchomok*, mint *ívöltőanyag* jön tekintetbe, hanem a rátétlapok közötti igen szűk térben létrejövő igen *nagy nyomás* is (*kombinált ívöltési mód*). Az *üveg-szilikon rátétlapok* alkalmazásával elérhető, hogy a kis és közepes túláramok esetén is igen nagy túlnyomás keletkezik az olvadóelem legkisebb keresztmetszetű, tehát leghamarabb kiolvadó és elgőzölgő részét körülvevő igen szűk térben, amely túlnyomás miatt az ív feszültségigénye megnövekszik és ugyanakkor az ezüstgőzöknek a kvarchomokba való kifűvése is bekövetkezik, ily módon tehát az ív rövid idő alatt megszabadul az ívöltést megnehezítő fémgőzöktől. A szervesetlen szigetelőanyagból (üveg-szilikon) készített rátétlapok közötti szűk térben létrejött igen nagy nyomás tehát, amellett, hogy a fémgőzöket a rátétlapokat körülvevő kvarchomokba kiszorítja, ahol azok lecsapódnak és hőenergiájukat leadják, az ív keresztmetszetének összeszűkítése miatt az ív fenntartására olyan

nagy feszültségigényt támaszt, amelyet a visszatérő feszültség már nem tud kielégíteni. Az ívöltás ily módon általában már a legközelebbi feszültség-nullaátmenetben vagy még azelőtt bekövetkezik. E biztosítóknál a nagynyomású tér létrehozását illetően a cél tehát az, hogy *mind kis túláramoknál, mind zárlatoknál az ívfeszültség igen nagy legyen*, azaz a visszatérő feszültség nagyságán túlmenő feszültségigényt támasszon. Ez a megoldás rövid ívidőt és hatásos áramkorlátozást eredményez.

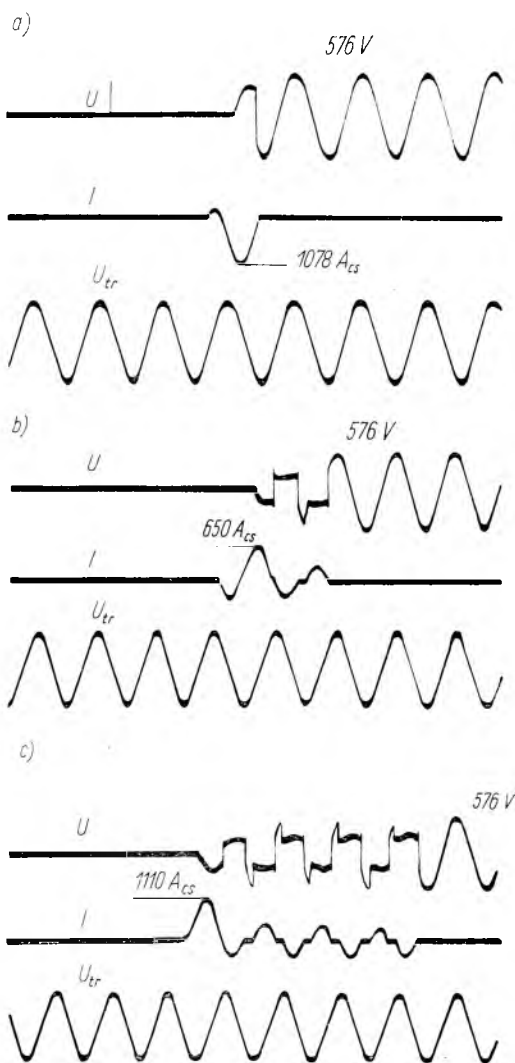
4. Vizsgálati eredmények

A kutatási munka során összehasonlító vizsgálatokat végeztünk a 21-1. ábra szerinti olvadóelemek felhasználásával készült biztosítókkal, *különböző ívöltési feltételek*, illetve körülmények mellett. A vizsgálatok céljaira a 21-1b ábra szerinti, két sorbakapcsolt, leszűkített keresztmetszetű helyvel rendelkező olvadólemezzel készült 150 A névleges áramerősségű NOSi-típusú olvadóbiztosítókat készítettünk, az alábbiak szerint:

- 4.1 Mindkét leszűkített keresztmetszetű hely üveg-szilikon rátétek közé volt szorítva;
- 4.2 Csak egyik leszűkített keresztmetszetű helyen volt üveg-szilikon rátétlemez;
- 4.3 Egyik leszűkített keresztmetszetű helyen sem volt üveg-szilikon rátét (tisztán kvarchomokos ívöltás).

Az előbbieken leírt betétekkel $576 V_{\text{eff}}$ feszültségen, egyfázisú kapcsolásban $880 A_{\text{eff}}$ és $36,5 kA_{\text{eff}}$ értékű független áramerősségekkel vizsgálatokat végeztünk. A 21-2. ábra a 4.1...4.3 alatti olvadóbiztosítók 880 A-es vizsgálatának oszcillogramjait tünteti fel. A túláramokkal elvégzett vizsgálatok során a 4.1 és 4.2 típusú olvadóbetétek ívideje — az *üveg-szilikon rátétlemezek* előbbieken ismertetett hatása, azaz a *kvarchomokos oltással kombinált fokozott ívöltő hatás* következtében — lényegesen rövidebb volt, mint a 4.3 alatti tisztán kvarchomokos oltású betéteké, amint az a 21-2a...c ábrákból is világosan kitűnik. Ugyanakkor szembe-tűnő a különbség a 4.1 és 4.2 megoldások között is az ívidőt illetően. Az eredmények alapján a NOSi-típusú, $500 V_{\text{eff}}$ feszültségű olvadóbetétek a 4.1 szerinti megoldással készülnek. Meg kell jegyezni, hogy a 4.1...4.3 alatti megoldási módok közötti szembe-tűnő különbség az ívöltési időket illetően elsősorban a túláramok és kis zárlati áramok tartományában észlelhető, a különbség nagy zárlati áramoknál lényegesen kisebb.

A vizsgálatok eredményei alapján tehát megállapítható, hogy az azonos kialakítású olvadólemez felhasználásával készült, különböző ívöltési-rendszerű, azonos névleges áramerősségű olvadóbetétek ívidői nagymértékben eltérnek egymástól. Az azonosan kis értékű ívidő elérése érdekében a tisztán kvarchomokos ívöltású olvadóbetéteknél a sorbakapcsolt, leszűkített keresztmetszetű szálrészek számát növelni kellene. Ebben az esetben azonban megnövekszik a biztosító veszteségmelege és az azonos névleges áramerősség eléréséhez azonos tokozat felhasználásával, nagyobb keresztmetszetű olvadólemezek használata szükséges. A nagyobb keresztmetszetű olvadólemezek használata esetén viszont — azonos névleges áramerősség mellett — csökken a legkisebb keresztmetszetű szálrészekben megengedhető áram-sűrűség értéke, amiből következik, hogy a biztosítók kiolvadási gyorsasága csök-



21-2. ábra. NOSi-típusú 500 V feszültségű, 150 A névleges áramerősségű olvadóbiztosító vizsgálata különböző ivoltási feltételek mellett

A vizsgálati áramkör adatai:
 $U = 576 \text{ V}_{\text{eff}}$; $I = 880 \text{ A}_{\text{eff}}$; $\cos \varphi < 0,15$

- a) 4.1 szerinti
 b) 4.2 szerinti
 c) 4.3 szerinti
- } olvadóbetétek vizsgálatának
 hurkos oszcillogramjai

zével $250 \text{ V}_{\text{eff}}$ feszültségre, NOSi típusjelzéssel $500 \text{ V}_{\text{eff}}$ feszültségre készülnek, mindkét típusnál 50 A-es fokozatokban 50...400 A névleges áramerősségre. A biztosítók — a névleges áramerősségtől függően — már a kb. $(3,5...6)I_n$ értékű túlterhelésnél nagyobb túláramoknál *áramkorlátozóan* működnek. A külföldi zárlati próbák eredményeinek tanúsága szerint a NOGe-típusú olvadóbiztosítók $250...300 \text{ V}_{\text{eff}}$ feszült-

ken és ezzel áramkorlátozóképesége romlik. Ez a helyzet pl. a legismertebb külföldi gyártmányú félvezető-egyenirányító-védőbiztosítóknál, ahol pl. az 500 V feszültségű olvadóbiztosítóknál három sorbakapcsolt legkisebb keresztmetszetű szálrésszel készült olvadólemezeket alkalmaznak, szemben az Intézetben kidolgozott 500 V feszültségű biztosítók két sorbakapcsolt legkisebb keresztmetszetű résszel és üveg-szilikon rátétekkel készülő olvadólemezeivel.

Az üveg-szilikon rátétlapok alkalmazásának előnyös tulajdonságait alátámasztandó igen jelentős és figyelemre méltó az az eredmény, amelyet az elvégzett vizsgálatok is bizonyítanak. A 250 V feszültségre egy megszakítási helyvel és üveg-szilikon rátétlemezekkel készült NOGe-típusú biztosítók — az üveg-szilikon rátétlapok kedvező hatása következtében — közepes túláramokat kb. 550 V feszültségen is kifogástalanul megszakítottak. Irodalmi és tapasztalati adatok szerint is kiszűrlésű biztosítóknál a tisztán kvarchomokban történő ivoltás esetén az egy megszakítási helyre jutó visszatérő feszültség legfeljebb $220...250 \text{ V}$ lehet, amit az üveg-szilikon lapok közé szorított egy megszakítási helylyel (egy leszűkített keresztmetszetű rész) rendelkező olvadólemez esetén — vizsgálataink tanúsága szerint — előbbinek több mint kétszeresére is lehetett növelni, ami a nagy nyomású térben égő, kis keresztmetszetű ív lényegesen nagyobb feszültségigényével volt elérhető.

Meg kell említeni, hogy a félvezető-egyenirányítók védelmére szolgáló biztosítók NOGe típusjel-

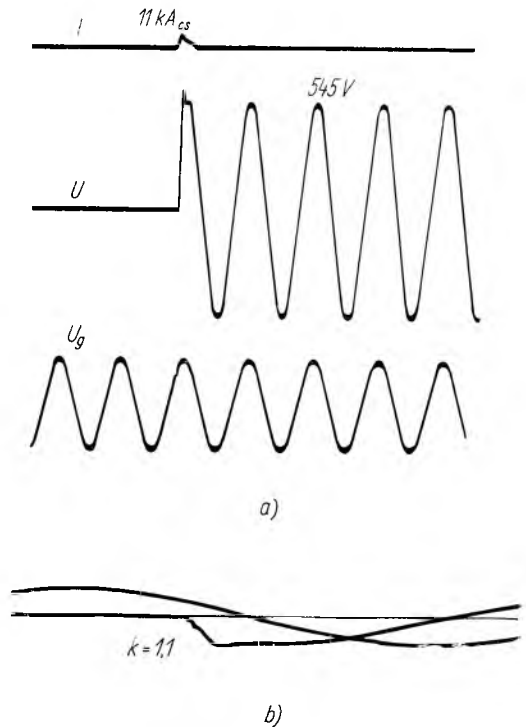
ségen $> 70 \text{ kA}_{\text{eff}}$, a NOSi-típusú olvadóbiztosítók pedig $500 \dots 550 \text{ V}_{\text{eff}}$ feszültségen $> 200 \text{ kA}_{\text{eff}}$ megszakítóképességgel rendelkeznek. Megjegyezzük, hogy e megszakítóképességek *még nem határteljesítmények*, hanem a zárlati próbaberendezésekben kismegszakítóvizsgálók céljaira rendelkezésre álló maximális független zárlati áramértékek. Az elvégzett vizsgálatok tanúsága szerint a biztosítók működésükkor nem okoznak a védendő berendezésekre veszélyes *túlfeszültséget*. A zárlati vizsgálatok során a *csúcstényező* (k) értéke az esetek túlnyomó részében $1,2 \dots 1,3$ érték alatt volt, de az $1,5$ értéket egyetlen vizsgálatnál sem haladta meg. A 21-3a ábra szemléltetésül NOSi-típusú 500 V feszültségű 200 A névleges áramerősségű olvadóbiztosító zárlati vizsgálatának hurkos oszcillogramját mutatja be, míg a 21-3b ábra ugyanezen olvadóbiztosító zárlati vizsgálatának katódcsúgár-oszcillogramját tünteti fel.

Az elvégzett vizsgálatok tanúsága szerint az üveg-szilikon alkalmazásából adódó előnyös tulajdonságok kihasználásával a félvezető-egyenirányító-védőbiztosítók mind a túláramok, mind a zárlati áramok tartományában kifogástalanul megszakítják az áramkört és *rövid idővel ivoltást* biztosítanak, ami az egykristályegyenirányítók védelme szempontjából igen előnyös.

5. Összefoglalás

Az Intézet Villamos Készülék Laboratóriumában a félvezető (germánium és szilícium) egyenirányítók védelmére szolgáló, igen gyors kioldadású áramkorlátozó olvadóbiztosítók kifejlesztésére irányuló kutatás célja olyan *olvadószáll-konstrukció és ivoltási rendszer* kidolgozása volt, amely a félvezető egyenirányítók védelmének igen szigorú követelményeit mindenben kielégíti. A biztosítókkal szemben támasztott különleges követelmények — az egyéb áramkorlátozó olvadóbiztosítókkal szemben támasztott követelményeken túlmenően — a következők voltak: a közönséges biztosítóknál lényegesen gyorsabban olvadjanak ki túlterhelések hatására is, nagy áramkorlátozóképeséggel rendelkezzenek, továbbá ivoltásuk és teljes működési idejük is nagyon rövid legyen.

Az előírt követelmények kielégítését az Intézetben kidolgozott igen gyors kioldadású áramkorlátozó olvadóbiztosítóknál részben az olvadóelem különleges kialakításával, részben a szemcsés ivoltóközeg (kvarchomok) jól ismert ivoltóhatásának és a nyomáseffektusnak a kombinációjával érték el.



21-3. ábra. NOSi-típusú 500 V feszültségű, 200 A névleges áramerősségű olvadóbiztosító zárlati vizsgálatának oszcillogramjai

$U = 545 \text{ V}_{\text{eff}}$; $I = 118 \text{ kA}_{\text{eff}}$; $i = 11 \text{ kA}_{\text{cs}}$; $\cos \varphi < 0,15$; $k = 1,1$
 a) a vizsgálat hurkos oszcillogramja
 b) a vizsgálat katódcsúgár-oszcillogramja

Irodalom

- [1] *Dr. Mocsáry J.*: Überflinke strombegrenzende NH-Sicherungen Typ NOGe und NOSi für Halbleitergleichrichter. *Elektrie* **7** (1964) p. 208—209.
- [2] *Dr. Mocsáry J.*: Igen gyors kiolvadású, áramkorlátozó olvadóbiztosítók félvezetőegyenirányítók védelmére. *Elektrotechnika* **57** (1964) 455—460. old.
- [3] *Dr. Mocsáry J.*: Gyors működésű áramkorlátozó olvadóbiztosító c., 150.156. sz. magyar szabadalom.
- [4] *Dr. Mocsáry J.*: Ultrarapid High-Breaking-Capacity Current-Limiting-Fuses for Semiconductor-Rectifier Protection. *Transelektro News* No. **5**. (1966).

Légnyomásos megszakító kapcsolási túlfeszültségének korlátozása nemlineáris ellenállás alkalmazásával

DR. NÉVERI ISTVÁN

ÖSSZEFOGLALÁS

A belső eredetű túlfeszültségek közül legveszélyesebbek a kis induktív áramok megszakításakor fellépő túlfeszültségek, amelyek keletkezését az áramlevágás jelensége okozza. A cikk ismerteti az áramlevágás keletkezésének okait, a fellépő kapcsolási túlfeszültségek várható értékeit és a túlfeszültségek elleni védekezés különféle módjait. A légnyomásos megszakítók megfelelő ellenállással ellátva képesek a kapcsolási túlfeszültségeket részben vagy teljesen kiküszöbölni. A kis induktív áramok megszakításánál igen jó eredmények érhetők el feszültségtől függő nemlineáris sönt alkalmazásával. A legmegfelelőbb ellenállás értékének meghatározásához a szerző közelítő számítások elvégzését javasolja, amelyek után meghatározott program szerint végrehajtott kísérletsorozat lefolytatása szükséges.

A Villamosipari Kutató Intézet kisfeszültségű zárlati próbaállomásának üzemeltése során gyakran szükséges a 10 kV-os hálózatról táplált zárlati transzformátor üresjárási áramának megszakítása. A kapcsolási túlfeszültségek elkerülésére az Intézet Készülék Laboratóriumában megfelelő szilíciumkarbid-alapú nemlineáris ellenállással ellátott légnyomásos megszakító kialakítása van folyamatban.

ОГРАНИЧЕНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ КОММУТАЦИИ АТМОСФЕРНОГО РАЗЪЕДИНИТЕЛЯ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Д-р. И. Невери

Резюме

Из перенапряжений внутреннего происхождения самыми опасными являются перенапряжения, возникающие при прерывании небольшого индуктивного тока, образование которых вызывает явление тока холостого хода трансформатора короткого замыкания питаемого от сети 10 кв. С целью избежания перенапряжения коммутации в Лаборатории электрических аппаратов Института в процессе разработки находится атмосферный прерыватель, снабженный соответствующим карбидкремниевым нелинейным сопротивлением.

В процессе эксплуатации пробной станции короткого замыкания небольшого напряжения Исследовательского института электротехнической промышленности часто требуется прерывание тока холостого хода трансформатора короткого замыкания питаемого от сети 10 кв. С целью избежания перенапряжения коммутации в Лаборатории электрических аппаратов Института в процессе разработки находится атмосферный прерыватель, снабженный соответствующим карбидкремниевым нелинейным сопротивлением.

BEGRENZUNG DER SCHALTÜBERSPANNUNG VON DRUCKLUFT-LEISTUNGSSCHALTERN DURCH DIE VERWENDUNG NICHTLINEARER WIDERSTÄNDE

Dr. I. Néveri

Zusammenfassung

Von den inneren Überspannungen sind die bei der Unterbrechung von kleinen induktiven Strömen auftretenden Überspannungen die gefährlichsten, die durch die Erscheinung des Stromabschneidens (Unterbrechens) hervorgerufen werden. In der Abhandlung werden die Ursachen dieser Erscheinung sowie die zu erwartenden Werte der auftretenden Schaltüberspannungen und die verschiedenen Methoden des Schutzes gegen Überspannungen beschrieben. Mit entsprechenden Widerständen versehen, können jedoch die Druckluftschalter die Schaltüberspannungen teilweise oder vollkommen eliminieren. Bei der Unterbrechung von kleiner induktiven Strömen sind durch Verwendung spannungsabhängiger, nichtlinearer Shunt-Widerstände besonders gute Erfolge zu erreichen. Zur Bestimmung der günstigsten Widerstandswerte schlägt der Autor Näherungsberechnungen vor, wonach dann die Vornahme einer Versuchsserie nach festgelegtem Programm erforderlich ist.

Im Laufe des Betriebes der Niederspannungs-Kurzschluss-Prüfstation des Forschungsinstitutes für Elektroindustrie wird oftmals die Unterbrechung des Leerlaufstromes eines von einem 10 kV Netz gespeisten Kurzschlusstransformators erforderlich. Zur Vermeidung der Schaltüberspannungen wird z. Zt. im Schaltgeräte-laboratorium des Institutes ein Druckluftschalter mit nichtlinearen Siliziumkarbid-Widerstand ausgearbeitet.

LIMITATION OF SWITCHING OVERVOLTAGE OF AIR-BLAST CIRCUIT-BREAKERS BY NON LINEAR RESISTANCES

Dr. I. Néveri

Summary

The overvoltages, occurring when breaking low inductive currents, are the most dangerous among the overvoltages of internal type. These overvoltages are produced by the current cut-off phenomenon. The paper describes the motives of rise of the current cut-off, the expectable values of the switching overvoltages and the different methods of protection against overvoltages. The air blast circuit breakers with appropriate resistances are capable of eliminating the switching overvoltages partly or completely. Good results can be obtained when breaking low inductive currents, by the aid of non-linear shunt resistances. The author proposes approximate calculations to determine the value of the most reliable resistance. After this a series of experiments is to be performed according to determined schedule.

When working at the Testing Station of the Research Institute of the Electrical Industry, the breaking of the no-load current of the short circuit transformer fed by 10 kV network, is often required. An air blast circuit breaker furnished with appropriate siliconcarbide non-linear resistance is being constructed in the Switchgear-Laboratory of the Institute, to eliminate the switching overvoltages.

1. A kis induktív áramok megszakításakor keletkező túlfeszültségek

A hálózatokon keletkező túlfeszültségek lehetnek külső és belső eredetűek. A külső eredetű túlfeszültség nagysága gyakorlatilag független a hálózat névleges feszültségétől és korlátozására megfelelő védelmi berendezések állnak rendelkezésre (túlfeszültség-levezetők, villámhárítók stb.). A belső eredetű túlfeszültségek egy részének nagysága csaknem kizárólag a hálózat jellemzőitől függ (pl. egyfázisú földzárlat, rövidzárlati áram megszakítása stb.) és a megszakítók legfeljebb korlátozzák azokat (pl. ellenállásos megszakítók). Ezen túlfeszültségek amplitúdó-

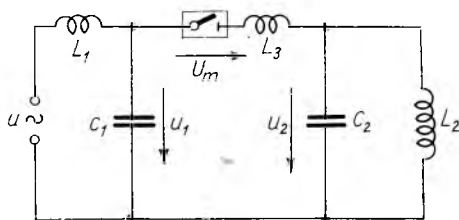
tényezője általában nem haladja meg az 1,9-et. A belső eredetű túlfeszültségek másik része nagymértékben függ az alkalmazott megszakítók jellemzőitől. Ilyen túlfeszültségek keletkeznek kis induktív áramok, terheletlen vezetékek és kondenzátortelepek áramának megszakításakor.

A belső eredetű túlfeszültségek közül a legveszedelmesebbek a kis induktív áramok, vagyis a terheletlen transzformátorok és motorok áramának megszakításakor fellépő túlfeszültségek, különösen középfeszültségen. Az Intézet Készülék Laboratóriumának most készülő kiefeszültégű, nagyteljesítményű zárlati berendezésében igen gyakran fog előfordulni a zárlati transzformátor üresjárású áramának 10 kV-os oldalon történő megszakítása. A 10 kV-ról táplált különleges zárlati transzformátort ugyanis, a kiefeszültégű oldalon lefolytatott sikeres zárlati vizsgálat után, egy 10 kV-os légnyomásos megszakító minden esetben lekapcsolja a táphálózatról. Így tehát gyakran kell számolnunk belső eredetű, ún. kapcsolási túlfeszültég fellépésével. Ennek elkerülésére különféle megoldási módok kínálkoznak. A leghelyesebb megoldás kiválasztása előtt azonban vizsgáljuk meg részletesebben a fellépő túlfeszültégek okait.

A kis induktív áramoknál fellépő kapcsolási túlfeszültégek keletkezését az áramlevágás jelensége okozza. Az áramlevágás kétféle tényező hatására következhet be, amelyek gyakran egyszerre fordulnak elő:

- a) A megszakító erőteljes ívöltő hatása, amely a nullához közeledő egyre labilisabbá váló íváramot hajlamos még a nullaátmenet elérése előtt megszüntetni, levágni. Az áramlevágás elsősorban kis áramok megszakításakor fordul elő, különösen légnyomásos megszakítóknál, amelyeknél az oltóhatás intenzitása független a megszakítandó áram nagyságától.
- b) Az áramkör állandói által kialakított rezgőkör szintén előidézhethet áramlevágást, különösen kis induktív áramok megszakítása esetén, amikor a terhelő oldal induktivitása és kapacitása nincs rövidrezárva (22-1. ábra).

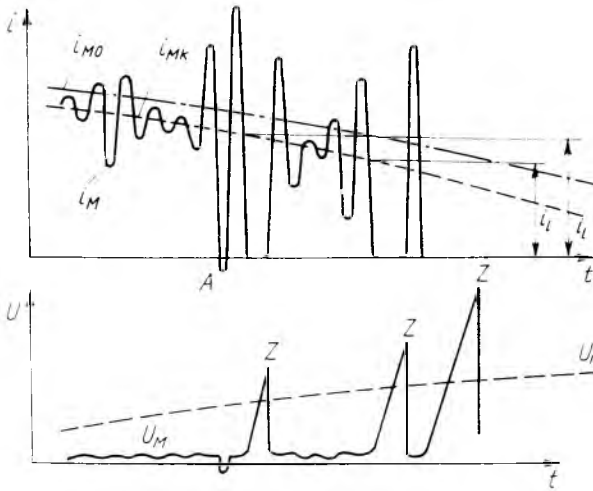
A 22-1. ábra szerinti áramkörben a megszakító érintkezőinek szétválása után az L_3 induktivitás és a C_1 , C_2 kapacitások által meghatározott rezgőkörben az áram változása miatt rezgések lépnek fel, amelyek az ív negatív karakterisztikája következtében erősödő jellegűek lehetnek. Ezek az 50 periódusú íváram hullámára rávetődő oszcilláló rezgések általában 10...200 kHz frekvenciájúak. A 22-2. ábrán kinagyítva látható az íváram változása az áram nullaátmenetének közelében. Mint az oszcillogram mutatja, a rezgések szabálytalanul változnak. Az oszcillálás növekedése olyan nagy lehet, hogy az áram nullára csökkenhet, sőt polaritásváltozás is előfordulhat még a természetes nullaátmenet előtt. Ekkor az ív instabillá válik és ha a megszakító átütési szilárdsága elég gyorsan áll helyre, a rezgés az ív végleges kialakítását okozhatja. Az ábra A pontja jelöli a polaritásváltozás esetét. Mikor az áram eléri a nullát, az ív kialszik és kedvező alkalom adódik a megszakításra. Azonban, ha a szigetelési szilárdság nem elég gyorsan áll helyre, a visszaszökő feszültég visszagyújtást hoz létre (Z pont), és az ív tovább ég látható megszakítás nélkül. Ha nem következik be visszagyújtás, az áramlevágás hatására igen nagy túlfeszültégek is



22-1. ábra. Áramkör-vázlat a kis induktív áramok megszakításáról

keletkezhetnek, mind a lekapcsolt transzformátor tekercselésében, mind pedig a megszakító sarkain. A keletkezett túlfeszültség nagysága a levágott áram, i_1 nagyságától függ.

A kis induktív áramok megszakításakor rendszerint egy meglehetősen nagy induktivitású (L_2) és kis kapacitású (C_2) üresen járó transzformátort, vagy terheletlen



22-2. ábra. Az iváram rezgései az áram nullaátmenetének közelében

i_{M0} : a független áram; i_{MK} : a tényleges iváram középértéke;
 i_M : a tényleges iváram alakulása; U_M az ivfeszültség alakulása

motort kell lekapcsolni (jelöléseket lásd a 22-1. ábrán). Az L_2 induktitásában felhalmozódott $\frac{1}{2} L_2 i_1^2$ mágneses energiának megfelelően a C_2 kapacitás fel fog tölteni. Mivel pedig C_2 rendszerint igen kicsi, az energiaegyensúlyból adódó feszültségcsúcs a levágott áram nagyságától függően igen nagy is lehet:

$$u = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}} i_1.$$

Ha a tápoldal energiaegyensúlyát is megvizsgáljuk, azt találjuk, hogy bár a jelenleg hasonlít a fogyasztási oldalon észlelthez, mégis nagy különbség van a keletkezett túlfeszültség tekintetében. A tápoldalon ugyanis ugyanaz a feszültségcsúcs jelentkezik a két fázis között, mint nagy áramok megszakításakor, és ez a feszültségcsúcs a viszonylag kis L_1 miatt közel sem olyan veszélyes, mint a transzformátor oldalán fellépő érték.

Az áramlevágás hatására fellépő túlfeszültség nagyságának meghatározása nem könnyű feladat. Az irodalomban található számítási módszerek meglehetősen pontatlanok és közös hátrányuk, hogy a számítások alapját képező levágott áram nagyságának meghatározása is bizonytalan. Végleges következtetésként azt mondhatjuk, hogy a számítási módszereknek inkább csak elvi jelentőségük van, és leghelyesebb a túlfeszültségértékek kísérleti megállapítása. Előzetes tájékoztató számításra a fent leírt képlet is alkalmas, amelyhez a levágott áram értékét műszaki becslés alapján vehetjük fel. Az ezen a téren végzett mérések alapján tájékoztatásul

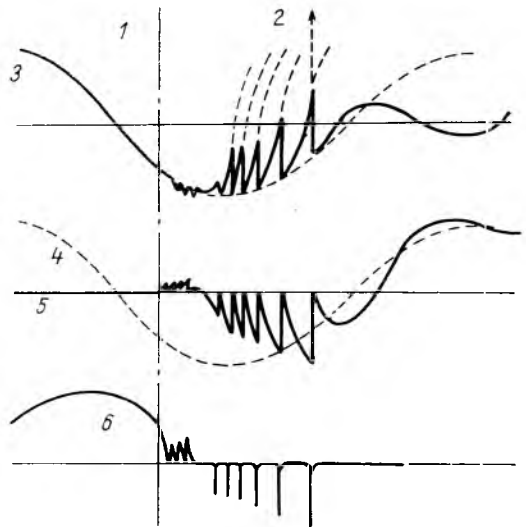
azt mondhatjuk, hogy a keletkező túlfeszültségek szempontjából legveszélyesebb megszakítási áramérték $20...60 A_{eff}$, és általában $10...25 A$ az az áramérték, amelyet a megszakítók maximálisan levágnak. A fellépő kapcsolási túlfeszültség amplitúdó-tényezője (csúcstényező) pedig általában meghaladja a hármat, de öt-hatszoros feszültségértéket is mértek. Ezeket a túlfeszültségértékeket természetesen különféle védelmi módokkal korlátozni lehet, sőt mint látni fogjuk azok meg is szüntethetők.

2. A túlfeszültség elleni védekezés módjai

Mivel a hálózat jellemzőitől függő belső eredetű túlfeszültségek amplitúdó-tényezője általában nem haladja meg az 1,9-et, nyilvánvaló, hogy ha a kapcsolási túlfeszültségeket is erre a szintre tudjuk korlátozni, nagymértékben megkönnyítjük a szigetelések koordinálását. Ebben az esetben már csak a külső, atmoszferikus eredetű túlfeszültségeket kellene figyelembe venni. Ez lehetővé tenné a szigetelési szint csökkentését és ezáltal a hálózatok és szigetelések költségei is csökkennének. A kapcsolási túlfeszültségek csökkentésére háromféle megoldás kínálkozik: túlfeszültség-levezetők használata; a megszakítók érintkezői védőszikraközöként szerepelnek; és végül ellenállásos megszakító alkalmazása.

A korszerű *túlfeszültség-levezetők* ma már alkalmasak arra, hogy az üresen járó transzformátorok megszakításakor felszabaduló mágneses energiát levezessék. Ebben az esetben azonban a veszélyeztetett transzformátorokat akkor is fel kell szerelni levezetőkkel, ha a légköri túlfeszültségek miatt egyébként nem lenne rá szükség. Sok esetben nemcsak a fázis és a föld közé kell túlfeszültség-levezetőt tenni, hanem ajánlatos a fázisok közé is levezetőket elhelyezni. Ezzel a megoldással meglehetősen megnövekszik a hálózatot elhelyezendő túlfeszültség-levezetők száma. Figyelembe kell azt is venni, hogy bár a transzformátor üresjárási áramának megszakításakor csak bizonyos áramtartományokban lépnek fel olyan túlfeszültségek, amelyek a levezetőt megszólaltatják, mégis sokkal gyakrabban kell számolni a kényes túlfeszültség-levezető megszólalásával, mintha csak a külső eredetű túlfeszültségekre alkalmaznánk azokat. Megállapíthatjuk tehát, hogy a túlfeszültséglevezetők kétségkívül védelmet biztosíthatnak a transzformátorok üresjárási áramának megszakításakor fellépő túlfeszültségek ellen, alkalmazásuk jogosultságát azonban gazdaságossági számítások szabják meg.

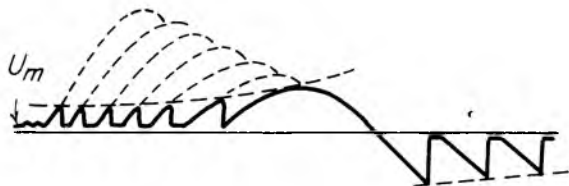
A megszakítók érintkezői akkor látják el a védőszikraköz szerepét, ha



22-3. ábra. A kapcsolási túlfeszültség korlátozása a megszakító érintkezői között létrejövő visszagyújtásokkal

1 az érintkezők szétválásának pillanata; 2 az áramkör megszakítása; 3 feszültség a transzformátor sarkain; 4 tápfeszültség; 5 a megszakító sarkain megjelenő feszültség; 6 az iv árama

a megszakító dielektromos szilárdságának visszatérési sebessége a visszazökő feszültség meredekségénél kisebb. Ebben az esetben az áramlevágás hatására fellépő kapcsolási túlfeszültség visszagyújtást okoz a megszakítóban, amely behatárolja a kapcsolási túlfeszültséget. A jelenség lefolyását a 22-3. ábra szemlélteti. A megszakító érintkezőinek szétválása után (I egyenes) a megszakító sarkain az 5 görbe szerinti feszültség jelenik meg. Amikor a visszazökő feszültség eléri az elektródköz átütési szilárdságát, visszagyújtás következik be, melynek hatására a megszakító érintkezői



22-4. ábra. A túlfeszültségek alakulása, ha a megszakító érintkezői között nem következik be visszagyújtás

között a 6 jelű görbe szerinti tranzienis áram folyik és a transzformátor C_2 kapacitása a megszakítóban keletkezett íven, az L_3 induktivitáson és az áramkör ellenállásain keresztül kisül. A létrejövő áram azonban labilis lévén, újból kialszik. A visszagyújtások addig ismétlődnek, amíg az érintkezők között a szigetelési szilárdság képes lesz a visszazökő feszültségnek ellenállni. Közben a transzformátorban felhalmozott energia fokozatosan visszajut a tápláló rendszerbe. A 22-4. ábrán látható szaggatott vonalak azt mutatják, hogy milyen feszültségek alakultak volna ki, ha a megszakító dielektromos szilárdságának visszatérési sebessége végtelen nagy lett volna. A felhalmozott mágneses energia csökkenésének hatására a visszazökő feszültség csúcserkéi, és így az emelkedési meredekség is nagymértékben csökken.

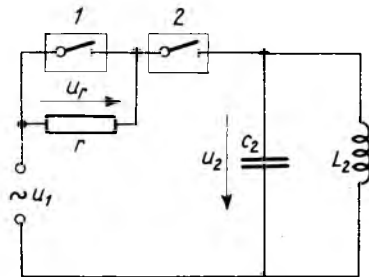
A megszakítók védőszikraköz szerepének azonban gátat vet az a tény, hogy feladatuk elsősorban a nagy zárlati áramok megszakítása. Így a dielektromos szilárdság visszatérési sebességének beállításánál azt kell szem előtt tartani, hogy az elektródköz átütési szilárdsága olyan kicsi legyen, amilyen még éppen megengedhető, nehogy a nagy zárlati áramok megszakításakor fellépő visszazökő feszültség visszagyújtást okozhasson. Így tulajdonképpen minden megszakítóhoz tartozik egy maximális túlfeszültségérték, amelyet a megszakító a kis induktív áramok megszakításakor megenged. Ez az érték azonban sajnos igen sok esetben a megfelelő megszakítóképesség érdekében olyan nagy, hogy a túlfeszültség korlátozásáról más módon kell gondoskodni.

Ellenállásos megszakító alkalmazásával igen kedvezően befolyásolhatjuk a kis induktív áramok megszakítását. Megfelelően kialakított és megválasztott ellenállással korlátozhatjuk a túlfeszültséget okozó áramlevágások nagyságát, csillapíthatjuk a megszakítás után fellépő túlfeszültségeket és kihasználhatjuk az érintkezők védőszikraköz szerepét, annak hátrányos következményei nélkül.

3. A túlfeszültségek korlátozása ellenállásos megszakítóval

Az ellenállásos megszakítók kialakításához olyan két megszakítási hellyel rendelkező megszakítóra van szükség, amelynél az egyes megszakítási helyek egymáshoz képest időben eltolva működnek. Egy elvi elrendezés a 22-5. ábrán látható, ahol

a megszakító 1 megszakítási helyével párhuzamosan kapcsoljuk a védőellenállást és az ellenálláson átfolyó áramot a 2 megszakítási helynek kell megszakítani. A 22-1. ábrához képest ezen kapcsolási vázlatban az L_1 és L_3 induktivitásokat elhanyagoltuk az L_2 induktivitás mellett és a C_1, C_2 kapacitásokat összevontuk. Ilyen két megszakítási helyvel rendelkező megszakító kialakítása viszonylag egyszerű feladat, de feltétlenül ismerni kell a két megszakítási hely várható igénybevételét. Ezt azonban csak a beépített ellenállás ismeretében lehet meghatározni, természetesen az egyéb áramköri adatok ismerete mellett. Az ellenállás értékének és minőségének (lineáris vagy nemlineáris voltának) megfelelő megválasztása biztosítja a kapcsolási túlfeszültségek kívánt szinten való tartását.

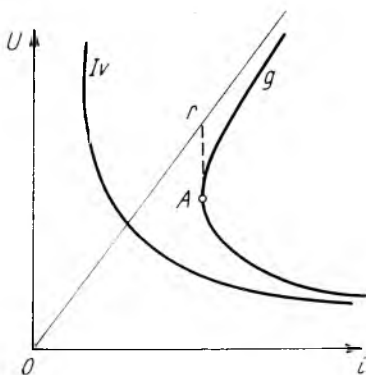


22-5. ábra. Egyszerűsített áramkör, üresen járó transzformátornak ellenállásos megszakítóval történő kikapcsolásáról

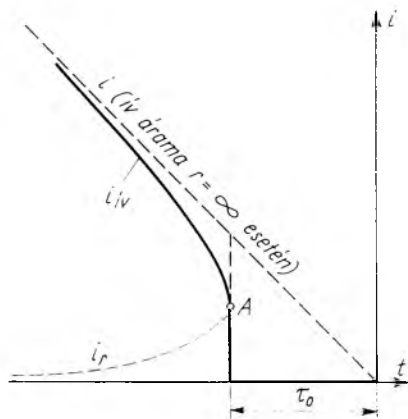
Az ellenállás megválasztásával kapcsolatos szempontok figyelembevételéhez vizsgáljuk meg részletesebben az ellenállás szerepét a megszakító egyes megszakítási helyeinek működése közben.

3.1 A főív (1 megszakítási hely) megszakítása

Mint a 22-5. ábrán látható, az 1 megszakítási hely nyitásakor az érintkezők között megjelenő ívvel egy r ellenállás van párhuzamosan kapcsolva. Nyilvánvaló, hogy a két párhuzamos ág között az áram minden pillanatban a vezetőképességek arányában fog megoszlani. Mivel az ív ellenállása az áram csökkenésével növekszik, az áram csökkenése következtében a pillanatértékek mind nagyobb százaléka fog az ellenálláson átfolyni. A 22-6. ábrán felrajzoltuk az ív statikus jelleggörbéjét és a sönt r egyenesét, a kettőből megszerkesztettük a két elem párhuzamos kapcsolásának g eredőjét. Ha az áram csökken, az eredő g görbe az A pont eléréséig megtartja negatív jellegét. Az A pont elérése után az üzemi pont kénytelen átugrani az r egyenesre és mint tisztán lineáris ellenállás csökken nullára. Az A pontban tehát az ív árama kialszik. A 22-7. ábrán az ív áramának időbeli lefolyása látható. Az ív-



22-6. ábra. Az ív áram jelleggörbéjének alakulása ellenállásos megszakítóban



22-7. ábra. Az ív áram alakulása ellenállásos megszakítóban, az idő függvényében

áram csökkenésével fokozatosan terelődik az áram egyre nagyobb része a sönt ágába. Az ellenállás hatására az i_v idővel hamarabb alszik ki a természetes nullaátmenetnél, és az egész áram az ellenálláson folyik tovább. Mindezekből megállapíthatjuk, hogy minél kisebbre választjuk a sönt értékét, annál több idő áll rendelkezésre az 1 megszakítási hely átütési szilárdságának visszatérésére.

A sönt így közvetve befolyásolja a túlfeszültséget okozó áramlevágásokat is, mivel lényegében megszűnik annak lehetősége, hogy a 22-7. ábra A pontjának elérése után áramlevágás következzen be. Mindez természetesen csak egy meglehetősen kis (néhány ohmos) ellenállás esetén fordulhat elő. Ugyancsak kis ellenállással lenne jól megvalósítható az üresen járó transzformátorban felhalmozódott mágneses energia kisütése is, és ezzel a kapcsolási túlfeszültségek elkerülése. A másik megszakítási hely szempontjából azonban minél nagyobb ellenállás beiktatására van szükség, mert ellenkező esetben a nehézségek és a veszélyes kapcsolási túlfeszültség a 2 megszakítási helyen fog jelentkezni.

A kis induktív áramok megszakításakor fellépő túlfeszültségek csökkentésére legalkalmasabb ellenállásérték pontos meghatározása meglehetősen bonyolult feladat. Ehhez ugyanis a megszakító jellemző paramétereinek pontos ismeretén túlmenően a hálózat és a lekapcsolandó transzformátor induktivitásainak és kapacitásának pontos ismerete szükséges. Ezek miatt az ellenállás értékének csak közelítő meghatározása lehetséges, és csak megfelelő számú kísérlet elvégzése után lehet egy meghatározott esetre a legmegfelelőbb ellenállásértéket megadni.

Az 1 megszakítási helyen fellépő maximális túlfeszültségre vonatkozóan igen jó tájékoztatást ad az

$$U_r = i_r r$$

egyenlet, ahol az ellenálláson átfolyó áram egy hálózati frekvenciájú és egy exponenciálisan csillapodó komponensből áll:

$$i_r = \frac{\sqrt{2} U_1}{\sqrt{r^2 + L_2^2}} \sin(\omega t - \varphi) + i_1 e^{-\frac{r}{L_2} t}$$

az egyenletben szereplő φ a

$$\cos \varphi = \frac{r}{\sqrt{r^2 + (\omega L_2)^2}}$$

képletből számítható; i_1 a levágott áram értéke.

A fellépő feszültségérték tehát:

$$U_r = \frac{\sqrt{2} U_1 r}{\sqrt{r^2 + (\omega L_2)^2}} \sin(\omega t - \varphi) + i_1 r e^{-\frac{r}{L_2} t}.$$

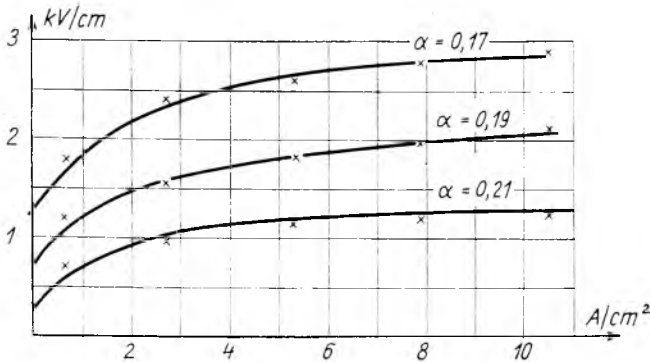
A levágott áram, az L_2 induktivitás és a megengedett maximális túlfeszültség ismeretében ebből az egyenletből a választandó ellenállás tájékoztató értéke meghatározható. A végleges ellenállásérték azonban, mint mondtuk, csak kísérletek alapján dönthető el.

A kedvező eredmények biztosítása érdekében arra kell törekednünk, hogy az 1 megszakítási hely működése alatt és közvetlen utána az ellenállás értéke minél kisebb legyen a kapcsolási túlfeszültség meggátolása érdekében, ugyanakkor az i_v megszakítása után az ellenállásérték ugrásszerű növekedése kívánatos, hogy a 2 megszakítási hely feladata minél könnyebb legyen. Ilyen szempontból igen csábító

tulajdonságokkal rendelkeznek a feszültségtől függő, szilíciumkarbid-alapanyagú ellenállások. Ezen ellenállások jelleggörbéje (volt—amper-jelleggörbe) az

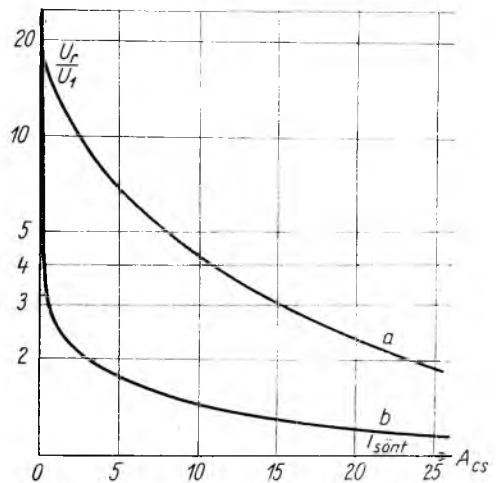
$$U = kI^\alpha$$

egyenlet szerint alakul (22-8. ábra), ahol k az anyagminőségtől függő állandó, α pedig a nemlinearitási tényező. Látható, hogy a megszakító szempontjából az a cél, hogy α -t minél kisebbre lehessen lezorítani.

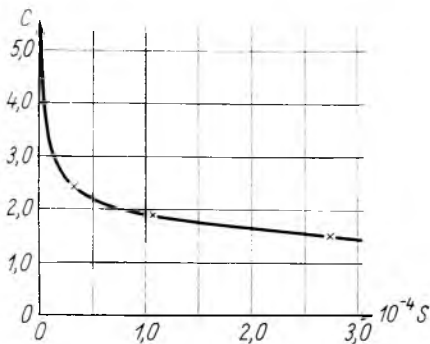


22-8. ábra. Szilíciumkarbid-ellenállás jelleggörbéje különböző nemlinearitási tényező esetén

A lineáris vagy nemlineáris ellenállás alkalmazásának kérdését a 22-9. ábrán látható jelleggörbék figyelembevételével dönthetjük el. Mint látható, a nemlineáris ellenállás (b görbe) már 2...3 A-es söntáramcsúcsnál megfelelő értékre korlátozza a túlfeszültséget, a lineáris ellenállásnál (a görbe) azonban tízszer, vagy még többször annyi áram kell, hogy ugyanazt az eredményt elérhessük. A diagram alapján mondhatjuk, hogy 25 A alatti söntáramok esetén feltétlenül előnyösebb a nemlineáris ellenállások alkalmazása. Mivel az üresen járó transzformátorok árama rendszerint ebbe a tartományba esik, esetünkben feltétlenül meg kellett vizsgálnunk a nemlineáris ellenállások alkalmazhatóságának kérdését, sőt elsősorban ezt. A nemlineáris ellenállások, különösen a szilíciumkarbid-alapú ellenállások nagy hátránya, hogy negatív hőkarakteristikával rendelkeznek és ezért nagy áramok vezetésére hosszabb ideig gazdaságosan nem alkalmazhatók. A transzformátorok üresjárási árama azonban ilyen szempontból még megengedhető igénybevételt jelent az ellenállások méreteinek túlzott növelése nélkül.



22-9. ábra. Az ellenállásos megszakító sarkain fellépő túlfeszültség 15 MVA-es transzformátor üresjárási áramának megszakítása esetén
 a lineáris ellenállás; b nemlineáris ellenállás alkalmazásával



22-10. ábra. A visszazökő feszültség csúcstényezőjének változása a nemlineáris ellenállás vezetőképességének függvényében, kis induktív áramok megszakítása esetén

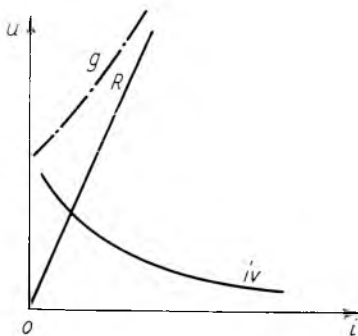
A szilíciumkarbid-alapú nemlineáris ellenállás értékének és méreteinek meghatározásához a maximálisan megengedett túlfeszültség és az előfordulható legnagyobb levágott áram értékének ismeretére van szükségünk. Első közelítésként feltételezhetjük ugyanis, hogy az áram, amely az első megszakítási hely ívének elalvása pillanatában az ellenálláson keresztül folyik, egyenlő a levágott árammal. Így az ellenállás jelleggörbéjének ismeretében a megengedett túlfeszültséghez kiválasztható a megfelelő ellenállásérték. Kísérleteink és az irodalmi adatok azt igazolják, hogy a kis induktív áramok megszakításakor fellépő kapcsolási túlfeszültségek korlátozására kb. 10^{-4} S-nél nagyobb vezetőképességű ellenállást nem érdemes alkalmazni.

3.2 A második megszakítási hely működése

A 22-5. ábra szerinti 2 megszakítási hely már az r ellenálláson átfolyó áramot szakítja meg. Az ívvel sorbakapcsolt ellenállás eredő jelleggörbéjét a 22-11. ábrán szerkesztettük meg. Láthatjuk, hogy az eredő g görbe csak akkor lesz pozitív hajlásszögű a kis áramok tartományában, ha megfelelően nagy az ellenállásérték. Ezért mondhatjuk, hogy a 2 megszakítási hely ívtoltásának megkönnyítéséhez minél nagyobb ellenállásértéket kell választani. Az ívvel sorbakötött ellenállás egyben csökkenti a megszakítandó áram amplitúdóját is és javítja az áramkör teljesítménytényezőjét. A teljesítménytényező javításával akkor érünk el megfelelő hatást, ha az ellenállás értéke nem kisebb a megszakítandó áramkör reaktanciájánál. Ebben az esetben ugyanis az áramkör teljesítménytényezőjét 0,5-nél nagyobb értékre javítva a megszakítás után az érintkező sarkain megjelenő rárezgő feszültség a hálózati feszültségnek nem a csúcsertékeire fog szuperponálódni, tehát a fellépő túlfeszültség csúcsertéke nagymértékben csökken.

A viszonylag nagy ellenállásérték ellenére ebben az esetben is számolhatunk áramlevágással, csak hogy a második megszakítási hely — amelyet segédmegszakítóknak is nevezünk — még nagy zárlati áramok megszakításakor is csak igen kis teljesítményt szakít meg, ezért aránylag csekély oltóhatást alkalmazhatunk. Az ívvel sorbakapcsolt ellenállás az íváram rezgéseit is csillapítja, tehát a rezgésekből adódó áramlevágás (lásd 22-2. ábra) veszélye is csökken.

A kis induktív áramok megszakításakor megjelenő túlfeszültség értékét tovább tudjuk szabályozni, ha a segédmegszakító szigetelési szilárdságának visszatérési sebességét megfelelő értékre korlátozzuk. Így a második megszakítási hely védőszikraközként szerepel. Ezáltal nem csökkentjük a megszakítóképeséget, mivel a nagy teljesítmények megszakítása az első megszakítási helyre korlá-

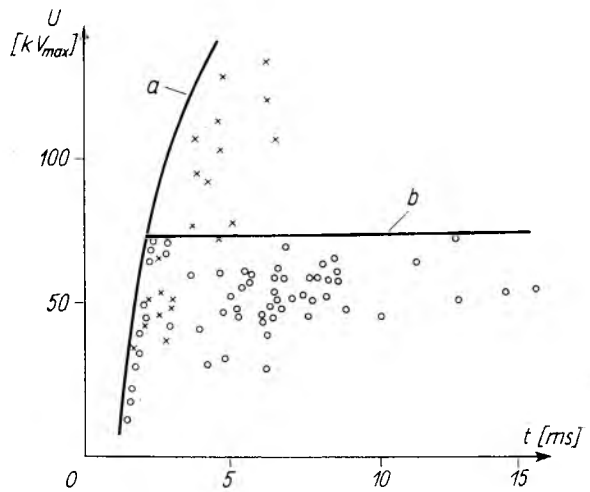


22-11. ábra. Az iv és a vele sorbakapcsolt ellenállás eredő jelleggörbéjének alakulása

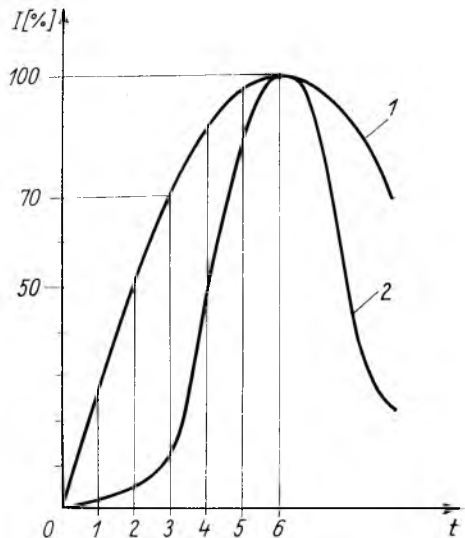
tozódott. Légnymásos megszakítóknál a második megszakítási hely szigetelési szilárdságának megfelelő értékre való szabályozása az érintkezők nyitási sebességének változtatásával, vagy a légnymás értékének csökkentésével történik. Ha tehát a túlfeszültség túllép egy bizonyos megengedett értéket, a segédmegszakító érintkezői között átütés jön létre és a hálózat kapacitása a védőellenálláson keresztül kiszül. Így a túlfeszültség letörése viszonylag kis sebességgel következik be és ezáltal nagymértékben csökken a kikapcsolandó transzformátor tekercsein a feszültség egyenlőtlen eloszlása, vagy a feszültség hullám feltorlódásának veszélye egy áramváltón vagy fojtótekercsen.

A segédmegszakító védőszikraköz szerepének érvényesülése jól látható a 22-12. ábrán, ahol ugyanolyan áramkörü adatok mellett, ellenállás nélküli és ellenállásos megszakító sarkain megjelenő maximális túlfeszültségértékek láthatók az idő függvényében. Az ellenállásos megszakító második megszakítási helye mint védőszikraköz működött és 70 kV_{cs} -nál nagyobb feszültségértéket nem engedett kifejlődni, ellentétben az ellenállás nélküli megszakítóval, amelynek jelleggörbéjét az *a* jelű görbe képviseli.

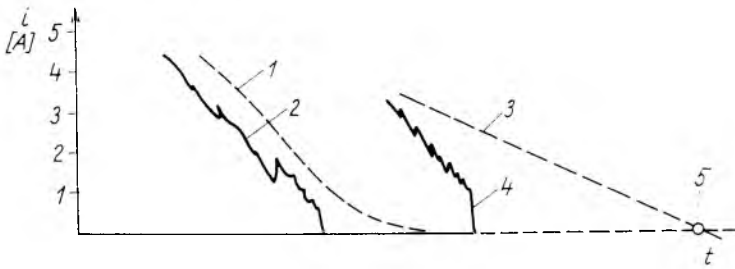
A második megszakítási hely működése szempontjából is igen előnyös a feszültségtől függő nemlineáris ellenállások alkalmazása. A nemlineáris ellenálláson átfolyó eredetileg szinuszos lefolyású áram alakja ugyanis eltorzul és a 22-13. ábrán látható módon, a nullaátmenet közelében az ivoltás számára lényegesen hosszabb idő áll rendelkezésre. Látható, hogy pl. amikor a szinuszos áram csúcserkének 70%-át elérte, a nemlineáris ellenállással bíró kör árama a csúcserké kb. 12%-át érte csak el. A 22-14. ábrán egy légnymásos megszakító söntáramának megszakítása látható, lineáris és nemlineáris ellenállás alkalmazása esetén. Szaggatott vonallal fel van tüntetve mindkét esetben



22-12. ábra. Kis induktív áramok megszakításakor fellépő túlfeszültség-értékek, légnymásos megszakító használata esetén. $U_n = 20 \text{ kV}$, $I = 25 \text{ A}$
a Ellenállás és védőszikraköz nélküli megszakítás;
b ellenállásos megszakítás



22-13. ábra. A szinuszos áramalak eltorzulása a nemlineáris szilíciumkarbid-ellenállás hatására
 1 eredeti áramalak; 2 eltorzult áramalak



22-14. ábra. A védőellenálláson átfolyó áram megszakítása lineáris és nemlineáris ellenállás esetén

1 a nemlineáris ellenálláson átfolyó áram az iv fellépése előtt; 2 az iv hatása a nemlineáris ellenálláson átfolyó áram alakjára; 3 a lineáris ellenálláson átfolyó áram az iv fellépése előtt; 4 az iv hatása a lineáris ellenálláson átfolyó áram alakjára; 5 a természetes nullaátmenet

a normál áramalak is. Látható, hogy nemlineáris ellenállás esetén jóval több idő áll rendelkezésre a szigetelési szilárdság visszatérése számára, ezért egy gyengébb oltóhatású megszakítási hely is el tudja látni ugyanazt a feladatot. Az ábrából az is látszik, hogy nemlineáris ellenállást alkalmazva ugyanazon megszakítónál kisebb áramlevágásra kell számítani.

4. Az ellenállás megválasztásához elvégezhető kísérletek

Megállapítást nyert, hogy a kis induktív áramok megszakításakor fellépő túlfeszültségek korlátozását lineáris vagy nemlineáris ellenállások alkalmazásával megfelelően meg tudjuk oldani. Láttuk azt is, hogy a túlfeszültségek csökkentésének mértéke nagyrészt az ellenállás értékének helyes megválasztásától függ; a szükséges ellenállás értékének pontos meghatározása pedig kísérletek nélkül nem lehetséges.

A kísérletek elvégzése előtt a 3. fejezetben leírt közelítő számítási módszer segítségével meghatározzuk az alkalmazandó sönt körülbelüli ellenállásértékét. Ha előírjuk, hogy 1,9-szeresnél nagyobb csúcstényezőjű visszaszökő feszültséget nem engedünk meg, akkor a számított ellenállásérték nagyságrendjébe tartozó néhány kísérleti ellenállás elkészítése után a következőképpen folytatjuk le a kísérletet. A kiválasztott és a megfelelő ellenállással felszerelt két megszakítási hellyel rendelkező megszakítót a vizsgált áramkörbe helyezük, majd a kikapcsolandó kis induktív áramok értékének 5...100 A áramtartományban történő változtatása mellett mindkét megszakítási helyen mérjük a kapcsolási túlfeszültségeket. Az egyes vizsgálat-sorozatokat elvégzése után a sönt ellenállásértékét változtatjuk. Így felrajzolhatjuk a megszakítandó áramerősség függvényében, hogy az első és második megszakítási helyen fellépő, maximálisan 1,9-szeres csúcstényezőjű visszaszökő feszültség értékéhez milyen ellenállásértékek tartoznak. Az így kiválasztott sönt méretezése most már egyszerű feladat.

A biztonság érdekében a második megszakítási hely megszakítóképessége ezután némileg csökkenthető és ezáltal a védőszikraköz szerepe jobban kidomborítható. Figyelembe kell vennünk ugyanis, hogy a nagy ellenállásérték hatására a második megszakítási helyen nagymértékben javított teljesítménytényezőjű áramot kell megszakítani:

$$I_2 = I_1 \frac{X}{Z} = I_1 \sin \varphi = \frac{U_f}{\sqrt{X^2 + r^2}},$$

ahol I_2 a második megszakítási hely árama;

I_1 a transzformátor üresjárási árama, amelyet 5...100 A-ig változtatunk;

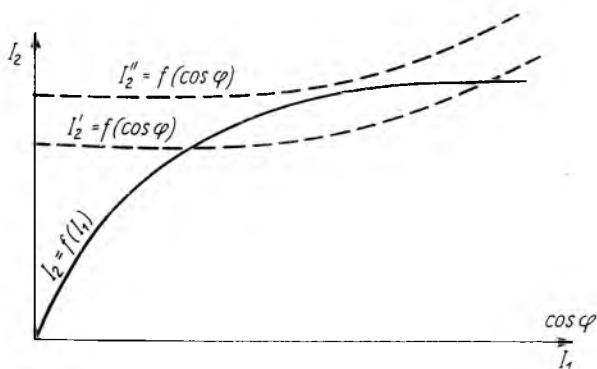
X a megszakítandó I_1 áramhoz tartozó reaktancia;

U_f az áramkör fázisfeszültsége;

r a sönt ellenállása;

$$Z = \sqrt{X^2 + r^2}.$$

A 22-15. ábrán felrajoltuk az $I_2 = f(I_1)$ görbét. A koordináta-rendszer abszcisszájára másik változóként a teljesítménytényezőt is felírtuk. Ezután ugyanebbe a koordináta-



22-15. ábra. A második megszakítási hely áramerősségének alakulása és a segéd megszakító jelleggörbéje

rendszerbe berajoltuk a segéd megszakító jelleggörbéjét (a segéd megszakító által megszakítható áram a teljesítménytényező függvényében) és eldönthetjük, hogy mennyire kell növelni vagy csökkenteni a megszakító képességet. Az ábrán az I_2' és I_2'' jelleggörbék közül, mint látható, az I_2'' görbéhez tartozó megszakító megfelelően el tudja látni a feladatát, míg az I_2' jelleggörbe szerinti megszakító bizonyos áramtartományban, illetve bizonyos teljesítménytényezőknél már nem működik megfelelően. A leírt módszer alkalmas tehát arra, hogy maximálisan kihasználjuk a második megszakítási helyet és ezáltal teljes mértékben biztosíthatjuk a megszakító védőszikrakóz szerepét is.

5. Következtetések

Az Intézet kisfeszültségű zárlati laboratóriumában a gyakori működés miatt a 10 kV-os tápoldalon, védő megszakítóként légnomásos megszakítót alkalmazunk. Az elmondottak figyelembevételével a megszakítót legcélszerűbb feszültségtől függő nemlineáris ellenállással ellátni. Ezáltal a zárlati transzformátor üresjárási áramának gyakori kikapcsolásánál sem kell veszélyes kapcsolási túlfeszültségre számítani. A feladat megoldása érdekében olyan légnomásos megszakítóra volt szükségünk, amely két megszakítási hellyel rendelkezik. Erre legalkalmasabbnak látszott a hazai PTK típusú (Ganz Villamossági Művek) megszakítókhöz hasonló felépítésű, cseh-szlovák gyártmányú CNR típusú megszakító. Ez a megszakító ellenállásos kivitelben készül, azonban az itt alkalmazott kis értékű lineáris fémellenállás nem alkalmas

a kapcsolási túlfeszültségek csökkentésére, az csak teljesítménynövelés szempontjából fejthet ki előnyös hatásokat. Ezért az eredeti ellenállást leszerelve, a megszakítót szilíciumkarbid-alapú nemlineáris ellenállással láttuk el, és ezáltal kívánjuk a korábbiakban vázolt célt elérni. A megfelelő karakterisztikájú és méretű nemlineáris ellenállásoszlopok Intézetünkben elkészültek és az azokkal kapcsolatos kísérletek a 4. pontban leírt program szerint folyamatban vannak. A kísérletek eredményeiről és a végleges megoldásról egy következő cikkben fogunk beszámolni.

Irodalom

- [1] *Allan, A.—Amer, D. F.*: The Extinction of Arcs in Air-Blast Circuit-Breakers. The Journal of the I. E. E. 1947. 94. p. 333.
- [2] *Baltensperger, P.*: Overvoltage Due to the Interruption of small Inductive Currents, CIGRE, 1950. Report No. 116.
- [3] *Benkó I.*: Kis induktív áramok megszakítása. Elektrotechnika. 1960. 98. old.
- [4] *Benkó I.*: Kis induktív áramok és kapacitív áramok megszakításakor fellépő túlfeszültségek. Kandidátusi értekezés. 1960.
- [5] *Bergström, L. R.—Johansen, O.—Grundmark, B.*: Limiting of Switching Over-Voltages Field Tests, Laboratory Tests and Calculations, CIGRE. 1954. Report No. 117.
- [6] *Biermanns, J.*: Hochspannung und Hochleistung. Hauser Verlag. München, 1949.
- [7] *Biermanns, J.*: Druckgasschalter. ETZ-A. 1953. 74. évf. p. 281.
- [8] *Flurscheim, C. H.—Saulez, K. J.—Sillars, R. W.*: Resistance Shunts for High Voltage Circuit-Breakers. CIGRE. 1950. Report No. 103.
- [9] *Hochrainer, A.*: Investigation of the Recovery of Dielectric Strength in Alternating Current Breakers. CIGRE. 1954. No. 112.
- [10] *Dr. Lukács J.*: Nemlineáris ellenállások túlfeszültséglevezetőkhöz. Kandidátusi értekezés. 1957.
- [11] *Maury, E.—Renaud, J.—Baron, Y.—Pouard, M.*: Le disjoncteur sans surtensions, Consequences pour les reseaux. CIGRE. 1958. Report No. 146.
- [12] *Néveri I.*: Ellenállásos megszakítás. Kandidátusi értekezés 1961.
- [13] *Nöske, H.*: Zum Stabilitätsproblem beim Abschalten kleiner induktiver Ströme. Archiv f. Elektrotechnik. 1957. p. 114.
- [14] *Teszner, S.—Maury, E.—Perolini, M.*: Switching Overvoltages Means for Their Reduction and Regulations for Circuit Breakers. CIGRE. 1954. Report No. 146.

23.

Újabb eredmények az érintkezőanyagok kutatása területén

DR. NÉVERI ISTVÁN

ÖSSZEFOGLALÁS

Az Intézet Villamos Készülék Laboratóriumában kidolgozott érintkezőanyagvizsgáló berendezésben az érintkezőanyagok élettartamának meghatározására gyorsított módszereket alkalmaznak. A vizsgálati eredmények alapján a cikk ismerteti az AgCdO érintkezőkkel elért újabb eredményeket, a 100 A feletti áramtartományban. Megállapítható az AgCdO érintkezők mikroszkópi vizsgálata alapján, hogy a CdO szemcse-elrendeződése és mérete tájékoztatást nyújt az érintkezőanyag minőségére vonatkozóan is.

Az érintkezők jóságát nagymértékben befolyásolja a hordozóanyagra történő felforrasztás megfelelő minősége. Az AgCdO érintkezők jó felforrasztásához ezüstréteget kell az érintkezőanyagra plattírozni, amelynek minőségét tanácsos gondosan ellenőrizni.

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ В ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНТАКТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Д-р. И. Невери

Резюме

По оборудованию для испытания контактных материалов, разработанного в Лаборатории электрических аппаратов Исследовательского Института применяются ускоренные методы для определения срока службы контактных материалов. На основании результатов испытания в статье описываются новые результаты достигнутые по контактам AgCdO в диапазонах тока свыше 100 а. На основании микроскопного испытания контактов AgCdO можно установить, что гранулометрический состав и размер зерен CdO дает информацию также и относительно качества контактного материала.

На добротность контактов в значительной мере воздействует соответствующее качество припойки к несущему материалу. Для хорошей припойки контактов контактный материал следует покрывать (платировать) слоем серебра, качество которого рекомендуется тщательно контролировать.

NEUERE FORSCHUNGSERGEBNISSE AUF DEM GEBIET DER KONTAKTMATERIALIEN

Dr. I. Néveri

Zusammenfassung

Bei der im Schaltgerätelaboratorium des Instituts entwickelten Kontaktmaterial-Prüfanlage werden zur Bestimmung der Lebensdauer von Kontaktmaterialien beschleunigte Methoden angewandt. Auf Grund der Versuchsergebnisse werden die mit AgCdO Kontakten in den Strombereichen über 100 A erzielten neueren Ergebnisse beschrieben. Auf Grund der mikroskopischen Prüfung von AgCdO Kontakten kann festgestellt werden, dass die Kornstruktur und Grösse des CdO Aufschluss auch über die Qualität des Kontaktmaterials gibt.

Die Güte der Kontakte wird weitgehend durch die entsprechende Qualität des Auflötlens auf den Trägerwerkstoff beeinflusst. Um eine gute Lötung zu erzielen, sind die AgCdO Kontakte mit einer Silberlackierung zu versehen, deren Qualität soll sorgfältig kontrolliert werden.

NEW DEVELOPMENTS IN THE STUDY OF CONTACT MATERIALS

Dr. I. Néveri

Summary

Rapid methods are adopted to determine the service life of contact materials in a contact material testing device, elaborated in the Swithgear-Laboratory of the Institute. The paper describes the new results with the AgCdO contacts in the current ranges above 100 A, on the basis of the experimental results. It can be proved by the aid of microscopic examination of the contacts, that the granular structure and the grain size of the CdO give information on the quality of the contact material too.

The good quality of the contacts is determined to a great degree by the adequate quality to the soldering on the base material. A silver layer must be plated on the contact material to have a good quality soldering of the AgCdO contacts; it is recommended to check carefully the quality of the soldering.

Bevezetés

A kisfeszültségű kontaktorok és motorvédő kapcsolók élettartamát elsősorban az alkalmazott érintkezők minősége határozza meg. Mivel a készülékek villamos élettartamának fokozása olyan gyártási folyamatok és egyéb automatizált berendezések üzembiztonságát növeli, amelyek gazdasági kihatása nehezen mérhető ugyan, de minden esetben több nagyságrenddel nagyobb a készülék áránál, mindent el kell követnünk az érintkezőanyagok minőségének javítása érdekében. A legfontosabb feladat annak meghatározása, hogy a különféle működési tartományokban melyik érintkezőanyag-összetétel bizonyul a legjobbnak. Azt is ki kell dolgozni, hogy az egyes összetételek milyen gyártási technológia szerint készüljenek. Intézetünk a Vasipari Kutató Intézettel együttműködve már hosszú évek óta folytat kutatást ezen a területen. Eddig a 20...100 A áramtartományban működő készülékek számára állapítottuk meg a legmegfelelőbb érintkezőanyag minőségét. Kutatásainkat most a 100...200 A áramtartományban üzemelő kontaktorokra terjesztettük ki.

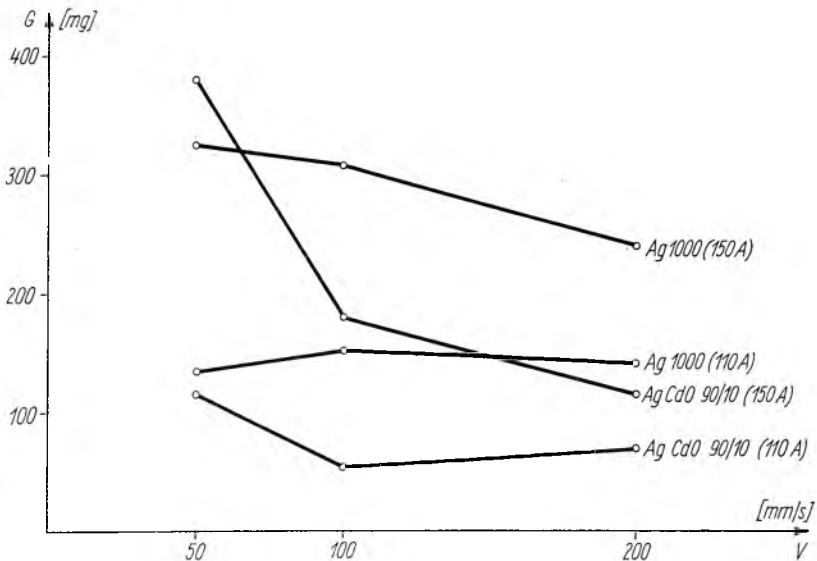
Az érintkezőanyag-kutatás keretein belül meg kell határozni az érintkezők élettartamát befolyásoló tényezők hatásainak mértékét is. Az érintkezők anyag-összetételüktől függően különbözőképpen reagálnak a villamos ív eróziós hatására és a kapcsolandó áramkör jellemzőinek változására. A vizsgálatok során figyelembe kell venni ezenkívül a kapcsolási sebességet, az érintkezőnyomást, az érintkezők alakját és az alkalmazott ívöltési módszereket is. A számos tényező hatásának figyelembevételével mellett a legmegfelelőbb megoldás kiválasztása — az elméleti megfontolásokon túlmenően — csak igen nagyszámú vizsgálati eredmény kiértékelése után lehetséges. Ennek érdekében dolgoztunk ki az Intézet Készülék Laboratóriumában olyan gyorsított vizsgálati módszereket, amelyek nem egyeznek ugyan meg a különféle szabványokban lefektetett előírásokkal, de viszonylag rövid idő alatt lehetővé teszik a különféle érintkezőanyag-minőségek között a jósági sorrend megállapítását, meghatározott áramtartományban [1., 2.]. Az így nyert eredmények, a kísérletek tanúsága szerint, jól követik a szabványos vizsgálatokkal kapott sorrendet.

Az érintkezők élettartamának alakulása 100 A feletti áramtartományban

A ksfeszültségű kontaktorok leggyakrabban névleges áramerősségükkel terhelve, 380/220 V-os áramkörben működnek. A szabványok előírásai szerint, rövidrezárt motorok kapcsolására alkalmas készülékeknel (AC₃ üzemmód [5]), 0,35-ös teljesítménytényező mellett kell a kikapcsolást végrehajtani. Elvárjuk a készülékektől, hogy lehetőleg többmillió villamos élettartammal rendelkezzenek, vagyis alkatrészcsere és javítás szükségessége nélkül biztonsággal végezzék el a megadott számú ki-bekapcsolási folyamatot. Ilyen üzemi követelményeket a 100 A-nél nagyobb névleges áramerősségű készülékeknel is általában többszörös megszakítási hellyel (leggyakoribb a két megszakítási hely) biztosítanak és az ív oltására külön oltókamrát alkalmaznak.

A korszerű követelmények ismeretében Intézetünk érintkezőanyagvizsgáló berendezésében, a beállított áramköri adatok mellett változtattuk a kapcsolási helyek számát és az ívoltagezési módszereket, hogy ezek hatásait is külön tanulmányozhassuk. Megállapítást nyert, hogy — mint azt a kisebb áramerősségű tartományokban végzett vizsgálatainknál is tapasztaltuk [1] — a kapcsolási sebesség is jelentős mértékben befolyásolja az érintkezőanyagok igénybevételét. Vörösréz, ezüst és különféle összetételű ezüstkadmiumoxid érintkezőanyagokat vizsgáltunk és az anyagfogyást tízezer kapcsolásonként mértük. Az érintkezőanyagokat mikroszkópi vizsgálatnak is alávetettük és vizsgáltuk a hordozóanyagra történő felforrasztás minőségét is.

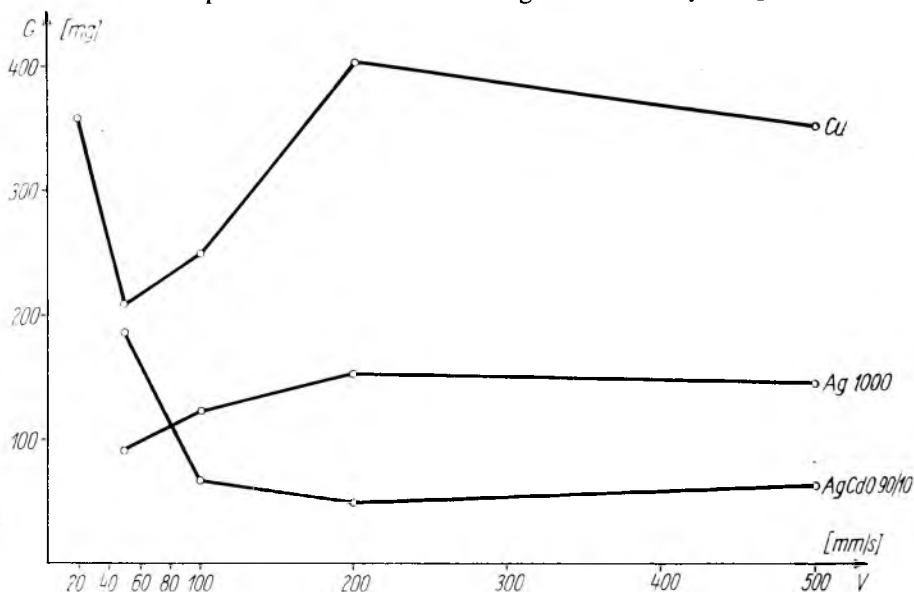
Az elvégzett vizsgálatok alapján kitűnt, hogy a 90% ezüstöt és 10% kadmiumoxidot tartalmazó, beoxidálási eljárással készült ezüstkadmiumoxid érintkezők rendelkeztek a legnagyobb élettartammal. A 23-1. ábrán felrajzoltuk az ezüst és az ezüstkadmiumoxid érintkezők anyagfogyását a kapcsolási sebesség függvényében



23-1. ábra. Érintkezők anyagfogyása a kikapcsolási sebesség függvényében, $50 \cdot 10^3$ kapcsolás után

Áramköri adatok: $U=220$ V; $\cos \varphi=1$; $I=110$ A, ill. 150 A

110 és 150 A-es áramkörben végzett vizsgálatoknál, ötvenezer kapcsolás után. Látható, hogy míg az ezüstkadmiumoxid érintkezőknél 100 mm/s kapcsolási sebességnél kisebb sebességek esetén az anyagfogyás ugrásszerűen nő, addig a színezüst érintkezők anyagfogyása a kapcsolási sebesség függvényében csak kismértékben változik. A mérési pontok általában öt-öt vizsgálati eredmény átlagértékét jelentik.

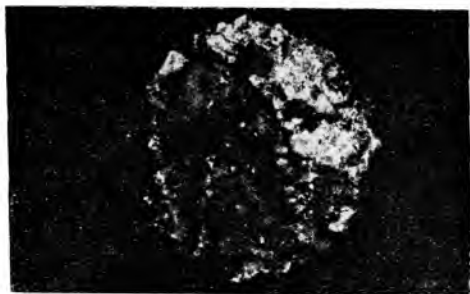


23-2. ábra. Érintkezők anyagfogyása 200 A-es áramkörben végzett vizsgálatoknál $20 \cdot 10^3$ kapcsolás után
Áramköri adatok: $U = 220$ V; $\cos \varphi = 0,35$

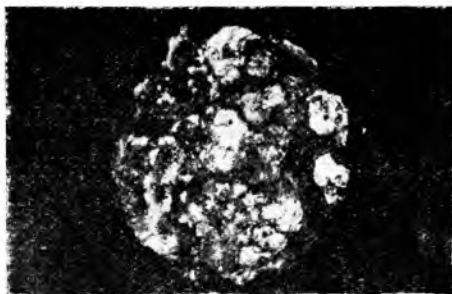
A 23-2. ábrán réz, ezüst és 90/10%-os ezüstkadmiumoxid érintkezők anyagfogyása látható a kapcsolási sebesség függvényében. Itt is megfigyelhető, hogy az ezüstkadmiumoxid érintkezők anyagfogyása 100...300 mm/s kapcsolási sebesség tartományban optimális értéket mutat. Az ezüstkadmiumoxid érintkezők élettartama több mint kétszerese az ezüstének és sokszorosa a vörösréz érintkező élettartamának. Összehasonlításként a 23-3. ábrán az érintkezők felületének fényképét is bemutatjuk, amelyen jól látható, hogy a kisebb kapcsolási sebességeknél az ezüstkadmiumoxid érintkezők felületi igénybevétele nagymértékben megnövekedett. A 23-4. ábrán a réz, ezüst és ezüstkadmiumoxid érintkezők felülete látható 200 mm/s kapcsolási sebességnél, a 23-2. ábra szerinti adatok mellett. Ránézésre is megállapítható az érintkezők igénybevétele mértéke.

Az ezüstkadmiumoxid érintkezők minősége

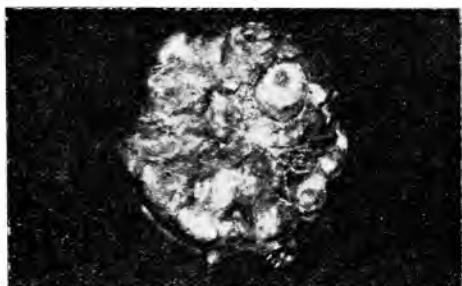
Az ezüstkadmiumoxid érintkezők előállításánál kísérleteztünk porkohászati eljárással is [4]. Az élettartamvizsgálatok azonban azt mutatták, hogy a belső oxidációs eljárással készült érintkezőkkel kedvezőbb és biztosabb eredményeket érhetünk el. Ez az eljárás lényegében ezüstkadmium érintkezőknek kemencében történő átoxidálásából áll. Megállapítottuk, hogy az érintkezők minősége nagymértékben függ a kadmiumoxid-szemcsék méretétől, a szemcseeloszlás egyenletességétől és az



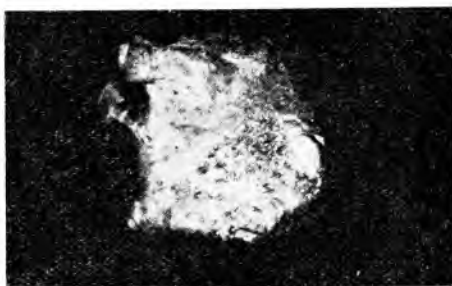
a)



b)



c)



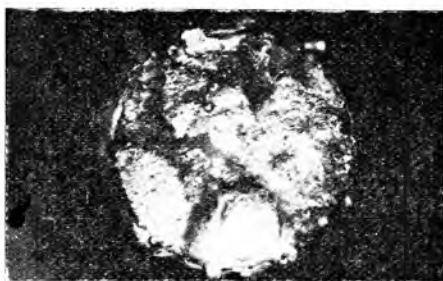
d)

23-3. ábra. Belső oxidációs eljárással előállított AgCdO érintkezők felülete a 23-2. ábra szerinti igénybevétel után, különböző kapcsolási sebességek esetén

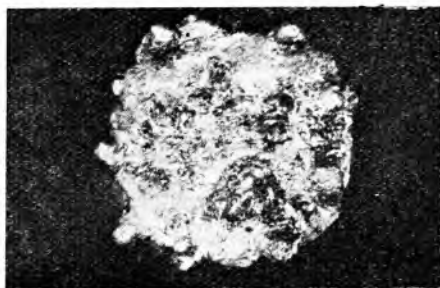
a) $v = 50$ mm/s; b) $v = 100$ mm/s; c) $v = 200$ mm/s; d) $v = 500$ mm/s



a)



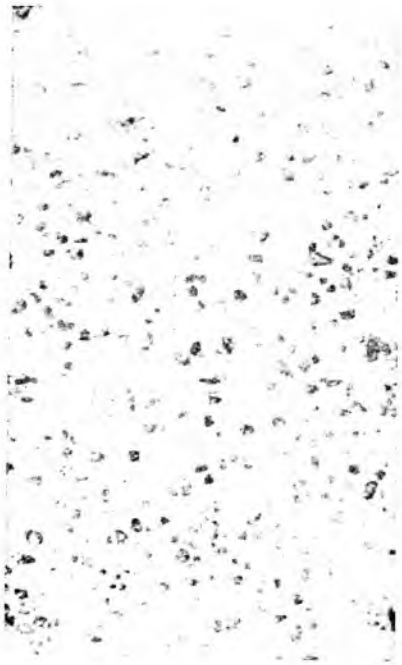
b)



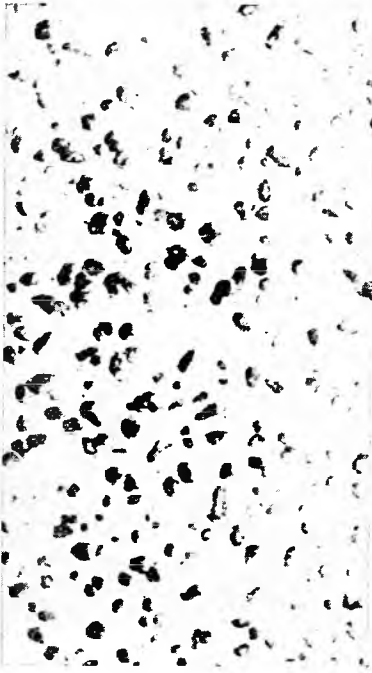
c)

23-4. ábra. Különféle érintkezőanyagok felülete a 23-2. ábra szerinti áramkörben, 200 mm/s kapcsolási sebességgel végzett $20 \cdot 10^8$ kapcsolás után

a) vörösréz érintkező; b) ezüst érintkező;
c) ezüstkadmiumoxid érintkező



a)



b)



c)



d)

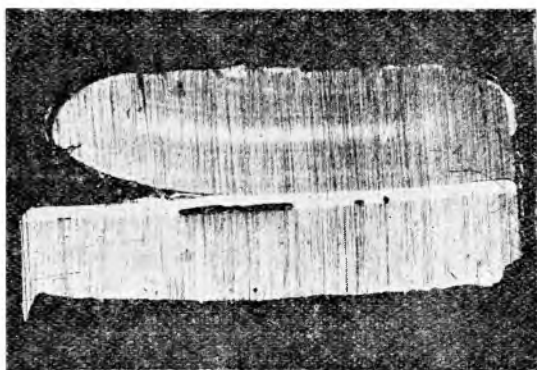
23-5. ábra. 90/10%-os összetételű AgCdO érintkezők szemcseszerkezetének mikroszkópi felvétele

a) Ismert külfordíj cég gyártmánya. Szemcseméret: 3...7 μ b) Vasipari Kutató Intézet által előállított érintkezőanyag. Szemcseméret: 2...7 μ
c) Vasipari Kutató Intézet által előállított érintkezőanyag. Szemcseméret: 6...10 μ d) Állami Pénzverő gyártmánya. Szemcseméret: 1...4 μ

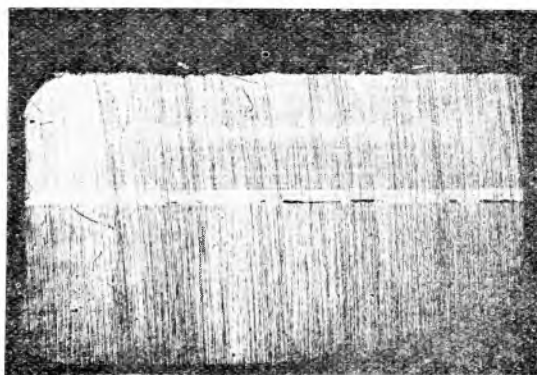
átoxidálás mélységétől. A 23-5. ábrán neves külföldi cég gyártmányának szemcseszerkezetét hasonlítottuk össze a Vasipari Kutató Intézet által készített ezüstkadmium-oxid érintkezők szemcseszerkezetével. Az élettartamvizsgálatok azt mutatták, hogy a *b)* ábrán látható 2...7 μ átlagos szemcseszerkezettel rendelkező hazai érintkező kedvezőbb eredményt ad a *c)* ábra szerinti durvább szemcseszerkezetnél, de a *d)* ábra szerinti finomabb szemcseszerkezetű érintkezőanyagnál is. A külföldi érintkezőanyag mikroszkópi felvétele (*a)* ábra) legjobban a *b)* ábrához hasonlít. Az élettartam szempontjából feltétlenül fontos a szemcseszerkezet eloszlásának egyenletessége is. E nélkül ugyanis a kapcsolási szám függvényében egyenletesen növekedő anyagfogyás görbéjében törések állnak elő és ez bizonytalanná teszi az érintkezők élettartamát is.

Az ezüstkadmium-oxid érintkezők felforrasztása

Az érintkezőket jelenleg úgy forrasztják a hordozóanyagra, hogy megfelelő hőmérsékletre melegítik mind a hordozóanyagot, mind a felforrasztandó érintkezőt és azokat ezüst-alapanyagú forrasztanyaggal egymáshoz kötik. Ezen keményforrasztási



a)



b)

23-6. ábra. 90/10%-os összetételű plattírozott AgCdO érintkezők felforrasztva

a) a plattírozás mentén elvált érintkezők;

b) hibátlanul plattírozott és forrasztott érintkező

eljárás közben az ezüstkadmiumoxid érintkezőből kadmiumoxid-gőzök távoznak el, amelyek a jó kötést lehetetlenné teszik. Újabban az érintkezőket gyártó Állami Pénzverő megoldotta az ezüstkadmiumoxid érintkezők felületére történő ezüstréteg plattírozását, amelynek segítségével a forrasztás sokkal egyszerűbb és biztonságosabb. Az így felhordott ezüstréteg vastagsága általában az érintkezők vastagságának 5...10%-a.

Az ezüstréteg plattírozása azonban igen gondos gyártást kíván, mert ellenkező esetben a rossz plattírozás az érintkezők idő előtti tönkremenését okozhatja. A 23-6a ábrán hibás plattírozás után elváló érintkező keresztmetszete látható. Érdekes megfigyelni, hogy bár az alsó forrasztott felületnél is látszanak hibás részek, mégis az érintkező a plattírozás mentén vált el. A 23-6b ábra jól plattírozott és forrasztott érintkező keresztmetszetét mutatja, bár a felforrasztás felületénél kisebb hiányosságok most is tapasztalhatók.

Tapasztalataink egyértelműen igazolják, hogy az érintkezők, különösen az ezüstkadmiumoxid érintkezők felerősítésére lehetőleg olyan technológiát kell kidolgozni, amely nem kívánja meg az érintkezőanyagok nagymértékű felmelegítését és a különféle közbenső anyagok (plattírozott ezüstréteg) alkalmazását. A megfelelő technológia kidolgozására vonatkozó kutatásaink egyelőre még nem vezettek kellő eredményre.

Irodalom

- [1] *Dr. Néveri I.—Csermely L.*: Kiszűzültségű kapcsolókészülékek érintkezőanyagainak vizsgálata. *Elektrotechnika* **58** (1965) 245—250. old.
- [2] *Dr. Néveri I.*: Kontaktwerkstoffprüfungen für Niederspannungsschaltgeräte. *Elektric* **20** (1966) 1, 11—13. old.
- [3] *Dr. Néveri I.*: Kontaktuntersuchungen an Niederspannungsschaltgeräten im Budapester Forschungsinstitut der Elektroindustrie. Kontaktwerkstoff in der Elektrotechnik. Akademie-Verlag, Berlin 1965.
- [4] *Vasipari Kutató Intézet*: Nagy kapcsolási számú, ezüst alapú érintkezőötvezetek gyártástechnológiájának kidolgozása. Évvégi jelentés 1964.
- [5] IEC TC 17 SC 17B: Low-Voltage Switchgear and Controlgear.

TÁVLATI FEJLESZTÉSI CSOPORT

24.

A magnetohidrodinamikus energiaátalakítás alapjelenségéről

CSÖRSZ ELEK

ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozat gázplazma munkaközegű MHD generátor alapjelenségét tárgyalja.

Bevezetőül értelmezi a munkaközeg komponenseinek kölcsönhatását az energiaátalakítás folyamatában. A gázdinamikai erőhatásokat újszerűen, parciális nyomásgradiensek és impulzusátadási valószínűségek szorzataként definiálja.

Tárgyalási módszerét a generátor áram—feszültség-karakterisztikájának hiperbolikus közelítésével ellenőrzi. Gázdinamikai jellemzőkkel megadja a teljesítményméretezés alapösszefüggését.

ОБ ОСНОВНОМ ЯВЛЕНИИ МАГНЕТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

Э. Чёрс

Резюме

В работе описывается об основном явлении магнетогидродинамического (МХД) генератора с рабочей средой газовой плазмы.

Вводно объясняется взаимодействие компонентов рабочей среды в процессе преобразования энергии. Газовые динамические действия силы определяются по новому: производением парциальных градиентов давления и вероятностей передачи импульсов.

Метод дискуссии контролируется гиперболическим приближением характеристики тока-напряжения генератора. Указывается основной связью расчета мощности с газовыми динамическими характеристиками.

ÜBER DIE GRUNDERSCHEINUNG DER MAGNETOHYDRODYNAMISCHEN ENERGIEUMFORMUNG

E. Csörsz

Zusammenfassung

In der Arbeit wird die Grunderscheinung des MHD Generators mit einem Gasplasmaarbeitsstoff behandelt.

Die Einleitung klärt die Wechselwirkung zwischen den Komponenten des Mittels im Prozess der Energieumformung. Die gasdynamischen Kraftwirkungen werden in einer neuen Betrachtung, als das Product der partiellen Druckgradienten und der Impulstransportwahrscheinlichkeiten definiert.

Die Behandlungsmethode wird durch eine hyperbolische Approximation der Spannung — Strom Charakteristik des Generators kontrolliert. Die grundlegende Zusammenhänge der Leistungsberechnung werden als eine Funktion der gasdynamischen Kennwerte dargestellt.

ABOUT THE PRINCIPAL PHENOMENA OF THE MAGNETOHYDRODYNAMIC ENERGY CONVERSION

E. Csörsz

Summary

The paper is dealing with the principal phenomena of an MHD generator with gaseous plasma as working fluid.

As a preliminary an explanation is given about the interaction between the components of the fluid in the energy conversion process. The gas-dynamic power effects are defined in a new form as a product of the partial pressure gradients and the due impulse transfer probabilities.

The treatment is controlled by the hyperbolic approximation of the voltage — current characteristic of the generator. The fundamental relation for the power-sizing is given by the gas-dynamical properties of the fluid.

Villamosenergia-termelő berendezés munkaközegének mozgási energiáját kétféleképpen alakíthatjuk át villamos energiává: erőgép és turbógenerátor közvetítésével, vagy e kettőt egyesítő magnetohidrodinamikusan generátor segítségével [1].

Jelen dolgozat célja az, hogy [1], [2] útmutatása nyomán a közvetlen energiaátalakítás alapjelenségét leíró tárgyalásmódot keressen.

Korlátozzuk vizsgálatainkat kvázineutrális gázplazma munkaközegű, egyenáramot szolgáltató MHD generátorra. Ennek munkaterében az energiaátalakítás mechanizmusát így értelmezzük:

— A mágneses térben áramló munkagáz villamosan töltött részecskéire fékező erő hat. A hatás azonban csak az elektronok vonatkozásában számottevő. Ezek esetében is csak akkor, ha mozgási energiájuk rovására villamos energiát szolgáltatnak a generátort terhelő fogyasztónak.

— Az ily módon lefékezett elektronok és a továbbáramló pozitív ionok közt elektrosztatikus erőhatás lép fel. Ennek következtében az ionok mozgási energiája is csökken: szintén a generátor által szolgáltatott elektromos energiává alakulhat.

— A plazma tömegének jelentősebb részét alkotó, villamosan semleges gázrészecskék azonban rugalmas ütközések révén pótolják az ionok — és megfelelő áramlásirányú sebességkülönbség esetén — az elektronok energiavesztését. Így, az említett effektusok közvetítésével ezen komponens mozgási energiája is villamos energiává alakulhat a folyamat hatásfokának megfelelően.

Mіндеzt a 24-1. ábrán vázolt generátormunkatér tetszőleges $dV = A \cdot dx = A \cdot b'$ elemi térfogatú szakaszában az alábbi feltételek figyelembevételével kíséreljük meg leírni:

— A vizsgált térrészben

$$v \approx v_{nx} \approx \text{állandó} \quad (1)$$

sebességgel áramló, ideális gázkeveréket képező plazma komponensei:

Villamosan semleges, közel azonosnak tekinthető részecskék (n index);

Egyszeres pozitív ionok $q_i = +e$ töltéssel: (2)

Elektronok $q_e = -e$ töltéssel. (3)

Valamely tetszőleges komponens j, k, l ; ezek összességét s index jelöli. A részecskék hőmozgásának sebessége egyensúlyi eloszlású.

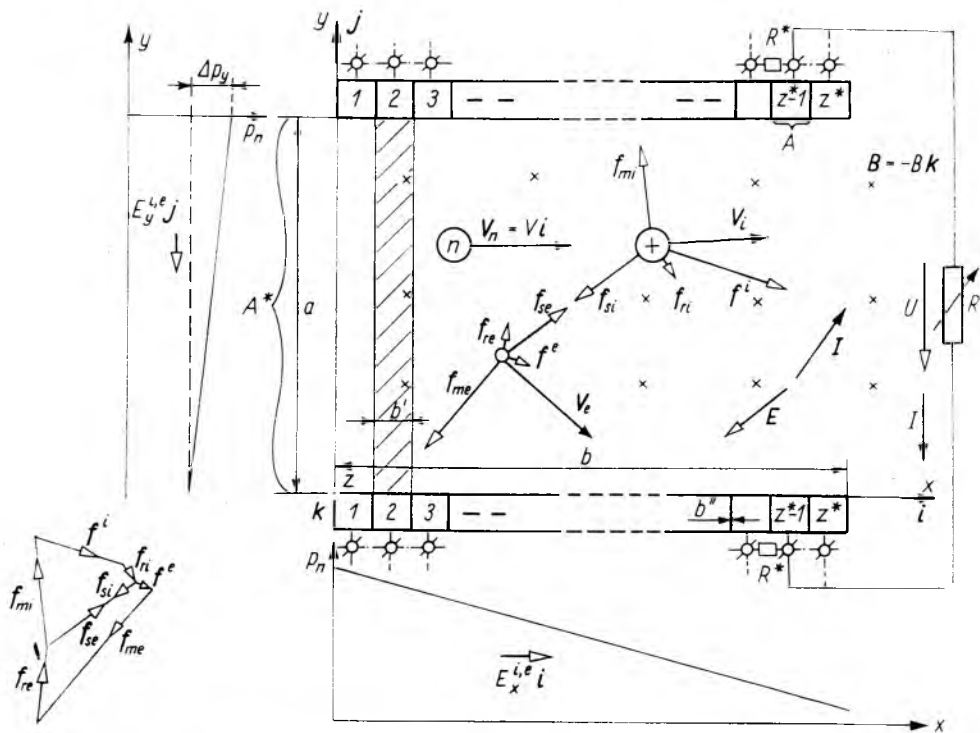
— Munkaközegünk kvázineutrális:

$$n_i \approx n_e = n \quad (4)$$

és célszerűen

$$n_n = N \quad (5)$$

a semleges komponens sűrűsége.



24-1. ábra. MHD generátor munkatere

— Tetszőleges ionizáló hatás biztosítja az

$$\frac{n}{N} \approx \text{állandó} \cong 10^{-3} \quad (6)$$

feltételt.

— Felhasználjuk majd a részecskék tömegére vonatkozó

$$m_n \approx m_i = M \quad \text{és} \quad m_e = m \quad (7)$$

jelöléseket, továbbá az

$$m/M \approx 10^{-4} \quad (8)$$

feltevést.

— A homogén tér valamennyi jellemzőjét úgy tekintjük, mintha azt csak az elektródok $(x; 0; z)$ és $(x; a; z)$ síkjai határolnák.

— Tekintsünk el a hővesztésegektől. Minden komponens hőmérséklete legyen állandó a vizsgált térben. Termoelektromos jelenségek közül csak a pozitív elektród

J_y -nál nagyobb telítési áramsűrűségű elektronemisszióját vesszük figyelembe. Ezen emissziót is biztosíthatja egyéb, tetszőleges hatás.

— Elhanyagoljuk a közeg viszkózus sűrűlódását és a gravitációt. Eltekintünk a lökéshullámok felléptétől és a turbulens áramlás okozta problémáktól is.

— Nem vesszük figyelembe a plazmában folyó villamos áramok mágneses terének hatását sem; azaz

$$\Re_m = \frac{v\mu_0 b}{\rho} \ll 1$$

kikötéssel élünk a mágneses Reynolds szám vonatkozásában. A $\mathbf{B} = -B\mathbf{k}$ homogén mágneses tér viszont tekintélyes szerepet játszik az erőegyensúly kialakításában, így

$$\Re_H = \frac{B^2}{\mu_0 N M v^2} \approx 1$$

is lehet a mágneses nyomásszám.

— A 24-1. ábrán vázolt elektródokat z^* számú izolált szegmensből állónak feltételezzük. Itt

$$b \gg a \gg b' \gg b'' \quad (9)$$

és b' tetszőlegesen kicsiny lehet. A az egyes elektródok aktív felülete; $A^*(x)$ az áramlási csatorna ($0; y; z$) síkkal párhuzamos derékszögű négyszögszelvényének területe. Itt $A^* = \text{állandó}$.

— Legyen az elektródok fajlagos ellenállása sokkal kisebb, mint a munkaközegé. Ezen utóbbi mennyiséget vizsgálatainknál nem tekinthetjük minden esetben állandónak.

— Generátorunk terhelését z^* számú R és $2z^* - 2$ darab R^* ellenállás képezi. Utóbbi (54) előlegezésével közel állandó értékűnek feltételezhetjük:

$$R^* = 2 \frac{\int_{b'}^0 E_x dx}{\int_{A^*} J_x dA} \approx 2 \frac{b'}{A^*} \rho \frac{c_{in} \beta_c}{\alpha^*}. \quad (10a, b)$$

Alapegyenlet

A plazmafizika alapvető összefüggései közül csak az erőviszonyokat tárgyaló egyenletet fogjuk részletezni. Impliciten felhasználjuk még az Ohm-törvényt (17) szerint és az ideális gázok állapotegyenletét (51)-ben.

Legyen tehát a j -edik plazmakomponensre ható erőssűrűség:

$$\mathbf{f}_j = n_j m_j \frac{d\mathbf{v}_j}{dt} = \mathbf{f}_{emj} + \mathbf{f}^j + \mathbf{f}_{rj}, \quad (11)$$

ahol

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v}_j \nabla \quad (12)$$

idő szerinti teljes differenciálást jelöl;

$$\mathbf{f}_{emj} = n_j q_j (\mathbf{E} + \mathbf{v}_j \times \mathbf{B}) \quad (13)$$

elektromágneses sűrűség;

$$\mathbf{f}^j = - \sum_{k=1}^s c_{jk} \text{grad } p_k \approx - c_{jn} \text{grad } p_n \quad (14a, b)$$

a gázdinamikai erőssűrűség definíciója, mely további megfontolásaink alap gondolatát képezi: különböző plazmarészecskék rugalmas ütközéséből adódó impulzuscserét értékel. Ennek megfelelően c_{jk} együtthatóként a $k-j$ részecskék közti impulzusátadási valószínűség szerepel. Részletes tárgyalást az 1. melléklet közöl. Erre hivatkozva csak az alábbi együtthatókat vesszük figyelembe:

$$c_{in} \approx \frac{Q_{in}}{Q_{nn}} = \frac{n}{N} \frac{\sigma_{in}}{\sigma_{nn}} \quad (15a, b)$$

és

$$c_{en} \approx \frac{m}{M} \frac{Q_{en}}{Q_{nn}} \approx 10^{-4} c_{in} \quad (16a, b)$$

(16a, b)-ben alkalmaztuk (8)-at és az 1. mellékletet (96), (97) összefüggését. σ_{jk} a megfelelő impulzusátadási hatáskeresztmetszetet jelöli [3].

Legyen továbbá

$$\mathbf{f}_{i,j} = - n_j e \frac{\mathbf{v}_j - \mathbf{v}}{\mu_j} \quad (17)$$

a j -edik komponensre ható fékezőerőssűrűség. Itt

$$\mathbf{v} = \frac{\sum_{j=1}^s n_j \mathbf{v}_j}{\sum_{j=1}^s n_j} \quad (18)$$

a plazma mozgásának átlagsebessége; esetünkben a munkaközeg (1)-gyel értelmezett áramlási sebessége. μ_j az ugyanezen közegben, mágneses térre merőleges irányban mért villamos mozgékonyág, mint az Ohm-törvénnyel analóg lineáris közelítés arányossági tényezője.

Későbbiekben felhasználjuk majd a közeg fajlagos ellenállására vonatkozó

$$\varrho_j = \frac{1}{n_j e \mu_j} \quad (19)$$

Langevin-összefüggést. Ezzel az s komponensű munkaközeg fajlagos ellenállása:

$$\varrho = \frac{1}{\sum_{j=1}^s n_j e \mu_j} \approx \frac{1}{n e \mu_*} \quad (20a, b)$$

A $\mathbf{B} = 0$ állapotban mérhető ϱ^* fajlagos ellenállással (20a, b) így adható meg:

$$\varrho \approx \varrho^* (1 + \beta_c^2), \quad (21)$$

ahol

$$\beta_j = B \mu_j \quad (22)$$

a szokásos Hall-paramétert definiálja. (20b) és (21) közelítést az elektronok minden más részecskéét meghaladó mozgékonyága indokolja.

Munkaközegünk villamosan töltött komponenseire vonatkoztatva a (11) egyenletet (4), valamint az erősűrűség-definíciók figyelembevételével:

$$\mathbf{f}_i = nq_i(\mathbf{E} + \mathbf{v}_i \times \mathbf{B}) - c_{in} \text{grad } p_n - ne \frac{\mathbf{v}_i - \mathbf{v}}{\mu_i}, \quad (23)$$

$$\mathbf{f}_e = nq_e(\mathbf{E} + \mathbf{v}_e \times \mathbf{B}) - c_{en} \text{grad } p_n - ne \frac{\mathbf{v}_e - \mathbf{v}}{\mu_e}. \quad (24)$$

Tételezzünk fel stacionárius állapotot; vagyis legyen

$$\mathbf{f}_j = \mathbf{0}. \quad (25)$$

Az egyszerűbb tárgyalás érdekében vezessük be a gázdinamikai térerő fogalmát:

$$\mathbf{E}^j = - \sum_{k=1}^s \frac{c_{jk}}{n_j e} \text{grad } p_k \approx - \frac{c_{jn}}{n_j e} \text{grad } p_n \quad (26a, b)$$

(14a, b) szerint. Itt az elemi töltés abszolút értéke szerepel, így \mathbf{E}^i és \mathbf{E}^e előjel tekintetében is összevethető (lásd a 24-1. ábrát).

Figyelembe véve (2), (3)-at is, (23) és (24) egyszerűsített alakja így írható:

$$\mathbf{0} = \mathbf{E} + \mathbf{v}_i \times \mathbf{B} + \mathbf{E}^i - \frac{\mathbf{v}_i - \mathbf{v}}{\mu_i}, \quad (27)$$

$$\mathbf{0} = -\mathbf{E} - \mathbf{v}_e \times \mathbf{B} + \mathbf{E}^e - \frac{\mathbf{v}_e - \mathbf{v}}{\mu_e}. \quad (28)$$

A vektorok célszerű irányítását ábránkon megadtuk.

Írjuk fel (27) és (28) egyenleteinket x , majd y irányú komponenseikre bontva:

$$0 = -E_x - v_{iy} B + E_x^i - \frac{v_{ix} - v}{\mu_i}, \quad (29)$$

$$0 = E_x - v_{ey} B + E_x^e - \frac{v_{ex} - v}{\mu_e}. \quad (30)$$

Ebből

$$E_x = -v_{iy} B + E_x^i - \frac{v_{ix} - v}{\mu_i} = v_{ey} B - E_x^e + \frac{v_{ex} - v}{\mu_e}, \quad (31a, b)$$

valamint

$$v_{iy} = \frac{E_x^i - E_x}{B} - \frac{v_{ix} - v}{\beta_i}, \quad (32)$$

$$v_{ey} = \frac{E_x^e + E_x}{B} - \frac{v_{ex} - v}{\beta_e}. \quad (33)$$

(29), (30)-ból az is belátható, hogy $d^2 p_n / dx^2 = 0$ a 24-1. ábrának megfelelően. (32), (33)-ból meghatározható az áramsűrűség y irányú komponense:

$$J_y = ne(v_{iy} + v_{ey}) = ne \left(\frac{E_x^i + E_x^e}{B} - \frac{v_{ix} - v}{\beta_i} - \frac{v_{ex} - v}{\beta_e} \right); \quad (34a, b)$$

Itt felhasználtuk a

$$\mathbf{J}_j = n_j q_j \mathbf{v}_j \quad (35)$$

és

$$\mathbf{J} = \sum_{j=1}^s \mathbf{J}_j \quad (36)$$

szokásos definíciókat, valamint a 24-1. ábra jelöléseit. (29), (30) alapján vázolhatjuk az erőegyensúlyt is:

$$0 = -f_{s_{ix}} - f_{m_{ix}} + f_x^i + f_{rix}, \quad (37)$$

$$0 = +f_{s_{ex}} - f_{m_{ex}} + f_x^e + f_{rex}. \quad (38)$$

Felbontottuk a Lorentz-erősűrűséget s -sel jelölt elektrosztatikus és m indexű, mágneses térrel arányos komponensekre.

Ezután foglalkozunk a (27), (28) egyenlet y irányú vetületével:

$$0 = -E_y + v_{ix} B - E_y^i - \frac{v_{iy}}{\mu_i}, \quad (39)$$

$$0 = E_y - v_{ex} B - E_y^e + \frac{v_{ey}}{\mu_e}. \quad (40)$$

Amiből

$$E_y = v_{ix} B - E_y^i - \frac{v_{iy}}{\mu_i} = v_{ex} B + E_y^e - \frac{v_{ey}}{\mu_e}, \quad (41a, b)$$

valamint

$$v_{ix} = \frac{E_y^i + E_y}{B} + \frac{v_{iy}}{\beta_i}, \quad (42)$$

$$v_{ex} = \frac{-E_y^e + E_y}{B} + \frac{v_{ey}}{\beta_e}. \quad (43)$$

Ezekkel az áramsűrűség x irányú komponense:

$$J_x = ne(v_{ix} - v_{ex}) = ne \left(\frac{E_y^i + E_y}{B} + \frac{v_{iy}}{\beta_i} - \frac{v_{ey}}{\beta_e} \right). \quad (44a, b)$$

Az erőegyensúly:

$$0 = -f_{s_{iy}} + f_{m_{iy}} - f_y^i - f_{riy}, \quad (45)$$

$$0 = +f_{s_{ey}} - f_{m_{ey}} - f_y^e + f_{rey} \quad (46)$$

a 24-1. ábrának megfelelően.

Következtetések

Továbbiakban a célunk az, hogy összefüggéseink segítségével megkíséreljük az MHD generátor 24-2. ábrán vázolt $U(I)$ karakterisztikáját az elmélet jobb közelítésével értelmezni. Majd a generátorból nyerhető villamos teljesítmény szemléletes gázdinamikai származását adjuk meg. Az előbbit főként a vizsgálati módszer igazolására, míg az utóbbit méretezési szempontok tisztázására szánjuk.

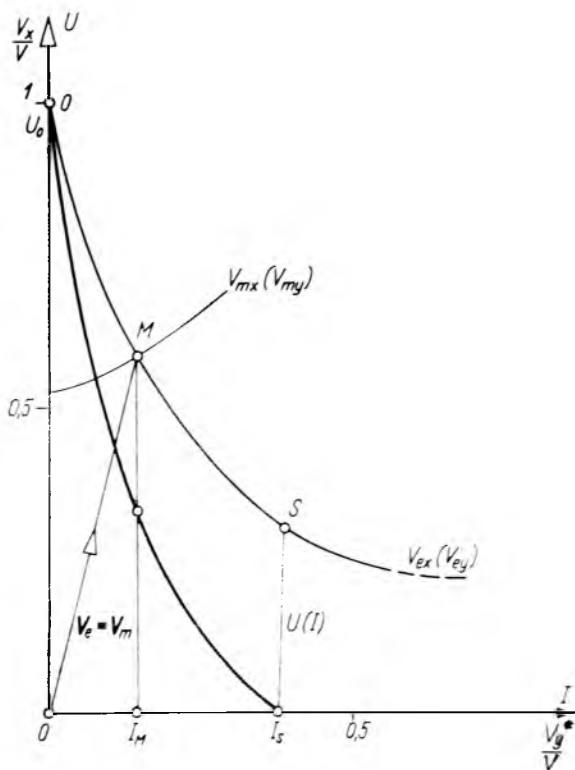
Valamely R terhelőellenálláson mérhető feszültség a (41a) egyenletből:

$$U = \int_a^0 E_y dy = aE_y = av_{ix}B - aE_y^i - a \frac{v_{iy}}{\mu_i}. \quad (47)$$

[1], [2] szerint, valamint (8), (32), (42) alapján

$$v_{ix} \approx v_{nx} \approx v \quad (48)$$

és
$$v_{iy} \approx 0. \quad (49)$$



24-2. ábra. A generátor $U(I)$ karakterisztikája és elektronsebesség diagramja

Alkalmazzuk (26b)-t is. Ezzel a feszültség kifejezése így alakul:

$$U \approx avB - a \frac{c_{in}}{ne} \text{grad}_y p_n. \quad (50)$$

Használjuk fel a semleges plazmakomponens állapotegyenletét és a 24-1. ábrán értelmezett Δp_y -t is:

$$U \approx avB - \frac{\mathfrak{R}_n M}{e} T_n \frac{\sigma_{in}}{\sigma_{nn}} \frac{\Delta p_y}{p_{n0}}. \quad (51)$$

Itt \mathfrak{R}_n a megfelelő gázállandót; T_n a hőmérsékletet $^{\circ}\text{K}$ -ben; p_{n0} pedig az elektródok közt uralkodó átlagos nyomást jelöli.

Az I terhelőáram kifejezése (34b)-ből:

$$I = \int_{(A)} J_y dA = \frac{A}{B} (f_x^i + f_x^e + f_{rix} + f_{rex}). \quad (52)$$

Az első tag mellett (16b)-re hivatkozva elhanyagolhatjuk a másodikat. A harmadik tag (48) szerint maradhat el. Ha (17), (22)-t is felhasználjuk:

$$I = A \frac{c_{in}}{B} (-\text{grad}_x p_n) + A \frac{ne}{\beta_e} (v - v_{ex}). \quad (53)$$

Az utolsó kifejezésben szereplő sebességkülönbség így közelíthető:

$$v - v_{ex} = \int_0^{v_{ey}} \alpha dr_{ey} \approx \alpha^* v_{ey}, \quad (54)$$

ha bevezetjük az

$$\alpha = -\frac{dv_{ex}}{dr_{ey}} = \frac{v_{ex}}{v_{ey}} C \quad (55a, b)$$

definíciót és ezt a jellemzőt a 24-2. ábrán látható $v_{ex}(v_{ey})$ függvény lineáris közelítésénél $*$ -gal megkülönböztetett állandó értékűnek feltételezzük. A kijelölt differenciálást (33) és (43) szerint végeztük el. Első közelítésként a C állandó értékét egységnyinek feltételezzük.

Így végül a terhelőáram:

$$I \approx \frac{A}{B} \frac{c_{in}}{1 - \alpha^*/\beta_e} (-\text{grad}_x p_n) = \frac{A}{B} (-\text{grad}_x p_n); \quad (56a, b)$$

mivel bevezető feltevéseink szerint (56a) második tényezője egységnyi értékű.

(56a, b), valamint a későbbi (67a), (68), (76a, b), (80) és (83) egyenletek módot nyújtanak a (15b) szerint nehezen kiértékelhető c_{in} tényező egyszerű mérésekkel történő közelítő meghatározására. Célszerűbb azonban (53) differenciálásával nyert összefüggést alkalmazni. $\alpha \neq \alpha^*$ -ot, tehát a $v_{ex}(v_{ey})$ görbe hiperbolikus közelítését felhasználva, több mérés eredményének átlagolásával pontosabb értéket nyerünk, illetve módunkban áll összehasonlítani a különböző üzemállapotok mikrofizikai jellemzőit:

$$c_{in} = \frac{1}{Z} \sum_{t=1}^Z \frac{B}{A} \left(1 - \frac{\alpha_t}{\beta_{et}} \right) \frac{\Delta I_t}{\Delta(-\text{grad}_x p_n)_t}. \quad (57)$$

Itt ΔI_t és $\Delta(-\text{grad}_x p_n)_t$ a t -edik vizsgálatnál mért áram, illetve nyomásgradiens-megváltozás; míg α_t a $v_{ex}(v_{ey})$ görbe megfelelő pontján (55a) szerint értelmezett meredekség. β_{et} sem tekinthető minden esetben azonosnak: (22)-ben az adott $(v_{ex} - v)_t$ sebességkülönbséghez tartozó μ_{et} értéket kell használnunk.

$v_{ex}(v_{ey})$ -t, mint mérési eredményt (34a), (41b) szerint származtatjuk az $U(I)$ karakterisztikából E_y^e (16b)-re hivatkozó elhanyagolásával. A két görbe összetartozó pontjainak megfeleltetése azonos abszcisszán történhet.

Tekintettel arra, hogy az elektronsebesség vektora a generátor működésének fontos jellemzője, célszerű azt (55a, b) differenciálegyenletünkéből is meghatározni:

$$v_{ex} = \frac{\text{állandó}}{v_{ey}} \approx \frac{c_{in} \beta_e v^2}{v_{ey}^* + c_{in} \beta_e v K} \quad (58a, b)$$

(58b) közelítés nevezője, valamint (55a, b) megoldásának így adódó peremfeltevéle eddigi megfontolásainkból nem származtatható. Alkalmazni csak a 24-2. ábrán; a (63b), (67a, b), (76a, b), (80) és (83) közelítésben fogjuk. Bevezetését az a tény teszi szükségessé, hogy az O terheletlen munkapontnál fennálló

$$f_{sey} = f_{mey} \quad (59)$$

egyensúly a v_{ex} sebesség statisztikus ingadozását figyelembe véve dinamikus egyensúlyt jelent, mely a kialakult villamos tértöltés veszteségével jár. A $c_{in} \beta_e v K$ tag ezen veszteséget folyamatosan pótló — tehát a külső áramkörbe nem jutó — elektronáramlást kívánja reprezentálni. Értékének közelítő meghatározására (74) összefüggésünket előlegeztük, ahol

$$p_0^* \approx 0, \quad (60)$$

és
$$v_{ex0} \approx v \quad (61)$$

feltételezéssel éltünk a teljesítménysűrűség, illetve az elektronsebesség vonatkozásában.

$$A \quad K = U/U_0 \quad (62)$$

tényező szerint az említett effektusra jellemző áramsűrűséget E_y -nal arányosnak feltételeztük.

(41b) további felhasználásával meghatározhatjuk a rövidzárási állapotban és a teljesítménymaximumnál adódó terhelőáramot:

$$I_S = A n e v \beta_e \sqrt{c_{in}} \approx \frac{I_M}{1,3 \sqrt{c_{in}}} \quad (63a, b)$$

(63b) előlegezi a maximális teljesítményű munkapontot kijelölő (75) hiperbolát az (58b)-ben alkalmazott koordinátatranszformációval. Itt. és a 24-2. ábra görbéiből származó (68), (76a, b), (80) közelítésekben szereplő állandók számértékét

$$c_{in} \beta_e \approx 0,1 \quad (64)$$

esetre értelmezhetjük.

Az $U(I)$ görbe meredekségét, mint differenciális belső ellenállást (34a), (41b) egyenleteinkből határozhatjuk meg:

$$r = \frac{dU}{dI} = \frac{a}{A} \frac{1}{ne} \frac{d(Bv_{ex} + E_y^e - v_{ey} \mu_e^{-1})}{d(v_{iy} + v_{ey})} \quad (65)$$

a (47) és (52)-ben részletezett integráldefiníciók mellőzésével.

Ísmét elhanyagoljuk E_y^e -t és felhasználjuk (49)-t is:

$$r = \frac{a}{A} \left(\frac{B}{ne} \frac{dv_{ex}}{dv_{ey}} - \frac{1}{ne \mu_e} \right) \approx -\frac{a}{A} \varrho (1 + \beta_e \alpha) \quad (66)$$

(20b) közelítés és (22), (55a) definíciók figyelembevételével.

Eredményünk kiértékelhető a generátor (62) szerint jellemzett különböző terhelési állapotainál:

$$r_0 \approx -\frac{a}{A} \varrho \left(1 + \frac{1}{c_{in}} \right) > r_s, \quad (67a, b)$$

ha $K = 1$;

$$r_M \approx -\frac{a}{A} \varrho \left(1 + \frac{0,3}{c_{in}} \right), \quad (68)$$

ha $K \approx 0,5 \dots 0,3$;

$$r_S \approx -\frac{a}{A} \varrho \cdot 2, \quad (69)$$

ha $K = 0$.

Összefüggéseink kísérleti eredményekkel történő egybevetésének néhány példáját a 24-2. melléklet közli. További ellenőrzésre az irodalomjegyzékben hivatkozott mérési eredmények nyújtanak módot.

Ezek után határozzuk meg a generátorból nyerhető p^* teljesítménysűrűséget és az abból származtatható egyéb jellemzőket. Itt (31a), (34b), (41a) és (44b) egyenleteinket fogjuk felhasználni.

$$\begin{aligned} p^* &= -\mathbf{E}\mathbf{J} = E_x J_x + E_y J_y = \\ &= v_i (f_x^i \mathbf{i} + f_{rix} \mathbf{i} - f_y^i \mathbf{j}) + v_e (\mathbf{f}^e + f_{rex} \mathbf{i}) - \varrho_i J_{iy}^2 - \varrho_e J_{ey}^2. \end{aligned} \quad (70)$$

Alkalmaztuk (14b), (19) és (35) definícióinkat is.

$$A \quad v_e (\mathbf{f}^e + f_{rex} \mathbf{i}) \quad (71)$$

kifejezés második tagja átalakítható

$$\varrho_e (J_{e,nev} - J_{ex}^2) \quad (72)$$

alakúvá. Előbbi formájában azonban szemléletesebben mutatja, hogy a (17)-tel definiált fékezősűrűség x irányú komponense a $v_{ex} < v$ viszony miatt hasznos villamosenergia-termelést eredményez, mint arra az energiaátalakítás mechanizmusát részletező harmadik bekezdésben utaltunk. Fentiek szemléltetésére a 24-1. ábra vektor-diagramját és (37), (38) egyenleteinket ajánlhatjuk.

(70) integrálása teljes értékű tájékoztatást nyújt az adott közelítésben tárgyalt generátor teljesítményméretezését illetően. A feladat egyszerűsítése érdekében azonban közelítéssel élhetünk: (48) szerint elhanyagoljuk f_{rix} -t. \mathbf{f}^e (16a, b)-re hivatkozva maradhat el. (49) feltételezéssel a $v_{iy} f_y^i$ szorzat és (70) utolsóelőtti tagja tűnik el. Ezzel a teljesítménysűrűség kifejezése így alakul:

$$p^* \approx v_{ix} f_x^i + v_{ex} f_{rex} - \varrho_e J_{ey}^2. \quad (73)$$

Eredményünk szemléletesen mutatja a villamosenergia származtatását: az *ionokra ható gázdinamikai erő x sebesség* és a *Joule-veszteség* különbségét *közvetlen gáz—elektron kölcsönhatásra jellemző tag* egészíti ki, melyre (72) után és az energiaátalakítás mechanizmusát értelmező harmadik bekezdésben utaltunk.

(73)-ban mindkét erőssűrűség ütközési folyamatokkal kapcsolatos. Az első tagban szereplő (14b) szerint, ellenkező irányú rugalmas ütközések impulzuscserejének nyomásgradiensből adódó különbségét értékeli. (17) viszont makroszkopikus sebességkülönbséggel kapcsolatos egyirányú ütközéseket vesz figyelembe.

Ezen sebességkülönbség elektronok esetében megközelítheti az impulzust átadó gázcsepp halmazának átlagsebességét [2], ami a gáz—elektron rugalmas ütközések vonatkozásában az előzőnél jóval hatásosabb impulzusátadást jelenthet. Tehát az első kölcsönhatás (16a, b) szerinti elhanyagolása mellett az utóbbit mégis figyelembe kell vennünk az említett komponensek esetében. Viszont a gázcseppkék és ionok sokkal hatékonyabb impulzusátadása miatt ezek közt — amint azt (48) megállapítja — az utóbbi effektusra jellemző sebességkülönbség ki sem alakulhat.

Most térjünk át a teljesítményillesztés problémájára: Itt (73) célszerű átalakításához (14b), (17), (19), (35) és (48) összefüggéseinket fogjuk felhasználni:

$$p^* \approx v c_{in} (-\text{grad}_x p_n) + \frac{ne}{\mu_e} (v v_{ex} - v_{ex}^2 - v_{ey}^2). \quad (74)$$

A nyomásgradiens (56b) alkalmazásával eltüntethető. Így eredményünk módot nyújt a maximális p_M^* teljesítménysűrűséget biztosító $\mathbf{v}_e \equiv \mathbf{v}_m$ sebességvektor meghatározására:

$$\left[\frac{v_{mx}}{v} - \frac{1}{4} \right]^2 - \left[\frac{v_{my}}{v} - \frac{c_{in} \beta_e}{4} \right]^2 \approx \frac{1 - c_{in}^2 \beta_e^2}{16}. \quad (75)$$

A teljesítményillesztést megvalósító sebességvektort, valamint a $v_{mx}(v_{my})$ hiperbolát szintén a 24-2. ábránkon szemléltetjük.

A generátor $U(I)$ karakterisztikájának maximális teljesítményt nyújtó munkapontját

$$R_M \approx \frac{a}{A} \varrho \left(\frac{0,4}{c_{in}} - 1 \right) = \left[\frac{a}{b'} \right]^2 \frac{\alpha^* (0,4 - c_{in})}{2c_{in}^2 \beta_e} R^* \quad (76a, b)$$

terhelőellenállás alkalmazásával realizálhatjuk. Ha ilyenkor

$$v v_{ex} \gtrsim v_{ex}^2 + v_{ey}^2 \quad (77)$$

viszonyt feltételezünk, egyszerű termodinamikai jellemzők segítségével kiértékelhetjük a

$$V = \int_{x_{be}}^{x_{ki}} A^*(x) dx \quad (78)$$

aktív térfogatú generátorból nyerhető maximális teljesítmény közelítő, illetve alsó határértékét:

$$P_M \gtrsim \int_{x_{ki}}^{x_{be}} (A^* v_M c_{in} \text{grad}_{xM} p_n) dx. \quad (79)$$

Itt már módunkban áll x függvényeként tetszőlegesen változó jellemzők értékelése: korábbi megszorításaink csak (78) térfogatelemére vonatkoznak.

$P_M = P' + P^*$ eloszlását a z^* számú R_M és $2z^* - 2$ darab R^* terhelésen közelítően így adhatjuk meg (76a, b) és a 24-2. ábra szerint:

$$\frac{P'}{P^*} \approx 10^{-1} \left[\frac{a}{b'} \right]^2 \frac{\alpha^* (0,4 - c_{in})}{2c_{in}^2 \beta_e}. \quad (80)$$

Megjegyezzük, hogy a (77) alapján elhanyagolt Joule-veszteség implicite továbbra is szerepel összefüggéseinkben: a $\text{grad}_x p_n$ kifejezés értékelésénél figyelemmel kell lennünk arra a tényre, hogy a generátorcsatornában $(v_{ex}^2 + v_{ey}^2)$ -tel arányos

diszperz hőfejlődés adódik. Természetesen ez nem jelent a szokásos generátorok belső hőfejlődéséhez hasonló veszteséget: Ha gondoskodni tudunk a csatornában keletkező hő folyamatos mozgási energiává alakításáról, úgy ez ismét villamos energiává alakítható a folyamat hatásfokának megfelelően. Ezen megfontolásunkból származtathatjuk az optimális $A^*(x)$ csatornaszelvényt.

Fentiek értelmében tehát a hőenergiát felhasználó MHD generátor Joule-veszteségét úgy tekinthetjük, mint a munkaközeg energiatartalmának azt a hányadát, mely a *hő—mozgási—villamos*-energiaátalakulási folyamat utolsó fázisából a kiindulási állapotba kerül vissza. Mint ilyen, a csatorna további szakaszában újra felhasználható energiatartalomként áll rendelkezésre. Ez a körülmény előnyösen vehető figyelembe a hatásfok értékelésénél, melynek alapösszefüggése:

$$\eta \approx \frac{\int_{x_{ki}}^{x_{po}} (A^* v c_{in} \text{grad}_x p_n) dx}{-\oint_{A_{csatorna}} w v dA}, \quad (81)$$

ahol az időegységenként felhasznált hő és mozgási energia a munkaközeg

$$w = NM \left(h + \frac{v^2}{2} \right) = NM \left(C_p T_n + \frac{v^2}{2} \right) \quad (82)$$

energiatartalmából adódják. Az entalpia kifejezését itt állandó nyomáson mért fajhő segítségével adtuk meg. Figyelmen kívül hagytuk a segédberendezések teljesítményviszonyait.

Eredményeink nem tartanak igényt a befejezett munka teljességére: (79), (81) részletezése további termodinamikai analízist igényel.

E helyütt azonban csak egy közelítést kívánunk ismertetni, mellyel a maximális teljesítmény kifejezését tesszük összehasonlíthatóvá az irodalomban szokásos eredményekkel.

Vegyük figyelembe az R_M és R^* terheléseken realizált $P' + P^*$ teljesítmény (80) szerinti megoszlását: az előbbi általában egy nagyságrenddel meghaladja az utóbbit [15]. Így megelégedhetünk a 24-2. ábra $U(I)$ görbéjéből adódó

$$P_M \approx P' = U_M I_M \approx 3 c_{in} P_T \quad (83)$$

közelítéssel. Itt

$$P_T = \frac{U_0^2}{4R_T} \quad (84)$$

a csatornaszegmens Thévenin helyettesítő generátorának teljesítménymaximuma

$$U_0 = avB \quad (85)$$

terheletlen feszültség és

$$R_T = r_T = \frac{a}{A} \varrho \quad (86)$$

illesztett terhelés, valamint belső ellenállás figyelembevételével.

Köszönetnyilvánítás

Végül köszönetet mondok *dr. Simonyi Károly* professzor úrnak, a BME Elméleti Villamosságtan Tsz. vezetőjének, aki előadásával és tanácsaival segített a dolgozat elkészítésében. Külön köszönettel tartozom *Halász Dénesnek*, a hivatkozott irodalom jelentős részének készsleges rendelkezésre bocsátásáért.

24-1. melléklet

Gázdinamikai erőhatások

Induljunk ki a gázokra érvényes

$$\mathbf{f} = -\text{grad}(p + \Phi) \quad (87)$$

összefüggésből. Ideális gázkeveréket képező plazmánál alkalmazhatjuk a Dalton-összefüggést:

$$p = \sum_{k=1}^s p_k. \quad (88)$$

A Φ potenciális energia hasonló származtatásától és ennek későbbiekkel analóg vizsgálatától eltekintünk.

Az erősűrűség kifejezése így írható:

$$\mathbf{f} = \sum_{j=1}^s \mathbf{f}^j \quad (89)$$

ahol $j \equiv k$ is lehetséges. (88) és (89)-cel a Euler-egyenlet egyszerűsített alakja:

$$\sum_{j=1}^s \mathbf{f}^j = -\sum_{k=1}^s \text{grad } p_k, \quad (90)$$

ha alkalmazzuk az összegzés és differenciálás felcserélhetőségét is.

Ezen erősűrűség rugalmas ütközések impulzuscserejének nyomásgradiensből adódó különbségeként értelmezhető.

Mivel bármely két részecske ütközési folyamata a többi kölcsönhatástól függetlennek tekinthető, így mindkét szummázás részfolyamatai önállóan is tárgyalhatók. Célszerű a (14a)-ban előlegezett felbontást használnunk:

$$\mathbf{f}^j = -\sum_{k=1}^s c_{jk} \text{grad } p_k \quad (91)$$

ahol c_{jk} a $k-j$ rugalmas ütközés impulzusátadási valószínűsége a lehetséges $k-l \dots s$ ütközések figyelembevételével:

$$c_{jk} = \frac{\frac{2m_j}{m_k + m_j} Q_{jk}}{\sum_{l=1}^s \frac{2m_l}{m_k + m_l} Q_{lk}}. \quad (92)$$

Itt

$$Q_{jk} = n_j \sigma_{jk} \quad (93)$$

a megfelelő részecskesűrűség és [3] szerint értelmezett impulzusátadási hatáskereszt-

metszet szorzataként. Feltételeztük az ütköző részecskék makroszkopikus relatív sebességének és a j -edik termikus átlagsebességének

$$|\mathbf{v}_k - \mathbf{v}_j| \ll u_j \quad (94)$$

viszonyát is. Ezen megszorításunk elsősorban a magnetohidrodinamikus energia-termelés inverz effektusát megvalósító propulziós hajtóműveknél korlátozza (92) érvényességét.

A j, k, \dots, s komponensre ható (91) szerinti gázdinamikai erőssűrűség együtt is szemlélhető:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{f}^j \\ \mathbf{f}^k \\ \vdots \\ \mathbf{f}^s \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} c_{jj} & c_{jk} & \dots & c_{js} \\ c_{kj} & c_{kk} & \dots & c_{ks} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{sj} & c_{sk} & \dots & c_{ss} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{grad } p_j \\ \text{grad } p_k \\ \vdots \\ \text{grad } p_s \end{pmatrix} \quad (95)$$

(92)-ből belátható, hogy az $s \times s$ méretű mátrix bármely oszlopának összege egy.

*

Tárgyalásunkban feltételezett háromkomponensű plazmára a [3], [13] szerinti

$$\sigma_{ij} \approx 100 \sigma_{nn}, \quad (96)$$

$$\sigma_{en} \approx 100 \sigma_{nn}, \quad (97)$$

valamint (6), (8) figyelembevételével (95) közelítően így alakul:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{f}^n \\ \mathbf{f}^i \\ \mathbf{f}^e \end{pmatrix} \approx - \begin{pmatrix} 0,9 & 1 & 1 \\ 0,1 & 10^{-3} & 10^{-3} \\ 10^{-5} & 10^{-4} & 10^{-5} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{grad } p_n \\ \text{grad } p_i \\ \text{grad } p_e \end{pmatrix}. \quad (98)$$

(6)-ra és az elektrosztatikus erőhatásokra hivatkozva:

$$\text{grad } p_n \gg \text{grad } p_{e,i}, \quad (99)$$

így a töltött részecskék erőegyensúlyának tárgyalásánál csak a

$$c_{in} \text{ grad } p_n \quad (100)$$

tagnak van számottevő szerepe. A szemléletes tárgyalás érdekében azonban itt még nem hanyagoljuk el a

$$c_{en} \text{ grad } p_n \quad (101)$$

kifejezést sem.

A felhasználandó együtthatók értékének közelítő meghatározása:

$$c_{in} \approx \frac{Q_{in}}{Q_{nn}} = \frac{n}{N} \frac{\sigma_{in}}{\sigma_{nn}} \approx 0,1 \quad (102)$$

$$\text{és} \quad c_{en} \approx \frac{m}{M} \frac{Q_{en}}{Q_{nn}} = \frac{m}{M} \frac{n}{N} \frac{\sigma_{en}}{\sigma_{nn}} \approx 10^{-5}, \quad (103)$$

(6), (8), (96), (97) szerint.

Ellenőrző megfontolások

Dolgozatunkat kísérleti eredmények ismertetésével kellene zárunk. Önálló munka hiányában azonban csak az irodalomból idézett mérési eredmények szolgálhatnak összehasonlítási alapul elméleti következtetéseinkhez.

Az (56b) egyenlettel kapcsolatban megjegyezzük, hogy jelen közelítésünk nem veszi figyelembe a súrlódásból származó, legtöbb készülékben igen tekintélyes értékű nyomásesést. [7] 1. ábrája azonban kétségtelenül igazolja a terhelőáram nyomásgradiens arányos voltát. Az arányossági tényező mért és (56b) szerint számított értéke mindössze 10% eltérést mutat.

Az említett ábra $I=350$ A abszcisszaértékénél azt is megfigyelhetjük, hogy (57)-nek megfelelően a ΔI és $\Delta(-\text{grad}_x p_n)$ mennyiségek előjele együtt változik meg.

(56b) ellenőrzésére [21] mérései is módot nyújtanak. Itt az arányossági tényező mért és számított értékének eltérése 40%.

Az $U(I)$ karakterisztikát nem a 24-1. ábra definíciója szerint szokás mérni. A közismert Faraday-kapcsoláshoz képest eltérést jelentő $R^* \approx 10^{-3} R_M$ terhelést azonban a mindig jelenlevő járulékos hatások közelítően realizálják. Így a 24-2. ábra hiperboláját összehasonlíthatjuk [24] 5. ábrájával és [18], [19] 6., 7., illetve 8., 9. ábráival. Az utóbbi két ábrát az érdeklődő olvasónak kell kiegészítenie a közölt mérési eredmények ismeretében.

$R = \infty$ terhelésnél mérhető megnövekedett belső ellenállás — (67a, b) — kétségtelenül megállapítható [9], [10], [13] és [14] megfelelő karakterisztikáin is. Ellenpéldaként [16], [17] említhető. Az előbbi dolgozat igen érdekes megfontolásokat fűz a problémához.

A belső ellenállás (69) szerinti minimális értéke szintén megfigyelhető [7] és [9] karakterisztikáin.

$I_s \sim \beta_c$ (63a) szerinti arányosság [10], [11] méréseiből mutatható ki.

Irodalom

- [1] Harris, D. J.: Direct generation of electrical power from a high-velocity gas jet. *Electrical Eng. Vol. 80*, No. 12, 1961.
- [2] Bailey, A. G.—Harris, D. J.: Gas Braking Process in MHD Type Electric Generators. *Advances in Magnetohydrodynamics*. ed. by McGrath, I. A.; Siddal, R. G.; Thring, M. W.; Pergamon, 1963.
- [3] Delcroix, J. L.: Introduction to the theory of ionized gases. Interscience, 1964.

Összefoglaló munkák:

- [4] Popov, V. A.: Magnitogidrodinamiceszkij metod preobrazoványija energii. Fizmatgiz, 1963.
- [5] ed. by Coombe, R. A.: Magnetohydrodynamic Generation of Electrical Power. Chapman and Hall, 1964.
- [6] Sutton, G. W.—Sherman, A.: Engineering Magnetohydrodynamics. McGraw-Hill, 1965.

Kísérleti eredmények és ezek értékelése:

- [7] Rosa, R.: Experimental MHD Power Generator. *J. Appl. Phys. Vol. 31*, No. 4, 1960.
- [8] Rosa, R.: Physical Principles of MHD Power Generation. *Phys. Fluids Vol. 4*, No. 3, 1961.
- [9] Mullaney, G.—Dibelius, N.: Small MHD Power Generator using Combustion Gases as an Energy Source. *ARS J. Vol. 31*, No. 4, 1961.
- [10] Way, S.—De Corso, S. M.—Hundstad, R. L.—Kemeny, G. A.—Stewart, W.—Young, W. E.: Experiments with MHD Power Generator. *J. Eng. for Power (Trans. ASME) Vol. 83A*, No. 9, 1961.
- [11] Way, S.: Comparison of Theoretical and Experimental Results in a MHD Generator. *Proc. 2nd Symp. Eng. Asp. of Magnetohydrodynamics*. Columbia Univ. Press, 1962.

- [12] *Brogan, T. R.—Kantrowitz, A. R.—Rosa, R. J.—Stekly, Z. J.*: Progress in MHD Power Generation (lásd [11]).
- [13] *Blackman, V. H.—Jones, M. S.—Demetriades, A.*: MHD Power Generation Studies in Rectangular Channels (lásd [11]).
- [14] *Sutton, G. W.—Robben, F.*: Preliminary Experiments on MHD Channel Flow with Slightly Ionized Gases. Proc. Symp. Electromagnetics and Fluid Dynamics of Gaseous Plasma. Vol. XI, Polytechnic Press, 1962.
- [15] *Harris, L. P.—Moore, G. E.*: Some Electrical Measurements on MHD Channels. Proc. 3rd Symp. Eng. Asp. of Magnetohydrodynamics. Gordon and Breach, 1962.
- [16] *Jones, M. S.—Blackman, V. H.—McKinnon, C. N.*: The Conductance of Seeded Combustion Products in MHD Channel Flow (lásd [15]).
- [17] *Brzozowsky, W. S.—Cielinski, Z.—Nowaczki, P.*: Experimental MHD Generator using Combustion Gases as Heat Sources. Bull. Ac. Pol. Sci. Vol. X, No. 5, 1962.
- [18] *Fushimi, K.—Kutsuwada, T.—Ikeda, S.*: Preliminary Experiment on MHD Power Generation using Argon Plasma. Bull. El. Techn. Lab. (Japan) Vol. 27, No. 7, 1963. (japánul).
- [19] *Mori, F.—Fushimi, K.—Kutsuwada, T.—Ikeda, S.*: Test-running of an Experimental MHD Generator; Mark 1. (japánul) (lásd [18]).
- [20] *Louis, J. F.—Lothrop, J.—Brogan, T. R.*: Studies of Fluid Mechanics using a Large, Combustion Driven MHD Generator. Proc. 4th Symp. Eng. Asp. of Magnetohydrodynamics. California Univ. Press, 1963.
- [21] *Louis, J. F.—Lothrop, J.—Brogan, T. R.*: Fluid Dynamic Studies with a Magnetohydrodynamic Generator. Phys. Fluids Vol. 7, No. 3, 1964.
- [22] *Mori, F.—Fushimi, K.—Kutsuwada, T.—Ikeda, S.*: Gas-fired Experimental MHD Power Generator; Mark 1. Bull. El. Techn. Lab. (Japan) Vol. 28, No. 4, 1964.
- [23] *Womack, G. J.—McGrath, I. A.—Thring, M. W.*: Experimental Studies in Open Cycle MHD Generation. Magnetohydrodynamic Electrical Power Generation. (Papers of Int. Symp.) ENEA, Paris, 1964.
- [24] *Crotiru, Z.—Békarian, A.—Graziotti, R.—Pithon, M.*: Resultats experimentaux sur les phenomenes d'ionisation hors equilibre dans les generateurs MHD (lásd [23]).
- [25] *Ito, T.—Morikawa, T.—Murai, Y.*: Some Experiments on an MHD Generator Driven by a Plasma Jet (lásd [23]).
- [26] *Lindley, B. C.—Brown, R.—McNab, I. R.*: MPD Experiments with a Helium-Cesium Loop (lásd [23]).
- [27] *Bienert, W. B.—Young, W. H.—Zavadny, E. N.*: Electrical output from closed loop experiment using auxiliary ionization. Advanced Energy Conv. Vol. 6, No. 1. 1966.
- [28] *Teno, J.—Brogan, T. R.—DiNanno, L. R.*: Hall Configuration MHD Generator Studies. Magnetohydrodynamic Electrical Power Generation. (Provisional Programme of Int. Symp. ENEA, Salzburg, 1966.) Sajtó alatt.
- [29] *Brzozowsky, W. S.—Cielinski, Z. N.—Kozlowski, T.*: Operating Experience of an Open-Cycle MHD Test Facility (lásd [28]).
- [30] *Yano, S.—Hiramoto, T.—Matsunaga, S.—Shirakata, H.—Fujino, H.—Sasaki, Y.*: MHD Power Generation Experiments with Potassium-Seeded Argon Plasmas (lásd [28]).
- [31] *Yamoto, M.—Tamaoki, T.—Saito, Y.*: Experimental Studies of Oil-fired MHD Power Generation (lásd [28]).
- [32] *Schneider, R. T.—Wilhelm, H. E.*: Experimental Investigations of Closed-loop MPD Generation (lásd [28]).
- [33] *Reseck, K. G.—Eustis, R. H.—Kruger, C. H.*: MHD Generator Performance Prediction including Two Dimensional Effects and Wall Leakage (lásd [28]).
- [34] *Zauderer, B.*: Electrical Loss mechanism in Linear MHD Generator operating at Large Hall Parameters (lásd [28]).
- [35] *Strashinin, E. P.—Karp, I. N.—Mazur, N. I.—Kristofovics, B. G.*: „Experiments with an MHD generator modell” (oroszul) (lásd [28]).
- [36] *Berger, M. S.—Mikhin, V. V.—Kurbatovsky, Yu. N.*: „Some results of experiments with a 100 kW MHD generator modell” (oroszul) (lásd [28]).
- [37] *Maslennikov, N. M.—Germanyuk, V. N.*: „Experimental investigation of plasma using modell of MHD generators” (oroszul) (lásd [28]).
- [38] *Yantovsky, E. I.*: „Experimental investigation of ionized gas flows through ducts” (oroszul) (lásd [28]).

Tartalomjegyzék

Előszó (Dr. Urbanek J.)	5
Bevezetés (Dr. Urbanek J.)	9

Szigeteléstechnikai Laboratórium

1. Kiöntőgyanták alkalmazása és felhasználási problémái az erősáramú villamosiparban (Leyrer R.)	23
2. Kísérletek polietilénlikoltereftalát hazai előállítására (Leyer R.—Fazekas G.-né)	31
3. Villamosüzemű vasúti fűtőtestek vizsgálata (Dávid P.)	45
4. A kúszóáram-vizsgálat elvi alapjai és a vizsgálóberendezés ismertetése (Miszlivetz J.—Ober F.)	59
5. Melamin—formaldehid-alapú sajtolóanyagok villamosipari célokra (Kopniczky Sz.)	69
6. Trópusi berendezések tervezésének klimatológiai alapjai (Sulyok J.)	85

Villamos Berendezések Laboratórium

7. Néhány szempont a hálózati feszültség szabályozásához (Dr. Gábor L.)	103
8. A diósgyőri durvahengermű szabályozott hajtásainak néhány áramköri kérdéséről (Mlinkó T.)	113
9. Szünetmentes áramforrások frekvencia- és töltésszabályozása (Bencze J.)	135
10. Váltakozóáramú generátoros vagonvilágítási rendszer (Csaba B.)	151
11. Tirisztoros központi váltóirányító fénycsövek táplálására (Füzesi E.)	159
12. Szilícium-egyenirányítók városi villamosvasutak állomásai számára (Marti S.)	167

Félvezető Laboratórium

13. Si-SiC p-n heteroátmenetek (Dr. Lukács J.)	181
14. Szilícium teljesítménydiódák p-n átmenetének termikus analízise (Molnár I.—Kiss D.)	187
15. Erősáramú vezérelt diódák konstrukciós és technológiai problémái (Salánki T.)	207
16. Termovillamos mechanizmus (Jarács Gy.)	219
17. A szilíciumkarbid felületi viszonyai és ezek változásainak kihatása a villamos tulajdonságokra (Bogoly I.)	229
18. Kompenzációfok meghatározása szilíciumon, Hall-mérésből (Gadányi P.)	237
19. Szilícium egykristályok készítése függőzónás egykristályhúzó gépen (Török T.)	253

Villamos Készülék Laboratórium

20. Áramkorlátozó olvadóbiztosítók különleges olvadószálainak előállítása (Dr. Mocsáry J.—Bányai B.)	261
21. Kombinált ivóltási mód alkalmazása kifeszültségű áramkorlátozó olvadóbiztosítóknál (Dr. Mocsáry J.)	269

22. Légnyomásos megszakító kapcsolási túlfeszültségének korlátozása nemlineáris ellenállás alkalmazásával (Dr. Néveri I.)	277
23. Újabb eredmények az érintkezőanyagok kutatása területén (Dr. Néveri I.)	291

Távlati Fejlesztési Csoport

24. A magnetohidrodinamikus energiaátalakítás alapjelenségéről (Csórsz E.)	301
--	-----

Содержание

Предисловие (Д-р. Урбанек, Й.)	5
Введение (Д-р. Урбанек, Й.)	9

Лаборатория Полупроводники

1. Применение заливочной смолы и проблемы использования в сильноточной электротехнической промышленности (Р. Лейрер)	23
2. Эксперименты, направленные на отечественное получение полиэтиленгликольтерефталат (Р. Лейрер—Г. Фазекаш)	31
3. Испытание железнодорожных электрических нагревательных элементов (П. Давид)	45
4. Оборудование для испытания прочности от току утечки (И. Мисливец—Ф. Обер)	59
5. Пресс-материалы меламин-формальдегидной основы для целей электротехнической промышленности (С. Копнишки)	69
6. Климатологические основы конструкции тропических устройств (Е. Шуйок)	85

Лаборатория Электрического Оборудования

7. Некоторые примечания по регулированию сетевого напряжения (Д-р. Л. Гадор)	103
8. Несколько вопросы по цепям тока регулируемых приводов диодшдьерского крупносортного стана (Т. Млинко)	113
9. Регулирование частоты и заряда непрерывных источников тока (Я. Бенце)	135
10. Система генератора переменного тока для освещения вагонов (Б. Чаба)	151
11. Центральный инвертор с тиристором для люминесцентных ламп (Э. Фюзешши)	159
12. Кремниевые выпрямители для городских трамвайных подстанций (Ш. Марты)	167

Лаборатория Полупроводники

13. Гетерогенные р-п переходы Si—SiC (Д-р. Й. Лукач)	181
14. Термический анализ р-п переходов кремниевых диодов мощности (И. Молнар—Д. Кишш)	187
15. Конструкционные и технологические проблемы управляемых сильноточных диодов (Т. Шаланки)	207
16. Термоэлектрический механизм (Д. Ярач)	219
17. Условия поверхности карбида кремния и влияние их изменения на электрические свойства (И. Боголь)	229
18. Определение компенсационной степени на кремния по измерению Холла (П. Гадани)	237
19. Изготовление монокристаллов кремния в машине для бестигельной зонной плавки (Т. Тёрёк)	253

Лаборатория Электрических Аппаратов

20. Получение специальных плавких нитей для плавких предохранителей ограничителя тока (Д-р. Й. Мочари—Б. Баняи) 261
21. Применение комбинированного дугогасительного метода по плавким предохранителям ограничения тока низкого напряжения (Д-р Й. Мочари) 269
22. Ограничение перенапряжения коммутации атмосферного разьединителя путем применения нелинейного сопротивления (Д-р И. Невери) 277
23. Новые результаты в области исследования контактных материалов (Д-р. И. Невери) 291

Исследовательская группа по перспективному развитию

24. Об основном явлении магнетогидродинамического преобразования энергии (Э. Чёрс) 301

Inhalt

- Einleitung (Dr. J. Urbanek) 5
Vorwort (Dr. J. Urbanek) 9

Laboratorium für elektrische Isolationsmaterialien

1. Die Anwendung und Verwendungsprobleme von Giessharzen in der Starkstrom Elektroindustrie (R. Leyrer) 23
2. Versuche zur Herstellung von Polyäthylenglykol-Terephthalat in Ungarn (R. Leyrer—Frau G. Fazekas) 31
3. Untersuchung elektrischer Bahn-Heizkörper (P. Dávid) 45
4. Einrichtung zur Prüfung der Kriechstromfestigkeit (J. Miszlivetz—F. Ober) 59
5. Pressstoffe auf Melamin—Formaldehyd-Harzbasis für die Elektroindustrie (Sz. Kopniczky) 69
6. Klimatologische Grundsätze der Konstruktion von tropischen Einrichtungen (J. Sulyok) 85

Laboratorium für elektrische Einrichtungen

7. Einige Bemerkungen zur Regelung der Netzspannung (Dr. L. Gádor) 103
8. Einige Probleme in Stromkreisen der geregelten Antriebe des Grobwalzwerkes in Diósgyőr (T. Mlínko) 113
9. Frequenz- und Ladungsregelung von stetigen Stromquellen (J. Bencze) 135
10. Stromerzeugersystem mit Drehstromgenerator für Eisenbahn-Beleuchtung (B. Csaba) 151
11. Thyristorwechselrichter für Leuchtstofflampen (E. Füzési) 159
12. Siliziumgleichrichter für Strassenbahn-Unterwerke (S. Marti) 167

Halbleiter Laboratorium

13. Si-SiC p-n Hetero-Übergänge (Dr. J. Lukács) 181
14. Thermische Analyse des p-n Überganges von Silizium-Leistungsdioden (I. Molnár—D. Kiss) 187
15. Probleme der Konstruktion und Technologie bei gesteuerten Starkstrom-Dioden (T. Salánki) 207
16. Thermoelektrischer Mechanismus (Gy. Jarács) 219

17. Oberflächen-Verhältnisse von Silizium-karbid und Auswirkung ihrer Veränderungen auf die elektrischen Eigenschaften (I. Bogoly)	229
18. Bestimmung des Kompensationsgrades in Silizium durch Hall-Messung (P. Gadányi).....	237
19. Herstellung von Silizium-Einkristallen mit tiegelfreien Zonenschmelzmaschine (T. Török) 253	

Schaltgeräte-Laboratorium

20. Herstellung von speziellen Schmelzleitern für strombegrenzende Schmelzsicherungen (Dr. J. Mocsáry—B. Bányai)	261
21. Anwendung von kombiniertem Lichtbogenlöscheffekt bei strombegrenzenden Niederspannungs-Sicherungen (Dr. J. Mocsáry)	269
22. Begrenzung der Schaltüberspannung von Druckluft-Leistungsschaltern durch die Verwendung nichtlinearer Widerstände (Dr. I. Néveri)	278
23. Neuere Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der Kontaktmaterialien (Dr. I. Néveri)	291

Gruppe für Perspektive Entwicklung

24. Über die Grunderscheinung der magnetohydrodynamischen Energieumformung (E. Csörsz) 301	
--	--

Contents

Preface (Dr. J. Urbanek)	5
Introduction (Dr. J. Urbanek)	9

Laboratory of Isolation Materials

1. The Application and Utilization Problems of Pouring Resins in the Heavy Current Electrical Industry (R. Leyrer)	23
2. Experiments Aiming at the Domestic Production of Polythene Glycol Terephthalate (R. Leyrer—Mrs. G. Fazekas)	32
3. Investigation of Railway Radiators (P. Dávid)	45
4. Leakage Current Strength (Tracking Resistance) Testing Set (J. Miszlivetz—F. Ober)...	60
5. Pressing Materials on Basis of Melamine-formaldehyde Resin for the Electric Industry (Sz. Kopniczky)	70
6. The Climatological Basis of Designing Tropical Equipments (J. Sulyok)	86

Laboratory of Electrical Equipment

7. Some Aspects of the Regulation of Network Voltages (Dr. L. Gádor)	104
8. Some Problems of Circuits of Controlled Drive of the Diósgyőr Heavy Mill (T. Mlinkó) .	114
9. Frequency and Charging Control of Non-Stop Supplies (J. Bencze)	136
10. A. C. Generator System for Railway Coach Illumination (B. Csaba)	151
11. SCR Inverter Supply for Fluorescent Lighting (E. Fűzesi)	160
12. Silicon Rectifier Equipments for Power Supply of Tramways (S. Marti)	168

Semiconductor Laboratory

13. Si-Sic p-n Hetero Junctions (Dr. J. Lukács)	181
14. Thermal Analysis of p-n Junction of Silicon Power Diodes (I. Molnár—D. Kiss)	188
15. Design and Technological Problems of Power Current Controlled Diodes (T. Salánki) ...	208
16. Thermoelectric Mechanism (Gy. Jarács)	220
17. Surface Conditions of the Silicon Carbide and Influence of their Variations on the Electrical Characteristic (I. Bogoly)	230
18. Determination of the Degree of Compensation in Silicon, from Hall Measurement (P. Gádányi)	238
19. Production of Silicon Monocrystals on a Floatingzone Crystal Drawing Machine (T. Török)	253

Switchgear Laboratory

20. Production of Special Fusible-Filaments of Current-Limiting Fuses (Dr. J. Mocsáry—B. Bányai)	262
21. Application of Combined Arc-Quenching Method at Low-Voltage Current-Limiting Fuses (Dr. J. Mocsáry)	270
22. Limitation of Switching Overvoltage of Air-Blast Circuit-Breakers by non Linear Resistances (Dr. I. Néveri)	278
23. New Developments in the Study of Contact Materials (Dr. I. Néveri)	292

Research Group of Perspective Development

24. About the Principal Phenomena of the Magnetohydrodynamic Energy Conversion (E. Csörsz)	302
--	-----

