

VKI
A VILLAMOSIPARI KUTATÓ INTÉZET
KÖZLEMÉNYEI

4

1972

MŰSZAKI KÖNYVKIADÓ

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

VILLAMOSIPARI KUTATÓ INTÉZET

KÖZLEMÉNYEI

4

KÖZZÉTESZI:

DR. LUKÁCS JÓZSEF

okl. gépészmérnök,
a műszaki tudományok doktora,
Kossuth-díjas,
az Intézet igazgatója

SZERKESZTETTE:

a Szerkesztő Bizottság

DR. GÁDOR LÁSZLÓ

okl. gépészmérnök,
a műszaki tudományok kandidátusa,
műszaki—tudományos szaktanácsadó

LEYRER RICHÁRD

okl. vegyészmérnök,
a Szigeteléstechikai Főosztály
vezetője

MOLNÁR ISTVÁN

okl. villamosmérnök,
a Félvezető Főosztály vezetője

KISS MIKLÓS

okl. gépészmérnök,
a Villamos Berendezés Főosztály vezetője

DR. MOCSÁRY JÓZSEF

okl. villamosmérnök,
a műszaki tudományok kandidátusa,
az Intézet tudományos igazgatóhelyettese

TAR FERENC

okl. villamos- és gazdasági mérnök,
az Intézet műszaki igazgatóhelyettese

FELELŐS KIADÓ: DR. LUKÁCS JÓZSEF

A kiadói munkálatokat a Műszaki Könyvkiadó végezte
Felelős szerkesztő: Guller Jánosné villamosmérnök
A kézirat lezárva: 1972. június
Műszaki szerkesztő: Hegedűs Ernő
Azonossági szám: 0648
72-3611 — Szegedi Nyomda



† DR. URBANEK JÁNOS 1905–1971

A Villamosipari Kutató Intézet Közleményeinek 4. kötete az első, amely nem dr. Urbanek János írásával indul. 1971. szeptember 9-én Barcelonában, a nemzetközi világítástechnikai kongresszuson tartott nagyszerű előadását követő éjszakán tragikus hirtelenséggel hunyt el intézetünk megalapítója, és 20 éven át volt igazgatója.

Dr. Urbanek János 1905-ben született Fiumében. Gépészmérnöki oklevelét 1927-ben szerezte meg Budapesten, majd rövid műegyetemi tanárségédkezés után, állami ösztöndíjjal a párizsi Institut d'Optique-ban végzett elektrotechnikai és fizikai kutatásokat. Itt került először kapcsolatba a világítástechnikával, ezt a tudományt nemzetközileg elismert szinten művelte, váratlanul bekövetkezett haláláig. Párizsban végzett kutatási eredményeit a Sorbonne 1930-ban kitüntetéses doktori oklevéllel ismerte el, és első ízben neki adták ki a nem sokkal korábban alapított „Prix Arthur Capel” díjat. Ugyanezen a tématerületen nyerte el 1941-ben az egyetemi magántanári címet.

1944-ig a Műegyetem Villamos Gépek és Mérések Tanszékén dolgozott, ezt követően a Ganz Villamossági Gyárba lépett át, mint a próbaterep helyettes vezetője. Később, 1948-ban a gyár egy új kutató és kísérleti osztály megszervezésével bízta meg. Ez az osztály lett a magva az erősáramú gyártóipar 1949-ben megalapított új központi kutatási szervének, az akkor Villamosipari Központi Kutató Laboratórium néven életre hívott intézetnek, amelynek megszervezője és első igazgatója dr. Urbanek János volt.

Hűszéves vezetése alatt a szerény öt fős osztály hatszázon felüli létszámú, nemzetközi hírnevű tudományos intézetté terebélyesedett. Az intézet neve 1956-ban Villamosipari Kutató Intézetre változott.

Dr. Urbanek János böles tapintattal, külső és belső diplomáciával és rendíthetetlen optimizmussal vezette át az intézetet a korszakonként változó iparpolitikai szemlélet, a hullámzó gazdasági helyzet nemegyszer szinte áthidalhatatlannak látszó nehézségein. Jó érzékkel tudta kiegyenlíteni az ellentéteket és meg tudta teremteni a szabad alkotó tevékenység termékeny légkörét.

Gazdag irodalmi tevékenységéből kiemelkednek a „Bevezetés a műszaki elméleti villamosságban”, a „Villamosságban egyenleteinek írásmódjai és mértékrendszer kérdései”, valamint az „Egyenletek mértékfüggetlen írásmódja: MKS-rendszer” című könyvei. Elsősorban villamosságtani könyvéért nyerte el 1953-ban a Kossuth-díjat. Legutolsó nagy, háromkötetes összefoglaló műve, amely az elektrotechnikai anyagok kérdéseit fejti ki a legkorszerűbb elméletek tükrében, sajnos már csak posztumusz műként jelenhet meg. Halála előtt a kéziratban az utolsó simitásokat végezte.

A kutatóintézeti munka elvi alapjait és gyakorlati eredményeit összefoglalóan ismertetik a VKI Közlemények első három kötetét bevezető tanulmányai. A 3. kötet bevezető tanulmánya arról a teljes 20 évről ad áttekintést, amelyet dr. Urbanek János vezetése alatt élt át az intézet. A tanulmány azonban ezen túlmenően a magyar villamosipar egész fejlődését felvázolja a századfordulótól kezdve és ennek a fejlődésnek szerves folytatásaként számol be az intézet 20 éves munkájáról. Az intézetvezetés terén elért érdemeit kormányunk a Magyar Népköztársaság Érdemérem arany fokozatának és a Munka Érdemrend arany fokozatának adományozásával ismerte el.

Ez a munka tükrözi az intézet vezetőjének azt az igényességét, amellyel mindig magas tudományos szintre törekedett. A gyakorlati eredmények azonban nem tükrözhetik azokat a személyes élményeket, amelyek az intézet dolgozóiban és az intézetvezető közeli munkatársaiban alakultak ki a vele való érintkezésben, a vele végzett közös munkában. Ezek forrása elsősorban a személyiségét jellemző mély humánus és erkölcsi erő.

Szellemi köre nem korlátozódott a műszaki tevékenységre, nagy nyelvtudása, széles körű műveltsége, művészszeretete, amely a festés és a muzsika amatőr szintet meghaladó aktív művelésében is megnyilatkozott, a korunkban már ritkaságszámba menő teljes emberség kategóriájába emelte őt.

Emlékét őrzi az intézet és a volt munkatársak.

DR. LUKÁCS JÓZSEF

SZIGETELÉSTECHNIKAI FŐOSZTÁLY

1.

Villamos szigetelőréteg előállítása elektroforézissel

Z. DR. WINDISCH KLÁRA

ÖSSZEFOGLALÁS

Az elektroforetikus lakkozás a merítéses lakkozással szemben számos előnnyel rendelkezik, melyek következtében a gépiparban széles körben elterjedt. A villamosiparban, mint szigetelőtechnikai eljárás alkalmazása csak az utóbbi években kezd elterjedni. Az eljárás számtalan olyan előnyt biztosít, melynek következtében a szigetelőanyagok felvitele egyszerűbbé, gazdaságossá válik. A cikk keretében a csillámpigmentet tartalmazó szigetelőréteg kialakítására vonatkozóan mutatunk be néhány alkalmazási lehetőséget.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИЗОЛЯЦИОННОГО СЛОЯ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОФОРЕЗА

З. Д-р. К. Виндиш

Резюме

Нанесение лака методом электрофореза имеет существенные выгоды по сравнению с нанесением лака путем погружения. Благодаря этому данный метод широко распространился в машиностроительной промышленности. В области электрической промышленности применение метода для создания изоляционного слоя стало распространяться лишь в последние годы. Метод обладает несколькими выгодными свойствами, благодаря которым нанесение изоляционного слоя становится более простым и экономически выгодным. В статье демонстрируются несколько примеров применения, касающихся создания изоляционного слоя, содержащего слюдяной пигмент.

HERSTELLUNG ELEKTRISCHEN ISOLIERSTAFFÜBERZÜGEN DURCH ELEKTROPHORESE

Z. dr. K. Windisch

Zusammenfassung

Die elektroforetische Lackierung besitzt viele Vorteile gegenüber dem Tauchverfahren, infolge der sie sich in der Maschinenindustrie weit und breit verbreitet hat. In der Elektroindustrie beginnt sich die elektroforetische Lackierung als isolations-technisches Verfahren erst in den letzteren Jahren zu verbreiten. Dieses Verfahren hat viele Vorteile, infolge deren der Auftrag der Isolierstoffe einfacher, wirtschaftlicher wird. Im Rahmen dieses Berichtes werden einige Anwendungsmöglichkeiten bezüglich des Auftrages der Glimmerpigment enthaltenden Isolierschicht vorgeführt.

ELECTRICAL INSULATING COATINGS PRODUCED BY ELECTROPHORETIC DEPOSITION

Z. Dr. K. Windisch

Summary

As compared to lacquering by conventional methods, the process of lacquering by electrophoretic deposition offers several advantages and has found wide-spread application in machine building. In electrical industry its use as a method of producing insulation coatings has only been introduced since a few years. Due to the numerous favourable properties of the process proposed the application of certain insulating materials is facilitated and rendered more economical. In this paper, examples of producing insulating coatings containing mica pigment are described.

Az elektroforetikus lakkozás az iparban egyre terjedő olyan újszerű eljárás, amelynek során a lakkfilm a lakkozandó tárgy vezetővé tett felületén alakul ki.

E módszer lényege, hogy — ellentétben az áram nélküli, mártásos lakkozással — a fémből készült lakktartály és a bevonandó tárgy között egyenfeszültséget létesítenek, és a lakkrészek az erőtér hatására az anódként kapcsolt lakkozandó felületre vándorolnak. Az anódon jól tapadó, tömör, nagy szárazanyag-tartalmú lakkfilm válik le, amelynek jellege egészen más, mint a mártással előállított rétegé.

1. Az elektroforézis

Az elektroforézis jelenségét *Reuss* észlelte először 1805 körül agyagrészecskék vizes szuszpenziójában. Nem vezető folyadékban diszpergált részecskék külső villamos erőtér hatására mozgásba jönnek és töltésüktől függően a katód vagy az anód felé vándorolnak. A folyamatot szemléltetően előállíthatjuk, ha egy desztillált vízben diszpergált agyagot tartalmazó üvegedénybe réz elektródapárt merítünk és egyenáramot kapcsolunk rá. Az anódon az agyagrészecskék tömörülnek. A feszültség hatására bekövetkező részecskemozgásból arra következtethetünk, hogy a diszpergált részecskéknek töltésük van. A jelenség az elektrolitokban lejátszódó ionvándorláshoz hasonlít, azonban a töltésmechanizmusban és a vándorló részecskék nagyságában lényegesen különbözik. A diszpergált részecskék mérete kolloid nagyságrendű vagy ennél nagyobb is lehet. A részecskék vándorlási iránya a diszpergált részecskék és a diszperziós közeg kémiai természetétől függ.

A felületi töltések villamos kettősréteget alakítanak ki, amely a részecskék felületén képződött töltésekből, és az azt körülvevő ellenkező töltésű ionfelhőből áll.

A leválás folyamata komplex jelenség. Az elektroforetikus részecsketovábbításon kívül koagulációs és elektroozmotikus folyamatok is jelentős szerepet játszanak. E folyamatok egymásrahatásaként a bevonandó felületen jól tapadó, rendkívül tömör, az elektroozmózis következtében nagymértékben víztelen, vízben oldhatatlan réteg keletkezik. A réteg kialakulásának mechanizmusára jellemző, hogy a bevonat vastagságának és tömörségének növekedésével, a víztartalom csökkenésével a réteg villamos ellenállása növekedik.

Ez a jelenség önmagától szabályozza a réteg vastagságát és az erővonalak a már bevont részekről az elektródák elhelyezése szempontjából kevésbé előnyös helyek felé irányulva, végül üreges, mélyedésekkel, résekkel ellátott felületeken is egyenletes bevonat jön létre.

A fűrdből kiemelt réteg tulajdonságai igen kedvezők. A mártással vagy kenéssel előállított réteg szárazanyag-tartalma általában 40...60%, az elektroforetikus előállított réteg nedves állapotban mintegy 90% szárazanyagot és 10% vizet tartalmaz. Ebből további előnyök származnak: a nedves réteg vastagsága kb. megfelel a valószínű rétegvastagságnak, a réteg igen szívós, csepegések, az éleken megfolyások nem jönnek létre. A nedves réteg mechanikai behatásoknak ellenáll, pl.: vízszugárral a vizes emulzió maradványa lemosható róla.

A folyamatot a felületes szemlélő a galvanizáláshoz hasonlónak tarthatja. Mindkét eljárást a következők jellemzik:

- a bevonandó vezető felületű munkadarabot folyadékba merítjük,
- a bevonáshoz egyenáramot használunk,
- a két elektróda közt — amelyek közül az egyik a bevonandó munkadarab — a potenciálesés következtében létrejövő erőteret használjuk ki a részecskék továbbítására,
- a továbbított részecskék töltésüket a bevonandó tárgyon elvesztik, ott lerakódnak és többé-kevésbé vastag, tömör réteget alkotnak.

1-1. táblázat

A galvanikus fémbevonás és az elektroforetikus lakkozás összehasonlítása

Összehasonlított jellemzők	Galvanikus fémbevonás	Elektroforetikus lakkozás
Alkalmazott közeg	elektrolit	vízzel hígított lakk
Üzemi hőmérséklet	20...80 °C	25...35 °C
Elektródák { <div style="display: inline-block; vertical-align: middle; margin-left: 0.5em;"> anód katód </div>	fémlemez	bevonandó tárgy
Feszültség	bevonandó tárgy	lakktartály
Áramsűrűség a munkadarabon	kicsi (< 8 V)	nagy (300 V-ig)
Áramsűrűség változása	nagy (50 A/dm ² -ig)	kicsi (≅ 0,4 A/dm ²)
Bevonási ideje	konstans	csökken a 0 felé
A fűrdő mozgatása	elég nagy, arányos a rétegvastagsággal	1,5...2,5 min, nem arányos a rétegvastagsággal
szűrése	nem szükséges	szükséges (keverés)
melegítése	esetenként szükséges	szükséges
hűtése	25 °C feletti üzemhőmérsékleten szükséges	néha kezdetben szükséges
pótlása	néha szükséges	szükséges (a reakcióhő elvezetésére)
ellenőrzendő adatai	az anód oldódásával	tömény lakkpaszta adagolásával
	koncentráció, fajsúly, p _H , szennyeződés	vezetőképesség, szárazanyag-tartalom, p _H , aminszám

A hasonló jelenségek ellenére a két eljárás részleteiben lényegesen különbözik. A lényeges különbségeket, és a hasonlóságokat az 1-1. táblázat tartalmazza [1], [2].

2. Az elektroforézis gyakorlati alkalmazása

A régóta ismert elektroforézis jelenségét ipari méretekben csak mintegy 6-8 éve kezdték hasznosítani, mert erre csak akkor kerülhetett sor, amikor a megfelelő minőségű vízben oldódó lakkokat kifejlesztették.

A műanyagok terén bekövetkezett nagymértékű fejlődés tette lehetővé olyan lakkrendszerek kialakítását, amelyek kielégítik a legkülönbözőbb mechanikai, korrózióállósági követelményeket és egyben elektroforetikus felhasználásra is alkalmasak. Az eljárást elsősorban fémből készült tömegcikkek: autókarozzériák és alkatrészek, fémbútorok, háztartási készülékek stb. alkatrészeinek alapozására, illetve bevonására használják.

A lakkréteg elektroforézissel való felvitelére a bevonandó munkadarabnak megfelelően kialakított tartály szükséges. A tartály fala a katód, a lakkozandó darab az anód. 50...250 V egyenárammal elérhető, hogy a negatív töltésű lakkrészecskék a bevonandó tárgy felé meginduljanak és ott lerakódnak. Minthogy az elektromos erővonalak sűrűsége a térben a munkadarab élein és csúcsain a legnagyobb, a lakk lerakódása ezeken a helyeken indul meg.

E jelenség különösen vékony lemezek és komplikált alakú tárgyak lakkozása esetén előnyös, mert az elektroforézises felvitel a vékony darabok éleit és sarkait olyan egyenletes védőréteggel látja el, ami másféle lakkozási eljárással nem lehetséges. Elkerülhető, hogy az éleken, sarkokon a lakk megfolyjon, hogy csupasz helyek maradjanak vagy megvastagodások keletkezzenek.

Az elektroforetikus lakkfürdőt ionmentes vízben diszpergált különböző kötő- és töltőanyagokból állítják össze úgy, hogy a kolloid nagyságrendű kötőanyag-részecskék és a kötőanyaggal körülvevett töltőanyag-részecskék negatív töltésű diszperz anyagként legyenek a diszperziós közegben. A fürdőszárazanyag-tartalma 6...15%. A fürdő szárazanyag-tartalmát, a meritőtartály folyadék mennyiségét állandó szinten kell tartani, az üzemelés során folyamatos utánpótlásról, az ülepedés megakadályozására a fürdő keveréséről gondoskodni kell, és egyben az odakerült idegen anyagrészeket, szennyeződéseket el kell távolítani. Ha a bevonás befejeződött, a lakkozott darabokat le kell öblíteni. Az elektroforézissel lerakódott lakkréteg jól tapad, szárazanyag-tartalma nagy.

A többi lakkozási eljáráshoz hasonlóan a felületeket alaposan meg kell tisztítani és előkezelni. Nagyon fontos, hogy az elektroforézises fürdőbe idegen szennyezések, sók ne kerüljenek, ezért az előkezelt darabokat a fürdőbe helyezés előtt ionmentes vízzel kell leöblíteni, és a fürdő elkészítéséhez is ilyen vizet kell használni. Bevonás után szárítás és a lakknak a szükséges hőmérsékleten történő beégetése következik.

Összefoglalva, az elektroforetikus lakkozás fő előnyei:

- egyenletes anyageloszlás nemcsak a felületeken, hanem az éleken és a sarkokon is,
- a lakkréteg vastagsága bizonyos határok közt szabályozható,
- a lakkozandó tárgyak felülete különböző alakú lehet, az elektroforézises lakkozás üregek bevonását is lehetővé teszi,
- a felvitt lakkréteg szárazanyag-tartalma nagy, utánpótlás nem észlelhető,
- a lakk vízzel hígítható, kevés oldószert tartalmaz, tűzveszély nincs és elszívóberendezés sem szükséges.

E valóban lényeges előnyökkel szemben mégsem lehet bizonyos hátrányokat figyelmen kívül hagyni. Ilyenek:

- a merítőfürdő érzékeny a tisztaságra, gondos karbantartást és felügyeletet igényel,
- a munkadarab felületének bizonyos feltételeket ki kell elégíteni (gondos felületi megmunkálás, tisztítás, előkezelés) [3].
- az eljárás megvalósításához beruházás szükséges.

3. Az elektroforézis alkalmazása a szigetelőtechnikában

A szerves és szervetlen szigetelőanyagok különböző tulajdonságai és feldolgozási lehetőségei, a növekvő igényű követelmények sokrétűsége: nagyobb hőállóság, jobb kúszóáram-szilárdság, korrózióállóság és nem utolsósorban a gyártás termelékenységének fokozása, a kézi munkák gépi eljárással való helyettesítése, sok új szigetelési eljárás kifejlődését eredményezték. Ez különösképpen vonatkozik a szigetelőrétegek villamos vezetőkön történő előállításának sokféleségére. Ide sorolhatjuk az elektroforézist is.

Az utóbbi években a villamos gépek és készülékek szigetelésében kezdtek alkalmazni a szerves és szervetlen szigetelőanyagok elektroforetikus eljárással való felvitelét. Ez az eljárás, a módszer egyszerűsége, az előállítható rétegek különleges tulajdonságai és változatossága miatt kiegészíti az ismert szigetelési eljárásokat és új megoldásokat tesz lehetővé. [4].

A szigetelőtechnikában 1954 óta a Siemens cég fejlesztette ki a csillámtartalmú szigetelőréteg elektroforetikus felvitelének módszerét. A csillám ma is a villamosipar igen nagy jelentőségű és széles körben alkalmazott természetes szigetelőanyaga. A hasított csillámból vagy csillámpapírból készült, különféle hőosztályú ragasztóanyaggal ragasztott, préselt lemezeket, vázanyagokkal vagy anélkül készült fóliákat, szalagokat, formadarabokat sok szigetelőtechnikai feladat megoldásához használják. E szigetelések hagyományos előállítása azonban nagyon munkaigényes [5], [6].

Az elektroforetikus eljáráshoz hőkezeléssel kombinált, kémiai és mechanikai eljárással feltárt csillámport használnak [7]. E kezeléssel igen apró, vékony, lemezes szerkezetű csillámport lehet előállítani, amely vizes közegben a felületére adszorbeált OH-ionoktól negatív töltésű, egyenáram hatására az anód felé vándorol és enyhe keveréssel lebegésben tartható. A csillám lerakódik az anódon és szilárd összefüggő réteget képez. A réteg tapadóképességének és szilárdságának fokozására azonban

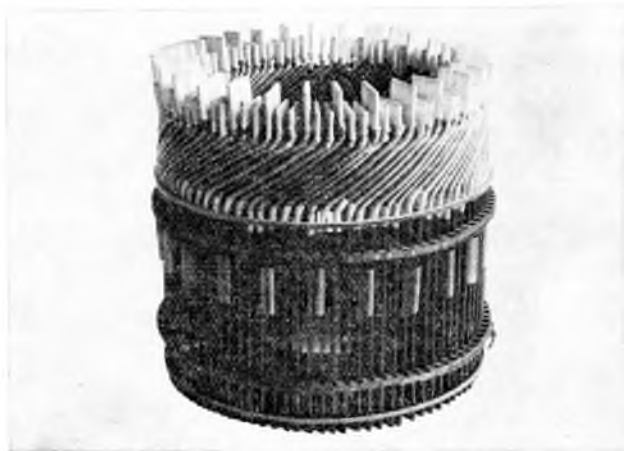
célszerű a csillámhoz — ugyancsak az anód felé vándorló — víz-emulziós műgyantaoldatot adni. Ez az oldat a megkívánt hőosztálynak és tulajdonságoknak megfelelően lehet szilikon-, polifluoretilén-, epoxi-, akrilsavészter-, vinilalkohol-, vinilacetát-alapú vagy egyéb vízben oldható gyanta-emulzió [8]. Például csillámporból és szilikongyanta-emulzióból elektroforetikus eljárással olyan réteget lehet előállítani, amelyben a csillám egyenletesen a gyantába van ágyazva, szárítás és beégetés után jó mechanikai és vil-

1-2. táblázat

Elektroforetikus eljárással előállított szigetelőréteg tulajdonságai

Tulajdonságok	Csillámpor – szilikongyanta emulzió összetétele: 6: 4
Vastagság	100...700 μm
Tapadás	100%
Átütési szilárdság (MSZ 4803/37 sz.)	10...12 kV/mm
Hőosztály	H
Rétegminőség	egyenletes csillám—gyanta eloszlású, tömör réteg

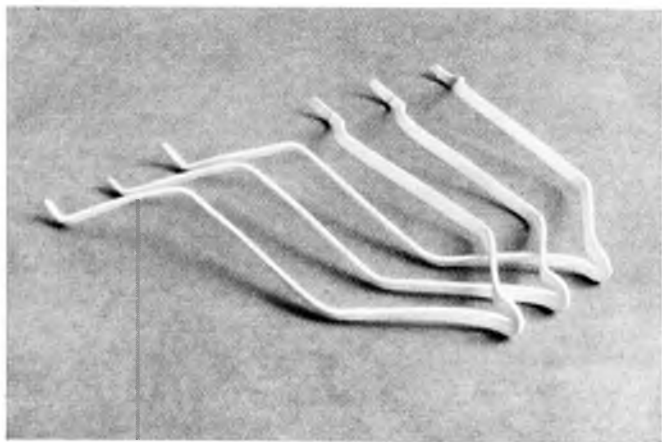
lamos tulajdonságú réteget képez. Tömör, a vezetőhöz jól tapad, hőállósága, kúszóáram-szilárdsága jó, és villamos szilárdsága 0,3 mm vastag rétegben 3 kV körül van. Az előállított réteg vastagsága a csillámpor szemcsenagyságától, a csillám—gyanta arány megválasztásától függően bizonyos határokon belül szabályozható. A réteg tulajdonságait az 1-2. táblázat tartalmazza. Ezzel az anyaggal vezető elemeket, tekercseket, tekercsfejeket, formadarabokat, ellenálláshuzalokat, szalagokat lehet szigetelőréteggel bevonni.



1-1. ábra. Rotormodell elektroforetikus tekercsfejbevonással

Az eljárás alkalmazására intézetünkben kísérletek folynak a villamosiparban jelentkező következő szigeteléstechikai problémák megoldására:

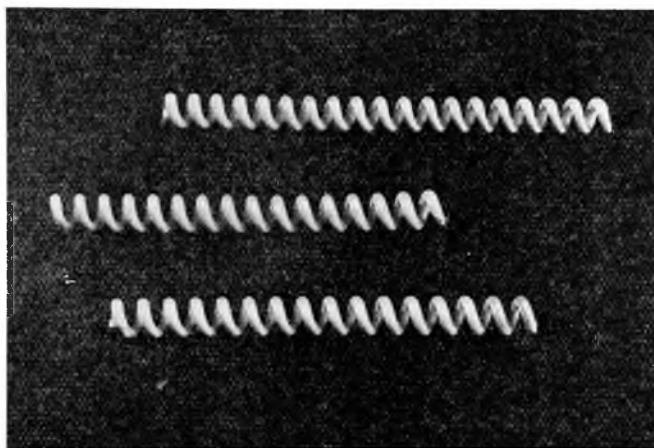
- forgórészek forrasztott, csupasz tekercsvégeinek a hosszadalmas kézi szigetelés helyett egy művelettel való szigetelésére (a szigetelt motormodellt 1. 1-1. ábra),



1-2. ábra. Villamos gépek tekercselemei elektroforetikus szigeteléssel

- villamos motorok tekercselemeinek elektroforetikus eljárással történő szigetelése; egy kísérleti motor üzemszerű kipróbálása jelenleg folyamatban van (1-2. ábra),
- különféle speciális vezetőanyagból készült elemek hőálló szigetelése (1-3. ábra).

A továbbiakban, a teljességre való törekvés igénye nélkül, röviden ismertetünk néhány, az elektrotechnika területén érdeklődésre számot tartó, az elektroforézis elvén alapuló eljárást, illetve szigetelési megoldást: A rádiótechnikában izzókatódokat, főképpen oxikatódokat állítanak elő alumíniumoxid és egyéb pl. alkáli földfémek karbonátjainak elektroforetikus felvitelével. Kísérleteket folytatnak lakkozott hu-



1-3. ábra. Tekercselemek elektroforetikus szigeteléssel

zalok és szalagok gyártására is. Ennek kifejlődését egyelőre késlelteti, hogy a pigmentanyag nélkül is kellő vastagságban, sima felülettel felvihető elektroforetikus lakk hiányzik [9].

Az elektroforetikus bevonás ma már az általánosan alkalmazott ipari eljárások közé tartozik. Ismert előnyeik kívül elsősorban az eljárás szigeteléstechikai szempontból kiemelhető előnyeire szeretnék még egyszer rámutatni. Az eljárás a több rétegben, több, általában kézi művelettel felvihető szigetelés helyett sok esetben alkalmas a szigetelések egy rétegben, egy művelettel, rendkívül egyenletes minőségben való előállítására. Előbbi káros inhomogenitások kiküszöbölésével jelentős minőségjavulást, utóbbi korszerű technológiai megoldásokat eredményez. Mindkét tényező megegyezik iparunknak a világszínvonal elérésére irányuló törekvéseivel.

Irodalom

- [1] *Hüneke, H.*: Elektrophoretisches Lackieren. *Industrie-Lackier-Betrieb* **32** (1964) Nr. 3. 69—77. old.
- [2] *Berger, S.*: Die Anwendung des elektrophoretischen Prinzips beim Lackieren. *Siemens-Zeitschrift* **39** (1965) Heft 11. 1209—1216. old.
- [3] *Berger, S.*: Die Elektrophorese und ihre Anwendung in der Industrie. *VDI Zeitschrift* **109** (1967) 787—792. old.
- [4] Neuentwicklungen auf dem Gebiet des Elektrophoreseprozesses. *Industrie-Lackier-Betrieb* **36** (1968) Nr. 7. 286—288. old.
- [5] *Guillery, P.—Rotter, H. W.*: Die Elektrophorese als Isolierverfahren in der Elektrotechnik. *Elektrotechnische Zeitung A.* **15** (1963) 607—611. old.
- [6] *Rotter, H. W.*: Elektrophorese, ein Verfahren zum Erzeugen hochwertiger Isolierschichten. *Siemens-Zeitschrift* **44**. (1970) Heft 4. 231—233. old.
- [7] *Z. Dr. Windisch Klára*: Csillámpapír alapú villamos szigetelőanyagok. *VKI Közleményei* **3**. 43—54. old.
- [8] Schwz. P. 443836. Verfahren zur elektrophoretischen Herstellung von Deckschichten.
- [9] *Z. Dr. Windisch Klára*: Elektroforetikus lakkozás alkalmazási lehetőségei a szigetelőtechnikában. Előadás a Villamosgép- és Készülékgyártás szigetelőanyagai c. ankéton. 1969. december

2.

Hazai szigetelőlakkok hőállósága

H. DR. MAGYAR LAURA

ÖSSZEFOGLALÁS

IEC és DIN előírások szellemében meghatároztuk hazai szigetelőlakkjaink öregedésre jellemző hőmérsékleti indexét. A hőmérsékleti indexet, azaz a 20 000 h élettartamhoz tartozó hőmérsékletet, az öregedést előidéző kémiai folyamatok sebességének hőmérsékletfüggését leíró *Arrhenius*-törvény segítségével állapítottuk meg. A törvény alkalmazhatóságát korrelációs együtthatókkal ellenőriztük. A lakkok élettartam-egyeneseit ábrákon mutattuk be.

ТЕПЛОСТОЙКОСТЬ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ИЗОЛИРУЮЩИХ ЛАКОВ

Л. Др. Л. Мадьяр

Резюме

Соответственно принципам стандартов МЭК и ДИН были определены температурные индексы характеризующие старение отечественных изолирующих лаков. Температурный индекс, т. е. температура, относящаяся к сроку службы 20 000 часов, был определен с помощью закона Архениуса, описывающего функциональную зависимость скорости химических процессов, вызывающих старение от температуры. Применимость закона была контролирована корреляционными коэффициентами. Прямые срока службы лаков изображены на рисунках.

WÄRMEBESTÄNDIGKEIT DER IN UNGARN HERGESTELLTEN ISOLIERLACKE

H. dr. L. Magyar

Zusammenfassung

Gemäss den IEC und DIN Vorschriften haben wir den Temperaturindex bezüglich der Alterung unserer in Ungarn hergestellten Isolierlacke bestimmt. Den Temperaturindex, d. h. die zur 20 000-stündigen Lebensdauer gehörige Temperatur haben wir durch das Gesetz von *Arrhenius*, das die Geschwindigkeit der die Alterung hervorruhenden chemischen Prozesse in Abhängigkeit von der Temperatur beschreibt, festgestellt. Die Verwendbarkeit des Gesetzes ist durch Korrelationskoeffizienten kontrolliert worden. Die Lebensdauerkurven der Lacke sind in Abbildungen vorgeführt worden.

THERMAL ENDURANCE OF INSULATING VARNISHES

H. Dr. L. Magyar

Summary

The temperature indices characterizing the ageing of insulating varnishes produced in Hungary have been determined according to IEC and DIN specifications. The temperature index, i.e. the temperature pertaining to service life of 20 000 hours has been determined by means of *Arrhenius*' law describing the temperature dependence of the rate of chemical processes causing ageing. Applicability of said law has been checked by correlation coefficients. Diagrams showing life curves of varnishes are presented.

1. Bevezetés

A szigetelőlakkok hőállósága, vagyis tartós hőigénybevételrel szembeni ellenálló-képessége döntő tényező a nagyobb hőmérsékleten üzemelő villamos gépek és készülékek üzembiztonsága és élettartama szempontjából. Érthető tehát az a nemzet-közi törekvés, hogy a szigetelőanyagok hőállóságát eddig jóformán empirikusan meghatározó szigetelési hőosztályokat pontosan körülírt vizsgálatok alapján kapott, reprodukálható hőállósági jellemzőkkel helyettesítsék. A cél az, hogy a gépszerkesztők konkrét összehasonlító adatokkal rendelkezzenek, az anyagok kiválasztásakor helyes útbaigazítást kapjanak és ne kelljen a többé-kevésbé önkényes osztályozásra támaszkodniuk.

Az IEC 15-ös bizottsága 1964-ben azt javasolta, hogy a szigetelési hőosztályokba csak a szigetelőanyag-rendszereket sorolják be és az egyes szigetelőanyagfajták hőállóságának jellemzésére vezessék be az ún. hőmérsékleti indexet. E bizottság keretében azóta is nagyarányú munka folyik e hőmérsékleti indexek vizsgálati mód-szereinek kidolgozására [1...3].

A hőmérsékleti index arról tájékoztat bennünket, hogy milyen hőmérsékleten tartható a szigetelőanyag 20 000 h időtartamig anélkül, hogy valamely kiválasztott tulajdonsága előre megadott és használhatóságát megszabó mértékben leromlana. A hőmérsékleti index fogalma megegyezik a DIN szabványokban [4, 5] már korábban szereplő határhőmérséklet fogalmával, de az időtartam a DIN szabványokban 25 000 h.

Az IEC előírásokat [6...14] és a DIN szabványokat figyelembe véve kezdtük el 1968-ban szigetelőlakkjaink hőmérsékleti indexének meghatározását. A vizsgálatok-kal kapcsolatos munkák során megválasztottuk a vizsgálati módszert is. E módszer lényegét az MSZ 4803/35 [15] szabvány rögzíti. A módszert itt nem ismertetjük, de a vizsgálati eredmények közlése előtt röviden vázoljuk azt az elvet, amely a szigetelőanyag hőöregedésének vizsgálatát lehetővé teszi.

2. A hőöregedés törvénye

A szigetelőanyagok termikus tulajdonságainak jellemzésekor különbséget kell ten-nünk hőmérsékletfüggés és hőállóság (hőöregedés) között. A *hőmérsékletfüggés* hőhatásra fellépő, rendszerint reverzibilis fizikai folyamatokban mutatkozik meg, eltekintve az e függőség vizsgálata során szükségszerűen alkalmazott rövid idejű hőhatásra bekövetkező öregedéstől. A *hőöregedés*, a tulajdonságok irreverzibilis

romlása, hőhatásra végbemenő irreverzibilis kémiai reakciók következménye. A termikus tulajdonságoknak e kétféle jellemzését szemléltettük a 2-1. táblázatban *K. Michel* cikke [16] alapján. A táblázat alapján érzékelhető, hogy a hőállóság vizsgálata lényegében különbözik a hőmérsékletfüggőség vizsgálatától.

2-1. táblázat

**A termikus tulajdonságok változásainak jellemzése
hőigénybevétel esetén**

Hőmérsékletfüggés	Hőállóság (hőöregedés)
A hőigénybevétel okozta változás jellemzése	
<p>A változás fizikai jellegű, többnyire reverzibilis. Mechanikai tulajdonságok változása (szilárdság, rugalmassági modulusz stb.) Dielektromos tulajdonságok változása (szigetelési ellenállás, dielektromos veszteségek, átütési feszültség stb.) Hőtágulás, hővezetés</p>	<p>A változás kémiai és fizikai jellegű, irreverzibilis. Az anyag kémiai változásai, mint pl.: bomlás oxidáció továbbhálósodás hidrolízis illő összetevők (pl. lágyító) távozása okozzák a mechanikai és a villamos tulajdonságok maradó változását.</p>
A termikus tulajdonságváltozások vizsgálata	
<p><i>Rövid</i> időtartamú vizsgálatok: A tulajdonságok vizsgálatára a hőmérséklet függvényében Termikus jellemzők mérése, pl.: fajhő, hőkiterjedési együttható, hővezetőképesség, hőalaklathatóság: lágyuláspont, olvadáspont</p> <p><i>Hosszú</i> időtartamú vizsgálatok: Termomechanikai tulajdonságok mérése</p>	<p><i>Hosszú</i> időtartamú vizsgálatok (öregedésvizsgálatok): Szigetelőanyagok és szigetelési rendszerek hőmérséklet—idő függésének meghatározása a tulajdonságoknak az alkalmazás szempontjából kritikus jellemző értékig bekövetkezett leromlásából</p>

A hőöregedést előidéző kémiai folyamatok sebessége a hőmérséklet függvénye. A hőöregedés vizsgálatának egzaktabb lehetőségét e függőség törvényszerűségének ismerete teremti meg. A reakciósebesség—hőmérséklet összefüggését *Arrhenius* törvénye írja le és a következő képlet fejezi ki:

$$\log k = -\frac{C}{T} + B,$$

ahol: *C* csaknem kivétel nélkül pozitív állandó;
T az abszolút hőmérséklet °K;
P anyagi állandó;
k a sebességállandó.

Ez az összefüggés mindig érvényes, ha a reakció rendűsége és a mérvadó sebességi egyenlet alakja a különböző hőmérsékleteken nem változik.

Arrhenius egyenletét először *Büssing* [17] alkalmazta szigetelőanyagok öregedési folyamatára. A feltételezés az, hogy az anyagtulajdonság az anyag alkalmasan válasz-

tott, kémiai szerkezetét jellemző kémiai paraméterének egyértelmű függvénye, vagyis

$$F = F(c).$$

ahol: F az anyag valamely fizikai tulajdonsága (pl. mechanikai, villamos stb.);

c az anyag valamely kémiai jellemzője (pl. koncentráció, közepes polimerizációs fok stb.).

Az összefüggés megfordítva is igaz, vagyis a c az F -nek ugyancsak egyértelmű függvénye, tehát

$$c = c(F).$$

Ebből következik, hogy az élettartam, tehát az anyag egy célszerűen megválasztott fizikai tulajdonságának egy bizonyos értékre való leromlási ideje, a hőmérséklettel ugyanolyan törvényszerűség szerint változik, mint az anyag kémiai jellemzője. A kémiai jellemző hőmérsékletfüggését a reakciósebesség hőmérsékletfüggése határozza meg és ezt az Arrhenius-törvénnyel fejeztük ki. Ennek alapján az anyag villamosiparban értelmezett élettartamának a hőmérséklettől való függésére a következő egyenletet írhatjuk fel:

$$\log L = a + \frac{b}{T},$$

ahol: L a szigetelőanyag élettartama T hőmérsékleten;

a és b anyagi állandók;

T az abszolút hőmérséklet, °K.

Az egyenlet alapján elvileg bármely hőmérsékletre kiszámíthatjuk az élettartamot, ha legalább két hőmérsékleten ismerjük azt.

A hőmérsékleti index, a 20 000 h élettartamhoz tartozó hőmérséklet meghatározásához a vizsgálat során célszerű olyan nagyobb hőmérsékleteken igénybe venni az anyagot, amelyeken a választott tulajdonságot képviselő jellemző viszonylag nem hosszú idő alatt romlik le az anyag használhatóságának alsó határát jelző értékre, vagyis nem hosszú idő alatt éri el végpontkritériumát. A jellemzőnek ez a leromlási ideje az igénybevételi hőmérséklethez tartozó élettartama. A megfelelő végpontkritérium nagyságát a már említett szabványok előírják.

Az anyag különböző tulajdonságainak romlási sebessége különböző lehet, ezért a különböző jellemzők alapján kapott élettartam-egyenesek meredeksége egymástól eltérhet. Ezenkívül az egyforma meredekségű élettartam-egyenesek egymáshoz képest párhuzamosan eltolódnak, ha a jellemző végpontkritérium változik, feltéve, hogy olyan értéktartományba esik, ahol a romlást ábrázoló görbe már eléggé meredek. E két körülmény miatt a hőmérsékleti index csak a mért jellemzőre érvényes és a végpontkritérium többé-kevésbé önkényes megválasztása miatt relatív.

A hőmérsékleti index meghatározásában talán a legnehezebb feladat a megfelelő jellemző és a helyes végpontkritérium megválasztása. A jellemző kiszemelésekor nemcsak felhasználási szempontokat kell tekintetbe venni, hanem a vizsgálati módszer kivitelezhetőségét is, amilyenek pl. az időtartam és az értékelhetőségi problémák. A jellemzőnek az anyagminőség változására kellően érzékenynek kell lennie és azzal egyértelműen kell változnia. A jellemzőnek az alkalmazással kapcsolatos fontos tulajdonságokról megfelelő és sokoldalú felvilágosítást kell adnia. Az elmondott követelményeket csak több jellemző vizsgálatával lehet kielégíteni.

A végpontkritérium a villamos berendezés üzemképességét biztosító jellemző érték alsó határa. Túlzott igényt — a valóságot figyelmen kívül hagyva — nem szabad támasztanunk, azonban a végpontkritériumnak az anyag olyan állapotát kell jeleznie, amelyben az a felhasználási igénybevételekkel szemben még megbízhatóan

ellenálló. Ezt az állapotot teljesítheti más-más végpontkritérium is a szigetelőanyag rendeltetésétől függően. Lehetséges, hogy az alkalmazási területek különböző igénybevételi szigorúságuk szerint is változó használhatósági határértéket szabnak meg egyes lényeges jellemzőkre, ami természetesen maga után vonja a hőmérsékleti index változását is. A végpontkritériumot a gyakorlatban jól bevált szigetelőanyagok vizsgálati eredményeit is figyelembe véve célszerű megadni.

Az elmondottakból következik, hogy valamely szigetelőanyag hőmérsékleti indexének megadásakor a vizsgált jellemző és mérési módszerének megjelölésén kívül a végpontkritériumot is fel kell tüntetni.

E megfontolások után a hazai szigetelőlakkokon elvégzett vizsgálatok eredményeit ismertetjük.

3. Szigetelőlakkok hőmérsékleti indexének meghatározása

3.1 A vizsgálat körülményei

A vizsgált módszert — amint már említettük — az MSZ 4803/35 szerint választottuk meg. A vizsgált szigetelőlakkokat, a lakkok rendeltetését, a mérési hőmérsékleteket, a mérésre kiválasztott jellemzőket, a mérési módszert és a végpontkritériumokat a 2-2. táblázatban tüntettük fel.

2-2. táblázat

A szigetelőlakkok vizsgálati körülményei

Lakk	XD	PU 44	FAP	BL 51	PU 54
Vizsgálati hőmérséklet, C°	140 160 180 200	160 180 200	120 140 160 180	120 140 160 180 200	160 180 200
a) Jellemző b) Mérési módszer c) Végpontkritérium	a) átütési térerősség b) DIN 46 456/1. Blatt c) 3 kV a) Villamos szilárdság b) IEC 15 B (Central Office) 18 c) 12 kV/mm		—		
	a) Repedésképződés b) DIN 46 456/1. Blatt c) repedés megjelenése a) Súlyvesztés b) MSZ 4803/35 c) 30%				

2-3. táblázat

Vizsgálati eredmények

Lakk	Jellemző	Hőmérséklet, °C	Élettartam, h	Hőmérsékleti index	Korrelációs együttható
1	2	3	4	5	6
XD	Átütési feszültség	200	470	130	0,999
		180	1 090		
		160	3 800		
		140	11 000		
Villamos szilárdság	200	400	126	0,998	
	180	800			
	160	2 480			
	140	9 200			
Repedésképződés	200	124,8	136	0,996	
	180	408,0			
	160	2 967,9			
	140	12 295,5			
Súlyveszteség*	200	525	141**	—	
	180	1 725			
	160	5 670			
	140	20 150**			
PU 44	Átütési feszültség	200	590	159	0,992
		180	4 100		
		160	16 100		
		140	16 100		
Villamos szilárdság	200	590	158	0,994	
	180	3 820			
	160	15 000			
	140	15 000			
Repedésképződés	200	436,8	156	0,998	
	180	2 654,4			
	160	12 936,0			
	140	12 936,0			
Súlyveszteség	200	520	157	0,999	
	180	3 010			
	160	14 600			
	140	14 600			
FAP	Repedésképződés	180	273,6	108	0,993
		160	1 041,6		
		140	2 133,6		
		120	9 072,0		
Súlyveszteség*	180	1 370	125**	—	
	160	3 450			
	140	8 300			
	120	28 000**			

2-3. táblázat folytatása

Lakk	Jellemző	Hőmérséklet, °C	Élettartam, h	Hőmérsékleti index	Korrelációs együttható
1	2	3	4	5	6
BL 51	Repedésképződés	200	96,0***	—	—
		180	338,4	109	0,996
		160	703,2		
		140	2753,6		
		120	9996,0		
	Súlyvesztés	200	44***		
		180	170	109	0,999
		160	580		
		140	2010		
		120	8300		
PU 54	Repedésképződés	200	333,6		
		180	1092,0		
		160	5308,8		
	Súlyvesztés	200	222	152	0,993
		180	1720		
		160	8073		

* Ennél a laktípusnál élettartam-egyes meghatározására nem ajánlott jellemző.

** A vizsgálat folyamatban (15 000 h után), tehát csak feltételezett érték.

*** Nem használható érték, mert kisebb, mint 100 h.

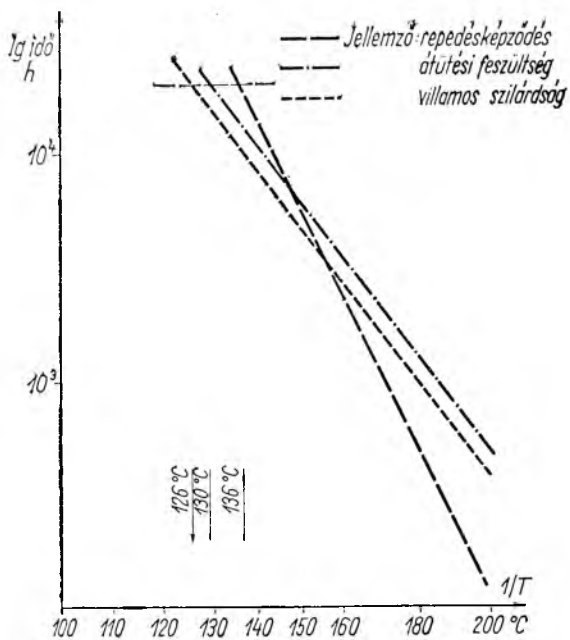
3.2 A vizsgálati eredmények ismertetése

A jellemzők, a repedésképződés kivételével, az idő függvényében értékcsökkenésükkel mutatták a szigetelőlakk romlását. A repedésképződés-vizsgálat tulajdonképpen vaslemezhozórára felvitt lakk rugalmasságának megfigyelése tartós hőigénybevétel alatt; ez hőszokkigénybevételt is jelent. A rugalmasság megszűnését repedés megjelenése mutatta, amelyet 1000 V-os feszültségpróbával vagy szemrevételezéssel állapítottunk meg. A repedés bekövetkeztéig eltelt idő az élettartam volt a vizsgálati hőmérsékleten, tehát a repedésképződés-vizsgálat közvetlenül az élettartamot adta meg.

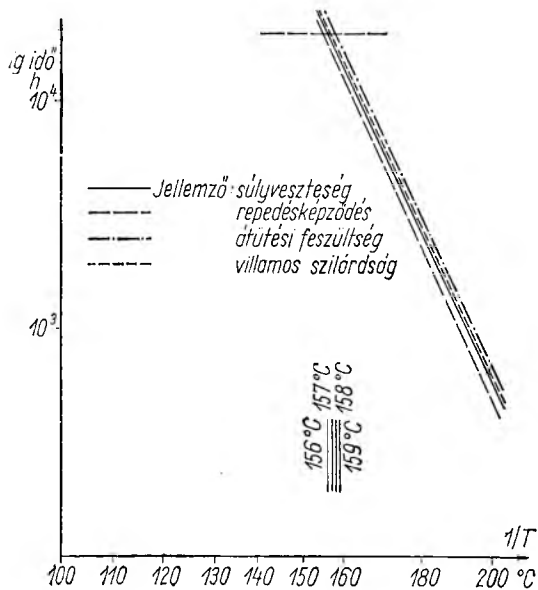
Valamennyi többi vizsgálat esetében az élettartamot a jellemző—idő grafikonból állapítottuk meg, amelyekben a hőmérséklet mint paraméter szerepelt. A további értékelés és az ábrázolás egyszerűbbé tétele érdekében az időt logaritmikus léptékben tüntettük fel.

A megállapított élettartamokból a szabvány utasításai szerint a legkisebb négyzetek elvén alapuló regressziós elemzéssel kiszámítottuk a hőmérsékleti indexet és megszerkesztettük az élettartam-egyenest. A 2-3. táblázatban foglaltuk össze a különböző hőmérsékletekhez tartozó, egy-egy jellemzőre vonatkozó élettartamokat és ugyanitt a hőmérsékleti indexeket. A táblázatban megadtuk továbbá még az élettartamok logaritmusai és a hozzájuk tartozó hőmérsékletek reciprok értékei között fennálló lineáris kapcsolatot mérő korrelációs együtthatókat is. Az együtthatók azt mutatják, hogy a két változó kapcsolata igen szoros, tehát a tulajdonságrömlások hőmérséklet-függése követi Arrhenius törvényét.

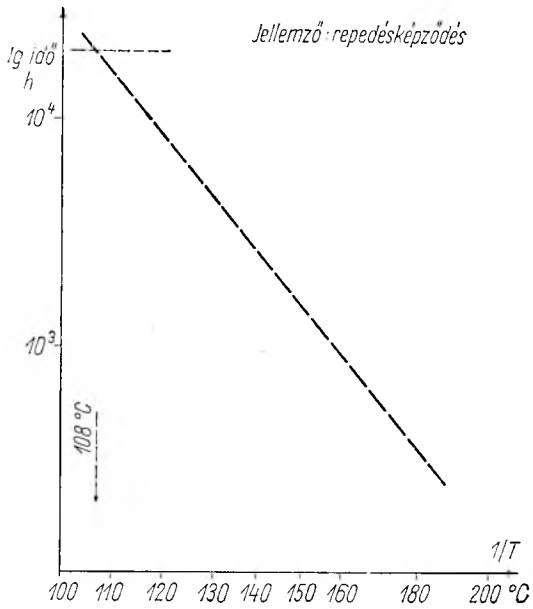
A táblázatból látható, hogy a 200 °C-on igénybevett Vinuret BL 51 mérési



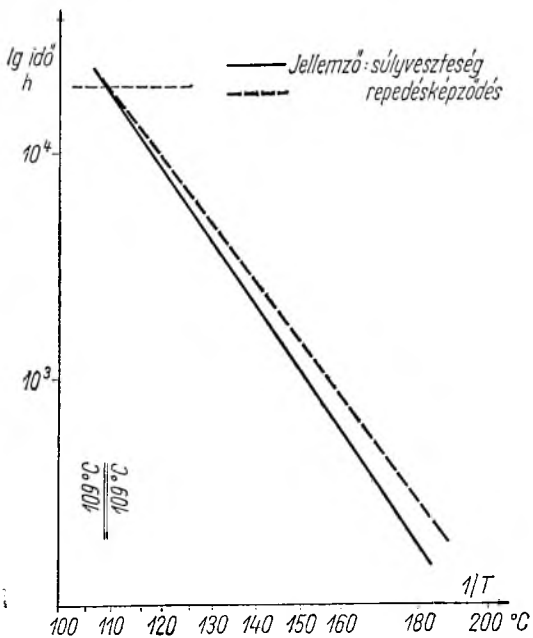
2-1. ábra. XD itatólakk élettartam-egyenesei



2-2. ábra. PU 44 itatólakk élettartam-egyenesei



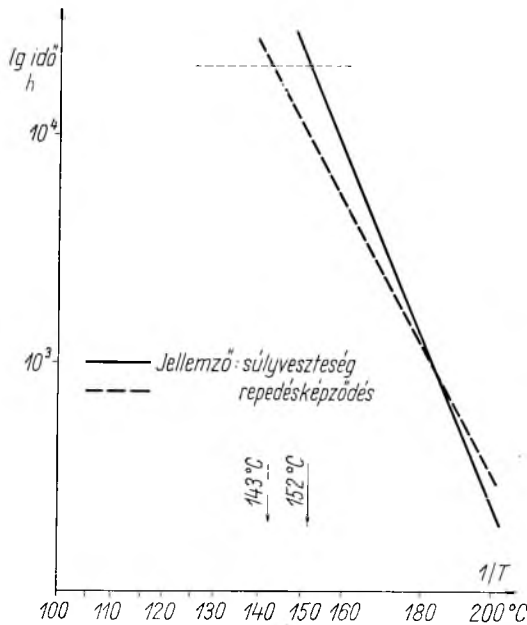
2-3. ábra. FAP bevonó lakk élettartam-egyenesei



$$q_F = f(\omega)$$

2-4. ábra. Vinuret BL 51 bevonó lakk élettartam-egyenesei

eredményei nem használhatók fel az élettartam-egyenes megszerkesztéséhez, mert a kapott élettartamok túl rövidek, 100 h-nál kisebbek. Látható az is, hogy a száradó növényi olaj felhasználásával előállított lakkok — az XD és a FAP — súlyvesztése nem alkalmas jellemző az élettartam meghatározására. Öregedésük ugyanis részben oxidációs folyamat és az ezzel járó súlynövekedés (oxigénfelvétel) jórészt kompenzálja a degradációs súlyvesztést. Ennek következtében az amúgy is sokáig tartó vizs-



2-5. ábra. PU 54 bevonólakk élettartam-egyenesei

gálat ideje meghosszabbodik, nagyjából kétszerese, négyszerese más jellemző vizsgálati idejének. Ezenkívül az extrapoláció is nehezebb, mert a súlyvesztés—idő görbék még logaritmusos időábrázolásban sem elég meredek. Ilyen típusú lakkokhoz ezért a súlyvesztést nem ajánlatos vizsgálati jellemzőnek választani.

A táblázatban feltüntetett eredményekből megszerkesztett élettartam-egyeneseket mutatják be a 2-1...2-5. ábrák.

4. A hőmérsékleti index jelentősége

A hőmérsékleti index a szigetelőlakkok relatív hőállóságát olyan megbízhatóan jelöli, mint bármely egyéb szabványos jellemzője más tulajdonságait. A relatív hőállóság a lakk rendeltetése szempontjából bármely fontos tulajdonságra meghatározható és nemcsak minőségi sorrendet állapít meg, hanem kvantitatíve is megkülönbözteti őket. A szigetelőlakkoknak ez a finomított és eddig nem közelítetten egzakt hőállósági választéka a szerkesztési munkát gazdaságosabbá, könnyebbé és eredményesebbé teszi.

A hőmérsékleti index és a vonatkozó egyéb vizsgálati adatok segítségével egy-egy tulajdonság hő hatására bekövetkező változására közvetlenül kapunk felvilágosítást.

Ezzel lehetőség nyílik arra, hogy meghatározott rendeltetésű szigetelőanyagok alkalmazása szempontjából legfontosabb tulajdonságait vizsgáljuk és azokra ne más vonatkozású, hanem kellően informatív termikus adatokból következtessünk.

Meg kell azonban jegyeznünk, hogy a hőmérsékleti index csak szigetelőanyagot jellemez, ebben az esetben szigetelőlakkot, függetlenül a szigetelési rendszertől. A szigetelési rendszer hőállósága az őt alkotó szigetelőanyagok hőállóságából nem adódik össze, hanem az összetevők kölcsönhatása miatt a rendszer hőállóságát külön meg kell vizsgálni. A megfelelő hőállóságú összetevő kiválasztása mégis lényeges, mert a kölcsönhatástól függetlenül a nem megfelelően hőálló alkatrész, mint gyenge pont, károsíthatja az egész rendszer hőállóságát.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton mondok köszönetet a KGM. 3. sz. Szabványosítási Központ vezetőjének, *Darnó Györgynek*, hogy e kutatási munkát lehetővé tette és abban segítséget nyújtott.

Irodalom

- [1] Étude de l'endurance thermique des matériaux entrant dans la construction électrique. *P. de Maneville*. Revue générale de l'électricité, jan. 1968.
- [2] Étude de l'endurance thermique des matériaux entrant dans la construction électrique. *P. Belloc—B. Fallou*. Revue générale de l'électricité, jan. 1969.
- [3] Étude du vieillissement thermique des matériaux utilisés dans la construction électrique. *P. Belloc—B. Fallou*. Revue générale de l'électricité, mars 1970.
- [4] DIN 46456 Blatt. 1. — 1964.
- [5] DIN 53446 — 1962.
- [6] IEC Publication 216. Guide for the preparation of test procedures for evaluating the thermal endurance of electrical materials
- [7] IEC 15 B (Secreteriat) 29-1969. Guide for the designation of the temperature capability of insulating materials and simple combinations.
- [8] IEC 15 B (Central Office) 7-1968. Test procedure for determining the relative thermal endurance of insulating varnishes in air.
- [9] IEC 15 B (Secreteriat) 28-1969. Test procedure for thermal endurance of flexible insulating materials, varnishes and resins by decrease of flexibility.
- [10] IEC 15 B (Central Office) 10-1968. Test method for evaluation of bond strength of electrical impregnating varnishes by the wire bundle test method.
- [11] IEC Publication 390-1969. Evaluation of the thermal endurance of electrical insulating varnishes by the helical coil bond test.
- [12] IEC 15 B (Central Office) 18-1970. Test procedure for thermal endurance of insulating varnishes — electric strength method.
- [13] IEC 15 B (London/Ad Hoc Group) 11-1968. Endurance test.
- [14] IEC 15 B (Report of Ad Hoc Group of dr. Eden, Dr. Dayand, Mr. Zeier) — 1968.
- [15] MSZ 4803/35—1971.
- [16] Prüfung und Beurteilung der thermischen Beständigkeit von elektrischen Isolierstoffen und Isolationen. *K. Michel*. Bull. Sev. 57 (1966) 18. Januar.
- [17] Beiträge zum Lebensdauergesetz elektrischer Maschinen. *W. Büssing*. Arch. Elektrotechn. Bd. 36/1942. S. 333—361; S. 735—745.

3.

Korszerű technológia áramköri elemek tokozására kis nyomású sajtolóanyagokkal

DR. MISZLIVETZ JÓZSEF

ÖSSZEFOGLALÁS

Az utóbbi években kifejlesztett epoxigyantás kisnyomású sajtolóanyagok lehetővé tették a legkülönbözőbb — főleg nyomásra érzékeny — áramköri elemek, mint pl. diódák, integrált áramkörök, tekercsek stb. tokozását. A tokozás a különféle környezeti behatásokkal, igénybevételekkel szemben teljes védettséget nyújt. A cikk tárgyalja a tokozó anyagokkal szemben támasztott követelményeket és összehasonlítja a különböző, tokozásra alkalmas anyagféléseket.

Megismerjük a VKI e téren kifejlesztett kutatási munkáját az alapanyagkutatás terén, továbbá az Intézet által kifejlesztett kisnyomású fröccs-sajtológépet és gyártástechnológiákat.

СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСА СХЕМНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ПРЕСС-МАТЕРИАЛОВ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Д-р. Й. Мисливец

Резюме

Разработанные в последние годы пресс-материалы низкого давления на базе эпокси-смола дали возможность на изготовление корпусов для различных элементов электрических схем, чувствительных к давлению, например, для диодов, интегральных схем, катушек и т. д. Схемные элементы, снабженные корпусом, защищены от различных воздействий окружающей среды. В статье рассматриваются требования, предъявленные к материалам, используемым для изготовления корпуса деталей и сравниваются различные материалы, пригодные для изготовления корпуса. Статья знакомит читателя с деятельностью Научно-исследовательского института электрической промышленности, направленную на создание исходных материалов, а также с шприцпрессом низкого давления, разработанным Институтом, и с технологией производства.

NEUZEITLICHE TECHNOLOGIE ZUR EINBETTUNG VON STROMKREISEN MIT NIEDERDRUCK-PRESSMASSEN

Dr. J. Miszlivetz

Zusammenfassung

Die in den letzteren Jahren entwickelten Epoxydharz-Niederdruck-Pressmassen haben die Einbettung der verschiedensten — hauptsächlich druckempfindlichen—Stromkreiselemente, wie z. B. Dioden, integrierte Stromkreise, Windungen usw. ermöglicht. Die Einbettung bietet vollen Schutz gegenüber den verschiedenen Umgebungseinwirkungen und Beanspruchungen. Der Aufsatz beschäftigt sich mit den gegenüber den einbettenden Materialien gestellten Anforderungen und vergleicht die verschiede-

nen, zur Einbettung in Betracht kommenden Materialarten. Wir lernen die auf diesem Gebiet entwickelte Forschungsarbeit des Forschungsinstituts der Elektroindustrie in der Grundstoffforschung, ferner die vom Institut entwickelte Niederdruck-Spritzpressmaschine und die Herstellungstechnologien kennen.

UP-TO-DATE TECHNIQUES FOR PRODUCING CIRCUIT ELEMENT ENCLOSURES BY LOW PRESSURE INJECTION MOULDING

Dr. J. Mislivetz

Summary

Low-pressure moulding materials developed in the past few years have rendered possible the enclosing of a wide range of circuit elements sensitive to pressure, such as diodes, integrated circuits, coils, etc. The enclosures provide full protection against harmful ambient effects and stresses. The requirements to be satisfied by such enclosures are dealt with, comparing the various materials applicable for this purpose. Information on the activity of VKI in the research of basic materials is given together with the description of a low-pressure injection moulding machine and production techniques developed by the Institute.

1. Általános ismeretek

A sajtolóanyagok igen fontos szigetelő- és egyben szerkezeti anyagokként szerepelnek a villamosipar különböző területein. A VKI Szigeteléstechikai Főosztályának már hagyományos kutatási területe a villamosipar különleges igényeit kielégítő új típusú sajtolóanyagok kifejlesztése, az ehhez kapcsolódó korszerű vizsgálati módszerek kidolgozása, valamint a feldolgozás- és alkalmazástechnikai problémák megoldása.

A sajtolóanyagokkal kapcsolatos világszerte folyó kutatások egyik legjelentősebb eredménye a legutóbbi években kétségtelenül a kis nyomású epoxigyantás sajtolóanyagok kifejlesztése volt. A feljlesztés az USA-ból indult ki, innen került át Európa iparilag fejlett országaiba. A kis nyomású sajtolóanyagokat elsősorban különböző villamos alkatrészek tokozására, beágyazására használják. Ennek az eljárásnak számos olyan előnye van, ami többek között méretcsökkentésben és így anyagmegtakarításban, továbbá az alkatrészek környezeti behatások elleni teljes védettségében és különböző új alkalmazástechnikai megoldásokban mutatkozik meg. Így az üzemi stabilitás és az élettartam jelentős mérvű javulását érték el a diódák, kistranszformátorok, mágnestekercsek stb. tokozása révén.

2. Tokozóanyagokkal szemben támasztott követelmények

Mielőtt részletesebben rátérnénk a tokozási technológiával kapcsolatos problémákra és néhány konkrét megoldás ismertetésére, érdemes röviden összefoglalni a már feldolgozott, tehát szilárd állapotú tokozóanyagokkal szemben támasztott általános követelményeket. Ezek a következők:

2.1 Nedvességállóság

A tokozóanyaggal szemben támasztott követelmények közül kétségtelenül a nedvességállóság a legjelentősebb. A tartós nedves—meleg (98% relatív légnedvesség, 55 °C, 56 nap) vagy a ciklikus (gyorsított) nedves—meleg igénybevételek hatására a tokozóanyagban repedések, sérülések nem mutatkozhatnak, és sem a tokozóanyag, sem a tokozott alkatrész jellemző tulajdonságai, mint pl. ellenállás, kapacitás stb. nem változhatnak meg.

2.2 Ellenállás a hirtelen hőmérséklet-változással szemben (hősok)

Ez a követelmény azt jelenti, hogy különböző termikus ciklusok — általában $-55\text{ °C} + 125\text{ °C}$ hatására a tokozóanyagnak nem szabad megrepednie, és a betokozott alkatrész villamos tulajdonságainak sem szabad romlania.

2.3 Hőtágulás

Az előzőkből következik a hőtágulási együttható fontos szerepe. Ha ugyanis a tokozóanyag, a betokozott munkadarabot felépítő anyagok, valamint a kivezetések anyagának hőtágulása túlságosan különbözik egymástól, a tokozás megsérül — akár csak hajszálrepedések formájában is — és így a nedvesség behatolása ellen már nem nyújt védelmet. Természetesen ugyanígy megsérülhet a betokozott munkadarab is; pl. a félvezető elemek kötése leválik vagy hibrid típusú integrált áramkörök szervesen anyagú hordozói: kerámia, üveg stb. megrepedeznek, széttörnek.

2.4 Hőállóság

Akár a betokozott munkadarabnak, akár az ezt magába foglaló berendezésnek az üzemi hőmérsékletét tekintjük, az igénybevételek egyre inkább a nagyobb hőmérsékletek felé tolódnak el. A tokozóanyagnak szintén egyre magasabb hőosztályúnak, ugyanakkor a jó hőátadás érdekében a hővezető képességének is kedvezőnek kell lennie.

2.5 Összeférhetőség

Minden tokozóanyaggal szemben alapvető követelmény, hogy a betokozott alkatrészek anyagaival összeférjen, azaz bennük károsodást, mint pl. korróziót ne okozzon. Ez a probléma különösen fontos a félvezetők és különféle integrált áramkörök esetében. A nehézséget tulajdonképpen a szabad ionok vagy egyéb poláros csoportok okozzák, amelyek olykor az alapgyantában is, többnyire azonban a töltőanyagban vagy egyéb kémiai komponensekben vannak jelen. A szabad ionok szennyezhetik a félvezetők kötéseit vagy a felületét. Védőbevonatokkal, pl. szilikonokkal a tokozásra kerülő alkatrész passzíválható, de ez sok esetben körülményes és költség-többletet is jelent.

2.6 Egyéb követelmények

Az említett döntően fontos következményeken kívül a tokozóanyagtól jó mechanikai tulajdonságokat, nagy átütési szilárdságot, 10 MHz-ig kis- és állandó értékű permittivitást, vegyszerállóságot és villamos ívvel szemben jó ellenállóképességet, valamint lángállóságot is megkívánhatunk.

3. Tokozóanyagok összehasonlítása

Nem célunk itt a tokozásra használható különféle műanyagok mélyreható összehasonlítása, de röviden érdemes kitérni arra, hogy miért éppen az epoxigyantás sajtolóanyagok váltak be legjobban. Bár a hőre lágyuló műanyagok árukat és a gyártás termelékenységét tekintve előnyösnek mutatkoznak, mégis a többszáz kp/cm² feldolgozási nyomás, a 175 °C feletti feldolgozási hőmérséklet, a rossz termikus stabilitás, az üzemeltetési hőmérséklet viszonylag alacsony volta tokozóanyagként történő felhasználásuk szempontjából nem előnyös.

A hőre keményedő műanyagok nagyobb hőmérsékleten is méretállóbbak, hőstabilitásuk is sokkal jobb és kémiai behatásoknak is jobban ellenállnak. Tokozási anyagként azonban nem mindegyik hőre keményedő műanyag alkalmazható. Próbálkoztak pl. — főleg olcsóságuk folytán — a fenoplasztok továbbfejlesztésével. Ezeknek a hátránya a viszonylag magas sajtolási nyomásban, a polikondenzációs folyamat melléktermékeiben — amely legtöbbször víz — és a betokozott munkadarabhoz való csekélyebb tapadóképességükben mutatkozik.

Ha kisnyomású fröccs-sajtolással dolgozzuk fel a fenoplasztokat, akkor ammóniát fejlesztenek és a keményedési reakció végén szabad fenol marad vissza, ami súlyos szennyezési problémát okoz. Ez a káros hatás nagy nyomású sajtolás esetén közel sem ilyen kirívó, a nagy nyomás azonban az érzékeny alkatrészek tokozását lehetetlenné teszi.

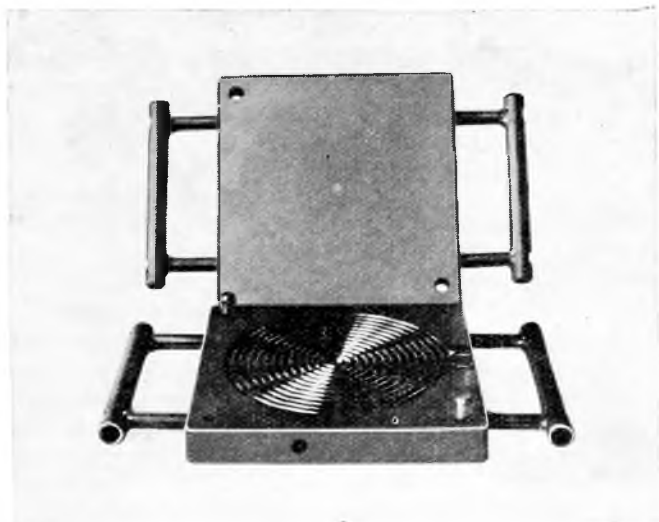
Az alkidcsoportba tartozó műgyanták, mint a diallilftalát, a diizoftalát és a poliészteralkidok általában szintén jóval nagyobb sajtolási nyomást igényelnek, mint ami tokozás céljára szóba jöhet. Egyébként is a rövid tárolhatósági idő, a kis hőmérsékletstabilitás és más kedvezőtlen feldolgozástechnológiai tulajdonságok tokozóanyagként való alkalmazásukat éppen úgy megghiúsítják, mint a fenoplasztokét.

A szilikon sajtolóanyagok elsősorban kitűnő hőmérséklet-állóságukról nevezetesek. Ezekből az anyagokból sikerült olyan lágyan folyó típust kifejleszteni, amely 20 kp/cm² nyomáson is feldolgozható, sőt a folyóképesség meghatározására vonatkozó ún. spirálpróba is jó eredménynek számító 50 cm hosszúságú. Ezzel szemben a sajtolási idő meglehetősen hosszú és a sajtolt munkadarab törékeny. Ez utóbbi kedvezőtlen tulajdonság üvegszál töltőanyag alkalmazásával csökkenthető lenne, ekkor viszont a sajtolási nyomást és a beömlőnyílás méretét kellene megnövelni. Bár a szilikongyanták nagyon stabilak és tisztaságuk következtében jól összeférnek a félvezető anyagokkal, a poláros csoportokat tartalmazó, tehát erősen szennyező hatású, de nélkülözhetetlen adalék anyagok ezeket a jó tulajdonságokat lerontják.

Az előzők alapján megállapítható, hogy a tokozóanyagokkal szemben támasztott követelményeknek az epoxigyantás sajtolóanyagok felelnek meg a legjobban. Összeállításukat és így tulajdonságaikat tekintve az epoxianyagok nyújtják a legtágabb variációs lehetőségeket. Az epoxigyantákból nagy a választék, ezek különféle anhidrid, amin vagy savas hálósítóval keményíthetők. Végeredményben az epoxigyanta-féleségeknek a tulajdonságaiban sokrétűen és árnyaltan jelentkező különbségek teszik ezt a termékcsaládot képessé arra, hogy a különféle áramköri elemek tokozásához igen változatos technológiai megoldásokat alkalmazhassunk.

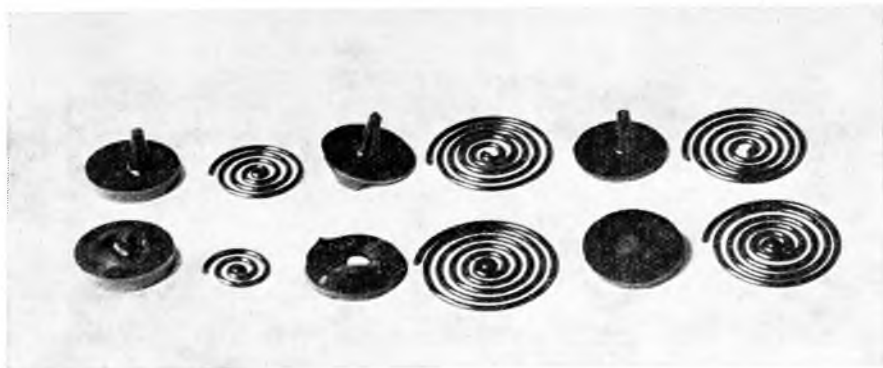
4. A kisnyomású epoxigyantás sajtolóanyagok tulajdonságai és vizsgálata

Az Epoxy Moulding Materials Institute (EMMI Epoxi Sajtolóanyagok Intézete) által kidolgozott spirális vizsgálati módszerrel (EMMI spirál) kimutatták, hogy meghatározott nyomás, hőmérséklet és anyagmennyiség esetén hogyan változik a folyóképesség a gélesedési idő és az olvadék viszkozitása függvényében, továbbá hogy a folyóképesség-karakterisztikák mennyiben változnak az epoxigyanta összetételétől függően.



3-1. ábra. Spirálszerszám (EMMI próba)

A VKI-ben is elkészült a spirálpróba-hoz szükséges szerzszám (3-1. ábra). A különböző anyagok ezzel készített spirálpróbáit a 3-2. ábra mutatja. Kidolgoztak olyan összetételű epoxi sajtolóanyagot is, amelynek spirálpróbája megfelelő előmelegítés után a 150 cm-t is eléri. Ez esetben azonban a gélesedési idő túl kicsi — a kikeményedés ideje kb. 1 min —, ami a bonyolult alakú betétdarabokhoz nem megfelelő.



3-2. ábra. Különböző sajtolóanyagok EMMI-spiráljai

Egy olyan típusú epoxi sajtolóanyag, amelynek gélesedési ideje az előbbinél hosszabb és az anyag közepes folyóképességű (kb. 64 cm hosszú spirálpróbával rendelkezik), lehetővé teszi a lassúbb adagolást, mivel a kikeményedési idő kb. 2 min-ra növekszik. Végeredményben a sajtolhatóság a mindenkori kívánalmaknak megfelelően állítható be. Egyes epoxi sajtolóanyagok feldolgozási nyomása még 5 kp/cm^2 -nél is kisebb lehet.

Kiváló az epoxi sajtolóanyagok nedvességállósága is. Mivel azonban idővel minden szerves anyag kisebb-nagyobb mértékben lehetővé teszi a nedvesség behatolását, ügyelni kell a tokozás megfelelő falvastagságára. A nedvességre érzékeny alkatrészek falvastagságának megengedhető minimuma általában $0,5 \dots 1 \text{ mm}$ a kiváló minőség biztosításához. A nedvesség behatolását az epoxi sajtolóanyagok jó tapadóképessége is nehezíti.

Néhány újabb típusú epoxi sajtolóanyaggal elérhető rendkívüli nedvességállóságra jó példát mutat a félvezető alkatrészek tokozása. Kezdetben a tranzisztorok tokozóanyagát jó nedvességállónak tartották, ha öt órai egy atmoszférás gőzben tartás után a szivárgási áram max. 10%-kal csökkent. Ma hasonló körülmények között a 200 h-nál hosszabban tartó igénybevétel után sem változnak ezek a paraméterek az előbbieken említett határokon túl. Vannak már olyan epoxi sajtolóanyagok is, amelyeknek hővezető képessége megkétszereződött anélkül, hogy a sajtolhatósági, nedvességállósági és egyéb fontos tulajdonságok romlottak volna.

A felhasználók természetesen elsőrendű villamos és mechanikai tulajdonságokat, jó kémiai ellenállóképességet várnak a tokozásra alkalmas epoxi sajtolóanyagoktól. Igen nehezen megoldható feladat azonban olyan anyagot kifejleszteni, amelynek az összes tulajdonsága optimális lenne. Ezeknek a tulajdonságoknak a hatása ugyanis sokszor homlokegyenest ellenkező követelményeket támaszt, ami viszont mindig a felhasználás során jelentkezik problémaként. Pl. a fémvezetékhez való szívós tapadás megakadályozza a könnyű eltávolíthatóságot és a könnyű sorjamentesítést; következésképpen meg kell kívánni a sajtolóforma igen kiváló minőségű megmunkálását, és az anyag sajtolhatóságát úgy kell beállítani, hogy a sorja minimális legyen. Ugyanezekre a problémákra vezethető vissza a méretek szűk tűréshatárok között tartása. Végülis azonban a döntő szempont az, hogy az alkalmazott tokozási technológia jó legyen.

A gyakran hosszadalmas, éppen ezért viszonylag költséges fejlesztési feladatok elkerülhetetlenek. A ráfordított idő és költségek azonban a biztonságos tömeggyártásnál, az üzemi stabilitás és az élettartam megnövelésével bőven megtérülnek.

Az epoxi sajtolóanyagokat — éppúgy, mint általában a többi sajtolóanyagot is — lehet közvetlenül por alakban sajtolni. Az anyag előformázása azt a célt szolgálja, hogy tisztább és könnyebb műveletté tegye a fizikai kezelést, továbbá a szerszám-töltésekor kiküszöbölje a súlydifferenciákat és minimálisra csökkentse a levegőzárványok keletkezésének lehetőségét. Ha az anyagot elő is szokták melegíteni — és ez általában csak igen kis anyagigény esetében kerülhető el — az előformázást tulajdonképpen nem is lehet elhagyni, ugyanis a jó hatásfokú, akadálytalan előmelegítés csak tablettá alakban valósítható meg. Az előformázás hidegtömörítéssel művelet, amelyet jóval nagyobb nyomáson végeznek, mint a melegsajtólást, ennek azonban káros mellékhatása lehet az, hogy a meginduló polimerizáció miatt a folyóképesség és a keményedési, ill. a tárolhatósági idő csökken. A túltömörítést éppen ezért kerülni kell.

A legjobban bevált előmelegítési eljárás a nagyfrekvenciás hevítés rendszerint 80 MHz -en, ami általában csak 40 g töltetsúly felett érdemes alkalmazni. Ha ugyanis ennél kevesebb anyagot dolgoznak fel, az anyag felé és az anyagban olyan gyors

a hőáramlás, hogy a nagyfrekvenciás előmelegítés nem szükséges. Az előmelegítésnek több célja van. Az anyag folyása lágyabb és hosszabb lesz; az adagolás azonnal megkezdődik, amint a nyomóbélyeg eléri az anyagot; az kikeményedési idő rövidebb, mivel az előmelegítés végén minden abszorbeált nedvesség eltávozik.

Nagy darabszámú, kisméretű alkatrészek tokozása esetén a termelékenység növelése végett igyekeznek a sajtolási időt a minimumra csökkenteni. Ilyenkor feltehető, hogy az anyag a szerszámból való kidobáskor csak kb. 85%-ban kikeményedett állapotú. Bár a további polimerizáció hosszú idő alatt szobahőmérsékleten is bekövetkezne, az optimális tulajdonságok elérése céljából gyakran utókezelést iktatnak be, pl. szárítást, egy e célra megfelelő szárítószekrényben.

A továbbiakban néhány olyan epoxigyantás sajtolóanyag főbb tulajdonságait ismertetjük, amelyeket eddigi kísérleteinkben használtunk. Ezek közé tartoznak a Hysol (USA gyártmányú) MG 6-77, a CIBA (svájci gyártmányú) X 381/2513 SH és az X 381/2449 HF jelzésű sajtolóanyagok.

— Az MG 6-07 jelű, szervesen töltőanyagot tartalmazó préspor kiváló mechanikai és villamos tulajdonságokkal rendelkezik. Különösen mágnesetekercsek, transzformátorok és elektronikus alkatrészek beágyazására alkalmas. Igen jó a nedvességállósága; vízfelvétele 24 h alatt 25 °C-on 0,04%. *Martens* szerinti hőalaktartóssága 108 °C. A sajtolási nyomás 3,5...50 kp/cm², a préselési hőmérséklet kb. 150 °C, a kikeményedési idő kb. 2 min.

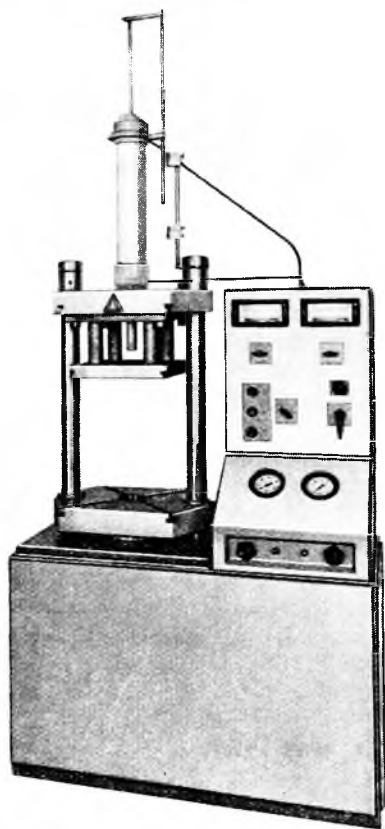
— Az X 381/2513 SH jelű, szervesen töltőanyagú préspor főleg elektronikus alkatrészek, kisméretű tekercsek tokozására alkalmas. Villamos tulajdonságai jók, mechanikai tulajdonságai a Hysol gyártmányénál gyengébbek. Vízfelvétele 24 h alatt 0,05%, *Martens* szerinti hőállósága kb. 80 °C. A sajtolási nyomás 4...20 kp/cm², a kikeményedési idő 1 min + 15 s/mm. Igen előnyös tulajdonsága, hogy utózsugorodása nincs.

— Az X 381/2449 HF jelű, szervesen töltőanyagú, epoxi-fenolgyanta alapú sajtolóanyag főleg elektronikus alkatrészek tokozására használatos. Villamos tulajdonságai igen jók, mechanikai tulajdonságai kevésbé. *Martens* szerinti hőalaktartóssága 130 °C, vízfelvétele 24 h alatt kb. 0,05%. A sajtolási nyomás 5...50 kp/cm², a kikeményedési idő 150...160 °C-on 1 min + 15 s/mm.

Végül meg kell emlékezni a hazai gyártmányú kisnyomású epoxigyantás sajtolóanyagokról. A VKI és a MÜKI közös kutatásának eredményeképpen születtek meg az EPOFORM 870 T és 871 T jelzésű hazai sajtolóanyagok. Ezeknek az anyagoknak szabvány szerinti vizsgálata már megtörtént, de alkalmazástechnológiai kísérleteinknek még az elején vagyunk. Bár az eddigi eredmények is nagyon biztatók, alkalmazhatóságukra vonatkozóan szélesebb körű tapasztalatokra van szükségünk, hogy a hasonló típusú külföldi sajtolóanyagokat leválthassák. Mielőbbi bevezetésük műszaki és gazdasági vonatkozásban egyaránt rendkívül fontos, hiszen szállítási és tárolási nehézségek vannak és mindenekelődik a típusok világpiacon árárendkívül magas, a jobb minőségek esetében az 5—7 dollárt is eléri kg-onként. A 870 T típus szemcsés, ásványi töltőanyagú, míg a 871 T típus üvegszálat is tartalmaz. Mindkét típust kiváló méretállóság, kis feldolgozási zsugorodás, gyakorlatilag utózsugorodásmentes formaállóság, kiemelkedő villamos és nedvességállósági tulajdonságok jellemzik. A sajtolási nyomás direkt sajtolással 5...50 kp/cm², fröccs-sajtolással 2...100 kp/cm². Sajtolási hőmérséklet 150...175 °C között van, míg a sajtolási idő 160 °C-on 2 min + 15...45 s/min. Összehasonlítva a külföldi anyagokkal a hazai sajtolóanyagok mechanikai tulajdonságai általában megegyeznek a CIBA gyártmányokéival, de rosszabbak a Hysol gyártmányokéinál. A villamos tulajdonságok mindhárom sajtolóanyag esetében (hazai, USA, CIBA) közel azonosnak mondhatók.

5. A VKI-ban kifejlesztett kisnyomású fröccs-sajtológép

Már a technológiai kísérletek kezdetén megmutatkozott, hogy a korszerűbb technológiák kifejlesztéséhez, főleg pedig a gyakorlatba való átültetéséhez megfelelő gépi berendezés szükséges. Miután a célnak megfelelő kisnyomású sajtológépet csak tőkés országokból és viszonylag magas áron lehetett beszerezni, a hiányságon magunk kívántunk segíteni megfelelő sajtológép tervezésével és kivitelezésével. 1968-ban készült el a gép prototípusa, és az azóta eltelt 3 év alatt összesen hatot



3-3. ábra. Kisnyomású fröccs-sajtológép

adtunk át a magyar iparnak (Remix, VIDEOTON, MMG részére egy-egy, VBKM részére három). Miután négy nyugatról importált gép is bejött az országba, a kisnyomású tokozási technológia széles körű ipari elterjedésének ilyen vonatkozásban nincsen akadálya.

A VKI által kifejlesztett kisnyomású fröccs-sajtológép (3-3. ábra) műszaki paraméterei a következők:

Maximális szerszámzáró erő minimuma	7,5 Mp
Szerszámzárási sebesség:	
gyorsjárat	állandó 22 mm/s
lassújárat, fokozat nélkül	állítható 0...22 mm/s
Maximális fröccsnyomás	60 kp/cm ²
Minimális fröccsnyomás	5 kp/cm ²
Fröccsölési sebesség:	
gyorsjárat	állandó 36 mm/s
lassújárat	állítható 0...36 mm/s
Fröccsdugattyú lökethossza	400 mm
Asztalméret (hasznos)	400×400 mm
Legnagyobb üzemi nyomás	63 kp/cm ²
Energiaszükséglet:	5 kW teljesítményfelvétel (380 V/220 V, 3 fázis)
Beépített szerszámfűtés:	két csatlakozóhely, egyenként 220 V, 50 Hz, 10 A.
Vezérlés:	elektrohidraulikus rendszerű; az asztal- mozgatás, fröccsdugattyú mozgatás végálláskapcsolóval határolható
Munkadarab-kiemelés:	gépi és kézi működtetésű
Hőmérséklet-szabályozás:	beépített hőmérsékletszabályozóval
Méretetek:	574×1224×2790 mm
Tömege:	kb. 700 kg.

6. Irányelvek a szerszám tervezéséhez és elkészítéséhez

Mielőtt rátérnénk néhány, a hazai villamosipar által megrendelt és a VKI által kifejlesztett tokozási technológia ismertetésére, érdemes röviden azzal is foglalkozni, hogy az új technológia egésze milyen feladatokat jelent általában a konstruktőrök számára. Hangsúlyozni kívánjuk azonban, hogy nem célunk sem a műanyag feldolgozástechnológia, sem pedig a hozzá szorosan fűződő szerszámtervezési és -készítési problémák mélyebb fejtegetése. Csupán az új technológiával kapcsolatos néhány fontos szempontra kívánunk rámutatni.

Legelőször is el kell dönteni, hogy a tokozandó alkatrész sajátosságának, rendeltetésének melyik anyag felel meg a legjobban. Ezután meg kell határozni a várható évenkénti darabszámot. Ennek alapján megállapítható, hogy hány fészkes szerszám elkészítése gazdaságos és műszakilag hány fészkeszám lehetséges. Végül alapvető követelmény a tokozott forma kiválasztása. Az elmondottak ismeretében nagyobb munkadarabok esetében kettő—négy-, kisebb munkadaraboknál hat—nyolcfészkes kísérleti szerszámot kell készíteni. A kísérleti szerszám feladata a fészkek, a beömlőnyílások, a felöntések és az áramlási csatornák megfelelő kialakítása, egyáltalán az áramlási jelenségek tisztázása.

Tulajdonképpen már a kísérleti szerszámot is a sorozatgyártás feltételeinek megfelelően kell üzemeltetni (sajtolási nyomás, sajtolási hőmérséklet, ciklusidő, azonos sajtológép stb.).

Mint ahogy arra már utaltunk, a kisnyomású sajtolóanyag tulajdonságaiból kell kiindulni, mert ezek határozzák meg a konstruktőrök számára a további feladatokat. A figyelembe veendő tulajdonságok a következők:

- folyóképesség,
- hálósodási sebesség,
- szerszámból való eltávolítás kérdése,
- a kisajtolt anyag merevsége a sajtolási hőmérsékleten.

Tekintettel arra, hogy 0,1...0,2 mm-es huzalkivezetéseket, aranyfüst lemezeket is kell tokozni, a pontosan megadott méretek és tűrések mellett a tokozandó alkatrésznek a szerszámban történő rögzítési helyét és módját is pontosan meg kell határozni. Mivel az epoxigyantás sajtolóanyag viszkozitása a fenol és karbamid sajtolóanyagok viszkozitásánál kisebb, a beömlőnyílások és felöntések keresztmetszete is kisebb kell legyen, mint az említett sajtolóanyagok felhasználásánál.

Az áramlási csatornák keresztmetszetének — ezt a külföldi cégek is hangsúlyozzák — alakja, mérete csak kísérleti úton határozható meg. Egyébként a csatornák optimális kialakítása a tokozandó alkatrész nagyságától, a fészkek elrendezésétől és számától, a sajtolási nyomástól, valamint a tokozóanyag folyóképességétől függ.

A szerszámfészkek kialakítása során fokozottan ügyelni kell a megfelelő kúposágra, mert igen érzékeny alkatrészek vékony kivezetéseiről van szó, amelyek a kidobásnál könnyen megsérülnek. A kúposág mértéke minimum 1/4 fok.

Az anyag kis viszkozitása a kidobók és a dugattyúk pontos illesztését igényli. Az irodalom az illesztés tűrésmértékét 0,025 mm-ben jelöli meg, mint felső határt.

Minél simább a szerszám felülete, annál könnyebb a darab eltávolítása. A felületi érdesség mértéke maximálisan 2,5 μ legyen.

A szerszámüreg gáztalanító csatornáinak helyzetét már a kísérleti szerszámnál meg kell határozni, és ki kell alakítani.

7. A VKI által kifejlesztett tokozási technológiák ismertetése

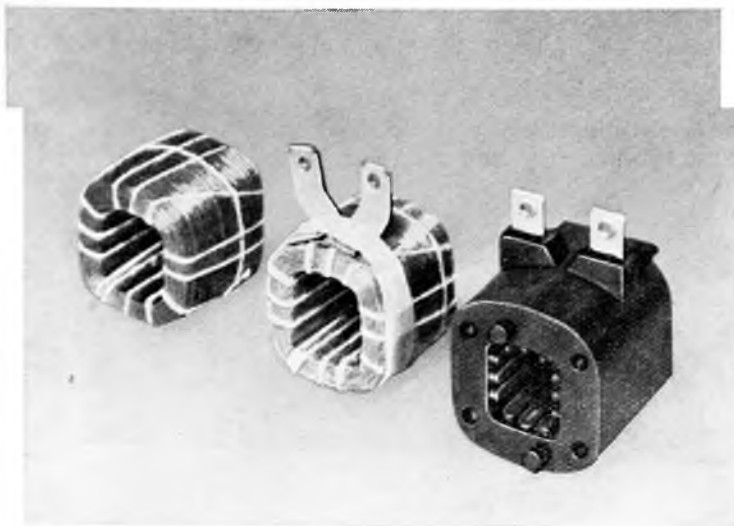
Első kísérleteink során a VBKM Ganz KK Gyárának megbízásából a VMK 11, 16 és 25 típusú mágneskapcsolók tekerceinek a tokozását valósítottuk meg csévetest nélküli kivitelben. Kezdetben a tekercs bandázsolásával együtt erősítettük fel a palástra a merev kivezetéseket. A kivezetések a kétrészes szerszám osztósíkjában kiképzett vályatokban feküdtek fel és így a tekercestestnek a szerszámfészkekben olyan helyzetet biztosítottak, hogy a megömlött tokozóanyag — a szerszámba beépített bordás mag segítségével — a tekercestestet körbeburkolta.

A bordás mag alkalmazása folytán a tokozott tekercs belső felületét is bordásra készítettük, így a hőátadási viszonyok kedvezőbbek. E technológia egyes fázisait a 3-4. ábra mutatja.

Későbbiek során a tekercsnek a szerszámformában való rögzítését a tekercs bandázsolásával együtt a homloklfelületekre felerősített helyezőpecek segítségével oldottuk meg. Ezek a bordás mag hornyaiban az erre a célra kiképzett kis üléseken feküdtek fel. Ez az eljárás mutatkozott egyébként a legmegfelelőbbnek. Az így tokozott tekercek közül 10 db-ot a Ganz KK laboratóriumában vizsgáltak be, és közülük 9 db 10⁷ feletti kapcsolási számot ért el. Az így tokozott tekercs és metszete a 3-5. ábrán látható.

A csévetest nélküli tekercs miatt ez a technológia feltétlenül költségigényesebb, mint ha a csévetestes tekercs kerülne tokozásra. A közeljövőben ezt a technológiát is kidolgozzuk.

A VBKM Világítástechnikai Gyára megbízásából a DST motorvédő készülék táptranszformátorának tokozási technológiáját dolgoztuk ki. A transzformátorral szemben támasztott követelmények a következők voltak; egyrészt a transzformátor



3-4. ábra. Bandázsolt, csévetest nélküli tekercs tokozási technológiájának fázisai

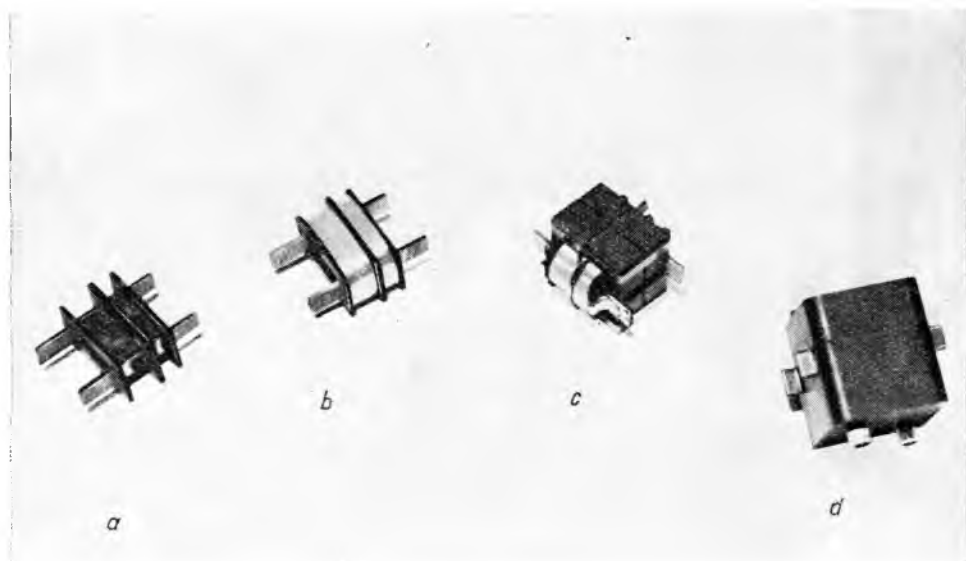
primer- és szekunder tekercse, valamint a tekercsek és a vasmag között a szigetelés minimum 2,5 kV-ot károsodás nélkül bírjon ki, másrészt a gyártási eljárás feleljen meg a korszerű sorozatgyártás követelményeinek.



3-5. ábra. Bandázsolás és csévetest nélküli tokozott tekercs

Először a négy elemből összerakott E vasmagos megoldással próbálkoztunk. Ez esetben a tekercsek és a vasmag együttesen kerültek tokozásra. A kivezetéseket rézfóliával borított üvegvázás rétegelt lemezből készítettük. A gyártástechnológia egyes fázisait a 3-6. ábra mutatja.

Szerelés szempontjából egyszerűbbnek és gazdaságilag előnyösebbnek mutatkozott az olyan transzformátor-konstrukció, amelyben nem szükséges a teljes transzformátort tokozni, hanem csak a tekercsek burkolását biztosítani, amivel megvalósítható a kívánt műszaki követelmény. Ebben a megoldásban fazékvasmagot alkalmaztunk, amely körülfogta a betokozott transzformátortekercseket. Az osztott kivitelű csévetestet szintén kisnyomású sajtolóanyagból készítettük. A transzformátor



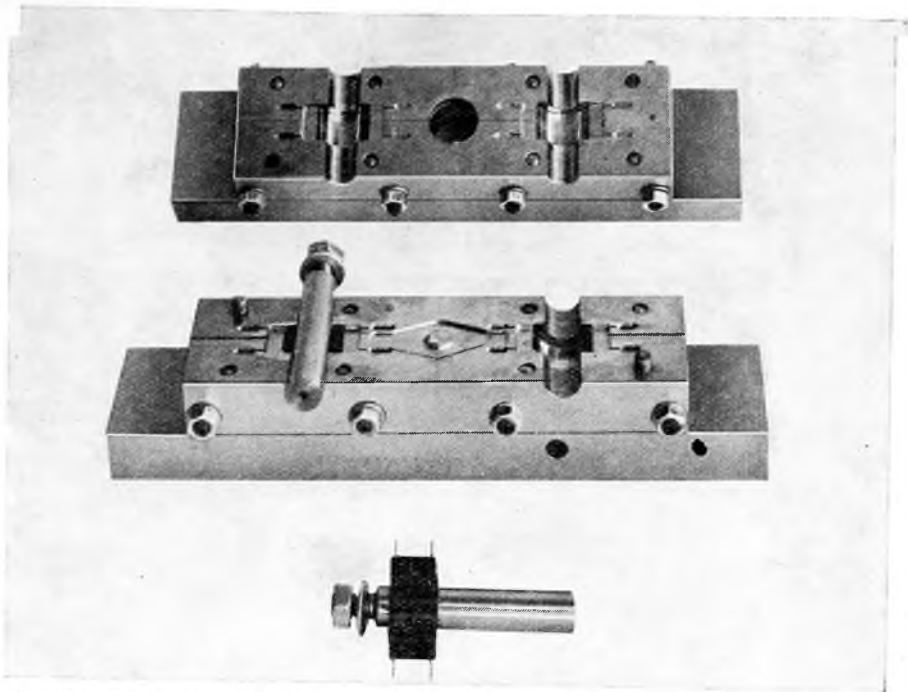
3-6. ábra. Tokozott kistranszformátor gyártástechnológiájának fázisai

kivezetéseit beágyaztuk a csévetestbe. Ezek a merev kivezetések egyszerűbbé tették a huzalvégek kiforrasztását, valamint a külső csatlakozó vezetékeknek a transzformátorhoz való kötését. A csévetest előállítására kétfézes kísérleti szerszámot készítettünk. A kész munkadarabnak a szerszámból való egyszerű eltávolítása céljából a kivezetéseket az osztósíkban helyeztük el. A tokozó kísérleti szerszámot szintén két fészekkel készítettük, ezt mutatja a 3-7. ábra. A gyártástechnológia egyes fázisai a 3-8. ábrán láthatók.

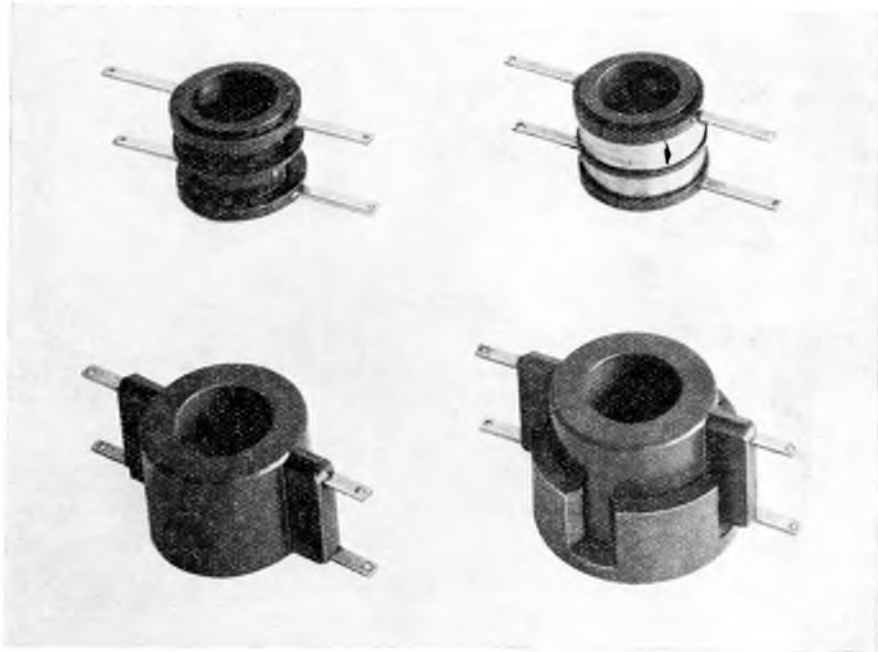
Ugyancsak a Világítástechnikai Gyár számára dolgoztuk ki a TVR 110 típusú tirisztorgyújtó transzformátor tokozási technológiáját. Mivel ez a transzformátor önálló szerelési egység, indokolt volt a vasmaggal együtti tokozást választani, hogy a jó szigetelési és mechanikai védelmet egyaránt biztosítsuk. A külső forma tervezésekor az esztétikai követelmények is előtérbe kerültek.

A helyes technológia kidolgozása során a kivezetések kialakítására kellett a fő hangsúlyt fektetni. Ugyanis ennek segítségével lehetett megoldani a hozzávezetések, a külső szerelvények megfogását, egyúttal pedig a transzformátor helyrögzítését a sajtolószerszám munkaüregében. A primer oldalon a tekercsvégek kivezetése mellett el kellett helyezni az előtétellenállás tartócsatlakozóit. A szekunder tekercs kivezetéséhez a külső csatlakozást oldható kötéssel kellett biztosítani. A fenti követelményeket a 3-9. ábrán látható kivezetés-konstrukcióval oldottuk meg.

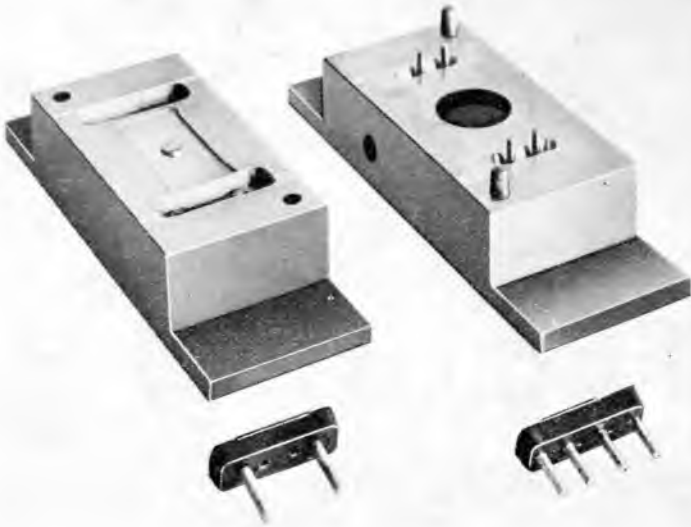
A transzformátortekercsekhez a kereskedelemben kapható csévetest nem volt alkalmas a fröccs-sajtolási technológia miatt, mert kis láguláspontú, hőre láguló



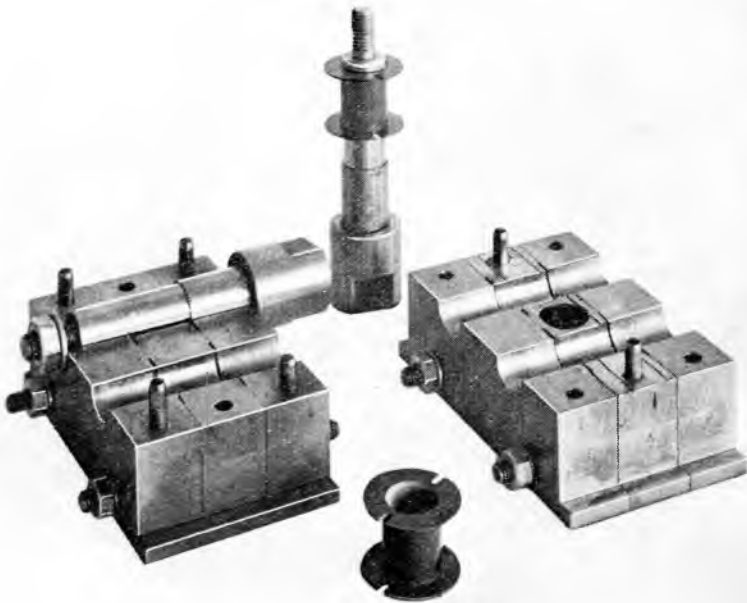
3-7. ábra. Fazékvasmagos kistranszformátor tokozószerzőma



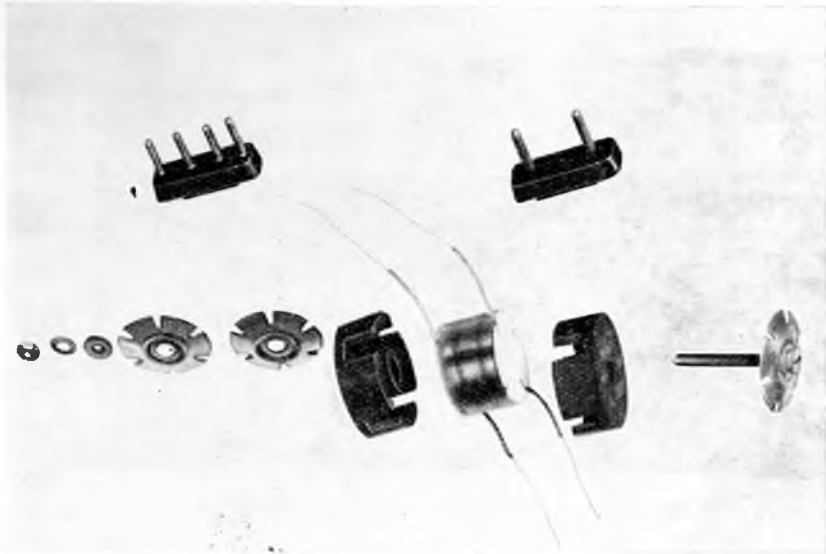
3-8. ábra. Kistranszformátor tokozott fazékvasmagjának gyártástechnológiai fázisai



3-9. ábra. Merev kivezetés kialakítása sajtolással



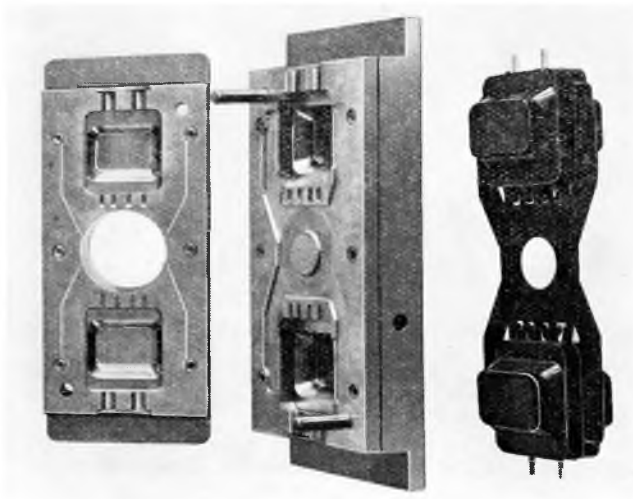
3-10. ábra. Tirisztorgyújtó transzformátor csévetest-gyártó szerszáma



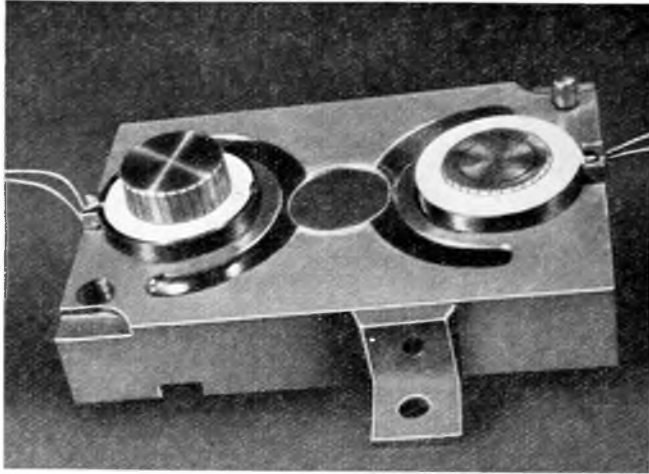
3-11. ábra. Tirisztorgyújtó transzformátor alkatrészei

műanyagból készült, ezért hőre keményedő anyagból gyártottunk a célnak megfelelő csévetestet. Kivitele a 3-10. ábrán látható. A 3-11. ábra illusztrálja az alkatrészeiből összeállítható transzformátort, végül a 3-12. ábra a tokozószerszámot és a belőle kikerült tokozott munkadarabokat tünteti fel.

A Mechanikai Mérőműszerek Gyárának megbízásából egy kis szinkron motor állórészének tokozását dolgoztuk ki. A nagy menetszámú (10200) tekercs esetében még a viszonylag kis nyomások is károsító igénybevételt jelenthetnek a menetzárlat

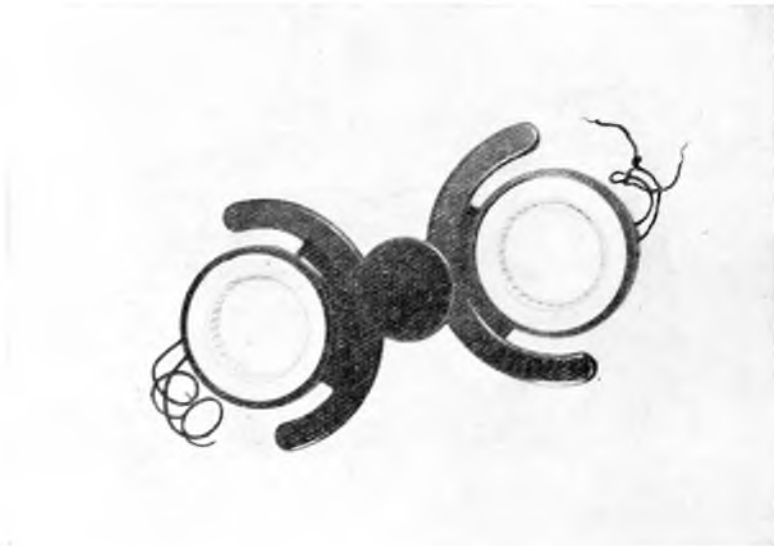


3-12. ábra. Tokozott tirisztorgyújtó transzformátor és tokozószerszáma



3-13. ábra. Szinkron motor állórészének tokozószerszáma

szempontjából. Ezt csak tovább élte az a körülmény, hogy az előírás értelmében csak 0,06 mm \varnothing -jú egyszeres szigetelésű zománchuzalt lehetett alkalmazni. A kivezető huzalok csak az eddigi, a hagyományos technológiáknál is alkalmazott PVC szigetelésű huzalok lehettek. Ennek a huzalszigetelésnek a hőállósága mindössze 90...100 °C, ami a 145 °C-os sajtózási hőmérsékletnél jelentett problémát. Jóval egyszerűbb szerszámkiképzést és tokozási technológiát lehetett volna alkalmazni, ha a fémházon levő, a kivezetések számára szükséges kivágásokat a ház más részén lehetett volna elhelyezni, vagy legalább a kivágás méretét egy-két milliméterrel növelni lehetett volna.



3-14. ábra. Szinkron motor betokozott állórésze

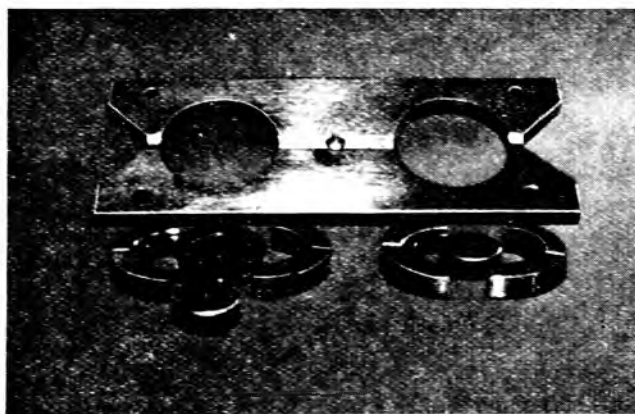
A csévetestes tekeres tokozására két megoldást választottunk. Az egyik esetben meghagytuk a gyár által hőre lágyuló műanyagból készített csévetestet, míg a másik esetben a csévetestet is kisnyomású sajtolóanyagból készítettük. Az előbbi esetben igen jelentős probléma volt a csévetest deformációjának megakadályozása. Ez közelebből azt jelentette, hogy meg kellett találnunk a hőre lágyuló anyagból készült csévetest vonatkozásában azt az optimális hőmérsékletet, amelynél a csévetest még nem deformálódik, de a sajtolás az optimális feldolgozási követelmények szerint valósítható meg. Erre vonatkozólag több kísérletet végeztünk és legmegfelelőbb hőmérsékletnek a 140 °C bizonyult. Meg kell azonban mondani, hogy bizonyos — bár kis mértékű — utózsugorodás mindenképpen fellépett, ami természetesen az alkatrészek szoros illeszkedése miatt nem engedhető meg. A problémát úgy oldottuk meg, hogy a csévetestes tekerest a csévetest belső menetéhez szorosan illeszkedő magra felhúzva helyeztük a szerszámba. A betokozás után a munkadarabot a maggal együtt kiemeltük a szerszámból és szobahőmérsékleten hagytuk lehűlni. Ebben az esetben — bár szintén létrejön az utózsugorodás — a csévetest törzsének belső átmérője nem változik. A változás a törzs külső átmérőjénél jelentkezik, s ennek hatása következtében a csévetesttörzs anyaga összezsugorodik. Ennek viszont nincs káros kihatása, sőt — ha igen kis mértékben is — jobb térkihasználást eredményez.

Természetesen a zsugorodási probléma eleve megoldható, ha a csévetestet már eredetileg valamivel nagyobb belső átmérővel gyártják. Ez nem volt megvalósítható, mert a jelenlegi gyártáshoz szükséges szerszámok méreteit nem lehetett megváltoztatni.

A hőre lágyuló anyagú csévetestes szinkron motor állórész tokozószerszámát a 3-13., a betokozott munkadarabot a szerszámból való kiemelés után a 3-14. ábra mutatja.

A csévetestes tekeres betokozásának másik megoldásánál a csévetest hőre keményedő műanyagból készült. Műszaki vonatkozásban az látszott a legcélszerűbbnek, ha a csévetest anyagául magát a tokozóanyagot választottuk. Feltételezhető ugyanis, hogy ekkor a legjobb a tapadóképeség a csévetest és a rásajtolt palást között. Ez azonban nem zárja ki, hogy a gazdasági szempontokat figyelembe véve, a csévetestet más típusú hőre keményedő műanyagból — pl. fenoplasztból — állítsuk elő.

A kísérleti szerszámot úgy képeztük ki, hogy megfelelően kialakított és cserélhető betétek alkalmazásával ugyanazzal a szerszámmal tudtuk megoldani a cséve-



3-15. ábra. Tokozószerszám középső lapja, cserélhető betétekkel szinkron motor állórészének tokozásához

test előállítását és a tekercs betokozását. A szerszám három részre tagozódik: az alsó és felső szerszámlapra és a köztük elhelyezett betétlapra. A két fészek a középső szerszámlapon helyezkedik el és ugyancsak ennek az alsó és felső felületén vannak kiképezve az áramlási csatornák. A 3-15. ábrán látható a középső szerszámlap a cserélhető betétekkel és a hornyolt palástú maggal, a 3-16. ábrán pedig a fémházba szerelt tokozott tekercs.



3-16. ábra. Szinkron motor fémházba szerelt állórésze

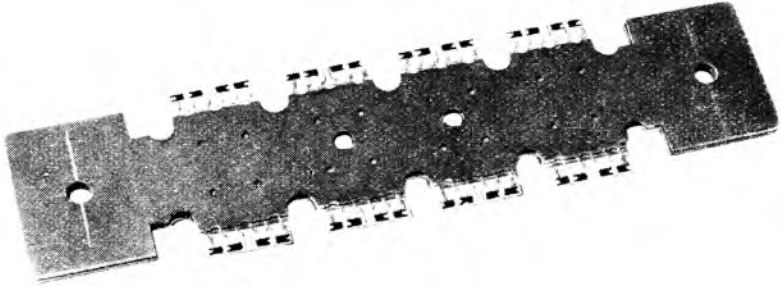
Érdemes még röviden ismertetni a REMIX Rádiótechnikai Vállalat részére jelenleg folyamatban levő tokozási technológiai kísérleteket. Ennek keretén belül különféle ellenálláshálózatok, valamint vékony- és vastagréteg (integrált) áramkörök kerülnek tokozásra. Az áramkörök hordozóanyaga pár tized milliméter vastagságú kerámia vagy üveglap. Ezek a hordozóanyagok, valamint a lágy forrasztással felerősített igen vékony kivezetők különlegesen precíz technológiát követelnek. A kikísérletezett technológia sikerét mutatja, hogy 0,05 mm-es tűrésen belül sikerült késztermékeket megvalósítani és a -55°C és $+120^{\circ}\text{C}$ közötti tartós váltakozó igénybevétel után a betokozott munkadarabokon mechanikai sérülések nem mutatkoztak és a villamos paraméterek nem változtak meg.

A 3-17. ábra mutatja a négyfészkes szerszám közbülső két betétlapját a beléjük helyezett tokozandó munkadarabokkal.

A 3-18. ábrán láthatók a szerszámból kiemelt munkadarabok. Ezeknél a kísérleti szerszámoknál 8...16 fészket alakítottunk ki, mert a munkadarabok kis méretei miatt az üzemi szerszámban várhatóan 32...64 fészek lesz.

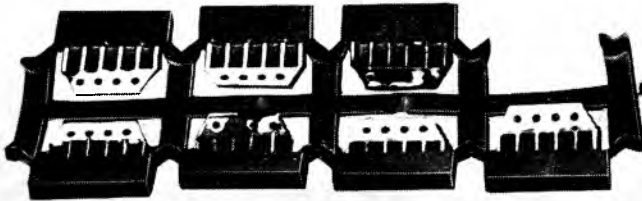
Amint az előzőekben leírtakból kitűnik, a kisnyomású tokozási technológia megoldása, alkalmazása során sok olyan nehézséget kell leküzdeni, ami a régebbi hagyományos módszernél egyáltalán nem mutatkozott. Ugyanakkor azonban sok olyan technológiai fogás, megoldás alkalmazására nyílik mód, ami — sokszor még a tokozástól függetlenül is — üzembiztosabb, a különböző követelményeket jobban kielégítő, az igénybevételnek jobban ellenálló korszerű konstrukció kifejlesztésére vezet. Nyilvánvaló, hogy magának a tokozóanyagoknak — a szokványos sajtolóanyagokhoz hasonlítva — többszörös ára, az új technológia kikísérletezése, főleg pedig a bonyolultabb és így költségesebb szerszámkonstrukciók folytán mindig

gondosan mérlegelni kell, hogy műszakilag és gazdaságilag hol előnyös ennek az új technológiának az alkalmazása. Elképzelhető, hogy ugyanaz az alkatrész kevésbé igényes helyen normál, tokozás nélküli, míg nehéz körülmények közötti üzemeltetés esetén, vagy különleges célokra tokozott kivitelben készüljön. Gondoljunk csak



3-17. ábra. Közbülső betétlapok ellenálláshálózat tokozószerzőmához

arra, hogy a félvezető áramköri elemek rohamos fejlődése, a miniatürizálásra való törekvés milyen lehetőségeket jelent a tokozási technológia alkalmazásának. A csomagolás, szállítás, tárolás sok gondját, nehézségét tekintve, még jobban kidomborodnak a tokozási technológia előnyei.



3-18. ábra. A szerzőmél kiemelt betokozott ellenállások

A VKI a MÜKI-vel együtt kidolgozta a kisnyomású sajtolóanyagot, a VKI kifejlesztette az új technológiához szükséges célgépet és mindkét intézet több technológiát kísérletezett ki és adott át a hazai villamosiparnak. Megvan tehát minden lehetőség arra, hogy az új korszerű technológia ipari hasznosítása realizálódjék.

Irodalom

- [1] *K. G. Walker Gimeche: Materials for encapsulation by low-pressure transfermoulding techniques.* Hysol Sterling Ltd, London. (Plastics Polimers, 1968. október.)
- [2] VKI zárójelentések:
 - 1. Kisfeszültségű készülékek mágnesekercseiben alkalmazott korszerű szigetelési rendszerek gyártástechnológiájának kidolgozása (1968).
 - 2. Félvezetős motorvédő készüléknél alkalmazásra kerülő fazékvasmagos transzformátor műanyagba, elsősorban fröccs-sajtolási eljárással présorba történő tokozása (1969).
 - 3. Szinkronmotor-állórész tokozási technológiájának kidolgozása epoxigyantás présorokkal (1970).
- [3] *Dr. Kelemen A.-né—Kiss A.—Horváth J.: Kisnyomású sajtolóanyagok az erősáramú villamosiparban.*

4.

Papírbakelit rétegelt termékek vízgőzdiffúziójának függése az alaktényezőtől

SULYOK JÓZSEF

ÖSSZEFOGLALÁS

Villamos berendezések szigetelő anyagainak méretezésénél fontos szigetelőanyag jellemző a nedves légtérben történt vízfelvétel. A konstruktőr számára fontos kérdés, hogy a különböző próbatesteken mért, s különböző fajlagos értékekkel megadott vízfelvétel hogyan számítható át a próbatestétől eltérő alakú és nagyságú konkrét alkatrészeire.

Jelen cikk különböző alaktényezők szerepét vizsgálja a rétegelt termékek esetén, nedves-meleg légtérben végzett kísérletek alapján. Bemutatja továbbá, különböző fajlagos értékek és igénybevételi idő esetére azt a hibát, amelyet a számításnál akkor követnek el, ha nem veszik figyelembe az alaktényezők szerepét.

ЗАВИСИМОСТЬ ДИФфуЗИИ ВОДЯНЫХ ПАРОВ В ИЗДЕЛИЯ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ ИЗ СЛОИСТОГО ГЕТИНАКСА ОТ КОЭФФИЦИЕНТА ФОРМЫ

И. Шуйок

Резюме

При расчете изоляционных материалов электрических устройств является важным параметром свойство впитывания воды изолятором. Для конструктора является важным метод пересчета впитывания воды измеренного на различных образцах и заданного удельными величинами на конкретную деталь, имеющую форму и размеры, отличные от образца.

Настоящая статья рассматривает роль различных коэффициентов формы в случае слоистых изделий на основе опытов выполненных в теплой и влажной атмосфере. Статья также и демонстрирует ошибки расчета, полученные в результате пренебрежения ролью коэффициентов формы при различных удельных величинах и интервалах подвергания воздействию влажной среды.

ABHÄNGIGKEIT DER WASSERDAMPFDIFFUSION VOM FORMFAKTOR IN HARTPAPIER

J. Sulyok

Zusammenfassung

Bei der Bemessung der Isolierstoffe elektrischer Einrichtungen ist die Wasseraufnahme in feuchtem Luftraum ein wichtiger Kennwert des Isolierstoffes. Es ist eine wichtige Frage für den Konstrukteur, wie die an den verschiedenen Prüfkörpern gemessene und mit verschiedenen spezifischen Werten angegebene Wasseraufnahme auf den

konkreten Bestandteil, der vom Prüfkörper abweichende Gestalt und Grösse besitzt, umgerechnet werden kann.

Dieser Aufsatz prüft die Rolle verschiedener Formfaktoren bei Schichtpreßstoffen auf Grund der Versuche, die in feucht-warmem Luftraum durchgeführt worden sind. Ferner wird — für verschiedene spezifische Werte und für die Beanspruchungszeit — der Fehler vorgeführt, der bei der Rechnung begeht wird, wenn die Rolle der Formfaktoren nicht berücksichtigt wird.

DEPENDENCE OF WALTER-VAPOUR DIFFUSION OF LAMINATED PAPER-BAKELITE PRODUCTS ON THE SHAPE FACTOR

J. Sulyok

Summary

Water absorption of insulating materials in humid atmospheres is an important property to be considered in dimensioning insulations of electrical equipment. It is important for the designer engineer to know how to determine, from the various specific values of water absorption measured on different test samples, the water absorption properties of a given component differing in shape and size from the test specimen.

The role of the different shape factors in the case of laminates on the basis of experiments performed in damp heat environment is discussed, and possible errors resulting from neglecting the influence of the shape are demonstrated for different specific values and exposure times.

1. A probléma felvetése

A villamos berendezések gyakran üzemelnek nedves környezetben, ahonnan a berendezésbe épített, rétegelt termékből készült alkatrész a levegő nagy relatív légnedvessége következtében vizet vesz fel. A vízfelvétel a légtér nedves igénybevételének mértékétől és az igénybevétel idejétől függően olyan mértékű is lehet, amely a szóban forgó alkatrész, s az egész berendezés meghibásodásához vezethet. A rétegelt termék nedves légtérben való viselkedése tehát a villamos berendezés megbízhatóságának fontos tényezője.

A különböző rétegelt termékek vízfelvételét laboratóriumi vizsgálattal állapítják meg. Műanyagok nedves légtérben történő vízfelvételének meghatározására nincs magyar szabvány, s a rétegelt termék vízfelvételére vonatkozó adatok többnyire csak vízben való áztatásra vonatkoznak. Viszonylag kevés adat áll a konstruktőr rendelkezésére, amely mint szabványos érték (pl. a DIN 53473 szabvány szerinti) nedves légtérben való vízfelvételre vonatkozik. A jelenleg rendelkezésre álló, különböző előírásokban és ismertetésekben szereplő vízfelvétel-adatok is többnyire csak egyetlen vízfelvétel-értéket jelentenek (x órás, ill. y napos igénybevétel utáni vízfelvétel).

Az előzőkből következik, hogy az első feladat, a rétegelt termékek nedvesség-abszorpciójának, mint folyamatnak a megismerése. E folyamat ugyanis nem lineáris függvénye az igénybevételi időnek, s ezért a rétegelt termék nedves légtérben való viselkedését nem jellemezheti egy vízfelvételi adat. Az anyag nedvességérzékenységről csak a teljes vízfelvétel-folyamat ismeretében tudunk meg elegendet.

A vízfelvételt szabványos próbatesteken mérik, s a különböző fajlagos értékeket e próbatestek méretei alapján számolják ki (térfogat-, felület-, súlyegység- stb.-re vonatkozó vízfelvétel). A vízfelvétel folyamata azonban nemcsak az igénybevételi időnek, hanem a próbatest alakjának sem lineáris függvénye. Ily módon a szabványos próbatest méretére és valamely rövid igénybevételi időre meghatározott fajlagos víz-

felvétel-értékből — anélkül, hogy ne követnénk el hibát — nem határozhatjuk meg a más alakra és más igénybevételi időre vonatkozó vízfelvételt. Az említett hiba függ attól is, hogy a próbatestétől eltérő alakú alkatrész várható vízfelvételét milyen fajlagos vízfelvétel-érték alapján számoljuk ki.

Az ismertetett problémák bemutatására és a mondottak igazolására megvizsgáltuk, hogy a próbatest alakja hogyan befolyásolja a fajlagos vízfelvétel-értékek alakulását, a szokásosnál hosszabb tartós nedves-meleg igénybevétel esetén. Megvizsgáltuk azt a hibát is, amelyet akkor követünk el, ha valamely próbatestre vonatkozó vízfelvétel-értékből határozzuk meg más alakú próbatest vagy alkatrész várható vízfelvételét. Meghatároztuk, hogyan alakul a számított és a valóságos vízfelvétel eltérése, ha a minták effektív vízfelvételét két fajlagos értékre számítjuk át, és pedig:

- felületegységre vonatkozó vízfelvételre (jelölése: q_F);
- térfogategységre vonatkozó vízfelvételre (jelölése: q_V).

2. A vizsgálat rövid leírása

Jelen munkánk egy másik munka folytatása [1], ezért itt csak a kísérlet ide vonatkozó részét foglaljuk össze. A vizsgálatok céljára egy viszonylag kis vízfelvételű papírvázás bakelit rétegelt terméktípust, az RPB IV típust és egy viszonylag nagyobb vízfelvételűt, az RPB I típust választottuk ki. A próbatestek különböző felületi tényezővel készültek. Az ω felületi tényező a próbatest F felülete és a próbatest V térfogatának viszonya. A vizsgálatához a felületi tényező 4-1. táblázatban szereplő értékeit választottuk. Mivel a minták vágott felületének nagysága a vízfelvétel folyamatát

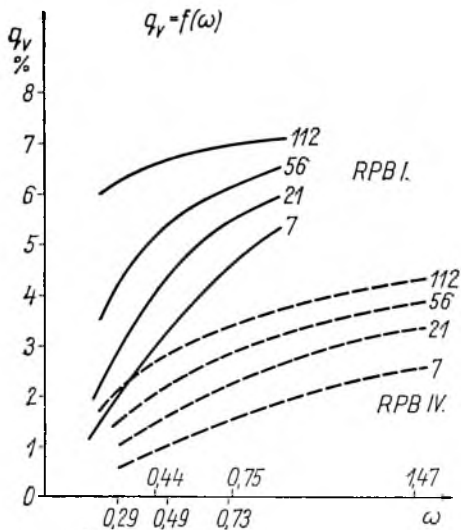
4-1. táblázat

A felületi tényező értékei

Rétegelt termék típusa	ω mm ⁻¹	F mm ²	V mm ³
RPB IV	0,44	22 000	50 000
	0,75	5 600	7 500
	1,47	1 980	1 350
RPB I	0,29	5 355	18 200
	0,49	1 925	3 900
	0,73	880	1 200

befolyásolja, e vizsgálatához a próbatestek méreteit úgy választottuk meg, hogy a vágott felületek és az eredeti sajtolt felületek A viszonya állandó volt. Az igénybevétel az MSZ 8888/3. lap szerinti tartós nedves-meleg igénybevétel volt. Az igénybevétel ideje: 112 nap. A vízfelvételt az igénybevétel 7., 21., 56. és 112. napján súlyméréssel állapítottuk meg. A súlyváltozásból adódó vízfelvételt

- felületegységre vonatkoztattuk és mg/dm²-ben adtuk meg,
- térfogategységre vonatkoztattuk és térfogatszázalékban adtuk meg.



4-1. ábra. RPB I és RPB IV típusú rétegelt termékek térfogatszázalékban megadott q_v vízfelvétele a próbatest ω felületi tényezőjének függvényében, különböző igénybevételi idők esetén

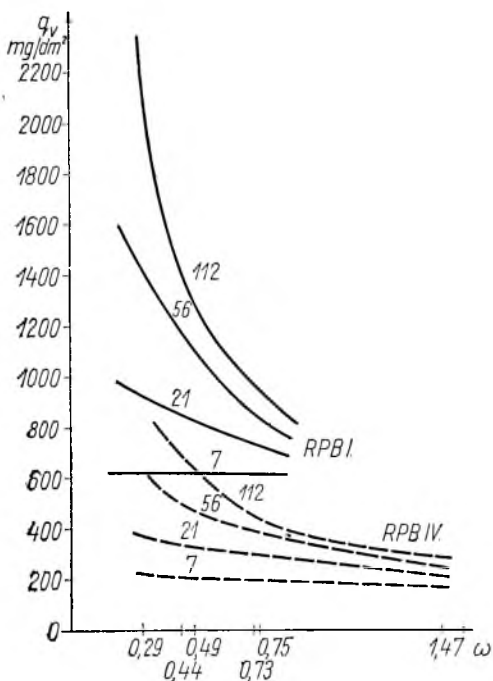
3. A fajlagos vízfelvétel függése a próbatest alakjától

A fajlagos vízfelvételt a felületi tényező és az igénybevételi idő függvényében a 4-1. és 4-2. ábra alapján tanulmányozhatjuk. A 4-1. ábrán a térfogat %-ban megadott vízfelvételt ábrázoltuk mind az RPB I, mind az RPB IV típusra nézve (a görbék paramétere az igénybevétel ideje.) A 4-2. ábrán a felületegységre vonatkoztatott vízfelvételt ábrázoltuk a térfogategységre vonatkoztatott vízfelvételhez hasonló módon.

Az eredmények alapján összefoglalóan megállapíthatjuk, hogy:

— a q_v térfogategységre számított átlagos vízfelvétel a próbatest alakjától, azaz az azt jellemző ω felületi tényezőtől függ. A függés pozitív iránytangensű görbével jellemezhető, az összefüggés azonban nem lineáris, inkább exponenciális jellegű; q_v értékek ω növekedésével valamilyen egyensúlyi érték felé tartanak. A görbe differenciálhányadosa az igénybevételi idő növekedésével fokozatosan csökken. A csökkenés a nagyobb vízfelvételű RPB I esetében fokozott, a kisebb vízfelvételű RPB IV anyagnál mérsékelt;

— a q_f felületegységre számított átlagos vízfelvétel a nedves-meleg igénybevétel 7. napjáig nem függ ω -tól, az igénybevételi idő növekedésével azonban már igen. A görbéknek negatív differenciálhányadosuk van. A görbék iránytangense az igénybevételi idő növekedtével és kis ω -k irányába haladva fokozatosan növekszik. A növekedés a nagyobb vízfelvételű RPB I-nél rohamos, a kisebb vízfelvételű RPB IV-nél mérsékelt. Növekvő ω -k felé haladva a különböző igénybevételi időhöz tartozó q_f értékek egyensúlyi érték felé tartanak.



4-2. ábra. RPB I és RPB IV típusú rétegelt termékek felületegységre vonatkoztatott q_f vízfelvétele a próbatest ω felületi tényezőjének függvényében, különböző igénybevételi időknel

4. A vízfelvétel alakulásának kvalitatív magyarázata

Bár az előzőkben ismertetett eredmények szinte önmagukért beszélnek, indokoltnak látjuk a szóban forgó fajlagos vízfelvétel-

-értékek alakulásának kvalitatív magyarázatát adni.

A vízfelvétel a nedves-meleg igénybevétel első szakaszában a felület állapotától függ. Ebben a szakaszban a felületen a nedvesség adszorpciója, s a felületi rétegek kapillár-kondenzáció révén való telítődése megy végbe. Az első szakaszban tehát szinte kizárólag a felületnek van szerepe, a térfogatnak még nincs. Érthető ezért, hogy a q_F felületegységre jutó vízfelvétel nem függ az ω felületi tényezőtől, azaz a felület és a térfogat viszonyától.

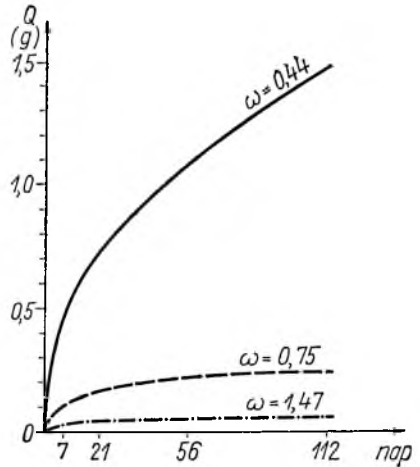
Ugyanebben az igénybevételi szakaszban a q_V térfogategységre számított vízfelvétel fokozottan függ ω -tól. A felülettől függő vízmennyiséget a szóban forgó fajlagos érték esetében a próbatest térfogatára vonatkoztatjuk. Nagy térfogat (kis ω) esetén a teljes térfogat viszonylag kisebb része, kis térfogat (nagy ω) esetén a térfogat viszonylag nagyobb része vesz részt a vízfelvételben, s így, minthogy a q_V átlagérték, kis ω esetén kisebb, nagy ω esetén nagyobb lesz a vízfelvétel.

A vízfelvétel az igénybevétel későbbi szakaszában lelassul. A lelassulás az anyag belső terében végbemenő vízgőzdiffúzióknak az előző folyamatnál lassúbb voltával és a fokozatos telítődéssel függ össze. A lassulás, mint azt a 4-3. ábrából láthatjuk, nagy térfogat (kis ω) esetén lényegesen kisebb mértékű, mint kis térfogatérték (nagy ω) esetében. E szakaszban tehát a térfogat fokozott szerepet kap. Nagy igénybevételi idő esetén, a telítődési állapot megközelítésével, az „egységnyi térfogatok” elvileg egyformán telítődnek, ezért ebben az igénybevételi szakaszban a különböző ω -khoz tartozó q_V értékek közötti különbség is egyre csökken. Ugyanakkor a felületegységre vonatkoztatott, különböző ω -khoz tartozó vízfelvételértékek egyre jobban eltérnek egymástól. Ez logikus, ha ugyanis a telítődés révén q_V már nem függ ω -tól, megközelítőleg állandó, akkor a felületegységre vonatkoztatott vízfelvétel

$$q_F = \frac{q_V}{\omega} = \frac{\text{áll.}}{\omega}$$

összefüggés szerint ω csökkenésével hiperbolikusan kell hogy növekedjen.

Az előző gondolatokhoz kapcsolódóan érdekes megfigyelni, hogy nagy ω -k irányában mind a $q_V - \omega$, mind a $q_F - \omega$ görbék egyre közelebb kerülnek egymáshoz. Nagy ω -khoz — mint tudjuk — kis próbatesttérfogat tartozik és azt is tudjuk, hogy a kis próbatesttérfogat gyorsan telítődik. Így nagy ω -k esetében a különböző igénybevételi időhöz tartozó q_V értékek ugyanúgy, mint a q_F értékek közel esnek egymáshoz, s a telítődési értékhez is.



4-3. ábra. Az effektív vízfelvétel alakulása különböző próbatestalakok esetén

5. A számított és a valóságos vízfelvétel közötti eltérés

Az eddig mondottakból már sejthető, hogy ha a fajlagos vízfelvétel a próbatest alakjától nem lineárisan függ és az összefüggést az igénybevétel ideje is erősen torzítja, a próbatesten mért és különböző fajlagos értékkel megadott vízfelvétel-értékeknek valamely más alakú alkatrésze való átszámításakor problémák lesznek.

Nézzük meg, hogy milyen eltéréseket tapasztalunk a számított és a valóságos vízfelvétel között, ha pl. a közepes felületi tényezőjű próbatestre vonatkozó fajlagos vízfelvétel alapján számoljuk ki más felületi tényezőjű próbatest vízfelvételét. A h százalékos hiba a térfogategységre számított vízfelvétel esetén:

$$h\% = \frac{q_{V\omega_0} - q_{V\omega}}{q_{V\omega}} \%,$$

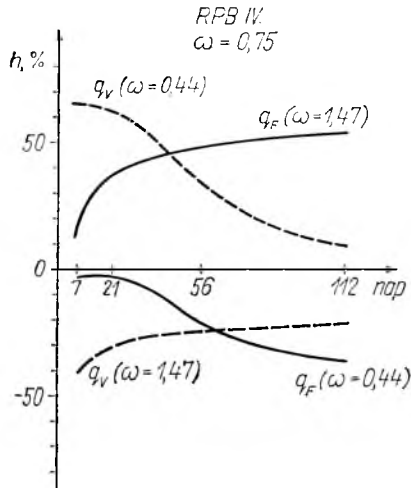
ahol $q_{V\omega_0}$ a kiválasztott ω_0 felületi tényezőjű próbatest térfogategységre vonatkoztatott vízfelvétele;

$q_{V\omega}$ a kérdéses minta valóságos, térfogategységre vonatkoztatott vízfelvétele. Hasonlóan adódik h a felületegységre vonatkoztatott vízfelvételekre is:

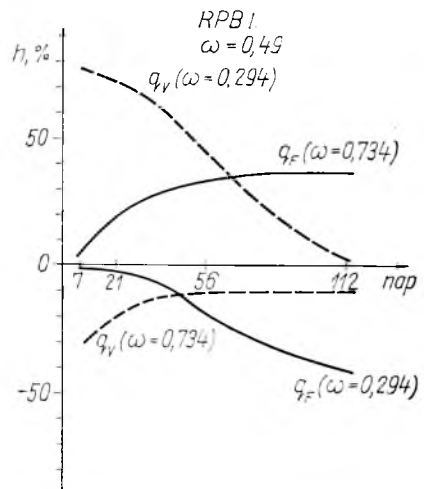
$$h\% = \frac{q_{F\omega_0} - q_{F\omega}}{q_{F\omega}} \%,$$

ahol a jelölések ugyanazok, mint az előbbi egyenletben, értelemszerűen a felületegységre vonatkoztatott vízfelvételekre.

A számítás eredményét a 4-4. és 4-5. ábra segítségével tanulmányozhatjuk. Az



4-4. ábra. A valóságos és számított vízfelvétel h hibájának alakulása az igénybevételi idő függvényében, ha a különböző felületi tényezőjű próbatestek vízfelvételeit az $\omega = 0,75 \text{ mm}^{-1}$ felületi tényezőjű próbatest fajlagos vízfelvételeit értékei (q_V és q_F) alapján számoljuk ki. (RPB IV típusú rétegelt termék)



4-5. ábra. A valóságos és számított vízfelvétel h hibájának alakulása az igénybevételi idő függvényében, ha a különböző felületi tényezőjű próbatestek vízfelvételeit az $\omega = 0,49 \text{ mm}^{-1}$ felületi tényezőjű próbatest fajlagos vízfelvételeit értékei alapján számoljuk ki (RPB I típusú rétegelt termék)

ábrákból láthatjuk, hogy a görbék jellege mind a két rétegelt termék esetében, azonos a megállapítások tehát mind a kisebb, mind a nagyobb vízfelvételi anyagra egyformán vonatkoznak.

A *térfogategységre vonatkoztatott vízfelvétel* esetében a számított és a valóságos vízfelvétel különbsége a valóságos vízfelvételre vonatkoztatva kis igénybevételi időnél igen nagy, az igénybevételi idő növekedtével azonban fokozatosan csökken, s nagy igénybevételi időknél már viszonylag kicsi.

A *felületegységre vonatkoztatott vízfelvétel* esetében a hiba éppen fordítva alakul, s előjele is ellentétes: a hiba kis igénybevételi időknél kicsiny, s az igénybevételi idő növekedtével fokozatosan növekszik, azonban egyensúlyra törekedve.

6. Következtetések és javaslatok

Rétegelt termékek vízgőzdiffúziójának folyamatát nedves-meleg légtérben a próbatest alakja — amelyet a felületi tényezővel jellemzünk — befolyásolja. A különböző fajlagos vízfelvétel-értékek és a felületi tényező között az összefüggés nem lineáris. Az összefüggést leíró görbék jellegét az igénybevételi idő nagysága a fokozottabb vízfelvételi típus esetén erősebben, a kedvezőbb vízfelvételi típus esetén mérsékeltebben, megváltoztatja.

A próbatesten mért fajlagos értékek alapján más méretű alkatrészre átszámított vízfelvétel — az előzőkben leírtak miatt — eltér a valóságos vízfelvételtől. A hiba az igénybevétel idejétől is függ. A felületegységre vonatkoztatott fajlagos vízfelvétel esetében a hiba kis igénybevételi idő esetén kisebb mértékű, nagy igénybevételi idők felé növekszik. A térfogategységre vonatkoztatott vízfelvételt tekintve a hiba éppen fordítva alakul, kis igénybevételi időkhöz nagy hiba, nagyobb igénybevételi időkhöz kis hiba tartozik.

Valamely alkatrész várható vízfelvételének számításakor, a számítás hibájának csökkentése érdekében a következőket javasoljuk:

— ha a felhasználás céljából a rövidebb nedves légtérben is elegendő a szigetelőanyag vízfelvételének meghatározásához, a vízfelvételt a próbatest felületére vonatkoztatva célszerű megadni, azaz a számításhoz a q_F értéket ajánlatos felhasználni;

— ha viszont az illető szigetelőanyag hosszabb idejű nedves légtérben való viselkedése érdekes, a vízfelvételt a próbatest térfogatára vonatkoztatva célszerű megadni, azaz a próbatestétől eltérő méretű alkatrész várható vízfelvételét a q_V értékből ajánlatos kiszámítani;

— különösen kényes alkatrészek vízfelvételét ajánlatos a kész alkatrészen meghatározni.

Irodalom

[1] *Sulyok J.*: Az alaktényező szerepe papírvázis rétegelt szigetelőanyag vízgőzdiffúziójának folyamatában. *Elektrotechnika* (1969) 2—3. szám.

VILLAMOS
BERENDEZÉS
FŐOSZTÁLY

5.

Nemlineáris híd termikus viselkedése

DR. GÁDOR LÁSZLÓ

ÖSSZEFOGLALÁS

A feszültségérzékelőként alkalmazott nemlineáris híd elvileg lineáris jelleggörbéjű ellenállásokból is felépíthető, ha a különböző munkapontokhoz más-más üzemi hőmérséklet tartozik és ez a változó hőmérséklet szolgáltatja a kívánt nemlinearitást. A változó hőmérsékletről maga a munkaáram gondoskodik. Egyszerű számítással kimutatható, hogy mind a disszipált teljesítmény, mind a feszültségtényező szempontjából kedvezőbb üzemi viszonyokat teremthetünk, ha a hőleadásban kisebb szerepet juttatunk a sugárzásnak és ha csökkentjük a nemlineáris hídág hőleadását.

ПОВЕДЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ МОСТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Д-р. Л. Гадор

Резюме

Нелинейный мост, применяемый в качестве датчика напряжения может быть построен по идеи и на сопротивлениях линейной характеристики, если к различным рабочим точкам относятся различные температуры. Изменяющаяся температура обеспечивает в этом случае требуемую нелинейность. Об изменении температуры заботится рабочий ток цепи. Простым расчетом можно выявить, что могут быть созданы более приятные рабочие условия как в отношении мощности, рассеяния так и в отношении коэффициента напряжения, если при теплоотведении дается меньшая роль излучению и если сокращается теплоотдача нелинейного плеча моста.

THERMISCHES VERHALTEN NICHTLINEARER BRÜCKEN!

Dr. L. Gádor

Zusammenfassung

Die als Spannungsmessglied angewandte nichtlineare Brücke kann grundsätzlich auch aus Widerständen linearer Kennlinie aufgebaut werden, wenn zu den verschiedenen Arbeitspunkten unterschiedliche Betriebstemperaturen gehören und durch diese veränderliche Temperatur sich die verlangte Nichtlinearität ausbildet. Die veränderliche Temperatur wird selbst durch den Arbeitsstrom zustande gebracht. Durch einfache Rechnung kann nachgewiesen werden, dass sowohl bezüglich der dissipierten Leistung als auch des Spannungsfaktors günstigere Verhältnisse geschaffen werden können, wenn man in der Wärmeabfuhr der Strahlung kleinere Rolle beimisst und wenn man die Wärmeabgabe des nichtlinearen Brückenastes verringert.

THERMAL BEHAVIOUR OF NON-LINEAR BRIDGES

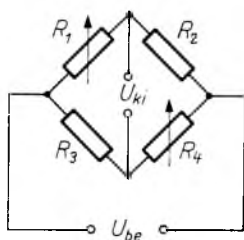
Dr. L. Gádor

Summary

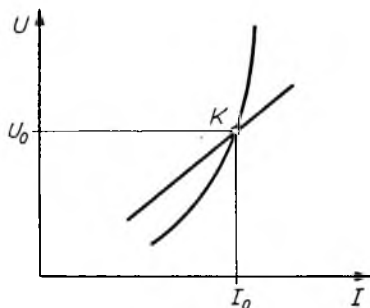
A non-linear bridge applied as voltage-sensing element can principally be built up of linear resistors, if different service temperatures are allocated to the various working points, i. e. the required non-linear feature is provided by this varying temperature. This temperature variation is catered for by the working current itself. It can be proved by simple calculation that improved operating conditions are obtained with respect to both dissipated output and voltage factor, if the proportion of radiation in the total heat transfer is diminished and heat dissipation of the non-linear branch is reduced.

Az intézetünkben kifejlesztett hálózati feszültségszabályozók érzékelőeleme nemlineáris híd. Ez az egyszerű, olcsó, üzembiztos érzékelőszerv egyelőre a félvezetőkkal szemben is meg tudta tartani pozícióját.

A szimmetrikus nemlineáris híd két-két olyan ellenállásból épül fel (5-1. ábra), amelyeknek feszültség—áram jelleggörbéje metszi egymást (5-2. ábra *K* pont). Ez



5-1. ábra. Szimmetrikus nemlineáris hídkapcsolás



5-2. ábra. Szimmetrikus nemlineáris híd két ágának jelleggörbéje

teszi lehetővé a híd kiegyenlítését az (U_0, I_0) helyen, tehát ha $U_{be} = U_0$, akkor $U_{ki} = 0$. (Ez az állítás egyenáramra, ill. váltakozóáram esetén annak alapharmonikusára igaz.)

A műszaki gyakorlatban olyan nemlineáris ellenállásokat ismernek és használnak, amelyek — mint pl. a polikristályos SiC — a töltéshordozók télerősségfüggő generálódása következtében feszültség növekedésére hatványozottan növekvő árammal reagálnak. Ilyen eszközöket használnak túlfeszültséglevezetőként az energiaátviteli és egyéb berendezésekben, ilyen feszültségtől függő ellenállásokkal dolgozik a híradástechnika is.

Ezek elvileg feszültségérzékelőként használt nemlineáris hidakban is alkalmazhatók, erre vonatkozóan végeztünk is kísérleteket. Mégis a tapasztalat alapján felhasználásukról lemondtunk, mert ellenük szólt viszonylag magas áruk és jelleggörbéjük instabilitása, vagyis az elemek öregedése.

Az eljárásunk alapjául szolgáló megfontolások elvileg bonyolultabbak, a gyakorlatban mégis egyszerűbbnek és könnyebben megvalósíthatóknak bizonyultak.

A lineáris ellenállás nemlineárisrá tehető azért, hogy a működési tartományon belül fizikai állapotát, pl. hőmérsékletét az üzemi pont függvényében változtatjuk.

A megvalósítás azért válik rendkívül egyszerűvé, mert az ellenálláson átfolyó áram maga gondoskodik az ellenállás felmelegítéséről. Céljainkra tehát ez a felmelegedés nem káros, hanem éppen ez szolgáltatja a kívánt nemlinearitást. Vizsgáljuk meg a viszonyokat részletesebben.

Állandósult állapotban hőegyensúly áll fenn, az ellenálláson keletkező hőteljesítmény egyenlő azzal a hőteljesítménnyel, amely átadással és sugárzással a környezetbe távozik:

$$I^2R = \alpha A(T - T_k) + \beta B(T^4 - T_k^4), \quad (1)$$

ahol I az R ellenálláson átfolyó áram;

T az ellenállás állandósult hőmérséklete;

T_k a környezet hőmérséklete;

A a hőátadó felület;

α a hőátadási tényező;

B a sugárzó felület;

β a sugárzási tényező.

Egyszerűség kedvéért írhatjuk $\alpha A = a$, $\beta B = b$, amivel

$$I^2R = a(T - T_k) + b(T^4 - T_k^4). \quad (2)$$

Megjegyzendő, hogy az összefüggés lineáris hőátadást leíró első részében $(T - T_k)$ értéke szempontjából közömbös, hogy $^{\circ}\text{K}$ -ben vagy $^{\circ}\text{C}$ -ban számolunk-e, de a sugárzás képletében $(T^4 - T_k^4)$ értékét feltétlenül $^{\circ}\text{K}$ -ban kell megadni.

Az R rezisztencia értéke a hőmérséklettel lineárisan változik:

$$R = R_0[1 + k(T - T_0)], \quad (3)$$

ahol R_0 a T_0 hőmérsékleten mérhető rezisztencia;

k a rezisztencia hőmérsékleti tényezője;

T_0 a táblázatokban 15°C vagy 20°C szokott lenni, de annak sincs akadály, hogy pl. 0°C -ra adjuk meg R_0 -t.

A rezisztencia lineáris hőmérsékletfüggése természetesen csak bizonyos korlátok közt érvényes, de a feladatunk szempontjából érdekes néhány száz fokos hőmérséklet-tartományon belül jó közelítéssel érvényesnek tekinthető.

R értékét (2)-be helyettesítve

$$I^2R_0[1 + k(T - T_0)] = a(T - T_k) + b(T^4 - T_k^4). \quad (4)$$

A feszültség értéke

$$U = IR = IR_0[1 + k(T - T_0)]. \quad (5)$$

A keresett $U = f(I)$ nemlineáris jelleggörbe elvileg úgy nyerhető, hogy (4) és (5) egyenletekből a T hőmérsékletet kiküszöböljük. Minthogy T a negyedik hatványon van, gyakorlatilag egyszerűbben jutunk célhoz, ha adott a , b , k , R_0 érték alapján meghatározzuk az önkényesen felvett T hőmérsékletekhez tartozó R , U és I értékeket.

Az Intézetünkben kifejlesztett hálózati feszültségszabályozó feszültségérzékelő-jének nemlineáris tagja wolframszálas izzólámpa. Azért esett rá a választás, mert olcsó, jól reprodukálható, stabil elem, üzemi hőmérséklete pedig elég nagy ahhoz, hogy a környezeti hőmérséklet ingadozása üzemét kevéssé befolyásolja. Az izzólámpa feszültség—áram jelleggörbéje az 5-3. ábrán látható. Az izzólámpa hideg-rezisztenciája $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$ hőmérsékleten $R_0 = 180 \Omega$. Az izzószál hőmérsékleti ténye-

zöje irodalmi adatok alapján és saját méréseink szerint is $0,0047 \Omega/^{\circ}\text{C}$. A görbe minden egyes pontjához $R = \frac{U}{I}$ összefüggésből R hozzárendelhető, majd ehhez

$$T = \frac{R - R_0(1 - kT_0)}{R_0}$$

egyenlet értelmében a T hőmérséklet. Ezután a görbe pontjaiból már könnyen visszaszámítható az a hőátviteli és b sugárzási tényező:

$$a = 1,5 \cdot 10^{-3}, \quad b = 10^{-12}.$$

A számított értékeket összefoglalva:

$T, ^{\circ}\text{K}$	R, Ω	$a(T - T_k)$	$b(T^4 - T_k^4)$	UI, VA	I, A	U, V
293	180	0	0	0	0	0
300	185	0,0105	0,001	0,002	0	0
500	360	0,31	0,0055	0,316	0,030	10,5
700	530	0,61	0,2331	0,843	0,040	21
900	700	0,91	0,6491	1,56	0,047	33
1100	875	1,21	1,457	2,67	0,055	48,5
1300	1050	1,51	2,849	4,36	0,0645	67,5
1500	1220	1,81	5,055	6,86	0,075	91,5

A táblázatot azért érdemes felírni, mert kitűnik belőle, hogy a teljes hőelvétel hogyan oszlik meg a lineáris hőátadás és a sugárzás között.

E két hőátviteli mód szerepének tisztázására egyszerű számítást végzünk. Először feltételezzük, hogy $b=0$, a teljes hőteljesítményt a hőmérsékletkülönbséggel arányos

hőátadás szállítja át a környezetbe. Ekkor

$$UI = a(T - T_k),$$

a feszültség és az áram számítása egyébként az előbbiekről szerint történik. Az eredményt az 5-3. ábra a görbéje mutatja. Amint látjuk, a jelleggörbe meredeken emelkedik, a feszültség „megszalad”. A megszaladási ponthoz tartozó kritikus áramértéket meg tudjuk határozni.

Ha $b=0$, akkor a (4) egyenlet a következő alakot ölti:

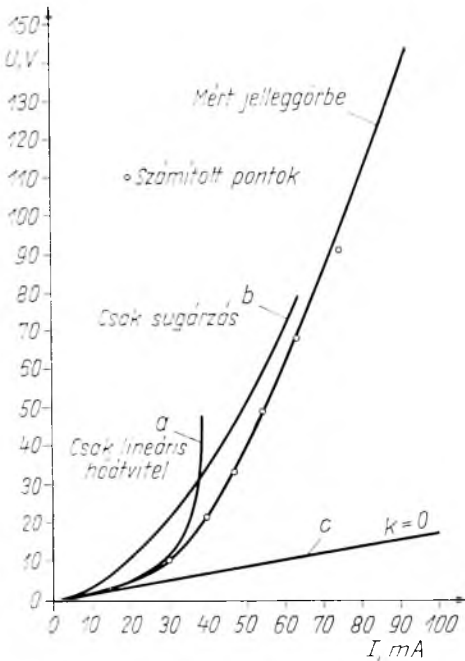
$$I^2 R_0 [1 + k(T - T_0)] = a(T - T_k). \quad (6)$$

Legyen az egyszerűség kedvéért $T_0=0$. A T hőmérsékletet (6)-ból kifejezve

$$T = \frac{I^2 R_0 + aT_k}{a - kI^2 R_0}, \quad (7)$$

és (5)-be helyettesítve

$$U = aI R_0 \frac{1 + kT_k}{a - kI^2 R_0}. \quad (8)$$



5-3. ábra. Wolframszálás izzólámpa feszültség—áram jelleggörbéje

Amint (7) és (8)-ból kitűnik, U , ill. T értéke akkor válik végtelen nagygyá, ha

$$a = kI^2 R_0,$$

amiből a kritikus áram

$$I_{kr} = \sqrt{\frac{a}{R_0 k}}.$$

A konkrét értékek behelyettesítésével esetünkben

$$I_{kr} = 0,0422 \text{ A},$$

tehát ha az izzólámpa sugárzását teljesen megakadályozzuk és arra kényszerítjük, hogy teljes melegmennységét arányos hőátadással adja át a környezetnek, igen hamar elérjük azt a kritikus áramerősséget, amelynél az izzó tönkremegy.

Lássuk most a másik szélsőséget: $a=0$, ami azt jelenti, hogy csak sugárzással távozik el hőenergia. Ezzel

$$UI = b(T^4 - T_k^4).$$

Az ezzel a feltételezéssel kiszámított jelleggörbe az 5-3. ábrán b -vel jelzett görbe.

Látható, hogy nemlineáris hidat akár úgy is felépíthetnénk, hogy az egyébként azonos adatú ellenállásokból szimmetrikusan kapcsolt híd két ellenállása csak sugárzással, másik két ellenállása pedig csak arányos hőátvitellel adja át hőjét a környezetnek. A két jelleggörbe így is metszi egymást, ami a feszültségérzékelő nemlineáris híd kialakításának szükséges feltétele.

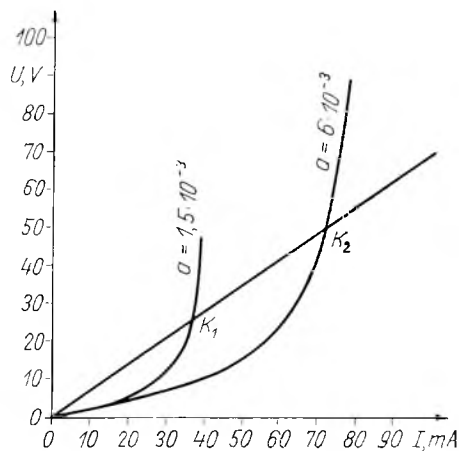
Levonhatjuk a két jelleggörbéből azt a következtetést, hogy a lineáris hőátvitel lényegesen erőteljesebb nemlinearitást hoz létre a feszültség—áram jelleggörbében, s ezt a felismerést a nemlineáris híd megtervezésében hasznosíthatjuk.

Az 5-4. ábra a jelleggörbének a hőátadási tényezőtől való függését érzékelteti. Nyilvánvaló, hogy a disszipált teljesítmény a -val arányosan nő, hiszen a hőátadási tényező változása éppen azt fejezi ki, hogy azonos hőmérsékletkülönbség esetén hogyan változik az átadott hő.

A nemlineáris híd feszültségtényezője, vagyis a híd kimenő jelének a viszonya a kiegyenlítési ponthoz viszonyított feszültségeltéréshez

$$f = \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1}, \quad (9)$$

ahol R_1 és R_2 a két hídág dinamikus rezisztenciája, ami nem más, mint a feszültség—áram jelleggörbe meredeksége a vizsgált pontban. Amint az ábrából is kitűnik, a négyszeres disszipált teljesítményhez ugyanakkora feszültségtényező tartozik. Viszonylagosan még kedvezőtlenebb a helyzet, mert a feszültség abszolút értéke ugyanakkor az előbbinek a kétszeresére nőtt, tehát azonos százalékos feszültségeltérés feleakkora kimenő jelet eredményez.



5-4. ábra. Izzólámpa feszültség—áram jelleggörbéjének függése az a hőátadási tényezőtől

Összegezve megállapíthatjuk, hogy a hőátadási tényező növelése — a sugárzást figyelmen kívül hagyva — a disszipált teljesítményt arányosan növeli, az azonos százalékos feszültségeltéréshez tartozó kimenő jelet arányosan csökkenti. A rosszul hűlő nemlineáris ellenállás tehát kedvezőbb viszonyokat teremt.

Végül vizsgáljuk meg a k hőmérsékleti tényező szerepét. A korábbiakból nyilvánvaló, hogy a jelleggörbe nemlinearitását a rezisztencia hőmérsékletfüggésének köszönheti. Ha ez a függés nincs meg, vagyis $k=0$, akkor az ellenállás megtartja kezdeti R_0 értékét, a jelleggörbe az 5-3. ábra c egyenese.

Nézzük meg, hogy egyebek változatlanul hagyásával hogyan függ a nemlineáris híd kimenő jele a k tényezőtől. A jobb áttekinthetőség érdekében tételezzünk fel bizonyos egyszerűsítéseket. Vizsgáljuk a kisebb hőmérsékletek tartományát, ahol a sugárzás hatása figyelmen kívül hagyható. Tételezzük fel továbbá, hogy $T_k=0^\circ\text{C}$, ami a számítást egyszerűsíti anélkül, hogy az eredmény lényegét befolyásolná. (8)-ből

$$U = \frac{aIR_0}{a - kI^2R_0}, \quad (10)$$

ahonnan a dinamikus rezisztencia

$$\frac{dU}{dI} = aR_0 \frac{a + kR_0I^2}{(a - kR_0I^2)^2}. \quad (11)$$

A két hídág ellenállásának jellemzői legyenek

$$a_1, R_{01}, k_1; \text{ ill. } a_2, R_{02}, k_2,$$

a nemlineáris híd K kiegyenlítési pontjának a koordinátái: U_0, I_0 .

A kiegyenlítési pont környezetében adódó dinamikus rezisztenciákból a (9) összefüggés értelmében meghatározható az f feszültségtényező. A két hídág dinamikus rezisztenciája (10) szerint

$$R_1 = a_1 R_{01} \frac{a_1 + k_1 R_{01} I_0^2}{(a_1 - k_1 R_{01} I_0^2)^2},$$

$$R_2 = a_2 R_{02} \frac{a_2 + k_2 R_{02} I_0^2}{(a_2 - k_2 R_{02} I_0^2)^2},$$

ahonnan (10) szerint

$$U_0 = \frac{a_1 R_{01} I_0}{a_1 - k_1 R_{01} I_0^2} = \frac{a_2 R_{02} I_0}{a_2 - k_2 R_{02} I_0^2},$$

ahonnan

$$I_0^2 = \frac{a_1 a_2}{R_{01} R_{02}} \frac{R_{01} - R_{02}}{a_1 k_2 - a_2 k_1}.$$

Ezekből az adatokból f számítható. Minthogy a kimenő jel nagyságát a két hőmérsékleti tényező különbsége szabja meg, az egyik ellenálláspárt célszerűen $k=0$ hőmérsékleti tényezőjű, a kereskedelmi forgalomban könnyen beszerezhető huzalellenállásból készítjük. Ezzel a számítás is egyszerűsödik.

A $k=0$ hőmérsékleti tényezőjű ellenállás feszültség—áram jelleggörbéje a kezdőpontból kiinduló egyenes, amelyre a dinamikus rezisztencia a hőmérséklettől függetlenül állandó és minden pontban egyenlő a statikus rezisztenciával. A kiegyenlítési pontban a lineáris és a nemlineáris ellenállás statikus rezisztenciája is egyezik.

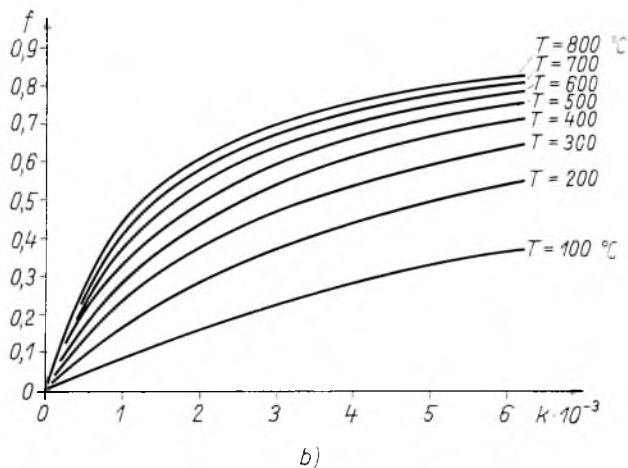
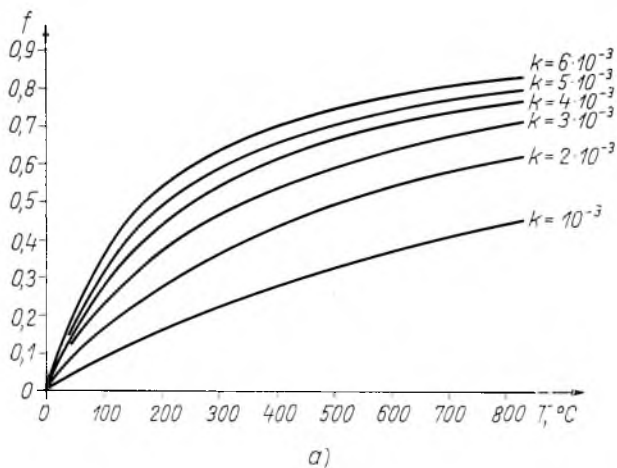
Ezek figyelembevételével

$$f = \frac{R_d - R_s}{R_d + R_s}, \quad (12)$$

ahol R_d a nemlineáris hídág dinamikus, R_s pedig a statikus rezisztenciája a K ki-egyenlítési pontban.

$$R_d = aR_0 \frac{a + kR_0 I_0^2}{(a - kR_0 I_0^2)^2}, \quad (13)$$

$$R_s = \frac{U_0}{I_0}. \quad (14)$$



5-5. ábra. A feszültségtényező k , ill. T függvényében

Másrészt

$$U_0 = \frac{aR_0 I_0}{a - kR_0 I_0^2},$$

amiből

$$I_0^2 = \frac{a}{k} \frac{R_s - R_0}{R_s R_0}. \quad (15)$$

Ezt a (13)-ba helyettesítve:

$$R_d = \frac{R_s}{R_0} (2R_s - R_0),$$

amivel a feszültségtényező:

$$f = \frac{R_s - R_0}{R_s}. \quad (16)$$

Végül figyelembe véve, hogy $R_s = R_0(1 + kT)$,

$$f = \frac{kT}{1 + kT}, \quad (17)$$

ahol T a °C-ban mért hőmérséklet.

Az 5-4. ábrán jelzett K munkapontra $T=627$ °C, amivel $f=0,745$.

Az 5-5. ábra f alakulását mutatja be k , ill. T függvényében. Az ábra ránézésre is érzékelteti, hogy a nemlineáris hid kedvező üzemi feltételeit $k=4 \cdot 10^{-3} \Omega/^\circ\text{C}$ körüli hőmérsékleti tényezővel és $T=400\dots 500$ °C körüli hőmérsékleten tudjuk biztosítani. Mivel a sugárzás a felvázolt helyzeten ront, ez is a viszonylag kis hőmérsékletek tartását kívánja meg.

Irodalom

Gádor L.: Nemlineáris hidak terhelhetősége. Elektrotechnika, 49. k. (1956) 10–12. sz., 320–331. o.

6.

Nagyáramú tirisztoros egyenirányító berendezések hidrogén-elektrolízis táplálására

KAFKA NÁNDOR—DR. NAGY LÁSZLÓ

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk az első hazai nagyáramú tirisztoros egyenirányítókat ismerteti. Részletesen foglalkozik a főáramkör kialakításával, a tirisztorok párhuzamos üzemeltetésének szempontjaival, nagyszámú párhuzamos tirisztor esetén a gyújtójelekkel szemben támasztott követelményekkel, a gyújtó- és vezérlőkörök kialakításával, valamint az elektrolízis üzem körülményeihez alkalmazkodó szabályozókör felépítésével és beállítási szempontjaival.

5000 А ГИДРАЛИЗЕР НА ТИРИСТОРАХ

Н. Кафка—Д-р. Л. Надь

Резюме

В статье приводятся первые мощные выпрямители на тиристорах, разработанные отечественными разработчиками. Статья подробно занимается методом создания основной цепи, принципами параллельного включения тиристорov; требованиями, предъявляемыми к сигналам зажигания, применяемыми при параллельной работе мощных тиристорov, методами конструирования применяемых цепей зажигания и управления, а также методом построения и принципами настройки цепи управления, согласованной с условиями работы в режиме электролиза.

THYRISTORISierter HYDROLYSEUR VON 5000 A

N. Kafka—Dr. L. Nagy

Zusammenfassung

Der Aufsatz legt die ersten einheimisch entwickelten, leistungsstarken thyristorisierten Gleichrichter dar. Er befasst sich ausführlich mit der Hauptstromkreis-Ausbildung, den Gesichtspunkten der Parallelschaltung von Thyristoren, den gegenüber den Zündimpulsen gestellten Anforderungen bei Anwendung zahlreicher paralleler Thyristoren, der Ausbildung angewandeter Zünd- und Steuerkreise, sowie mit dem Aufbau und den Einstellungs-Gesichtspunkten des sich an die Umstände des Elektrolysenbetriebes anpassenden Regelkreises.

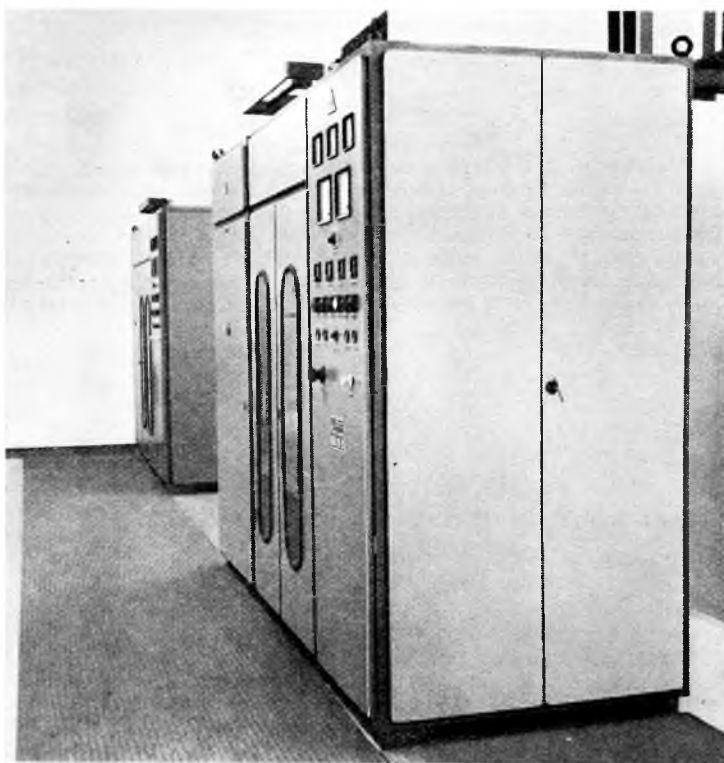
5000 A HYDROLYSER

N. Kafka—Dr. L. Nagy

Summary

The first high-current thyristor rectifiers developed in Hungary are described. Set-up of the main circuit, aspects of parallel operation of thyristors, requirements to be met by the triggering pulses in parallel operation of high-current thyristors, arrangement of ignition and control circuits, set-up of the control circuit adapted to the specific conditions of electrolyser applications and point of views of adjustment are dealt with in detail.

A VKI és a VBKM Anód Áramirányító Gyára több, mint egy évtizedes eredményes együttműködése a teljesítményelektronika körébe tartozó számos berendezés fejlesztését és gyártását eredményezte. A két kollektíva rugalmas és jó kapcsolatának újabb bizonyítéka, az alig több, mint egy év alatt kifejlesztett és az Egyesült Izzó számára elkészített 3 db 5000 A-es, szabályozott tirisztoros hidrolizőr egyenirányító. A berendezéseket 1970—1971. évben helyezték üzembe az Egyesült Izzó budapesti és gyöngyösi telephelyén. Külön elismerést érdemel az Egyesült Izzó műszaki gárdájának úttörő törekvése, a hazai fejlesztésbe vetett bizalma és a műszaki fejlesztést elősegítő támogatása, amely jelentősen hozzájárult a nagyáramú tirisztoros berendezésekkel kapcsolatos kutatások sikeréhez. Az ipari alkalmazás során már eddig is



6-1. ábra

sok és fontos tapasztalatot szereztünk, amely lehetőséget nyújtott számunkra a további fejlesztéshez. Részben ez, részben a kedvező üzemi tapasztalatok bátorították a tervezőket az eddiginél nagyobb — 7000, ill. 14000 A-es — berendezések kidolgozására, amelyek üzembehelyezésére 1972-ben kerül sor.

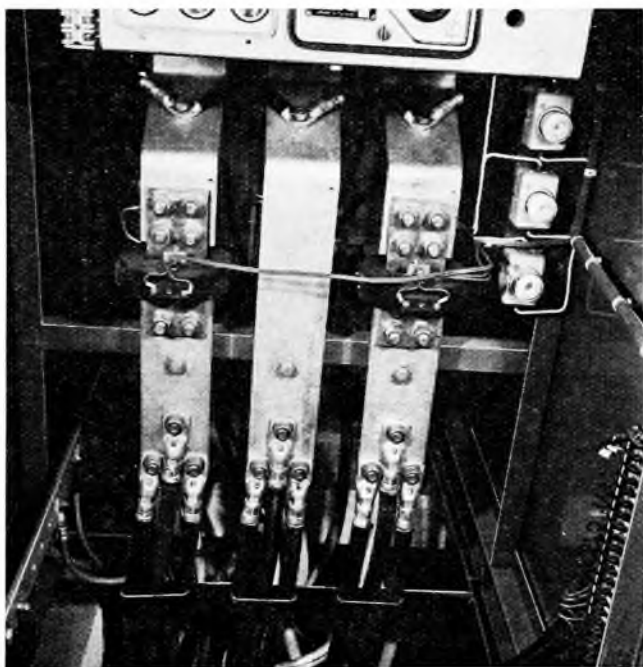
1. Az egyenirányító berendezés jellemző adatai, felépítése

Névleges teljesítmény	600 kW
Névleges egyenfeszültség (kézi szabályozással beállítható)	0...120 V
Névleges egyenáram (automatikus szabályozással beállítható)	0...5000 A \pm 2%
Tápfeszültség	3 \times 380/220 V, 50 Hz
Maximális környezeti hőmérséklet	35 °C.

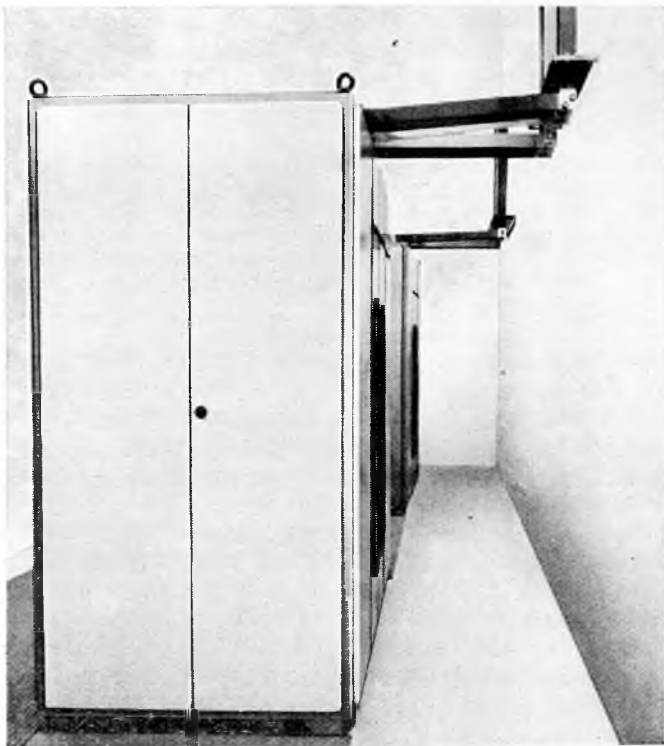
Az egyenirányító-berendezés felépítését tekintve a következő részekre tagozódik:

- kapcsolószekrény a főkapcsolóval és a primer oldali áramváltókkal;
- egyenirányító transzformátor;
- szívó—fojtó és szekunder oldali áramváltók;
- tirisztoros egyenirányító;
- segédüzem;
- védelmek és jelzések.

A 6-1. ábrán az üzembe helyezett egyenirányító-berendezések láthatók. A tirisztoros egyenirányítót 1600 \times 1000 mm alapterületű és 2000 mm magas szekrény



6-2. ábra

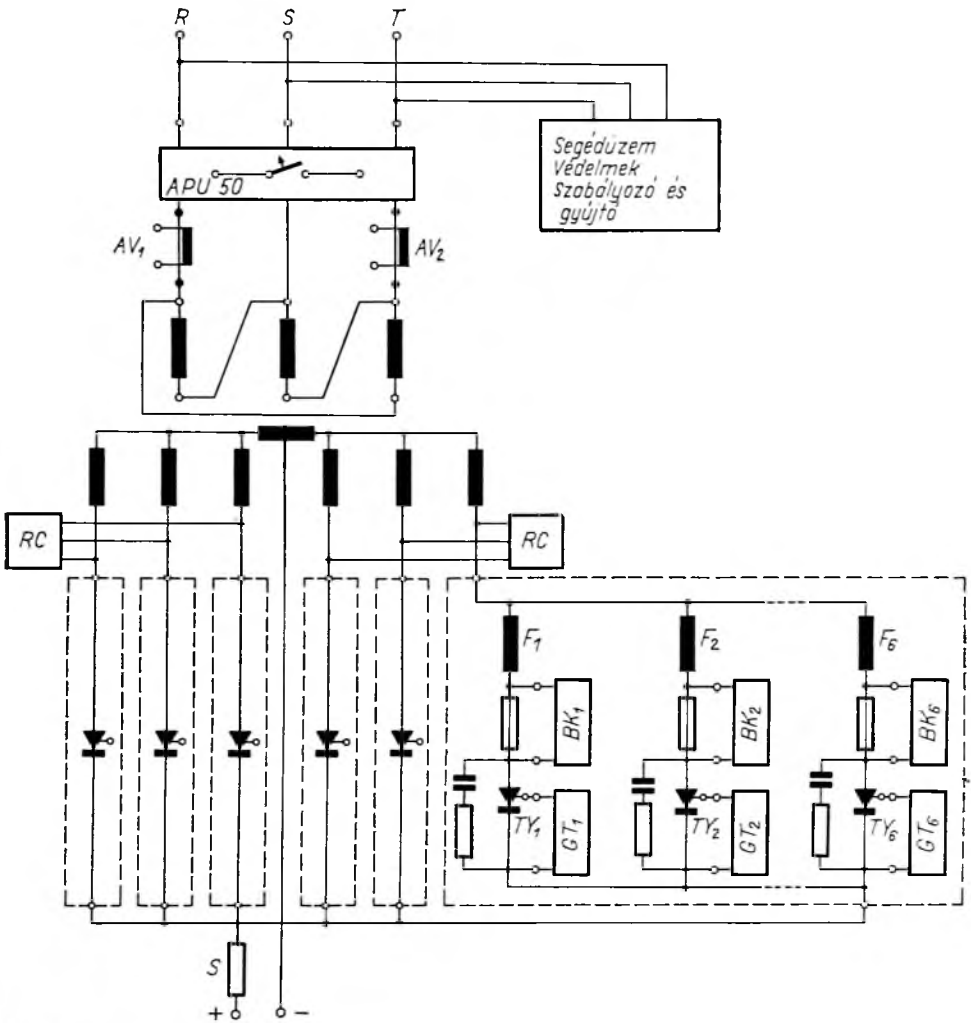


6-3. ábra

tartalmazza. A szellőző ventilátorok a szekrény tetején helyezkednek el, az egyen- és váltakozóáramú csatlakozások a szekrény alján vannak. A kapcsolószekrény hálózati betáplálása a 6-2. ábrán látható. Az egyenirányító-transzformátort és a szívó—fojtót külön helyiségben helyezték el. A szomszédos transzformátor-helyiségből a szekrény tetejéhez síneken át csatlakozik a szekunder oldali hatfázisú betáplálás (6-3. ábra).

2. Erősáramú kapcsolás

A berendezés elvi kapcsolási rajzát a 6-4. ábrán tüntettük fel. Az egyenirányító hatfázisú szívó—fojtótekerces kapcsolású, amelyet a $3 \times 380/220$ V-os háromfázisú hálózatra csatlakozó delta/2 \times csillag kapcsolású egyenirányító-transzformátor táplál. Az egyenirányító-berendezés egy-egy ága 6—6 db párhuzamosan kapcsolt tirisztort tartalmaz. A tirisztorok AEG T 301 N 600 típusúak. Katódjukhoz NOSi 400 típusú félvezetővédő biztosítók, anódjukhoz pedig a párhuzamos tirisztorok üzemét elősegítő légmagos fojtótekercesek kapcsolódnak (6-5. ábra). A fojtótekercesek vörösréz szalaganyagból, önhordó kivitelben készültek, hűtésükre a tirisztor tokozása mellett beáramló szekunder hűtőlevegő elegendő. Az előtétinduktivitások feladata kettős, egyrészt korlátozza a leggyorsabban kapcsoló tirisztoron fellépő áramnövekedési sebesség, di/dt értékét, másrészt biztosítja a legutolsónak begyűjtő tirisztor maradék-



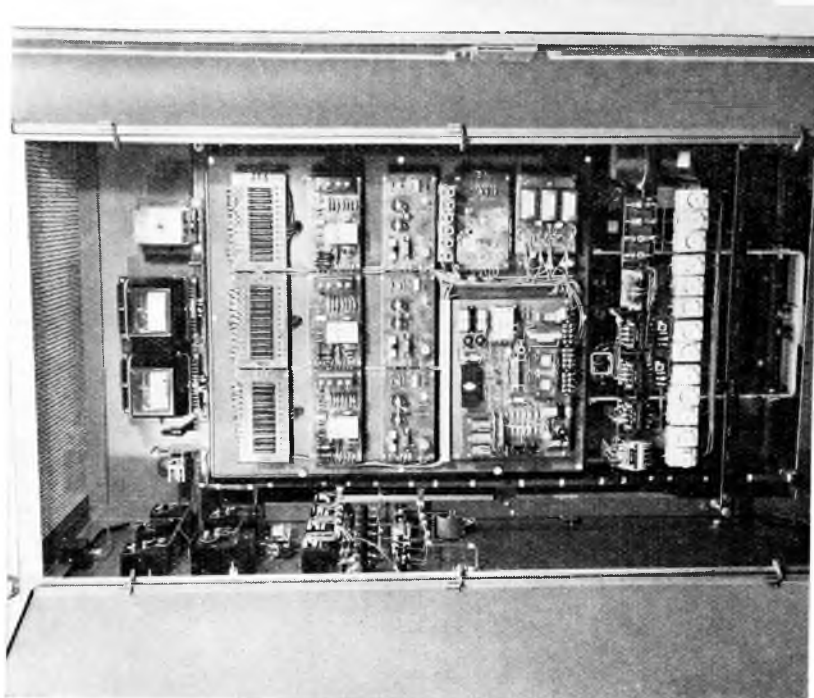
6-4. ábra

talán gyűjtáskiterjedését, a 2...3 V-ra lecsökkent anód- és katód feszültség ellenére is. További előnyt jelent még, hogy véges értékű rezisztenciája hozzájárul az egyenletes áramosztás kialakulásához.

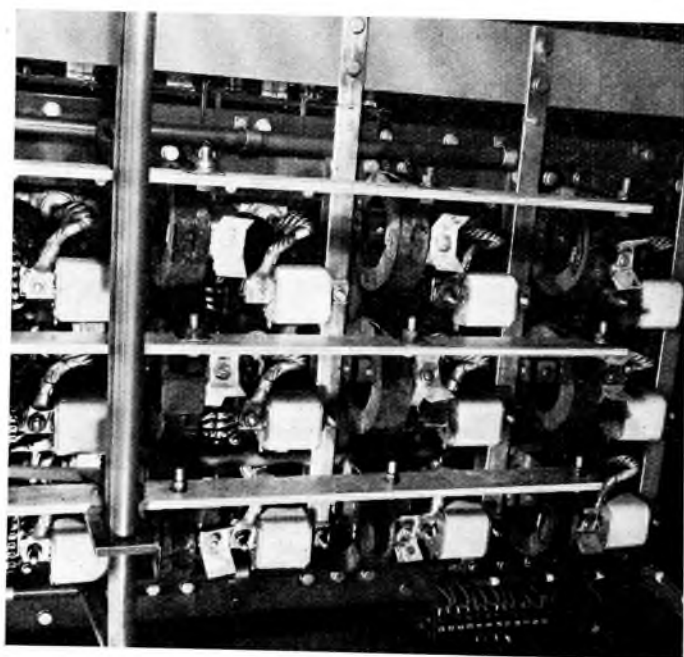
Az egyenirányító berendezés túlfeszültségvédelmét a tirisztorokkal párhuzamosan kapcsolt RC tagok, valamint az egyenirányító-transzformátor szekunder oldalához egyenirányítón keresztül kapcsolódó RC tag látja el. A túláramvédelmet — a beépített áramkorlátozás on túlmenően — a primer oldali áramváltókhoz kapcsolódó túláramrelék biztosítják (6-6. ábrán, felül).

Az egyenirányító-szekrény előlapjára vannak felszerelve a működtetéshez szükséges nyomógombok, jelzőlámpák, hibajelző relék, kapcsolók, valamint az üzem ellenőrzéséhez szükséges műszerek (6-7. ábra).

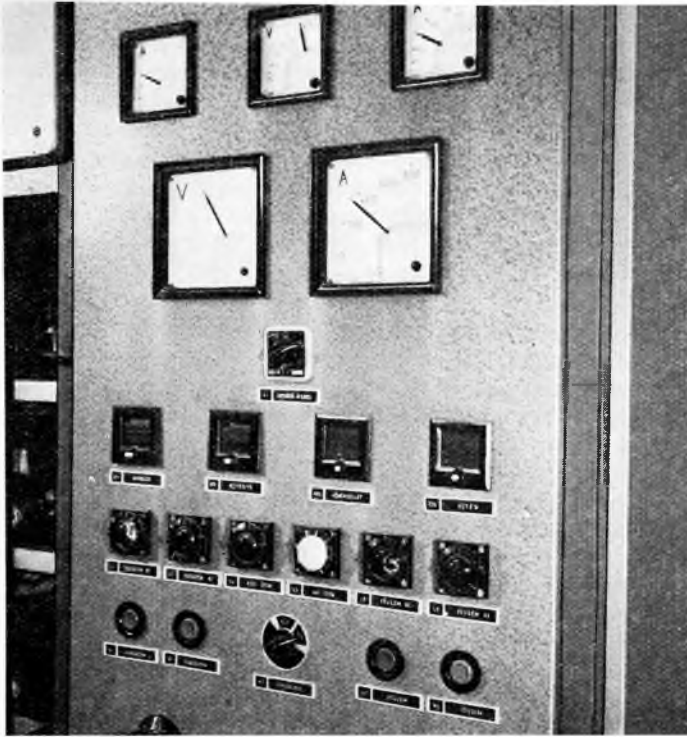
A biztosítók kioldadását a biztosítók sarkaira kapcsolódó jelzőtranszformátorok



6-6. ábra



6-5. ábra



6-7. ábra

érezélik. Biztosítókiolvadás esetén a jelzőtranszformátor szekunder tekercse támaszrelét működtet, amely egyrészt parancsot ad a berendezés lekapcsolására, másrészt jelzőlámpával regisztrálja a hibahelyet. Az alapállapotot külön nyomógombbal lehet visszaállítani.

A berendezés áramszabályozását a beépített szabályozó és gyűjtásszögvezérlő együttesen végzi. Ezek az egyenirányító-szekrény jobb oldalán, a szekrény végén levő ajtón keresztül jól hozzáférhető helyen vannak. (6-6. ábra). A kép bal oldalán az ellenőrző műszerek, nyomógombok, hibajelző relék szekrénybe nyúló részei, alul pedig a segédüzemi biztosítók és mágneskapcsolók, valamint a hibajelző szíréna látszik.

3. Tirisztorok párhuzamos üzemeltetésének néhány szempontja

A párhuzamosan üzemelő tirisztorággal szemben támasztott legfontosabb követelmény: a működés minden időpillanatában biztosítani az egyenletes áramosztást. A tirisztor vezetési időszakában lényeges különbséget kell tenni a tirisztor bekapcsolási folyamata és az azt követő vezetési félperiódus alatti áramosztás között.

A vezetési félperiódus idejére vonatkozó áramosztási módszerek tulajdonképpen már a diódás berendezéseknél kialakultak. Az itt szerzett tapasztalatok a tirisztorokból épített berendezések tervezésében is használhatók. Tirisztorok alkalmazása esetén is célszerű nyitóirányban osztályozott félvezetőket alkalmazni, bár ilyen

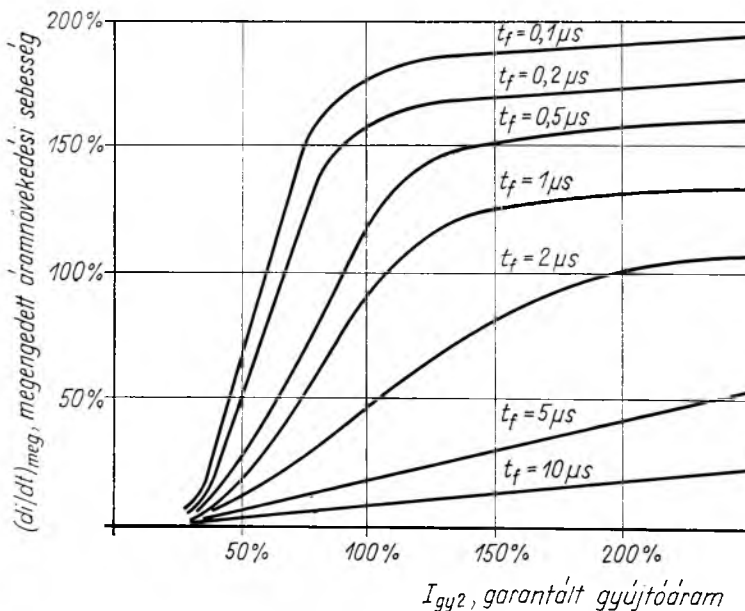
feltétellel még nem minden gyártó cég vállalja a szállítást. Jelentősen elősegítik még az egyenletes áramosztást a félvezetőkkel sorbakapcsolt, egymással egyenlő értékű ellenállások. Ebből a szempontból számításba jön a félvezetővédő biztosítók ellenállása is. Tapasztalatunk szerint a biztosítók rezisztenciájának szórása kicsi, ezért a kiegyenlítő hatást elősegítik. Osztályozatlan tirisztorokból alkotott párhuzamos kapcsolások esetén alkalmaznak még osztó—fojtótekerccs kapcsolásokat. Az áramosztó hatás transzformátoros úton érvényesül úgy, hogy az egymással csatolásban levő magok indukált feszültsége a nyitóirányú feszültségeltéréseket éppen kiegyenlíti. Ez a módszer eléggé költség- és helyigényes, ezért várható, hogy a tirisztorok párhuzamos üzemét elősegítő nyitóirányú osztályozás elterjedése után elveszti létjogosultságát.

A tirisztorok bekapcsolási időszakában az áramosztást a tirisztor gyújtáskésési, átkapcsolási és gyújtáskiterjedési idejének tartama és a bekapcsolási görbe menete szabja meg. Ha ezek a paraméterek egyeznek, az áramosztás egyenletes. Ez azonban csak elvi jelentőségű, mert az ilyen válogatás igen szigorú, szinte megoldhatatlan feladatot jelent.

A bekapcsolási időszakban két, a tirisztorokat károsító jelenséggel kell számolni:

- A leggyorsabban kapcsoló tirisztor veszélyeztető áramnövekedési sebesség, di/dt , egy tirisztorra megengedhetetlenül magas értéke, valamint a bekapcsolási veszteség jelentős növekedése.
- A legutoljára gyújtó tirisztoron az égésfeszültségre csökkent anód—katód feszültség miatt a gyújtáskiterjedési szakaszban fellépő rendellenességek.

Ez utóbbi lehet a gyújtáskiterjedési idő jelentős növekedése, vagy a gyújtási mechanizmus folyamatának megszakadása is, amely a pn átmenet részleges, szigetekre korlátozódó vezetési állapotát jelenti. Ennek következménye egyrészt a többi



6-8. ábra

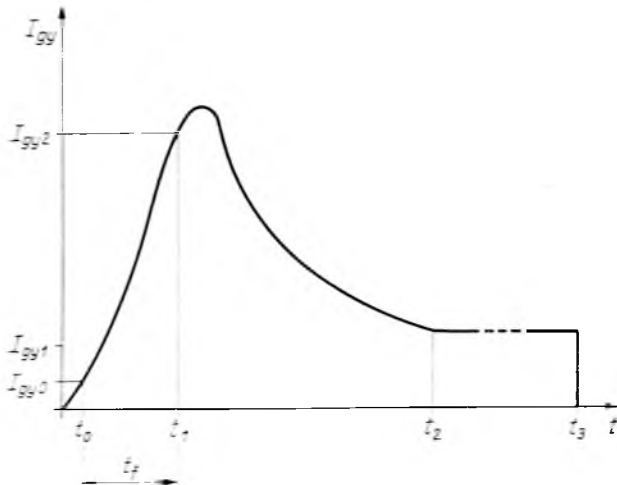
tirisztor túlterhelésében, másrészt a nem teljes felületen gyűjtött tirisztor meghibásodásában nyilvánulhat meg.

Kísérleteink során bebizonyosodott, hogy a bekapcsolási időszak rendellenességei megfelelően méretezett és a tirisztorral sorbakapcsolt légmagos fojtótekerccsel és speciális, a paralel járás követelményeit is kielégítő gyűjtőkészülék alkalmazásával megszüntethetők, ill. elhanyagolhatóan kis értékűre csökkenthetők. A 6-5. ábrán jól látható a légmagos fojtótekerccsek elhelyezése és mérete.

Különösen a nagyáramú tirisztoros berendezésekben válik elengedhetetlenné a valóságban fellépő áramnövekedési sebesség, di/dt értékének számszerű ellenőrzése és összevetése a tirisztorra megengedett $(di/dt)_m$ értékkel. Adott berendezésben fellépő áramnövekedési sebesség csökkentésére van ugyan mód, de olcsóbbnak tűnik a tirisztorok állóképességének fokozása megfelelő gyűjtással.

A következőkben röviden ismertetjük a tirisztor gyűjtásával kapcsolatos követelményeket, mert a figyelmen kívül hagyásuk miatt létrejött öregedési és meghibásodási folyamatokat célszerű részletesebben tanulmányozni. A 6-8. ábra összefüggést mutat a tirisztor megengedett áramnövekedési sebessége $(di/dt)_m$ és a gyűjtőáram amplitúdója között, különböző homlokmeredekségű gyűjtőjelek esetén. Az ábra 100%-kal jelölt értékei Westinghouse-tirisztorok garantált katalógusadatára vonatkoznak, a t_f paraméter a gyűjtőjel homlokfelfutási idejét adja μs -ban. Az ábra szemléletesen mutatja, hogy a tirisztor intenzív, nagy meredekségű gyűjtése kétszeres di/dt áramnövekedési sebességet tesz lehetővé, „gyenge” gyűjtés viszont a tirisztor megengedett di/dt értékét akár 20...30%-ra csökkentheti.

A gyűjtőjel alakjával szemben támasztott további követelményeket a 6-9. ábra alapján tárgyalhatjuk. Az ábrán a gyűjtőimpulzus felfutó élén I_{gy0} az a maximális gyűjtőáram, ahol a tirisztor még nem gyűjt, I_{gy1} pedig a katalógusban garantált gyűjtőáram.



6-9. ábra

Az I_{gy2} gyűjtőáram a gyűjtőkészülék által szolgáltatott impulzus csúcserőértékének 0.9-szerese. A két érték között eltelt idő $t_1 - t_0 = t_f$ a homlokfelfutási idő. A tirisztor di/dt terhelhetőségét ez a szakasz határozza meg. A hátgörbe $t_2 - t_1$ hosszának ajánlott értéke 20 μs , vagy annál nagyobb, és nagysága t_2 pontban nagyobb a tirisztor minimális I_{gy1} -gyel jelzett gyűjtőáramánál. A gyűjtőimpulzus teljes t_3 hossza már áramkörü alkalmazásoktól (induktív terhelés, teljesen vezérelt többfázisú

hídkapcsolás stb.) függ, és akár félperiódus vagy még hosszabb is lehet. Párhuzamos kapcsolás esetén még külön ki kell emelni a párhuzamos ágra kapcsolt gyűjtőimpulzusok egyidejűségének fontosságát, mert nélkül az egyenletes áramosztás nem valósítható meg.

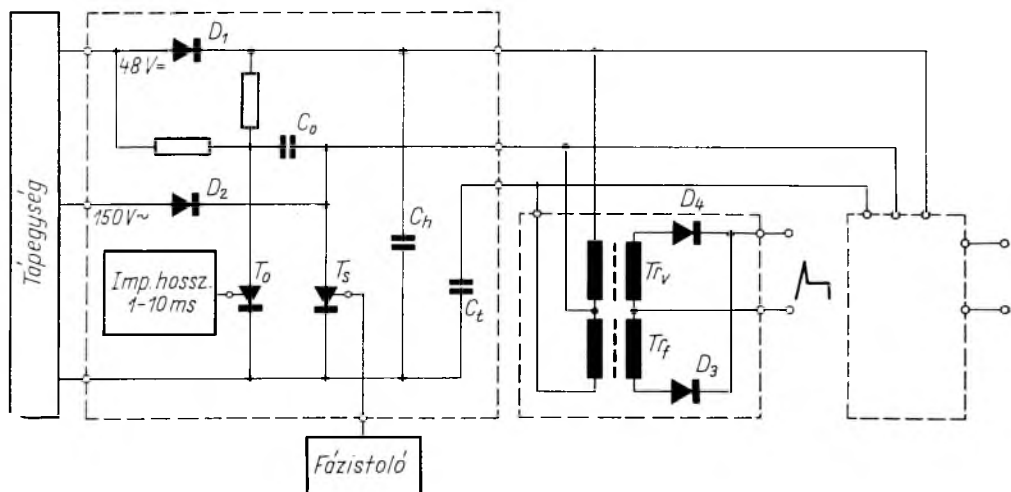
A gyenge gyűjtés veszélyessége főleg abban rejlik, hogy károsító hatása nem

szükségszerűen jelentkezik azonnal, hanem hónapok — esetleg évek — múltán okoz meghibásodást. Ennek oka, hogy az anód—katód vezetés a rács—katód körzet leggyengébb, igen kis felületű pontjáról indul és a legelső időszakban csupán ez viszi a terhelést, helyi melegedést, későbbi meghibásodást okozva. Ezzel szemben az intenzív gyújtás alkalmazása során az anód—katód vezetés a katód—rács átmenet teljes felületéből indul ki, így sokkal nagyobb katódfelület áll rendelkezésre az áram vite-
lére, ezért a vezetési csatorna túlmelegedése kisebb lesz.

Gyenge gyújtás esetén, valamint az áramkörü számításokból kiadódó és a kritikus di/dt értéket megközelítő áramnövekedési sebességnél célszerű óvatosan eljárni, és előzetes vizsgálatokkal eldönteni, hogy a tirisztorokat károsító hatás valóban fennáll-e, vagy sem. Az ilyen öregedési folyamatok vizsgálatára több módszer ismeretes, amely a tirisztor szétbontása nélküli, viszonylag egyszerű villamos mérések-
ből áll.

4. A párhuzamos üzem ellátására alkalmas gyújtókészülék

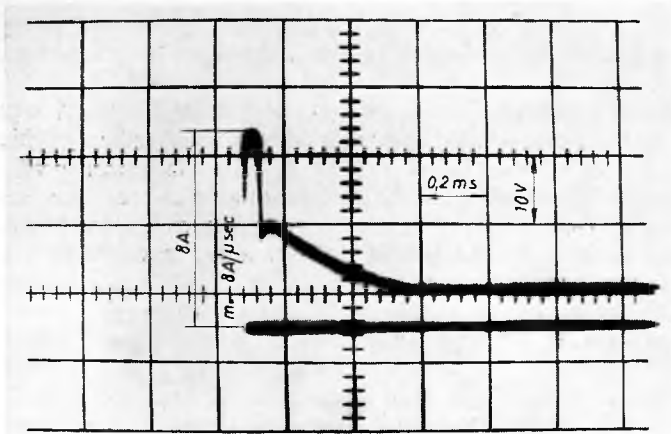
A gyújtóimpulzusról a 3. pontban közölt igényeket teljes mértékben kielégíti az 5000 A-es berendezésekben használt és a VKI által gyártott gyújtókészülék (VKI szolgálati szabadalom*). A gyújtóimpulzust előállító fokozat elvi kapcsolási rajzát mutatja a 6-10. ábra. A rajzolt egység 8—10 párhuzamosan kapcsolt tirisztor gyújtását képes ellátni. A gyújtójelet a tirisztor mellett elhelyezett Tr_v — Tr_f szigetelő- és illesztőtranszformátorok továbbítják a gyújtóelektródokhoz.



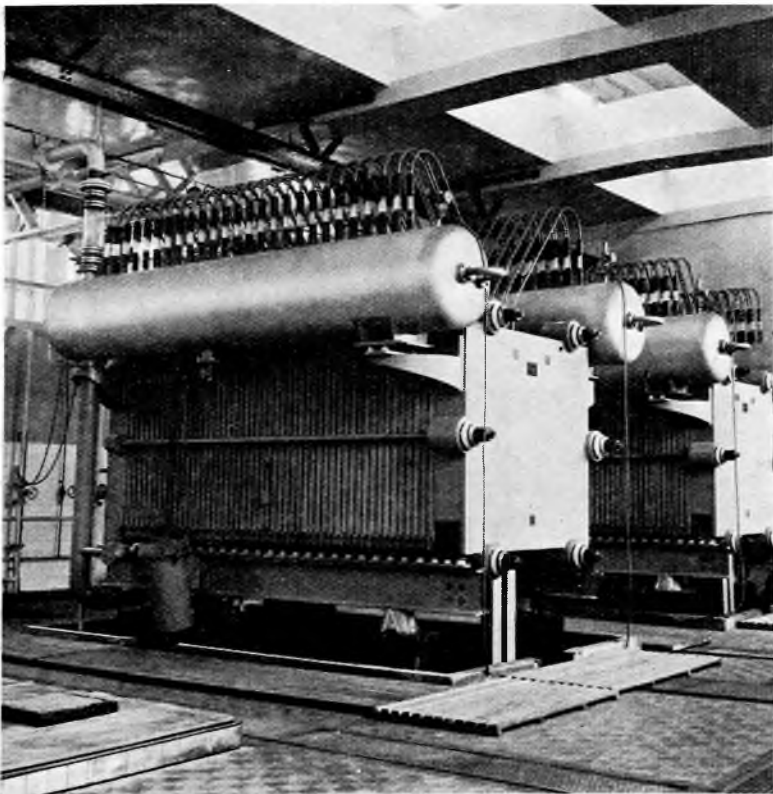
6-10. ábra

A gyújtókészülék igen intenzív és gyors felfutású gyújtójelet állít elő, amely a párhuzamosan és a sorosan kapcsolt tirisztorok gyújtására egyaránt alkalmas. A gyújtójeletről készült oszcillogramot mutatja a 6-11. ábra. A gyújtójelet tulajdonképpen két impulzus szuperponálása révén jön létre, a nagy meredekségű ($8 \text{ A}/\mu\text{s}$) és nagy

* Dr. Ganszky—Kafka: Kapcsolási elrendezés összetett alakú, nagy meredekségű gyújtójelet előállításához, több tirisztor egyidejű gyújtására. 158218. ljsz. magyar szabadalom.



6-11. ábra

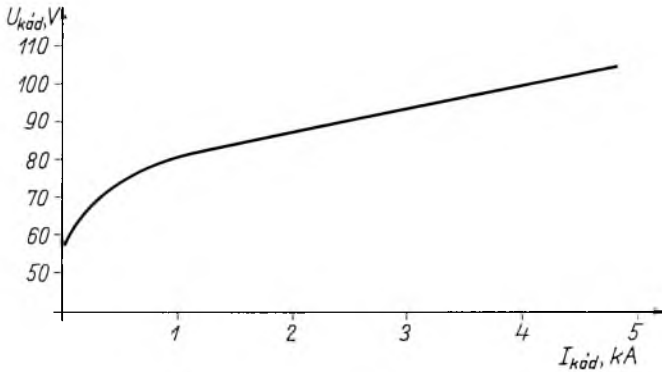


6-12. ábra

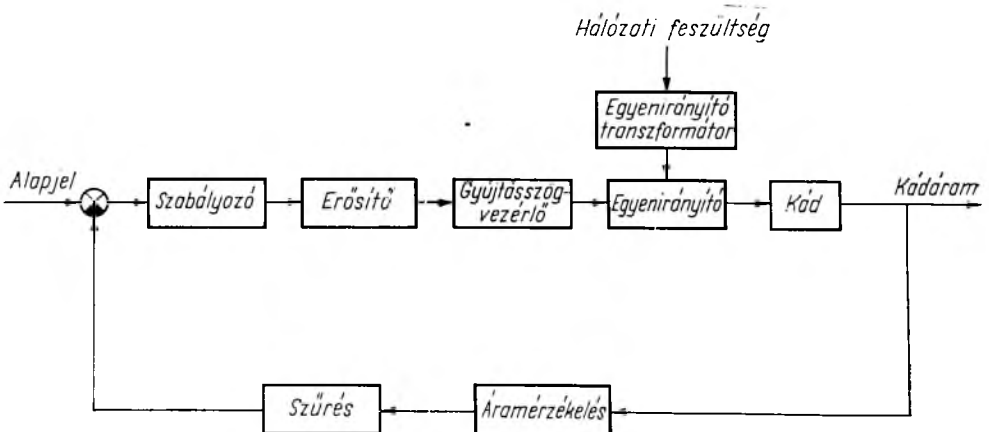
amplitúdójú (8 A) tüimpulzus négyszögimpulzusban folytatódik, amelynek amplitúdója a biztos gyújtás tartományába vezérli a tirisztort, hossza pedig szükség szerint beállítható.

A 6-10. ábrán vázolt elvi kapcsolás működése a következő: A tápfeszültségek bekapcsolása után a fázistoló által meghatározott szöghelyzetben gyűjtjük a T_s jelű segéd-tirisztort, amely egyrészt kisüti a 150 V szinuszos tápfeszültségre feltöltődött C_t kondenzátort a Tr_f nagyfrekvenciás transzformátor primer tekercsén keresztül, másrészt zárja a 48 V-os kapocsról kiinduló és Tr_v transzformátor primerjén átfolyó áramkört. E két funkció eredményeként jön létre a Tr_f szekunderén a tü-, és a Tr_v szekunderén a négyszögimpulzus, amely a D_3 és D_4 diódákon összegeződve jut a gyújtandó tirisztort gyújtóelektródjára. A T_s tirisztort oltását és egyben a négyszögimpulzus levágását a T_o oltótirisztorra adott gyújtóimpulzussal végezzük. Az ezt követő — a gyújtandó tirisztort anódjára vonatkoztatott negatív — félperiódusban az áramkör visszaáll eredeti kiindulási állapotába. Az áramkör kialakítása egyben biztosítja a Tr_v és Tr_f transzformátorok minden működés utáni visszamagnesezését.

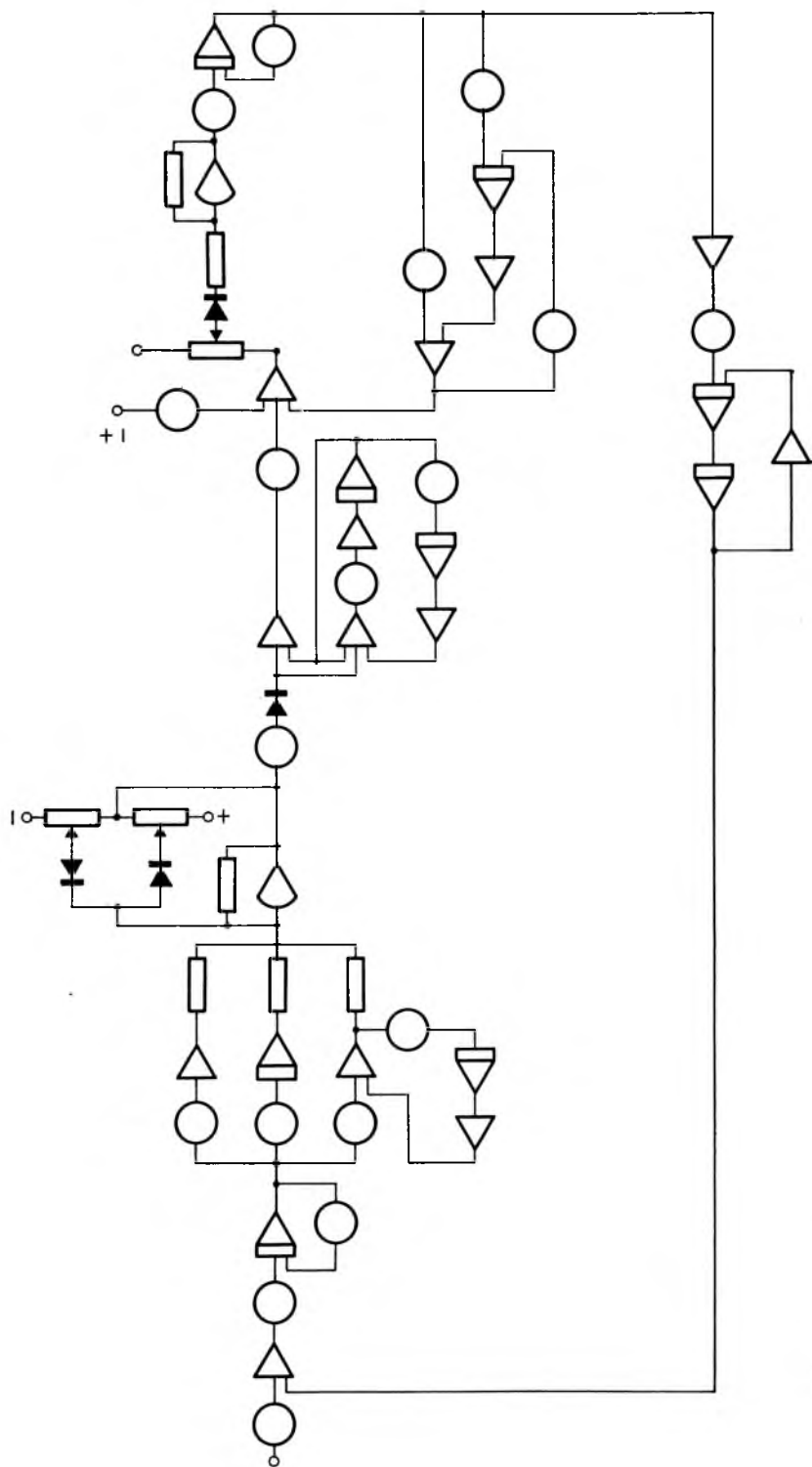
A Tr_v és Tr_f transzformátorokat, valamint a D_3 és D_4 diódákat műgyantával kiöntött egységbe, közvetlenül a gyújtandó tirisztortok közelébe helyeztük el. A gyújtókészülékek eddigi üzeme során zavarérzékenységet, hibás működésből eredő tirisztort-meghibásodást nem tapasztaltunk.



6-13. ábra



6-14. ábra



6-15. ábra

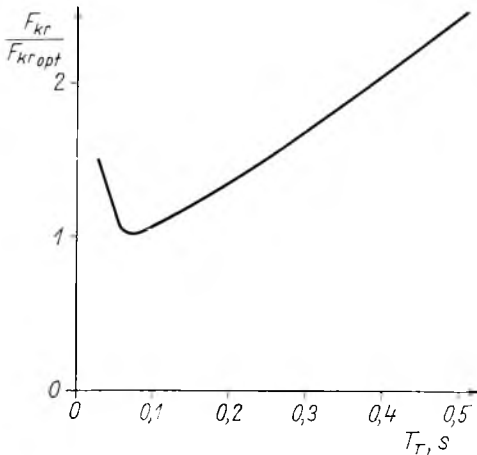
5. Az áramszabályozó kör kialakítása

Az 5000 A-es tirisztoros egyenirányítók egyenként egy-egy *Oerlikon* gyártmányú hidrolizórt táplálnak (6-12. ábra). A kádak közelítő külső jelleggörbéit l. a 6-13. ábrán. Ez az elektrolízis üzem az, ami egyrészt technológiai, másrészt konstrukciós szempontból meghatározza a berendezések szabályozásával szemben támasztott követelményeket. Az alapkövetelmény itt is, mint általában a vizes oldatok nem oldódó elektródok között történő elektrolíziseinél, 1—2% statikus pontosságú áramszabályozás. Ez az adat többnyire technológiai okokból következőleg adott, esetünkben az előírás $\pm 2\%$ volt. A szabályozással szemben támasztott dinamikus követelmények többnyire konstrukciós eredetűek és céljuk az olyan áramlökések kialakulásának elkerülése, amelyek — a kádon belül fellépő dinamikus erőhatások következtében — veszélyesek lehetnek. Konstrukciós és üzemeltetési tapasztalatok alapján általában kimondhatjuk, hogy ilyen kádméreték és kialakítás esetén legfeljebb 15...25%-os transziens árammaximumok engedhetők meg a névleges áramra vonatkoztatva, ami — figyelembe véve a kádak kis belső ellenállását — meglehetősen szigorú követelmény. A szabályozókör paramétereinek a követelményeknek megfelelő optimális beállítását célszerű analóg számológépen elvégezni. A szabályozókör blokkvázlatát a 6-14. ábra, analóg számológépi modelljét a 6-15. ábra mutatja. Az optimalizációs vizsgálatokhoz a szabályozással szembeni követelményeket egy kritériumfüggvény formájában foglaltuk össze és ennek minimumát tekintettük a szabályozás optimumának. Másodlagos jellemzőként külön értékeltük a transziens árammaximumok alakulását is. Vizsgálataink során mindvégig a *Gauss—Seidel*-féle optimumkeresési módszert követtük. Célunk nem a lehető legtökéletesebb szabályozás megalkotása volt, hanem egy olyan egyszerű felépítésű szabályozó megkeresése, amely paramétereinek optimális megválasztása következtében a gyakorlati kívánalmakat megfelelő módon ki tudja elégíteni.

A vizsgálatok eredményeként integráló jellegű, arányos egytárolós tagra felépített szabályozót választottunk. Tekintettel a három berendezés esetén nem teljesen azonos üzemi körülményekre, mind a körerősítés, mind pedig a kompenzációs időállandó szempontjából több, az optimum közelében elhelyezkedő és egyszerűen átköthető variációt építettünk be az üzembehelyezési biztonság növelésére.

A szabályozás minőségét tükröző kritériumfüggvény (F_{kr}) alakulását a kompenzációs időállandó (T_T) függvényében az optimum környezetében a 6-16. ábra mutatja, ahol a kritériumfüggvény mindenkorai értékeit az optimumhoz tartozó értékre vonatkoztatott relatív egységekben adtuk meg.

A gyakorlatilag kivitelezett formában a szabályozók tranzisztoros műveleti erősítőre felépített integráló jellegű, arányos egytárolós tagok, változtatható erősítéssel és időállandóval. A szabályozók alapjele stabilizált és hőmérséklet-kompenzált. Az ellenőrző jelet szekunder áramváltókon keresztül az egyenirányító transzformátor primer oldalára elhelyezett V-be kötött áramváltókról nyerjük. A szabályozó a gyújtásszögvezérlőhöz egy illesztőtagon keresztül csatlakozik.



6-16. ábra

7.

Időosztásos négy-negyedes szorzóáramkör

BOHUS AURÉL—IVÁNSZKY BÉLA

ÖSSZEFOGLALÁS

A mérés technikában és az automatizálás területén gyakran szükség van olyan áramkörre, amely két villamos mennyiség szorzatával arányos áramot vagy feszültséget állít elő. Például: teljesítmény távjelzés, energiamérés, nem szinuszos áram vagy feszültség effektív értékének meghatározása, szelektív feszültségmérő készítése. A cikk rövid áttekintést ad az irodalomban fellelhető szorzási elvekről, és részletesen ismerteti egy integrált műveleti erősítővel megvalósított időosztásos elv szerint működő szorzóáramkört.

ЧЕТЫРЕХ-ЧЕТВЕРТНАЯ СХЕМА УМНОЖЕНИЯ С РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ВО ВРЕМЕНИ

А. Бохус—Б. Ивански

Резюме

В измерительной технике и в области автоматики часто требуется применение схемы, которая вырабатывает ток или напряжение пропорциональное произведению двух электрических величин. Например, телесигнализация мощности, измерение электроэнергии, измерение действующего значения несинусоидального тока или напряжения, изготовление избирательного вольтметра. Статья содержит краткое описание принципов умножения, встречающихся в литературе и подробно описывает схему умножения работающую по принципу распределения во времени реализованную на операционных усилителях, содержащих интегральные схемы.

ZEITVERHÄLTNIS-VIERVIERTEL-MULTIPLIKATORSTROMKREIS

A. Bohus—B. Ivánszky

Zusammenfassung

In der Messtechnik und auf dem Gebiete der Automatisierung werden häufig Stromkreise gebraucht, die einen mit dem Produkt von 2 elektrischen Grössen proportionellen Strom oder eine Spannung herstellen. Z. B. Leistungs-Fernsignal, Energiemessung, Bestimmung des Effektivwertes des nichtsinusförmigen Stromes oder der nichtsinusförmigen Spannung, Fertigung eines selektiven Spannungszeigers. Der Aufsatz gewährt einen kurzen Überblick über die in der Literatur vorkommenden Multiplikationsverfahren und legt ausführlich einen mit integrierten Operationsverstärkern ausgeführten Multiplikatorstromkreis dar, der gemäss dem Zeitverhältnis-Prinzip funktioniert.

TIME-DIVISION FOUR-QUARTER MULTIPLIER CIRCUIT

A. Bohus—B. Ivánszky

Summary

In the field of measuring and control engineering is often required a circuit producing current or voltage proportional to the product of two electrical quantities. E. g. in case of remote signaling of power, measuring of energy, determining the r. m. s. value of non-sinusoidal currents or voltages, designing selective voltmeters, etc. A brief survey of the multiplication principles known from technical literature is given, and a new multiplier circuit composed of integrated-circuit operational amplifiers operating according to the time-division principle is described in detail.

Bevezetés

Az analóg számítástechnikában, a mérés technikában és az elektronika számos területén sok olyan feladat adódik, amelyet szorzóáramkör nélkül nem lehet megoldani. A tervező előbb-utóbb arra kényszerül, hogy valamilyen szorzóáramkört dolgozzon ki. A pontossági igények mérlegelésével számos elvi megoldás közül válogathat. A legismertebbek a következők:

- szorzás négyzetes karakterisztikájú eszközökkel;
- szorzás logaritmikus karakterisztikával;
- Hall-szorzó;
- szorzás vezérelt ellenállásokkal (szervoszorzó);
- fűrészfeszültség amplitúdó- és frekvenciamodulációján alapuló szorzó;
- időosztásos szorzó;
- szorzás vezérelt áramelosztással.

A Villamosipari Kutató Intézet 21. Osztályán felmerült feladatok megoldásához a legpontosabbnak ismert időosztásos szorzó realizálását tűztük ki célul. A cikk javarészt a kidolgozott áramkört ismerteti. A teljes áttekintés érdekében röviden ismertetjük a többi felsorolt módszer elvét is.

Az integrált áramköri technika óriási fejlődése az analóg számítástechnika területén is érezteti hatását. Gondoljunk csak az igen jó műszaki tulajdonságokkal rendelkező műveleti erősítőkre. Ma már a félvezető eszközöket gyártó vállalatok szorzóáramkört is gyártanak. A kisméretű, kompakt, jó műszaki tulajdonságokkal rendelkező szorzóáramkörök előbb-utóbb elterjednek, és áruk a digitális integrált áramköröknél tapasztalt mértékben csökkenhet, így a szorzás (valamint osztás, négyzetemelés, gyökvonás) ugyanolyan könnyen és olcsón elvégezhető művelet lesz, mint a korszerű műveleti erősítők birtokában az összeadás, kivonás. A szorzóáramkörök számos új kapcsolástechnikai lehetőséget nyújtanak, amelyeket ma még a nagy költségek miatt célszerűtlen lenne kihasználni, de a közeljövőben talán igen. A cikk befejező részében ezért az időosztásos szorzó kidolgozását indokló feladatok vázlatos ismertetése mellett néhány új kapcsolástechnikai megoldásra is kitérünk.

1. Az ismertebb szorzási elvek áttekintése

1.1 Szorzás négyzetes karakterisztikájú eszközökkel

A szorzást négyzetreemelésre, összeadásra és kivonásra vezetik vissza:

$$U_1 U_2 = 1/4[(U_1 + U_2)^2 - (U_1 - U_2)^2]. \quad (1)$$

A négyzetes karakterisztika ellenállásokból és előfeszített diódákból álló hálózattal közelíthető, de a tervezérlésű tranzisztorok négyzetes karakterisztikája is jól kihasználható [1].

Igen jó négyzetes karakterisztikát lehet kapni, ha dióda—ellenállás hálózatot műveleti erősítővel kombinálunk. Erre a célra manapság már olcsó és rendkívül jó műszaki tulajdonságú integrált műveleti erősítők állnak rendelkezésre. A tökéletes négyzetes karakterisztikára a pontosság növelése érdekében szükség is van, mivel nagy feszültségek különbségének képzésekor jelentős hiba léphet fel, ha a négyzetre-emelés pontatlan.

1.2 Szorzás logaritmikus karakterisztikájú eszközökkel

A szorzás (és osztás) összeadásra (és kivonásra) egyszerűsödik:

$$\frac{U_1 U_2}{U_3} = \exp(\ln U_1 + \ln U_2 - \ln U_3). \quad (2)$$

A logaritmikus karakterisztika legegyszerűbben ellenállásokból előfeszített diódákból álló hálózattal állítható elő. Célszerű azonban planár technológiával készült tranzisztorokat használni, ugyanis bázisfeszültség—kollektoráram karakterisztikájuk a kis áramok tartományától kezdve több dekádon át teljesen exponenciális. Ennél a szorzótípusnál [2] a legnagyobb nehézséget a hőmérsékletfüggés kompenzálása jelenti, ugyanis drága, egy Si-morzán levő tranzisztorpár szükséges hozzá, valamint nagy stabilitású műveleti erősítő, ha több dekádon át megkívánjuk a pontosságot. Elvi hátrány, hogy U_1 , U_2 , U_3 nem lehet 0, és előjelük is csak pozitív lehet.

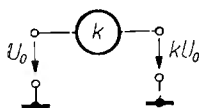
1.3 Hall-szorzó

Már régóta ismert szorzóáramkör [3]. A Hall-feszültség arányos a Hall-generátoron átfolyó árammal és a Hall-generátoron áthaladó B indukcióval: $U_H \sim BI$. Ha $I \sim U_1$ és $B \sim U_2$, akkor $U_H \sim U_1 U_2$. Az első követelményt ($I \sim U_1$) még a 0...1 MHz frekvenciasávban is könnyű teljesíteni. A $B \sim U_2$ arányosságot nagy pontossággal széles frekvenciasávban nehéz realizálni. Konstans U_2 feszültség esetén ugyanis a gerjesztőtekeres által létrehozott B indukció a tekercs induktivitása következtében a frekvencia növekedésével csökken. Ezt többféle módon lehet megkerülni. Az egyik lehetőség az, hogy modulátorok segítségével U_2 frekvenciasávját magasabb frekvenciasávba transzponálják át, így a gerjesztőtekeres relatív frekvenciaváltozása kis értéken tartható. Másik lehetőség az, hogy U_2 feszültséggel vezérelt áramgenerátort alakítanak ki. A mai modern integrált műveleti erősítők ebben igen nagy segítséget nyújtanak, mivel így 1...10 kHz sávzélesség könnyen megvalósítható. A Hall-szorzó másik fő problémája a hőmérsékletfüggés kompenzálása.

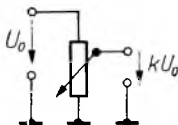
1.4 Szorzóáramkörök vezérelt ellenállással

A szorzóáramkörök nagy csoportját alkotják [4]. A szorzáshoz ún. együttthatókörök kelleneek. Az együttthatókör elvi jelölését a 7-1. ábra mutatja. Jellemzője az, hogy az U_0 bemeneti feszültséget k konstansszal szorozza, amely konstans U_0 -tól függetlenül állítható. A legegyszerűbb megvalósítási lehetőség a 7-2. ábrán látható potenciométer, a k konstans a potenciométer szögelfordulásával arányos. A szorzás, ill. osztás elvi elrendezése a 7-3. ábra szerinti.

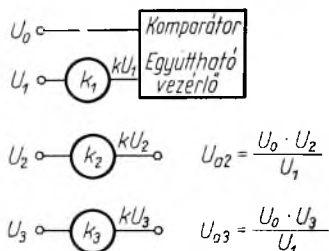
A komparátor és együttthatóvezérlő $kU_1 = U_0$ egyenlőséget állít be, valamint a k_2, k_3 együttthatóköröket úgy vezérli, hogy valamennyi további U_2, U_3 feszültség



7-1. ábra



7-2. ábra



7-3. ábra

ugyanazzal a k konstansszal szorozódják. Az elrendezés legegyszerűbb megvalósítási formája több közös tengelyű helipot. A szorzót szervoszorzóként ismerik. A helipotok tengelyét szervomotor hajtja, a szervomotor szabályozását a komparátor végzi a $kU_1 - U_0 = 0$ egyenlőségnek megfelelően. A szorzás pontossága a potenciométerek együttfutási és a komparátor beállítási pontosságától függ. Az $U_2, U_3 \dots$ feszültségek sáv szélessége azonban a szervomotor lassúsága miatt néhányszor 10 Hz. Sokkal elegánsabb a megoldás, ha az együttthatókörök potenciométereit nem mechanikusan, hanem elektronikusan valósítják meg. Az elektronikus potenciométerekben az osztóellenállások értéke nem függ a rájuk kapcsolt feszültségtől, a potenciométerek „csúszkáinak” helyzetét a bemeneti feszültséggel arányos mágneses vagy elektromos tér, ill. fényintenzitás változtatja. Az eszközök a következők lehetnek:

- mágnesesen vezérelt ellenállás (mistor, Feldplatte);
- izzólámpával, glimmlámpával, világítódiodával vezérelt fotoellenállás;
- térvezérlésű tranzisztorok kimenő impedanciája kis drain—source feszültségtartományban, a gate-feszültséggel vezérelve.

A vezérelt ellenállásokkal megvalósított szorzóáramkörök frekvenciatartománya az eszköztől függően néhányszor 10 Hz-től néhányszor 10 kHz-ig terjed. A térvezérlésű tranzisztoros megoldás integrált áramkörös formában is elképzelhető.

1.5 A vezérelt áramelosztáson alapuló szorzó

E szorzófajta [5] alapeleme a 7-4. ábrán látható differenciálerősítő. Ha $U_y = 0$, az U_x feszültséggel arányos emitteráram a két tranzisztor között egyenlően oszlik meg, a kimeneti feszültség 0. Ha U_y pozitív, T_1 árama növekszik, T_2 -é csökken, kimeneti feszültség negatív. A kollektoráram-különbség annál nagyobb, minél nagyobb az emitteráram, azaz minél nagyobb U_x és minél nagyobb U_y . A kollektorellenállásokon létrejövő feszültségkülönbség U_a , így U_x és U_y szorzatával arányos.

A részletes számítás azt mutatja, hogy ha U_x jóval nagyobb, mint a tranzisztorok U_{BE} bázis—emitter feszültsége, akkor a kollektoráramok különbsége:

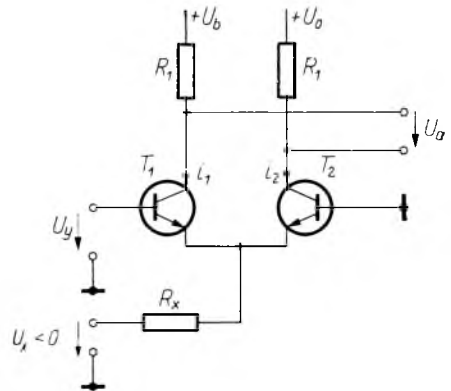
$$i_2 - i_1 = \frac{U_x}{R_x} \operatorname{th} \frac{U_x}{2U_T} \quad U_a = R_1(i_2 - i_1), \quad (3)$$

U_T a Boltzmann-feszültség.

Az $U_y \ll U_T$ feltételezéssel a tangens hiperbolikus szorbafejthető és

$$U_a \approx \frac{R_1}{2U_T R_x} U_x U_y. \quad (4)$$

A 7-4. ábra szerinti kapcsolás tehát a bemeneti feszültségek szorzatával arányos kimeneti feszültséget szolgáltat. U_y előjele tetszőleges lehet, de amplitúdója kb. ± 10 mV, ha a nemlineáris torzítások nem léphetek túl az 1%-ot. U_x mindig negatív, különben a tranzisztorok lezárnak, ezenkívül jóval nagyobb, mint a tranzisztorok 0,6 V körüli bázis—emitter feszültsége. Az U_x -re vonatkozó előjelkorlát megszüntethető, ha differenciálerősítővel egy második differenciálerősítőt kapcsolnak párhuzamosan, amelynek emitteráramát U_x az előzőével ellenütemben vezérli. Az U_y kis tartománya azért zavaró, mert U_y ekkor összemérhető a differenciálerősítő offset feszültségével, és a szorzó driftje számottevő lesz. Ezért U_y feszültséget diódák exponenciális karakterisztikáját felhasználva logaritmálják, utána vezetnek a szorzást elvégző differenciálerősítő bemenetére. Így U_y megengedett tartománya kb. ± 10 V-ra nő és az offset feszültséggel kapcsolatos problémák megszűnnek. A logaritmusképzés miatt a (3) képletből a tangens hiperbolikus kiesik, a (4) képlet közelítés nélkül igaz. Az így módosított kapcsolás csak tranzisztorokat, diódákat, ellenállásokat tartalmaz, ezért monolitikus integrált áramkör formájában is gyártani tudják. Legismertebb típus a Motorola MC 1495 típusszámú áramköre, de valamennyi nagyobb félvezető gyár gyárt már ilyen áramkört. Az MC 1495 bemeneti feszültség tartománya ± 10 V, sávszélessége nagyjelű üzemben 100 kHz, nullpontdriftje $1 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Pontossága 1%, amelyet a kívülről hozzákötendő ellenállások szabnak meg. Kiviteli formája 14 kivezetésű DIP. Néhány ellenállással és egy műveleti erősítővel kiegészítve szorzó, négyzetre emelni, osztani, reciprokot képezni, gyököt vonni lehet vele (l. 3. pont).

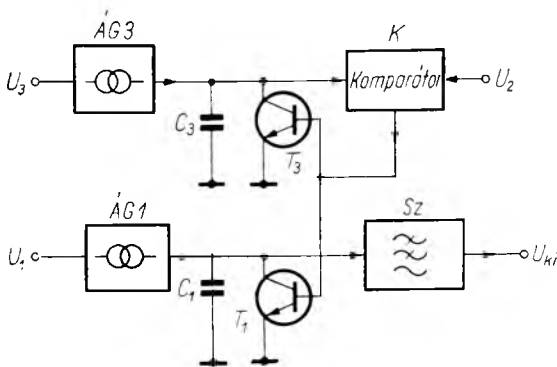


7-4. ábra. A vezérelt áramelosztásos szorzó elve

1.6 Fűrészfeszültség amplitúdó- és frekvenciamodulációjával működő szorzóáramkörök

A szorzóáramkörök egyik csoportját alkotják [6]. Elvi vázlatuk a 7-5. ábrán látható.

A C_1 és C_3 kondenzátorok konstans árammal töltődnek az $\dot{A}G_3$ és $\dot{A}G_1$ áramgenerátorokról. Az áramgenerátorok forrásáramának nagyságát U_3 és U_1 feszültségek szabják meg. Amikor C_3 feszültsége U_2 -vel lesz egyenlő, a komparátor bebillen és nyitja T_1 , T_3 tranzisztoros kapcsolókat, amelyek C_1 és C_3 kondenzátorokat kisütik.



7-5. ábra. A fűrészfeszültség-szorzó elve

Ezután a folyamat C_1 és C_3 újratöltésével előlről kezdődik, a kondenzátorokon fűrészfeszültség alakul ki. A fűrészfeszültség frekvenciája U_3 feszültséggel egyenesen, U_2 -vel fordítottan arányos. A C_1 kondenzátoron kialakuló fűrészfeszültség amplitúdóját U_1 és U_3 határozza meg. A kondenzátor feszültségét az Sz aluláteresztő szűrő átlagolja. Az U_{ki} kimeneti feszültség:

$$U_{ki} = K \frac{U_1 U_2}{U_3}. \quad (5)$$

A kapcsolással tehát, attól függően, hogy melyik feszültség konstans a három közül, szorozni vagy osztani lehet. A művelet pontossága a fűrészfeszültség linearitásától, azaz az áramgenerátorok jóségától függ.

2. Időosztásos négynegyedes szorzóáramkör

(Time-division four-quadrant multiplier)

A lehetséges szorzási módszerek áttekintése után az Intézet 21. Osztályán megvalósított időosztásos szorzóáramkört ismertetjük. Az időosztásos szorzó *előnyei* a következők:

- a legpontosabbnak ismert szorzási elv;
- működése az összes megoldások közül a legkevésbé függ az alkatrészek szórástól, öregedéstől, a hőmérséklettől, időben nagyon stabil;
- aránylag könnyen realizálható, túl speciális alkatrészeket nem igényel;
- négynegyedes szorzó, azaz a szorzat előjelét minden bemenő feszültség előjelkombinációra helyesen adja;
- könnyen kalibrálható, drifttulajdonságai jók;
- megengedett bemeneti- és kimenetifeszültség-tartománya elegendően nagy.

Hátrányai:

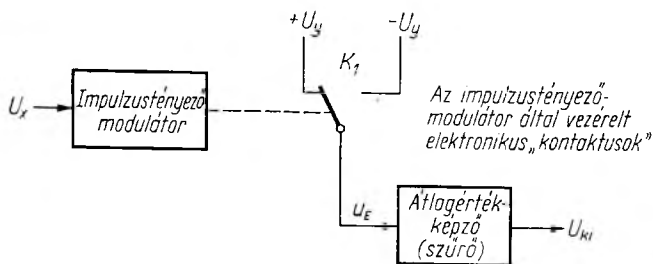
- nagyobb frekvenciák szorzására (5 kHz felett) korlátozott sáv szélessége és a benne levő szűrő fázistolása miatt nem megfelelő.

2.1 Az időosztásos szorzás elve, a szorzó tömbvázlata

Az időosztásos szorzó, más elnevezéssel impulzustényező—impulzusamplitúdó modulátor működési elvét a 7-6. ábra tömbvázlata segítségével követhetjük végig.

A tömbvázlat szerinti K_1 elektronikus kapcsoló periodikusan működik, t_1 ideig a rajzolt helyzetben, t_2 ideig átváltott állapotban van. Nyugalomban $+U_y$, átváltott helyzetben $-U_y$ feszültséget kapcsol az átlagértékképző szűrő bemenetére. A szűrő kimenő feszültsége a 7-7. ábra szerint a feszültség—idő területek alapján számolva:

$$U_{ki} = \frac{F_1 - F_2}{t_1 + t_2} = \frac{t_1 - t_2}{t_1 + t_2} U_y.$$



7-6. ábra. Az időosztásos szorzó blokkvázlata

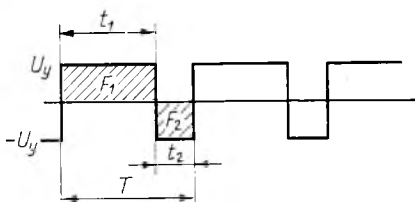
Az impulzustényező modulátor a t_1 és t_2 kapcsolási időket állítja elő. Ha az U_x bemenő feszültség és a kapcsolási idők között a következő arányosság áll fenn:

$$\frac{t_1 - t_2}{t_1 + t_2} = KU_x, \quad (6)$$

vagyis a periódusra vonatkoztatott jel—szünet különbség az U_x feszültséggel arányos, akkor az átlagértékképző szűrő kimeneti feszültsége

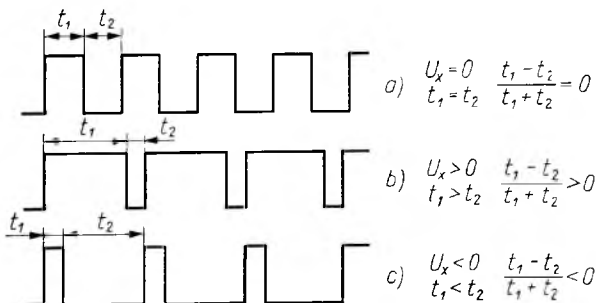
$$U_{ki} = \frac{t_1 - t_2}{t_1 + t_2} U_y = KU_x U_y, \quad (7)$$

a két bemeneti jel szorzatával arányos. A 7-6. ábra szerinti elrendezésben tehát az egyik bemenő jel (U_x) az átlagértékképző szűrőre jutó impulzussorozat kitöltési tényezőjét, a másik bemenő jel (U_y) pedig az amplitúdóját modulálja. A szorzó négynegyedes, azaz a szorzat előjele minden bemeneti feszültség minden előjelkombinációjára helyesen adódik, mert U_x előjelének változásával az impulzusok $t_1 - t_2$ időkülönbségének előjele, U_y előjelének változásával az impulzusok fázisa változik meg. Így mindkettő a 7-7. ábra szerinti feszültség—idő területek átlagának előjelét változtatja. Az impulzustényező-modulátor U_x előjelével való változását a 7-8. ábrán vázoltuk fel.



7-7. ábra. Az átlagértékképző szűrő bemeneti feszültsége

Az impulzustényező-modulátor működési frekvenciája általában nem konstans, a kivezérléstől függ (vö. (18) képlet). Legnagyobb akkor, ha a modulálófeszültség 0. Akár pozitív, akár negatív irányban növekszik U_x , a modulátor frekvenciája mindenképpen csökken. A modulátor frekvenciájának változása önmagában semmilyen módon nem befolyásolja a pontosságot és a linearitást, ezeket egyedül a kitöltési tényező alakulása határozza



7-8. ábra. Az impulzustényező-modulátor jelalakjai

meg. Az eddigiekben feltételeztük, hogy a modulálójel egyenfeszültség, de ha az

$$f_{\min} = \frac{1}{T_{\max}} = \frac{1}{(t_1 + t_2)_{\max}} \gg f_{\text{mod max}} \quad (8)$$

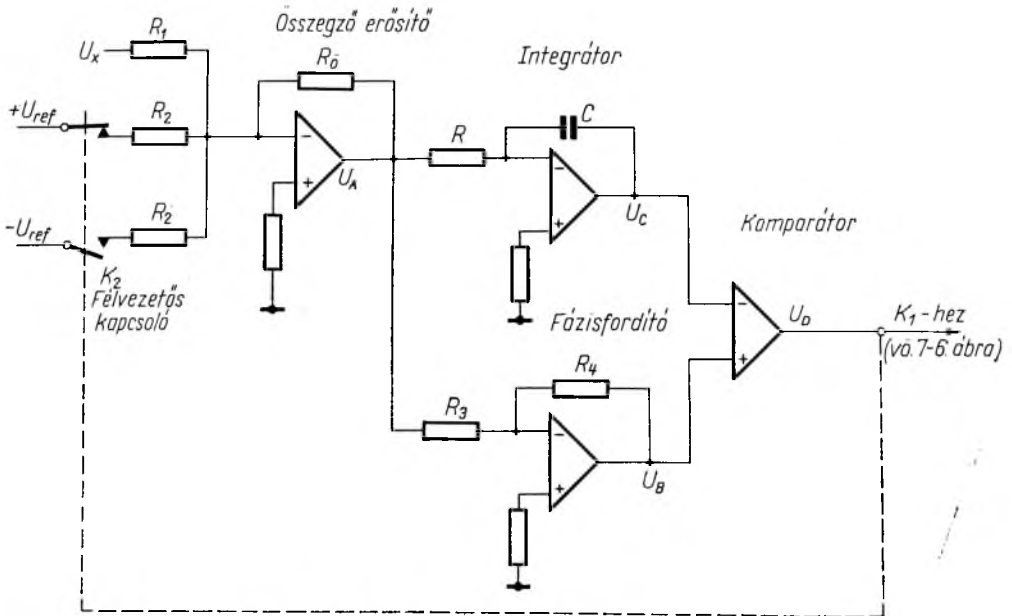
feltétel teljesül, azaz a kivezélés során fellépő legkisebb modulátorfrekvencia is elegendően nagyobb a legnagyobb modulálófrekvenciánál, akkor váltakozófeszültségeket is szorozhatunk. Az átlagértékképző szűrő feladata, hogy a kapcsolási frekvenciát kiszűrje. Határfrekvenciáját olyan kicsire kell választani, hogy az impulzustényező-modulátor legnagyobb kivezélése esetén létrejövő legkisebb modulátorfrekvenciára is elegendő szűrést biztosítson. A szűrő fázistolást okoz, ezért határfrekvenciája viszont elegendően nagy legyen, hogy a szorzó átviteli sávjában jelentős fázistolás ne keletkezzék. A számítások szerint e két, egymásnak ellentmondó követelmény úgy elégíthető ki, hogy 5 kHz szorzó sáv szélesség mellett a szűrő határfrekvenciája 7 kHz körüli, a szűrő vágási meredeksége 80 dB/dekád, a modulátor alappfrekvenciája 50 kHz, amely maximális kivezélés esetén 25 kHz-re csökkenhet le.

A továbbiakban a szorzóáramkör tömbvázlata szerinti elemeinek realizálását ismertetjük.

2.2 Az időosztásos szorzó áramkörei

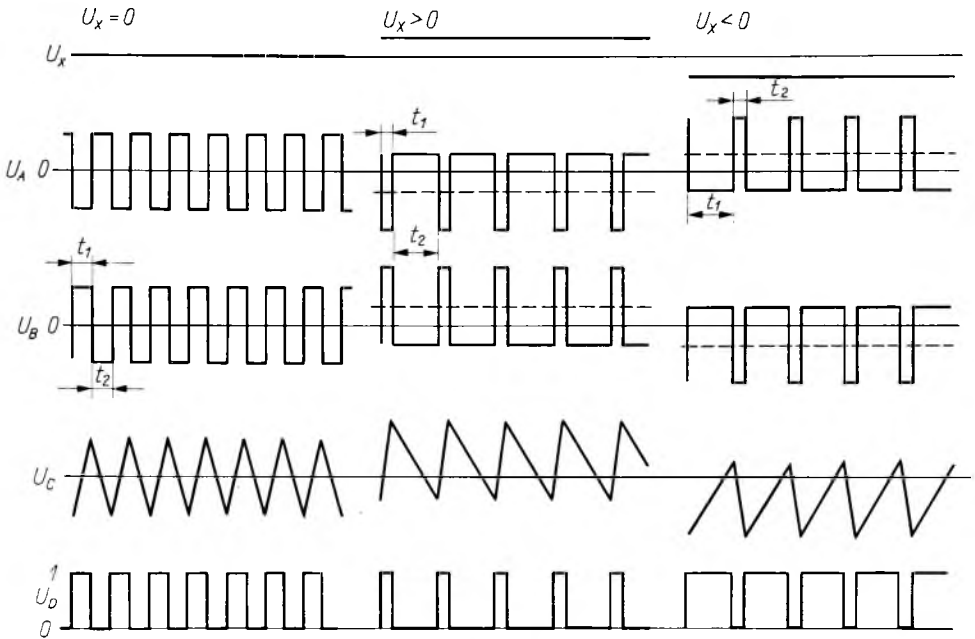
Az impulzus-tényező modulátor

Az impulzustényező-modulátor realizálására számos kapcsolástechnikai lehetőség áll rendelkezésre. Sok esetben vasmagtelítéses üzemmódban dolgozó blocking-oszcillátort alkalmaznak. A tekercsre kapcsolt konstans feszültség hatására a mágnesezőáram időben lineárisan emelkedik. A telítési indukció elérésekor a kapcsolás a visszacsatolás hatására átbillen. A modulálófeszültségnek a konstans feszültség-



7-9. ábra. Az impulzustényező-modulátor elvi kapcsolása

hez való hozzáadásával, ill. levonásával a (6) képlet szerinti kapcsolási időmoduláció érhető el. A modulációt úgy is meg lehet oldani, hogy egy segédtekercsrel (a modulálófeszültséggel arányos árammal) a vasmag munkapontját változtatjuk. A blocking-oszcillátoros megoldás nagy előnye, hogy a modulálójel és az elektronika galvanikus elválasztását könnyű megoldani. Szívesen alkalmazott impulzustényező-modulátor megoldás a vezérelt astabil multivibrátor. Legmegfelelőbb erre a célra az emitter-



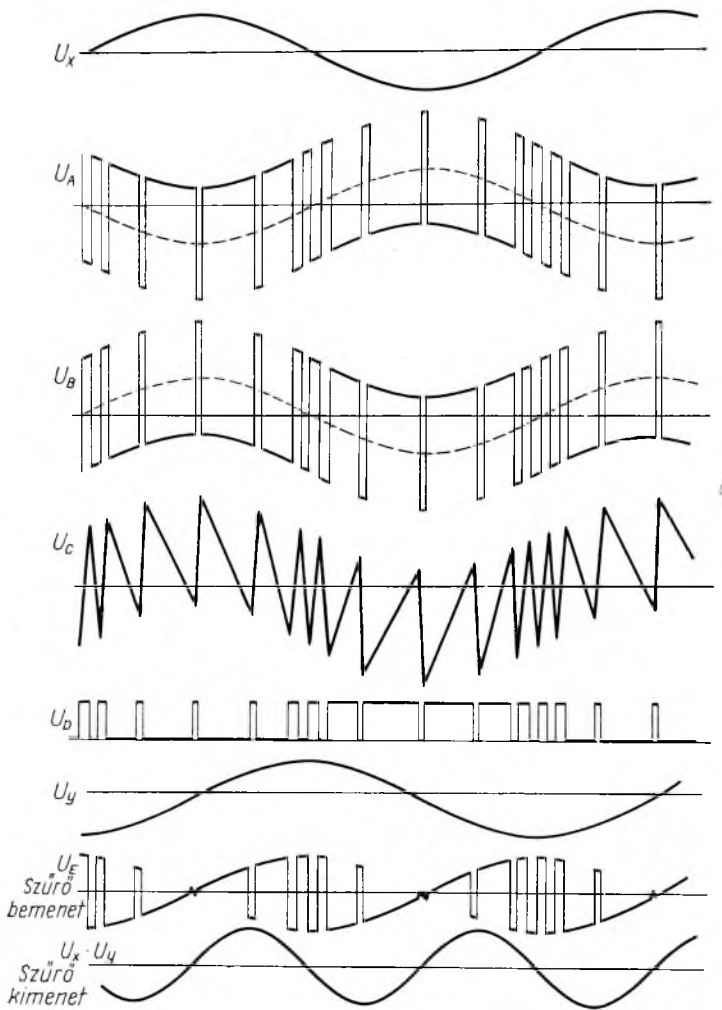
7-10. ábra. Az impulzustényező-modulátor jelalakjai, ha U_x bemeneti feszültség egyenfeszültség

csatolt multivibrátor [7], [8]. A multivibrátor tranzistorainak emittereit két áramgenerátorral táplálják. Ha az áramgenerátorok forrásáramainak különbsége a modulálófeszültséggel arányos, akkor a kapcsolási idők modulációja a (6) képlet szerinti lesz.

Mi az impulzustényező-modulátort integrált műveleti erősítők segítségével kívántuk megoldani. Ma már a félvezetőpiacon igen jó műszaki tulajdonságokkal rendelkező műveleti erősítők kaphatók olcsón, szinte már „tranzistoráron”. Műveleti erősítők felhasználásával a diszkrét alkatrészekből épített áramkörnél jobb műszaki tulajdonságokkal rendelkező modulátort lehet építeni, nem sokkal drágábban. A modulátor elvi kapcsolása a 7-9. ábrán látható.

Az összegzőerősítő egyik bemenetét az U_x modulálófeszültség hajtja meg. A másik két bemenetre a komparátor által vezérelt K_2 elektronikus „váltó” érintkező a komparátor állapotától függően, vagy az U_{ref} referenciafeszültséget, vagy annak negáltját kapcsolja. Az összegzőerősítő kimenő jelét a fázisfordító invertálja és az integrátor integrálja, kimenő feszültségeiket a komparátor hasonlítja össze. Mindig, amikor az integrátor emelkedő vagy csökkenő kimenő jele a fázisfordítóval egyező értékűvé válik, a komparátor ellenkezőjére változtatja logikai állapotát és reverzálja a K_2 kapcsolót. A komparátor egyúttal a szorzóáramkör K_1 kapcsolóját

is átváltja (l. 7-6. ábra). Az impulzustényező-modulátor jelalakjai a 7-10. és 7-11. ábrákon követhetők végig. A K_2 (és K_1) kapcsoló t_1 ideig nyugalmi, t_2 ideig átváltott állapotban van. A következőkben írjuk fel az áramkör pontjain a t_1 és t_2 idők alatt mérhető feszültségeket.



7-11. ábra. Az impulzustényező-modulátor jelalakjai, ha a bemeneti feszültség szinuszos

Az összegzőerősítő kimeneti feszültsége:

$$U_A^{t1} = -\left(\frac{R_0}{R_1} U_x + \frac{R_0}{R_2} U_{ref}\right) + U_{öd},$$

$$U_A^{t2} = -\left(\frac{R_0}{R_1} U_x - \frac{R_0}{R_2} U_{ref}\right) + U_{öd}. \quad (9)$$

A fázisfordító erősítő kimenő feszültsége:

$$\begin{aligned}
 U_B &= -\frac{R_4}{R_3} U_A + U_{fd}, \\
 U_B^{t_1} &= \frac{R_4}{R_3} \left(\frac{R_0}{R_1} U_x + \frac{R_0}{R_2} U_{ref} - U_{\odot d} \right) + U_{fd}, \\
 U_B^{t_2} &= \frac{R_4}{R_3} \left(\frac{R_0}{R_1} U_x - \frac{R_0}{R_2} U_{ref} - U_{\odot d} \right) + U_{fd}.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Az előbbi képletekben $U_{\odot d}$ és U_{fd} -vel jelöltük az erősítők offset feszültsége és árama, ill. ezek driftje miatt a kimenetükön létrejövő hibafeszültséget.

Az integrátor kimeneti feszültségének változása, feltételezve, hogy az U_x modulálójel frekvenciája jóval kisebb a minimális $f_{min} = 1/(t_1 + t_2)_{max}$ modulátor frekvenciánál:

$$\begin{aligned}
 \Delta U_c &= -\frac{t}{RC} U_A, \\
 \Delta U_c^{t_1} &= \frac{t}{RC} \left[\frac{R_0}{R_1} U_x + \frac{R_0}{R_2} U_{ref} - U_{\odot d} \right]_0^{t_1}, \\
 \Delta U_c^{t_2} &= \frac{t}{RC} \left[\frac{R_0}{R_1} U_x - \frac{R_0}{R_2} U_{ref} - U_{\odot d} \right]_0^{t_2}.
 \end{aligned} \tag{11}$$

Induljunk ki abból az állapotból, hogy K_2 éppen alaphelyzetben van. Ez az állapot úgy jött létre, hogy a komparátor az integrátor kimeneti feszültségét a t_2 idő végén a fázisfordító $U_B^{t_2}$ kimeneti feszültségével egyezőnek találta. A komparátor tehát alaphelyzetbe billent és alaphelyzetbe vezérelte K_2 -t. A fázisfordító kimeneti feszültsége ezért $U_B^{t_2}$ -ről $U_B^{t_1}$ -re vált, az integrátor kimeneti feszültsége nem ugrik, $U_B^{t_2}$ -ről $\Delta U_c^{t_1}$ változással tart $U_B^{t_1}$ felé. A t_1 idő elteltével az integrátor kimenete „utoléri” a fázisfordító kimenetét:

$$U_B^{t_2} + \Delta U_c^{t_1} + U_{kd} = U_B^{t_1} + U_{kd}.$$

A komparátor átbillen, K_2 -t átváltja. A komparálási hiba U_{kd} . Behelyettesítve és rendezve:

$$\frac{t_1}{RC} \left(\frac{R_0}{R_1} U_x + \frac{R_0}{R_2} U_{ref} - U_{\odot d} \right) = 2 \frac{R_4}{R_3} \frac{R_0}{R_2} U_{ref}. \tag{12}$$

A fázisfordító kimeneti feszültsége most $U_B^{t_1}$ -ről $U_B^{t_2}$ -re vált, az integrátor kimeneti feszültsége $U_B^{t_1}$ -ről $\Delta U_c^{t_2}$ változással tart $U_B^{t_2}$ felé. A t_2 idő végén:

$$U_B^{t_1} + \Delta U_c^{t_2} + U_{kd} = U_B^{t_2} + U_{kd}.$$

Behelyettesítve és rendezve:

$$\frac{t_2}{RC} \left(-\frac{R_0}{R_1} U_x + \frac{R_0}{R_2} U_{ref} - U_{\odot d} \right) = 2 \frac{R_4}{R_3} \frac{R_0}{R_2} U_{ref}. \tag{13}$$

A (12) és (13) egyenletekből az impulzustényező kifejezhető:

$$m = \frac{t_1 - t_2}{t_1 + t_2} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{U_x}{U_{ref}} + \frac{R_2}{R_0} \frac{U_{\odot d}}{U_{ref}} = -k U_x + U_h. \tag{14}$$

Az impulzustényező tehát az U_h hibatagtól eltekintve a kívánt módon változik az U_x modulálófeszültséggel. Az arányossági tényező $k = \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{U_{ref}}$, így a modulátor (és az egész szorzó) az R_1 vagy R_2 ellenállások valamelyikének változtatásával kalibrálható. Az impulzustényező független az integrátor időállandójától és a modulátor működési frekvenciájától. A szorzó driftjét (l. U_h hibatag) az összegzőerősítő határozza meg, a komparátor, a fázisfordító és az integrátor driftje kiesik. A negatív előjel csak annyit számít, hogy a szorzó K_1 kapcsolóját K_2 -vel ellenfázisban, azaz a komparátor negált jelével kell működtetni. A (12) és a (13) egyenletekből a működési idők kifejezhetők.

K_2 nyugalmi (és K_1 átváltott) helyzetének ideje:

$$t_1 = 2RC \frac{R_3}{R_4} \frac{1}{1 - \frac{R_2}{R_1} \frac{U_x}{U_{ref}} + \frac{R_2}{R_0} \frac{U_{öd}}{U_{ref}}}. \quad (15)$$

K_2 átváltott (és K_1 nyugalmi) helyzetének ideje:

$$t_2 = 2RC \frac{R_3}{R_4} \frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_1} \frac{U_x}{U_{ref}} - \frac{R_2}{R_0} \frac{U_{öd}}{U_{ref}}}. \quad (16)$$

Az impulzustényező-modulátor periódusideje:

$$t_1 + t_2 = 4RC \frac{R_3}{R_4} \frac{1}{1 - \left(\frac{t_1 - t_2}{t_1 + t_2} \right)^2} = T_0 \frac{1}{1 - m^2}. \quad (17)$$

A működési frekvencia:

$$f = f_0(1 - m^2); \quad f_0 = \frac{1}{4RC} \frac{R_4}{R_3}. \quad (18)$$

A (17) és (18) egyenletekből az alábbi következtetések vonhatók le. Ha U_x modulálófeszültség nulla és az összegzőerősítő offset beállítása megtörtént, akkor a kapcsolási idők egyenlők, $m=0$. A modulátor frekvenciája ekkor a legnagyobb (f_0). A modulátor alaphfrekvenciáját az integrátor időállandója szabja meg, de a fázisfordító (R_4/R_3) erősítésének változtatásával korrigálni lehet. Akár pozitív, akár negatív a modulálófeszültség, a modulátor frekvenciája a kivezérlés fokával mindenképpen csökken. A (18) képletből kiszámítható, hogy a modulátorfrekvencia akkor csökken az alaphfrekvencia felére, ha a kivezérlés $m = \frac{\sqrt{2}}{2}$. A 14. képletből a szorzó U_x kivezérlési tartománya:

$$|U_x| \leq \frac{\sqrt{2}}{2} U_{ref}. \quad (19)$$

Az átlagértékképző szűrő

Az impulzustényező-modulátor által vezérelt K_1 kapcsoló (l. 7-6. ábra) az U_y szorzandó feszültséget, ill. annak negáltját kapcsolgatja az átlagértékképző szűrő bemenetére. A szűrő bemeneti és kimeneti jeleit a 7-11. ábrán is feltüntettük. A szűrő bemeneti jelének az impulzustényezője a (14), a frekvenciája a (18) képlet szerint

változik az U_x modulálófeszültséggel. Az impulzusok amplitúdóját U_y modulálja. A szűrő bemenetén a szorzat frekvenciaspektruma mellett a kapcsolási frekvencia és annak felharmonikusai is megtalálhatók. Az aluláteresztő szűrő határfrekvenciájának alkalmas megválasztásával különböző tulajdonságú szorzóáramkörök nyerhetők. Ha az aluláteresztő szűrő határfrekvenciája akkora, hogy a szűrő az előforduló legkisebb kapcsolási frekvenciára is elegendő csillapítást nyújt, de a határfrekvencia mégis nagyobb a szorzandó feszültségek frekvenciaspektrumának legnagyobb frekvenciájánál, akkor a szűrő kimenetén a szorzat-jelalak vehető le. Ebben az esetben a szűrő határfrekvenciáját és vágási meredekségét úgy kell megválasztani, hogy a kimenő jel hullámossága és a szűrő fázistolása a várható legnagyobb szorzatfrekvencián előírt érték, ill. annál kisebb legyen. Megválasztható a határfrekvencia úgy is, hogy a szűrő ne csak a kapcsolási frekvenciát, hanem a szorzat váltakozó komponenseit is levágja és csak az egyenáramú komponenszt engedje át. Ez az eset teljesítménymérésnél fordul elő [7], [8]. Az aluláteresztő szűrő frekvenciamenetét általános esetben a következő képlet írja le [11]:

$$A = A_0 \frac{1}{1 + a_1 P + a_2 P^2} \frac{1}{1 + b_1 P + b_2 P^2} \dots, \quad (20)$$

ahol A_0 az egyenáramú erősítés;
 P a normált komplex frekvencia;

$$P = \frac{p}{\omega_g} = j \frac{\omega}{\omega_g} = j \frac{f}{f_g},$$

p a Laplace-operátor;
 $\omega_g; f_g$ a szűrő határfrekvenciája;
 a_1, a_2, b_1, b_2 a nevező polinom valós együtthatói.

A szűrő fokszámán (n) a nevező polinomban a szorzás elvégzése után nyerhető legnagyobb P hatvány kitevőjét értjük. A szűrő határfrekvencia feletti csillapítás—frekvencia karakterisztikájának aszimptotája $n \cdot 20$ dB/dekád. A szűrő áteresztő sávbeli csillapításingadozását, ill. azt, hogy a határfrekvencia felett milyen módon közelítse meg a karakterisztika az aszimptotát, a nevező polinom együtthatóinak alkalmas megválasztásával lehet befolyásolni. A gyakorlatban használt szűrőtípusok: a kritikus csillapítású-, Butterworth-, a Bessel- és Csebisev-szűrő.

A *Butterworth-szűrő* karakterisztikája az átviteli sávban a lehető „legvízszintesebben” fut, a határfrekvencia felett élesen vág. A bemenetre adott négyyszög-feszültség hatására a kimeneti jelen kismértékű túllövés jelentkezik, amely a szűrő fokszámának növekedésével megnagyobbodik.

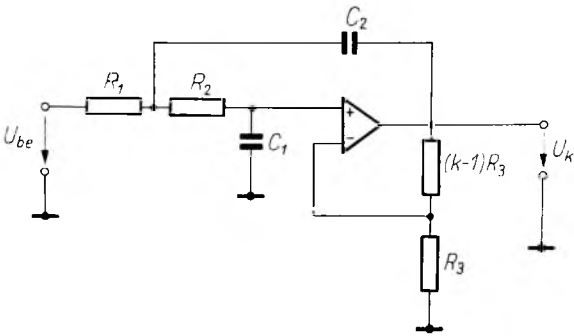
A *Bessel-szűrő* négyyszögátvittele optimális. A szűrőn áthaladó jelekre a késleltetési idő széles frekvenciasávban konstans, azaz a fáziseltolás a frekvencia növekedésével arányosan növekszik. Így a négyyszögátvitel túllövésmentes, de a szűrő a határfrekvencia felett nem vág olyan élesen, mint a Butterworth-szűrő.

A *Csebisev-szűrő* határfrekvencia feletti vágási meredeksége az összes szűrőtípus közül a legnagyobb. Az erősítés az áteresztő sávban nem konstans, hanem állandó amplitúdójú hullámossága van. Adott fokszámú szűrőnél minél nagyobbra választjuk a levágási meredekséget, annál nagyobb az áteresztősávbeli hullámosság. A négyyszögátvitelt nagy túllövés jellemzi.

A szűrőtípus kiválasztása során a következőképpen jártunk el. Egyrészt a 2.1. pont szerinti megfontolások eredményeképpen az impulzustényező modulátor-alapfrekvenciáját 50 kHz-re választottuk, amely még μA 709 műveleti erősítő alkalmazását is lehetővé teszi a modulátorban [15], [2]. Ha a megengedett legnagyobb

modulációs tényező $m = \sqrt{2}/2$, akkor kivezélés közben a modulátorfrekvencia 25 kHz-nél jobban nem csökken le, lásd (18) képlet. 5 V-os referenciafeszültség esetén U_x tartománya $-3,5 \text{ V} < U_x < +3,5 \text{ V}$; vö. (19).

Az U_x feszültség frekvenciatartománya 0...5 kHz. Ha 5 kHz-en már megengedünk 3 dB amplitúdóesést, akkor a szűrő határfrekvenciája 5 kHz. A szűrőnek tehát



7-12. ábra. Aktív aluláteresztő szűrő alapkapcsolása

5 kHz és 25 kHz között legalább 40 dB-t kell vágni ahhoz, hogy a modulátor legnagyobb kivezélése esetén se legyen a szorzó kimenő jelének hullámossága 1%-nál nagyobb. A fenti követelményeket negyedfokú Csebisev-, vagy Butterworth-szűrővel lehet kielégíteni. A Csebisev-szűrő az átteresztő sávbéli csillapításingadozás és a nagy túllövés miatt nem megfelelő. Végül is negyedfokú Butterworth-szűrőre esett a választás. Ez a szűrőtípus kielégíti a csillapításigényeket és a 12% túllövése a legtöbb alkalmazási helyen elhanyagolható.

A szűrő realizálására két lehetőség van. Az egyik megoldás szerinti áramkör pontos értékű kondenzátorokat és induktivitásokat tartalmaz. Főleg az utóbbi miatt nem választottunk passzív LC szűrőt. Az ilyen szűrő ráadásul még meghatározott ohmos lezárásokat is igényel. Sokkal kézenfekvőbb integrált műveleti erősítők birtokában passzív RC elemekből és műveleti erősítőkből álló aktív szűrőt építeni. Tekintsük a 7-12. ábrán látható kapcsolást.

A műveleti erősítő $+k$ erősítésre van visszacsatolva. A kapcsolás átvitele:

$$A = \frac{k}{1 + P\omega_g[R_1 C_1 + R_2 C_1 + (1 - k) R_1 C_2] + P^2 \omega_g^2 R_1 R_2 C_1 C_2}$$

Ha az erősítő erősítését egységnyinek, az R_1 és R_2 ellenállásokat azonosnak választjuk, akkor az átvitel:

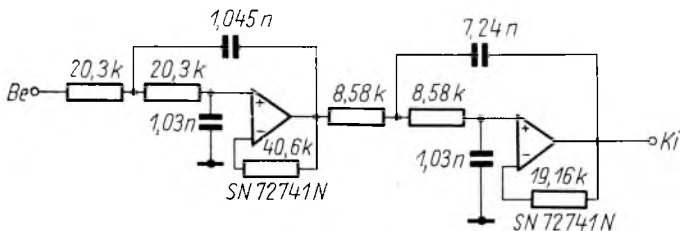
$$A = \frac{1}{1 + 2P\omega_g R C_1 + P^2 \omega_g^2 R^2 C_1 C_2} \quad (R_1 = R_2 = R \text{ és } k = 1). \quad (21)$$

Az aluláteresztő szűrő frekvenciamenetét meghatározó átviteli függvényt tehát a 7-12. ábra szerinti kapcsolással realizálni lehet. A (20) általános képlet egy-egy „törtjének” megvalósításához egy-egy 7-12. ábra szerinti kapcsolás szükséges. A (21) és a (20) egy-egy törtjének együtharthatóösszehasonlításából a következő adódik:

$$A_0 = 1 \quad C_1 = \frac{a_1}{4\pi f_g R} \quad \text{és} \quad C_2 = \frac{a_2}{\pi f_g R a_1},$$

ill.

$$C'_1 = \frac{b_1}{4\pi f_g R} \quad \text{és} \quad C'_2 = \frac{b_2}{\pi f_g R b_1}, \quad (22)$$



7-13. ábra. Negyedfokú Butterworth-aluláteresztő szűrő

Az $a_1 \dots b_2$ együtthatók értéke a szűrő fokszámától és a szűrő típusától függ. Butterworth-szűrők együtthatói 1—4 fokszámig a következők:

n	a_1	a_2	b_1	b_2
1	1,000	0,000	0,000	0,000
2	1,414	1,000	0,000	0,000
3	1,000	0,000	1,000	1,000
4	1,848	1,000	0,765	1,000

A szorzóhoz a korábbi megfontolások alapján negyedfokú Butterworth-szűrő szükséges. A szűrő elemei R és a határfrekvencia felvételével, valamint az együtthatók ismeretében a (22) képletek alapján kiszámíthatók. A kiadódó szűrőkapcsolás a 7-13. ábrán látható.

A szűrő mért karakterisztikáját a 7-14. ábra mutatja.

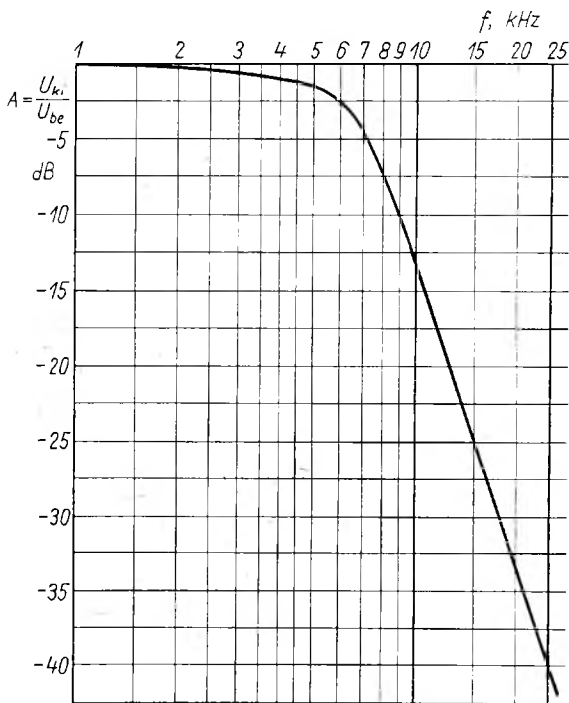
A félvezetős kapcsolók

A szorzóáramkörben két helyen kell alkalmaznunk gyorsműködésű félvezetős analóg kapcsolókat, egyik az impulzustényezőmodulátor, a másik az U_y és $-U_y$ feszültségeket kapcsoló amplitúdómodulátor. A félvezetős kapcsolók tranzisztossal, fettel, ill. mosfettel valósíthatók meg. Ez egyes eszközök előnye és hátránya a következő:

- a tranzisztor olcsó, gyors, de a többi eszközhöz képest maradékfeszültsége nagy, a változó potenciálon levő tranzisztor vezérlőáramát nehéz biztosítani és, mivel inverz üzemmódban érdemes működtetni, ezért tetszőleges

polaritású feszültséget nem lehet azonos pontossággal és sebességgel kapcsolni vele;

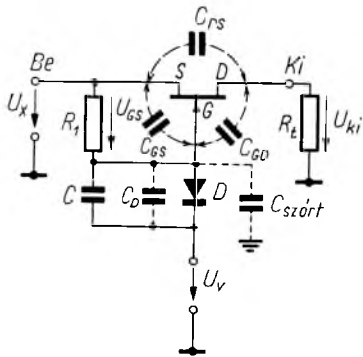
- a záróréteges fet maradékfeszültsége tetszőlegesen kicsivé tehető, a kikapcsolási/bekapcsolási ellenállásviszony nagy, a változó potenciálon levő gate—source



7-14. ábra. Negyedfokú Butterworth-aluláteresztő csillapítás karakterisztikája

közötti vezérlőfeszültséget könnyű biztosítani, mivel a gate áramot nem fogyaszt, adott határok között tetszőleges polaritású feszültség kapcsolható. Problémát jelent az elektródakapacitások feltöltődéséből és kisüléséből adódó sebességi korlát leküzdése;

— a mosfet maradékfeszültsége — éppen úgy, mint a feté — tetszőlegesen kicsivé tehető, a kikapcsolási/bekapcsolási ellenállásviszony igen nagy, a változó potenciálon levő gate—source közötti vezérlőfeszültséget könnyű biztosítani, mert a gate elektromosan szigetelve van a csatornától, az eszköz igen gyors. Igen drága viszont, és gate—substrat túlfeszültségvédelmet igényel, különben könnyen tönkremegy.



7-15. ábra. Záróréteges fet mint analóg kapcsoló

A szorzóáramkörben 2N 48 56A típusú n-csatornás záróréteges fettel és 2N 3993A p-csatornás záróréteges fettel építettünk kapcsolókat. A két eszköz működése azonos, csak a be- és kikapcsolási vezérlőfeszültség polaritása ellentétes. Továbbiakban az n-csatornás fet kapcsoló működését magyarázzuk. A kapcsoló elvi kapcsolása (vezérlőáramkör nélkül) a 7-15. ábrán látható.

A fet drain—source csatornaellenállása az U_{GS} gate—source feszültséggel a következőképpen változik [12]:

$$R_{DS} = \frac{-U_p}{2I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_p}\right)}, \quad (23)$$

ahol U_p az ún. elzáródási (pinch-off) feszültség, I_{DSS} pedig az $U_{GS}=0$ feszültség mellett folyó csatornaáram. Mindkettő az adott fet típusára jellemző érték. A fet nyitásához a gate—source feszültséget 0-vá kell tenni. (A gate a source-hoz képest pozitívba nem vezérelhető, mert ez az eszköz tönkretenetelét okozhatja.) Ekkor a bekapcsolási csatornaellenállás:

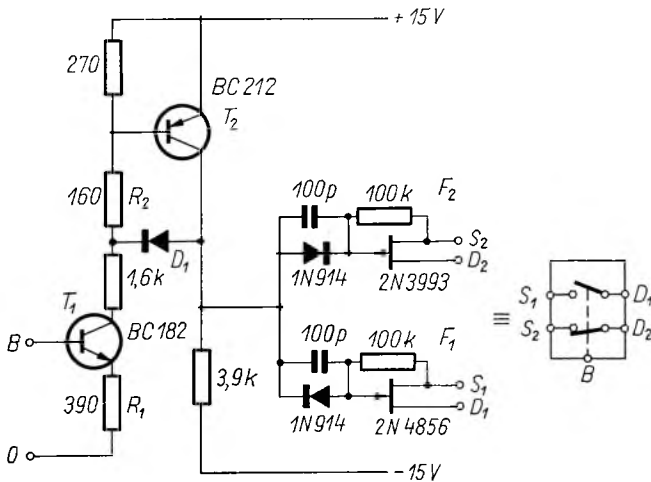
$$R_{DS} = \frac{-U_p}{2I_{DSS}}.$$

A 2N 4856 A típusra ez az érték 25Ω . A bekapcsolt állapot úgy érhető el, hogy bekapcsoláskor az U_v vezérlőfeszültség a változó nagyságú és polaritású U_x bemenő feszültségnél mindenkor pozitívabb, ± 5 V kapcsolandó feszültségtartomány esetén pl. $+10$ V. Bekapcsoláskor tehát $U_v > U_x$, a gate—source dióda kinyitását D dióda akadályozza meg, ugyanis lezár, ha U_v pozitívabb, mint U_x . A fet kikapcsolásához a gate-nak legalább U_p feszültséggel negatívabbnak kell lennie a source-nál. A (23) képlet szerint ugyanis, ha $U_{GS}=U_p$, akkor R_{DS} elvileg végtelen, gyakorlatilag $10^{10} \dots 10^{12} \Omega$. A 2N 4856 fet-re $U_p = -2,5 \dots -5,0$ V, tehát ± 5 V kapcsolandó feszültségtartomány esetén a kikapcsoláshoz tartozó U_v vezérlőfeszültség legalább -10 V. A lezáró feszültség a nyitott D diódán át kerül a gate-re.

A fet átkapcsolások esetén mutatott dinamikus viselkedését a csatornaellenálláson kívül a belső elektródakapacitások határozzák meg. Ezeket a 7-15. ábrán szaggatott vonallal rajzoltuk be. Általában nem koncentrált, hanem elosztott paraméterű, feszültségfüggő kondenzátorokról van szó. Kikapcsoláskor ezek a kapacitások a D dióda dinamikus ellenállásán, az U_v vezérlőfeszültséget előállító áramkör belső ellenállásán keresztül töltődnek. Ha ez kicsi, akkor a kikapcsolási idő rövid. Bekapcsoláskor a gate—source feszültség negatív értékről közelítőleg 0-ig változik.

Mivel a vezérlőfeszültség negatívból pozitívba váltásakor a D dióda lezár, a gate—source kör nyitottá válik és a feltöltött elektróda kapacitások csak a gate—source szivárgási ellenálláson át tudnak kisülni. Mivel ez $10^{10} \Omega$ nagyságrendű, ezért a bekapcsolási idő túl hosszúvá adódna. Ezen a problémán segít a 7-15. ábrán a gate—source-val párhuzamosan kapcsolt R_1 ellenállás, amely a fet bekapcsolásakor az elektróda kapacitásokat kisüti. Az átkapcsolások pillanatában a gate—source között kialakuló kezdőfeszültséget a C_D dióda kapacitás és a fet szórt kapacitásaiból kialakuló feszültségosztó határozza meg. A leosztás mértékét a diódával párhuzamosan kapcsolt C külső kondenzátorral lehet lecsökkenteni. Az elektróda kapacitásokból további átviteli problémák is adódnak (pl. átcsatolás, frekvencia elzáródás), ezekkel itt most nem foglalkozunk. A p-csatornás fet működése hasonló, csak a fet pozitív U_{GS} feszültségre zár le, és negatívra nyit. A D dióda polaritása fordított. A fetek vezérlésére vezérlőáramkört kell kialakítani, amely biztosítja, hogy a komparátor TTL logikai szintjeit $+10\text{ V}$ és -10 V nagyságrendű be- és kikapcsolási feszültségekké játsszuk át. Emellett gyorsnak és kis kimenő impedanciájúnak kell lennie. A vezérlőáramkört a vezérelt fetekkel együtt a 7-16. ábra mutatja.

Ha a B bemeneten „0” logikai szint ($0 \dots 0,8\text{ V}$) van, T_1 zár vagy kismértékben vezet, árama nem elég T_2 nyitásához, T_2 kollektorán -15 V feszültség mérhető. Ekkor F_1 n-csatornás fet zárva, F_2 p-csatornás fet nyitva van. A váltóérintkező a rajzolt alaphelyzetben marad. Ha a B bemenetre „1” logikai szintet ($+2,4\text{ V} \dots +5\text{ V}$) adunk T_1 árama annyira megnő, hogy T_2 a telítés határára vezérlődik. T_2 telítését az R_2 és D_1 diódából ismert módon kialakított telítésgátló megoldás biztosítja. A nyitott T_2 kollektorán kialakuló $\sim +15\text{ V}$ feszültség F_2 fetet lezárja, F_1 -gyet kinyitja. A bemenetre adott logikai „1”-re a váltóérintkező átvált.

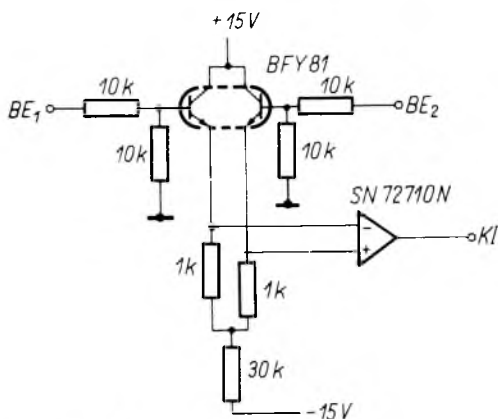


7-16. ábra. Félvezetős váltóérintkező fettel

A kapcsolás gyors működését a kisértékű ellenállások mellett a tranzisztorok telítés nélküli működtetése biztosítja. T_2 telítését az R_2 , D_1 ; T_1 telítését pedig az R_1 emitterellenállás szünteti meg. A kapcsolóval kapcsolható feszültségtartomány $\pm 7,5\text{ V}$, a B bemenetre adott bekapcsolási—kikapcsolási parancsot az áramkör $100 \dots 200\text{ ns}$ késleltetéssel követi. A bekapcsolási ellenállás $25 \dots 300 \Omega$, a kikapcsolási ellenállás $> 10\text{ M}\Omega$.

A komparátor

A komparátor az impulzustényező-modulátor integrátorának és invertáló erősítő-jének kimenő jelét hasonlítja össze (l. 7-9. ábra). Kimenetén logikai „1” jelszint alakul ki, ha az integrátor kimeneti feszültsége negatívabb, mint az invertáló erősítőé, és logikai „0”, ha az integrátor kimenet az invertáló erősítő kimeneténél pozitívabb. A komparátor kimenete a 7-6. és 7-9. ábrán látható és a 7-16. ábra szerint megvalósított félvezetős kapcsolókat vezérli.



7-17. ábra. A komparátor

hasonlítandó feszültségeket erősen terhelnék. Ezért a komparátorbemenetek elé impedanciatranszformáló emitterkövető fokozatot tettünk. A kapcsolás a 7-17. ábrán látható.

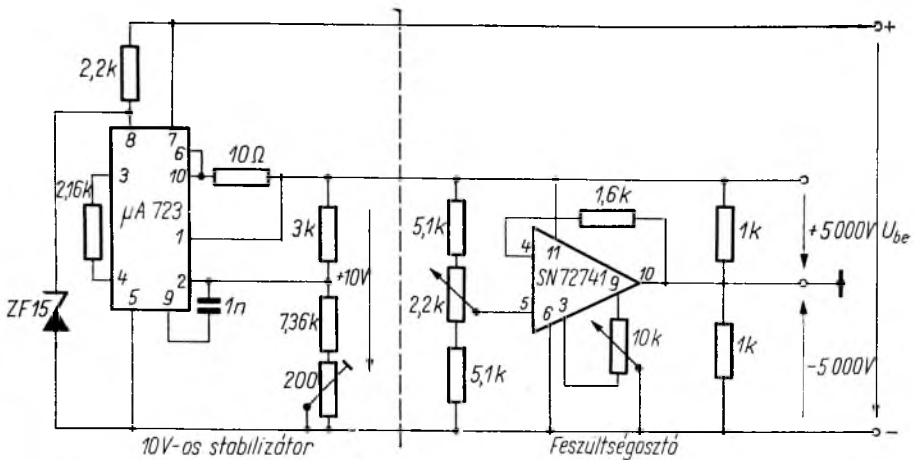
A referenciaszültségek előállítása

A $+U_r$ és $-U_r$ referenciaszültségeket kisebb igények esetén Zener-diódákkal állíthatjuk elő. Ha a pontossági követelmények nagyobbak, akkor a Zener-diódákat egyrészt hőkompenzálni kell, másrészt a terheléstől való függetlenítés és $+U_r$, ill. $-U_r$ egyforma abszolút értékének pontos beállítása érdekében műveleti erősítőkkel kell kombinálni.

Sokkal jobb megoldáshoz lehet jutni integrált feszültségstabilizátorok felhasználásával. Ezek a stabilizátorok (pl. μA 723) igen jó műszaki tulajdonságokkal rendelkeznek, a kimeneti feszültség a bemeneti feszültséggel, a hőmérséklettel és a terheléssel igen kis mértékben változik [15]. Ezenkívül rövidzárvédelemmel is el vannak látva.

A referenciaszültségek pontosságának biztosítására igen nagy gondot fordítottunk, mert nemcsak a szorzóáramkörben, hanem a szorzóáramkört felhasználó műszer más áramkörében is szükségünk volt igen pontos referenciaszültségekre. A megvalósított kapcsolást a 7-18. ábra mutatja.

A kapcsolás egyik része a μA 723-mal felépített stabilizátor, amely 20...30 V bemenő feszültségből igen pontos 10 V-ot állít elő. Ezt a feszültséget az SN 72741N műveleti erősítő feszültségkövető kapcsolásban megfelezi. A műveleti erősítő kimenete földelve van, így a stabilizátor kimenő kapcsain $+5$ V és -5 V referenciaszültségek vehetők le.



7-18. ábra. A referenciatesztés-áramkör

A kapcsolás nagy bemeneti feszültség elnyomási tényezőjét (kb. 120 dB) az biztosítja, hogy a μA 723 műveleti részének tápfeszültségét a ZF 15 Zéner-dióda stabilizálja. Az áramkör terhelése konstans, de biztonság céljából a kimenetek 1 k Ω -mal vannak terhelve. Így 5 mA terhelés változásra a kimeneti feszültség 0,1 mV-ot változik. A μA 723 nagyfokú hőmérséklet-függetlenséget ($3 \cdot 10^{-5}/^{\circ}C$) biztosít. A hőmérséklet-érzékenységét tovább lehet fokozni, ha a μA 723-at termosztátba helyezzük (l. 7-19. ábra). A termosztát az μA 723-ra ráhúzott alumínium tönk, amelynek a hőmérsékletét a ráerősített teljesítménytranszisztor által disszipált teljesítmény szabályozásával tartjuk állandó értéken (kb. 50 $^{\circ}C$).

2.3. A megépített szorzóáramkör

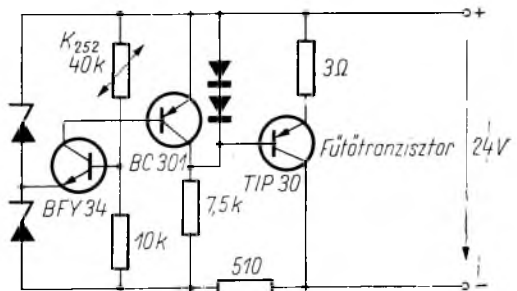
A szorzóáramkör elvi kapcsolása és beállítása

A 7-20. ábrán a szorzóáramkör teljes elvi kapcsolását rajzoltuk meg. Lényegében a 7-6., 7-9., 7-13. ábrákat rajzoltuk egybe, kiegészítve a működés szempontjából lényeges, de az eddigi magyarázatok szempontjából érdektelen alkatrészekkel (offset beállító, kalibráló, szimmetriabeállító potenciométerek, a műveleti erősítők frekvenciakompenzáló elemei). A félvezetős kapcsolókat, a komparátort és a referencia tápegységet nem rajzoltuk ki, ezek helyére a 7-16., 7-17., és 7-18. ábra szerinti kapcsolásokat kell gondolni.

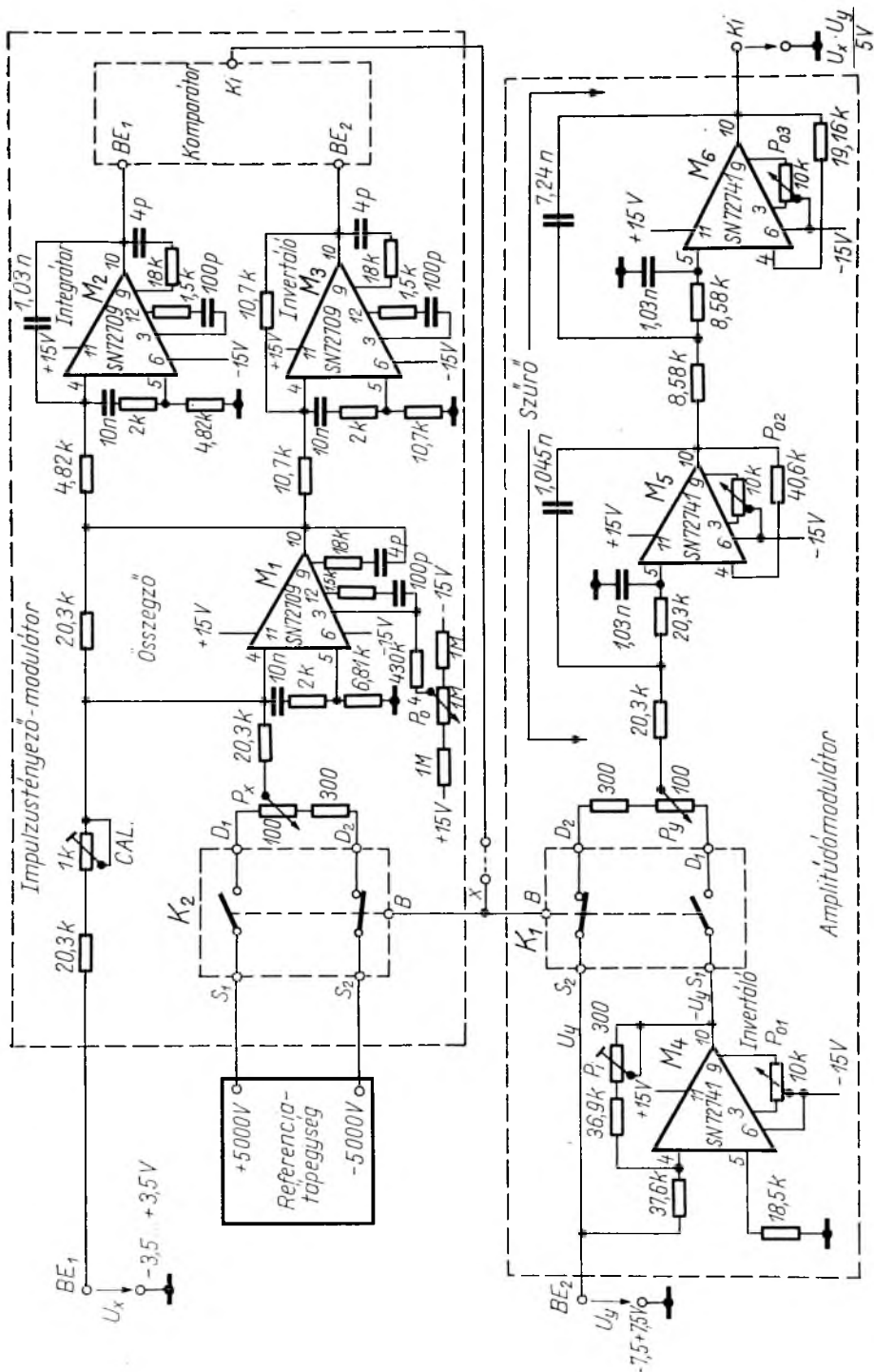
A 7-20. ábrán minden műveleti erősítők mellé odaírtuk a kapcsolásban betöltött szerepét. A szorzóáramkör beállítása a következő lépésekben történt:

— az X átkötést eltávolítva K_1 kapcsoló bemenetére 0-t kapcsolunk. Ekkor K_1 a rajzolt állapotban marad;

— $U_y = 0$ bemeneti feszültség esetén a P_{01} , P_{02} , P_{03} offset beállító potenciométerekkel az M_4 , M_5 , M_6 műveleti erősítők kimeneteit sorban és rendre 0-ra állítjuk;



7-19. ábra. A referenciatesztés tápegység termosztátáramköre



7-20. ábra. A szorzóáramkör elvi kapcsolása

$U_y = +7,5$ V bemeneti feszültség esetén az U_y invertáló (M_4) műveleti erősítő erősítését pontosan -1 -re állítjuk úgy, hogy P_1 potenciométerrel az erősítő kimenetén $-7,5$ V-ot állítunk be;

— a K_1 kapcsoló vezérlőbemenetéről a 0-t lekapcsoljuk, helyette segédáramkörből TTL logikai szintek mellett 50 kHz-es 1:1 kitöltési tényezőjű négyszögjelet kapcsolunk. Az U_y bemenetre $+7,5$ V-ot vagy $-7,5$ V-ot adva a P_y potenciométerrel a szorzóáramkör kimenetét kinullázzuk. A P_y potenciométer a K_1 félvezetős váltóérintkező bontó- és zárórészének bekapcsolási ellenállásait egyenlíti ki;

— a K_2 kapcsoló vezérlőbemenetét 0-ra kapcsoljuk. A referenciátápegységet leválasztjuk, $+5$ V és -5 V helyett 0-t adunk be. Az U_x bemenetre is 0-t kapcsolunk. A P_{04} potenciométerrel az M_1 összegezőerősítő offset-null beállítását elvégezzük;

— a referenciátápegységet visszakapcsoljuk, az X átkötést visszahelyezzük. Az U_x bemenetre 0-t, az U_y bemenetre $+7,5$ V-ot vagy $-7,5$ V-ot kapcsolunk. A P_x potenciométerrel a K_2 kapcsolót szimmetrizáljuk úgy, hogy a szorzóáramkör kimenetét nullázzuk;

— az U_x bemenetre pontos 3 V-ot, az U_y -ra pontos 5 V-ot kapcsolunk és a szorzóáramkört a CAL potenciométerrel kalibráljuk úgy, hogy a kimeneten 3 V-ot állítunk be;

— a kalibrálást (U_x)=3 V és (U_y)=5 V esetén valamennyi bemeneti előjelkombinációra ellenőrizzük. A P_x , P_y és CAL potenciométerekkel esetleg utána állítunk.

Mérési eredmények

a) Statikus karakterisztika

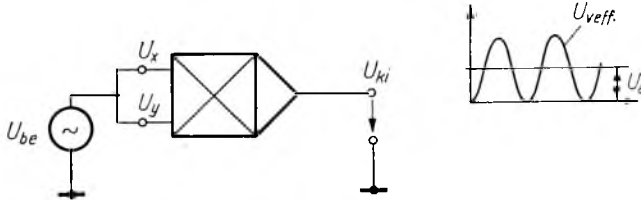
A szorzóáramkör bemeneteire egyenfeszültségeket kapcsolva kimértük a szorzóáramkör statikus karakterisztikáját. A mérési eredmények közül néhányat az alábbi táblázatban közlünk. A táblázatban megadjuk az $\frac{U_x U_y}{5V}$ képlet szerint számított névleges kimenőfeszültségtől való eltéréseket is mV-ban.

$U_y U_x$	0	+0,5	+1,0	+2,0	+3,0	-0,5	-1,0	-2,0	-3,0
0	0	-0,003 -3	-0,003 -3	-0,003 -3	-0,002 -2	-0,003 -3	-0,003 -3	-0,003 -3	-0,003 -3
+0,5	-0,003 -3	+0,049 -1	+0,099 -1	+0,198 -2	+0,298 -2	-0,051 -1	-0,101 -1	-0,201 -1	-0,301 -1
+2,0	-0,007 -7	+0,204 +4	+0,404 +4	+0,802 +2	+1,197 +3	-0,195 +5	-0,397 +3	-0,800 0	-1,202 -2
+4,0	-0,010 -10	+0,407 +7	+0,808 +8	+1,601 +1	+2,396 -4	-0,390 +10	-0,793 +7	-1,596 +4	-2,406 -6
+6,0	-0,020 -20	+0,612 +12	+1,210 +10	+2,402 +2	+3,597 -3	-0,583 +17	-1,183 +17	-2,391 +9	-3,604 -4
-0,5	-0,003 -3	-0,054 -4	-0,104 -4	-0,203 -3	-0,302 -2	+0,046 -4	+0,096 -4	+0,197 -3	+0,299 -1
-2,0	+0,005 +5	-0,206 -6	-0,407 -7	-0,805 -5	-1,199 +1	+0,193 -7	+0,394 -6	+0,798 -2	+1,201 -1
-4,0	+0,011 +11	-0,413 -13	-0,814 -14	-1,607 -7	-2,401 -1	+0,386 -14	+0,789 -11	+1,595 -5	+2,404 -4
-6,0	+0,017 +17	-0,622 -22	-1,220 -20	-2,411 -11	-3,601 -1	+0,577 -23	+1,178 -22	+2,389 -11	+3,603 -3

b) A szorzó frekvenciaátvittele

A szorzó frekvenciaátvitelét a 7-21. ábra szerinti négyzetreemelő kapcsolásban mértük. Ha mindkét bemenetet szinuszos feszültséggel hajtjuk meg, akkor a kimeneti feszültség:

$$U_{ki} = \frac{U_{be}^2}{5V} = \frac{\hat{U}_{be} \sin^2 \omega t}{5V} = \frac{1}{2} \frac{\hat{U}_{be}^2}{5V} - \frac{1}{2} \frac{\hat{U}_{be}^2}{5V} \cos 2\omega t.$$

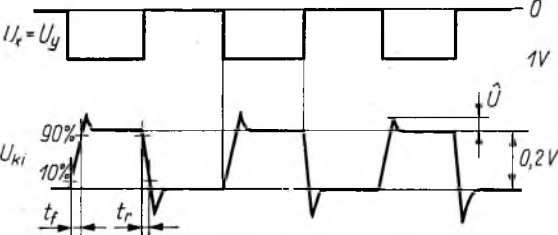


7-21. ábra. A szorzó frekvenciaátvitelének mérése

A kimeneti feszültség tehát egyenáramú és kétszeres frekvenciájú váltakozóáramú komponenszt tartalmaz (vö. 7-28. ábra). A mérési eredményeket a következő táblázat tartalmazza konstans $U_{be} = 2 V_{eff}$ bemeneti feszültség esetén és a frekvencia függvényében.

f, Hz	20	50	100	200	500	1k	2k	5k	3,45k
\hat{U}_e, V	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
U_{veff}, V	0,565	0,565	0,565	0,565	0,565	0,565	0,65	0,11	0,4

A kimeneti feszültség váltakozó komponensének 3 dB-es pontja 3,45 kHz-re adódott, megfelelően a kimeneti szűrő 7 kHz körüli értékre választott határfrekvenciájának.



7-22. ábra. A szorzó impulzusátvitelének mérése

c) Impulzusátvitel

A szorzóimpulzus átvitelét úgy vizsgáltuk, hogy mindkét bemenetre mélyen a határfrekvencia alatti (kb. 100 Hz-es) ismétlődési frekvenciájú négyszögjelet kapcsoltunk (l. 7-22. ábra).

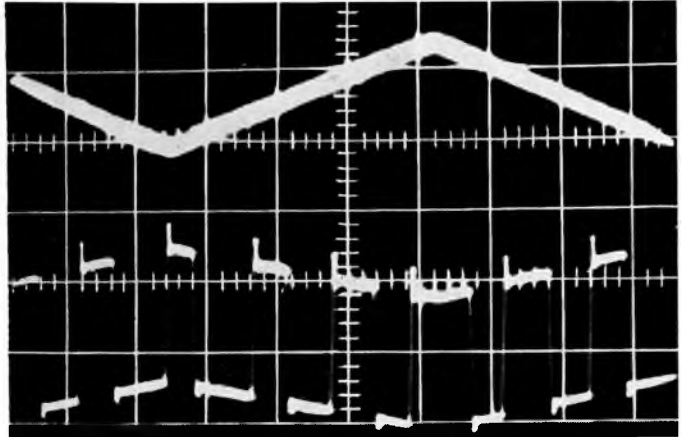
A kimeneti feszültség 10%-tól 90%-ig történő t_r bekapcsolási és kikapcsolási ideje 100 μs körüli értékre adódott. A kimeneti feszültségen 20%-os túllövés jelentkezett, megfelelően annak, hogy a kimeneti szűrő Butterworth-típusú (vö. 7-27. ábra).

Oscilloszkóp-felvételek

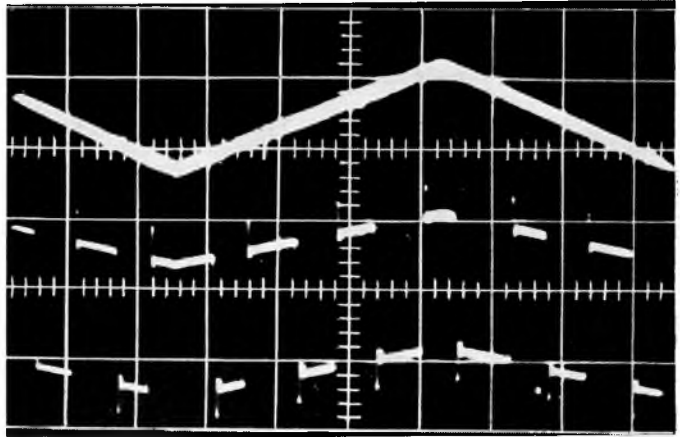
A szorzó működésének illusztrálására oscilloszkópfelvételeket készítettünk. Az impulzustényező-modulátor belső jelalakjait a 7-23—7-26. ábrák mutatják háromszög alakú U_x bemenő feszültség esetén. Az ábrákat célszerű összehasonlítani a 7-7...7-11. elvi ábrákkal.

A következő ábrák néhány jellegzetes szorzat előállítását mutatják.

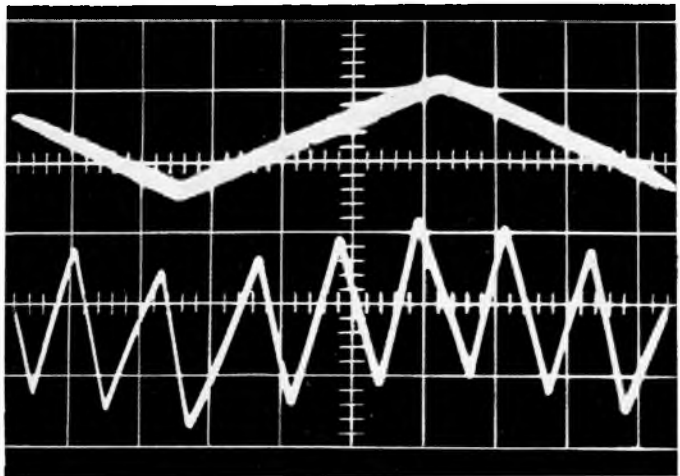
7-23. ábra. Az impulzus-tényező-modulátor össze-
gező-erősítőjének (7-20.
ábrára M_1) kimenő fe-
szültsége háromszög ala-
kú moduláló jel esetén
(2 V/div; 5 V/div;
20 μ s/div)

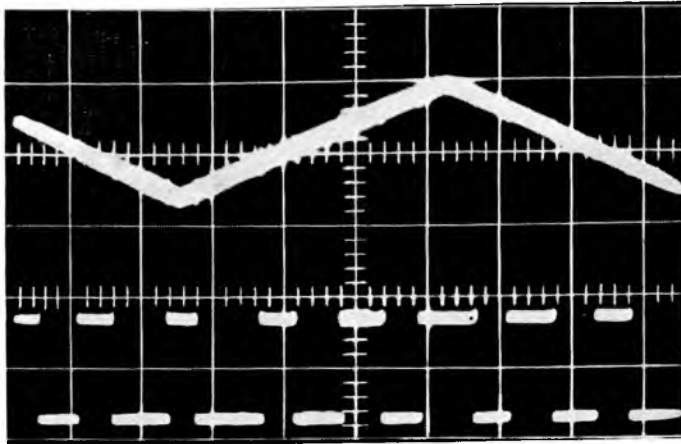


7-24. ábra. Az impulzus-tényező-modulátor inver-
tálóerősítőjének (M_3) kí-
menő feszültsége háromszög
alakú moduláló-
feszültség esetén (2 V/div;
5 V/div; 20 μ s/div)

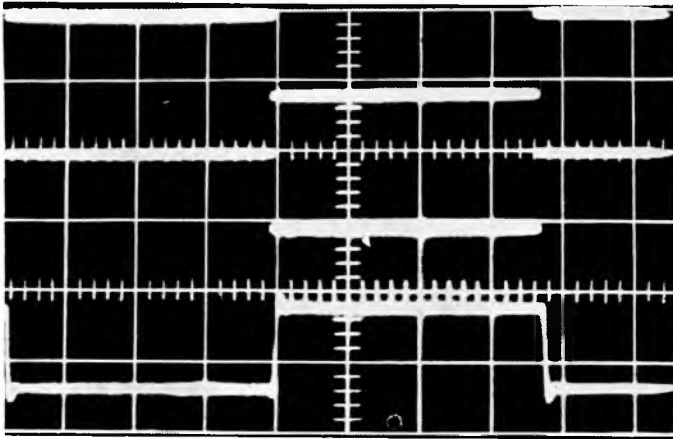


7-25. ábra. Az integrátor
(M_2) kimenő feszültsége
háromszög alakú mo-
dulálófeszültség esetén
(2 V/div; 5 V/div;
20 μ s/div)

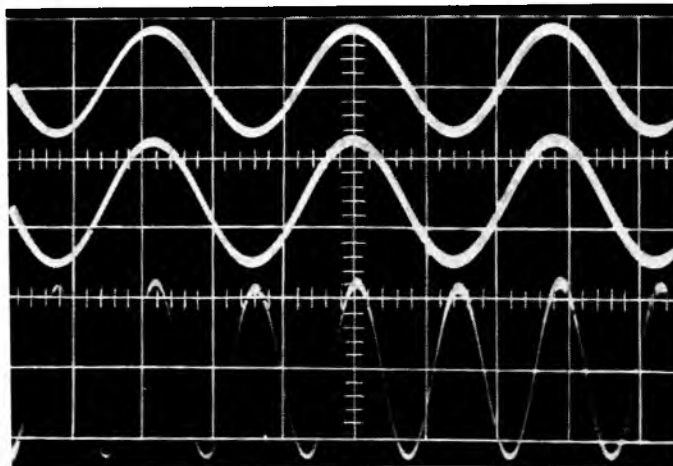




7-26. ábra. A moduláló-
feszültség és a komparátor
kimenő feszültsége
(2 V/div; 2 V/div;
20 μ s/div)

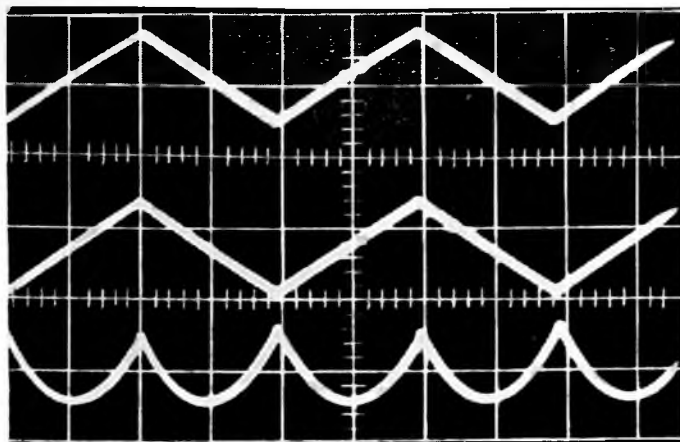


7-27. ábra. Két $\hat{U}/2$
egyenáramú komponens
tartalmazó négyzetjel
és a szorzatuk (2 V/div;
2 V/div; 0,2 V/div,
1 ms/div)

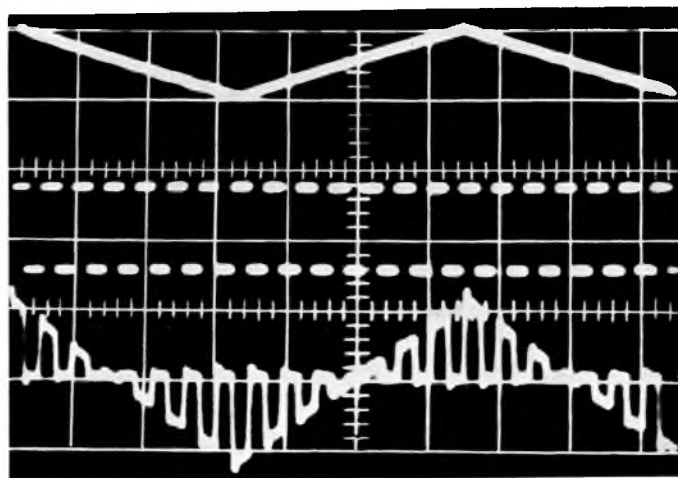


7-28. ábra. Két szinusz-
feszültség és a szorzatuk
(2 V/div; 2 V/div;
0,2 V/div, 1 ms/div)

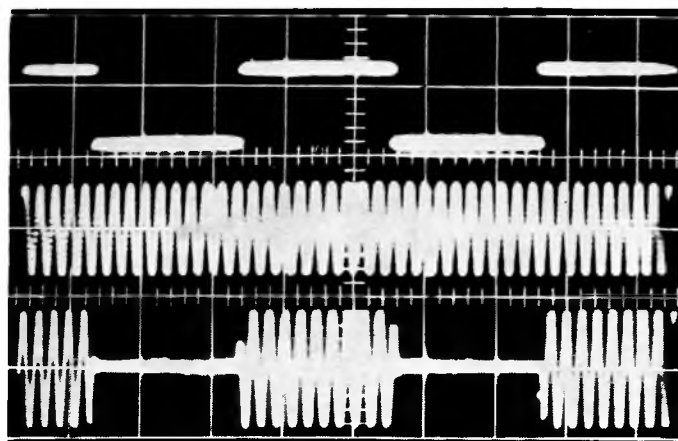
7-29. ábra. Két háromszögjel és a szorzatuk (2 V/div; 2 V/div; 0,5 V/div, 2 ms/div)

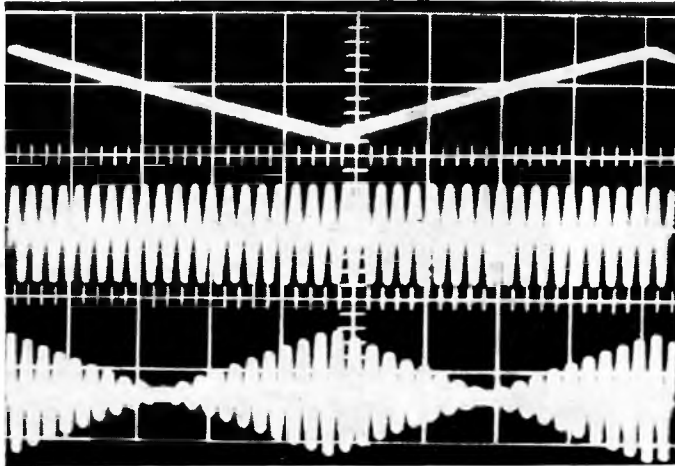


7-30. ábra. Háromszögjel $\hat{U}/2$ egykomponenst tartalmazó négyszögjel, és a szorzatuk (2 V/div; 2 V/div; 1 V/div, 2 ms/div)



7-31. ábra. $\hat{U}/2$ egykomponenst tartalmazó négyszögjel, szinusz és a szorzatuk (2 V/div; 1 V/div, 2 ms/div)





7-32. ábra. Háromszögjel, nagyobb frekvenciájú háromszögjel, és a szorzatuk (2 V/div; 2 V/div; 0,5 V/div; 2 ms/div)

3. A szorzóáramkörök alkalmazásai

Az eddigiekben áttekintettük a szorzóáramkörök lehetséges elvi megoldásait, majd részletesen ismertettük az általunk megvalósított időosztásos szorzóáramkört. Mondanivalónk nem lenne teljes a szorzóáramkörök alkalmazási területeinek rövid összefoglalása nélkül. Továbbiakban ezért erre a kérdésre térünk át. Először is azt nézzük meg, hogyan lehet a szorzóáramkört általános műveleti elemként felhasználni, majd néhány speciális alkalmazás következik. A bevezetőben említettük, hogy az integrált áramköri formában megjelenő szorzóáramkör új elektronikai lehetőségeket nyújt. Ezek közül is ismertetünk néhányat.

3.1 Négyzetreemelés, gyökvonás, osztás, reciprokképzés szorzóáramkör segítségével

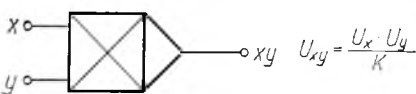
A továbbiakban a szorzóáramkört a 7-33. ábrán látható szimbólummal jelöljük.

A szorzóáramkör kimenő feszültsége $U_{xy} = \frac{U_x U_y}{K}$,

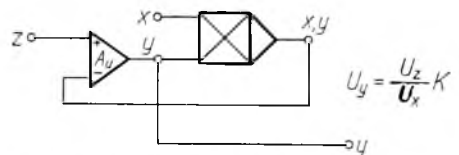
ahol K a szorzóáramkörre jellemző konstans (a 2. pontban ismertetett szorzónál $K=5$ V).

A négyzetreemeléshez a szorzó mindkét bemenetére azonos feszültséget kell kapcsolni. A kimenő feszültség $U_{xy} = \frac{U_x^2}{K}$.

Az osztás megvalósítására egészítsük ki a szorzóáramkört egy műveleti erősítő-



7-33. ábra. A szorzóáramkör szimbolikus jelölése

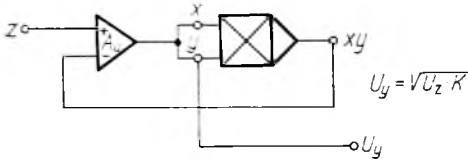


7-34. ábra. Osztóáramkör elvi sémája

vel a 7-34. ábra szerinti elrendezésben. A műveleti erősítőről tételezzük fel az alábbi ideális tulajdonságokat:

- erősítése ($-A_U$) végtelen nagy,
- bemeneti impedanciája végtelen nagy,
- kimeneti impedanciája zérus.

A korszerű integrált műveleti erősítőkre (pl. SN 72741) a fenti feltételezéseket valóban megtehetjük [15]. A műveleti erősítőre a következőket írhatjuk fel:



$$(U_{xy} - U_z)(-A_U) = U_y.$$

A szorzóáramkör jellemzője:

$$U_{xy} = \frac{U_x U_y}{K}.$$

A két egyenletből

$$U_z - \frac{U_x U_y}{K} = \frac{1}{A_U} U_y,$$

7-35. ábra. A négyzetgyökvonó áramkör elvi sémája

ha a műveleti erősítő erősítése igen nagy $A_U \rightarrow \infty$, akkor a fenti egyenletben határátmenetet képezve adódik:

$$U_y = \frac{U_z}{U_x} K. \quad (24)$$

Reciprokképző áramkör úgy nyerhető, ha az osztóáramkörben a z bemenetre konstans feszültséget kapcsolunk (pl. 1 V-ot). Ebben az esetben

$$U_y = \frac{1}{U_x} K. \quad (25)$$

Négyzetgyökvonáshoz a műveleti erősítőt és a szorzóáramkört a 7-35. ábra szerint kell összekapcsolni. A műveleti erősítőre vonatkozó egyenlet:

$$(U_{xy} - U_z)(-A_U) = U_y.$$

A szorzó egyenlete:

$$U_{xy} = \frac{U_x U_y}{K} = \frac{U_y^2}{K}.$$

A két egyenletből:

$$U_z - \frac{U_y^2}{K} = \frac{1}{A_U} U_y,$$

Ha $A_U \rightarrow \infty$

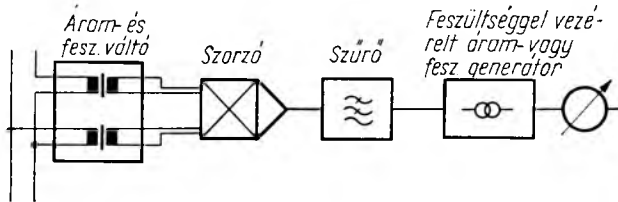
$$U_y = \sqrt{U_z K}. \quad (26)$$

3.2 A szorzóáramkör néhány speciális alkalmazása

Teljesítményváltó, teljesítménytávodó

Az erőművi hálózatokban az állandó teljesítménymérésnek igen nagy a jelentősége. A mért teljesítmények ismeretében az elosztóközpontokban mindenkor áttekinthető a hálózat terhelési állapota. Az állandó teljesítménymérés a folyamatszabályozá-

soknál is fontos, a pillanatnyi teljesítménnyel arányos feszültség vagy áramjel a szabályozó- és vezérlőáramkörökben rendelkezőjelként szolgál. A fenti feladatok megoldására mérőátalakítóra van szükség, amelynek kimenetén a pillanatnyi teljesítménnyel arányos áram vagy feszültség vehető le. A mérőátalakító jele valamilyen központba továbbítható, ahol áttekintést nyernek a mért helyeken a teljesítményáramlás pillanatnyi állapotáról. A 7-36. ábra egy ilyen teljesítményváltó elvi elrendezését mutatja. Az áram- és feszültségváltó az erősáramú köröket az utána következő elektronikától galvanikusan elválasztja és a bemeneti feszültséget, ill.



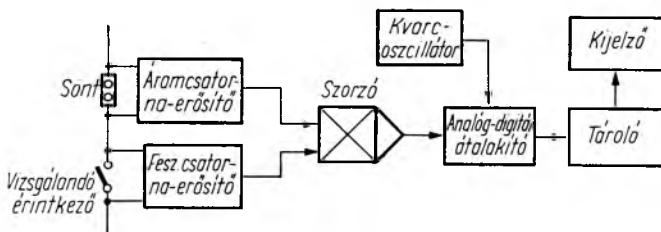
7-36. ábra. Teljesítményváltó blokkvázlata

áramot a szorzóhoz illeszti. Fázisforgató köröket is tartalmazhat, ha látszólagos teljesítményt kell mérni. A szorzó a pillanatnyi áram és feszültségértékeket szorozza össze, így kimenetén a pillanatnyi teljesítménnyel arányos jel vehető le. A szűrő leválasztja a váltakozóáram összetevőt és vezérli az utána következő fokozatot, amely feszültséggel vezérelt áramgenerátor, vagy feszültséggenerátor lehet, attól függően, hogy a mért teljesítménnyel arányos áramra, vagy feszültségre van-e szükség.

Energiamérés

Erősáramú kontaktorok érintkezőanyagainak kutatásához igen fontos mérési adat az árammal terhelt érintkező megszakításakor fellépő elektromos ív energiája. Az ívenergiamérés a 7-37. ábrán megadott elvi elrendezésben végezhető el.

Az áramcsatorna és feszültségcsatorna erősítő a mérendő ív áramkörét galvanikusan leválasztja az utána következő elektronikától. A csatornák choppers bemenetűek, hogy egyenáramot szakító érintkezők is vizsgálhatók legyenek. Bizto-



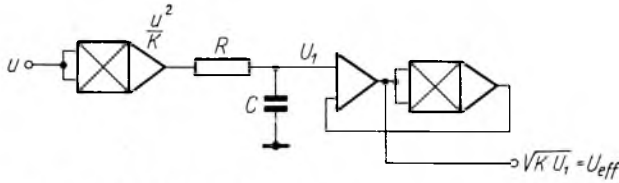
7-37. ábra. Az ívenergiamérő blokkvázlata

sítják azt is, hogy a szorzó bemenetei minden méréshatáron illetve legyenek. A szorzó az áram- és feszültségcsatorna jelét összeszorozza, kimenetén az érintkező megszakításakor teljesítményimpulzus lép fel. A teljesítményimpulzus integrálását az analóg—digitál átalakító végzi oly módon, hogy a kvarcoszcillátor által biztosí-

tott pontos időközönként a jelből mintát vesz, azokat a feszültségértékkel arányos impulzusszámmá alakítja az impulzusok száma a tárolóban összegeződik. A tároló tartalmát, tehát az ív energiáját a kijelző egység számkijelző csöveken láthatóvá teszi.

Valódi effektív érték mérése

Kevés feszültségmérő műszer van, amely valóban effektív értéket mér, mint pl. a hődrótos műszer. A legtöbb műszer vagy elektrolitikus közepet, vagy csúcsértéket mér, azonban effektív értékre van kalibrálva a szinuszos jel formatényezőjének megfelelően. Abban az esetben, ha torzított szinuszos, vagy nem szinuszos feszültséget mérünk egy ilyen műszeren, akkor a leolvasott érték mindjárt illuzórikus. A szorzó-



7-38. ábra. Effektívérték-mérő

áramkörök segítségével minden nehézség nélkül mérhetjük nem szinuszos, periodikus jel effektív értékét a definíció szerint:

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{\lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} u^2 dt}. \quad (27)$$

Az elvi kapcsolás a 7-38. ábrán látható. Az első szorzóáramkör kimenete U^2/K feszültséget szolgáltat. Az utána következő aluláteresztő középértéket képez, ha időállandója $\tau = RC$ elegendően nagy. A műveleti erősítőtől és a második szorzóból álló áramkör a gyökvonást végzi el.

Szelektív voltmérő

A szorzóáramkörök segítségével igen egyszerűen készíthető szelektív voltmérő. Ha az analizálandó

$$\sum_{n=1}^{\infty} U_n \sin(\omega_n t + \varphi_n)$$

spektrumot egy tiszta szinuszos segédoszillátor $U_0 \sin \omega_0 t$ jelével összeszorozzuk és a szorzatot aluláteresztő szűrőn bocsátjuk át, akkor a szűrő kimeneti feszültsége:

$$U = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{n=1}^{\infty} U_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) U_0 \sin \omega_0 t dt,$$

ebből

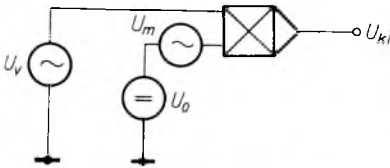
$$U = \begin{cases} 0 & \text{ha } \omega_n \neq \omega_0 \\ \frac{1}{2} U_0 U_n \cos \varphi_n, & \text{ha } \omega_n = \omega_0. \end{cases}$$

A szűrő kimenetén tehát akkor mérhető egyenfeszültség, ha a spektrum tartalmaz a segédoszillátor jelével megegyező frekvenciájú komponenset. A szűrő kimeneti lével ezután a segédoszillátort úgy szinkronozzuk, hogy a segédoszillátor fázisban legyen a megtalált komponenssel. Ezután, a segédoszillátor fázisban 90°-kal eltolt jelével egy másik szorzón a spektrumot újra megszorozzuk, a szorzó után kapcsolt aluláteresztő kimenetén a kérdéses spektrum összetevőt leolvashatjuk.

3.3 A szorzóáramkörök segítségével megvalósítható elektronikai feladatok

Amplitúdómoduláció

Az amplitúdómoduláció szorzóáramkör segítségével igen egyszerű. A szorzóáramkör egyik bemenetére az $U_v \cos \omega_v t$ vivőfrekvenciát, a másik bemenetre az U_0 egyenfeszültségre szuperponált $U_m \cos \omega_m t$ modulálójelet kell kapcsolni. Az elvi elrendezést a 7-39. ábra mutatja.



7-39. ábra. Az amplitúdómodulátor

A szorzóáramkör kimeneti feszültsége:

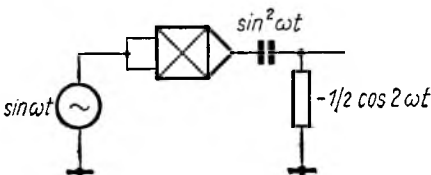
$$\begin{aligned}
 U_{ki} &= \frac{1}{K} U_v \cos \omega_v t (U_0 + U_m \cos \omega_m t) = \\
 &= \frac{U_v U_0}{K} \cos \omega_v t + \frac{U_v U_m}{2K} \cos (\omega_v + \omega_m) t + \\
 &\quad + \frac{U_v U_m}{2K} \cos (\omega_v - \omega_m) t.
 \end{aligned}$$

Tehát a vivő- és a két oldalsáv kiadódik. Ha $U_0=0$, akkor a vivőfrekvenciás komponens kiesik, így két oldalsávós elnyomott vivőjű amplitúdómodulációt lehet megvalósítani.

Az ilyen amplitúdómodulátoroknak kis egyenfeszültségek mérése esetén is nagy jelentősége van. Az ilyen műszerekben ugyanis a bemeneti kis egyenfeszültséget tranzistoros vagy távvezérlésű tranzistoros chopperrel szaggatni szokták, a váltójelet erősítik, utána szinkron-egyenirányítóval demodulálják. A szaggatójel négyeszőgjel, ezért az átkapcsolások időpontjában a szaggató tranzistorok kapacitásai miatt a szaggató jelre jelentős nagyságú túimpulzusok szuperponálódnak, amelyek az egész rendszer driftjét meghatározzák. A fenti amplitúdómodulátorral a bemeneti feszültséget szinuszosan lehet modulálni és így az átkapcsolási tüskék kiesnek.

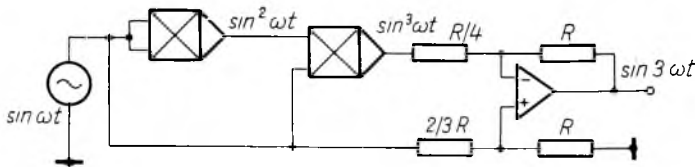
Frekvenciakétszörözés

A hagyományos frekvenciasokszorozó áramkörökben a kiinduló jelet nemlineáris karakterisztika felhasználásával torzítják, az így nyert spektrumból a megfelelő felharmonikus hangolt körökkel kiszűrjük és erősítjük. Így az elrendezés csak egy adott frekvenciára jó. Szorzóáramkörök segítségével hangolt kör nélküli sokszorozókat lehet építeni, tehát a sokszorozást széles frekvenciasávban bármely frekvenciára el lehet végezni. Frekvenciakétszerezésnél pl. a következő trigonometriai összefüggésből lehet kiindulni:



7-40. ábra. Frekvenciakétszerezés

$$\sin^2 \omega t = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\omega t.$$



7-41. ábra. Frekvenciaháromszorozó

Az ennek megfelelő elvi elrendezést a 7-40. ábrán láthatjuk. Frekvenciaháromszorozás kiinduló egyenlete

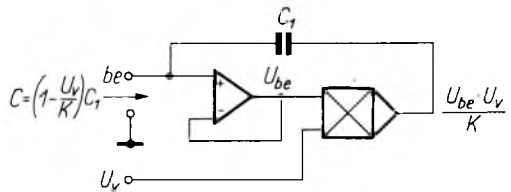
$$\sin 3\omega t = 3 \sin \omega t - 4 \sin^3 \omega t.$$

A kapcsolási rajzot a 7-41. ábra mutatja.

Feszültségvezérelt kapacitás, induktivitás

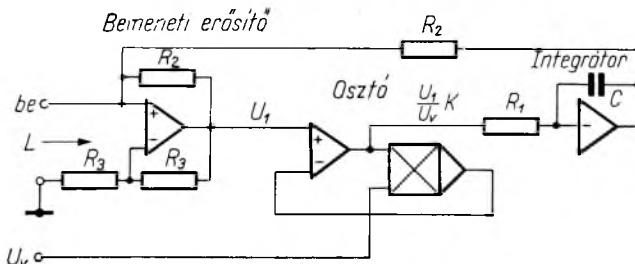
Műveleti erősítőkből és passzív RC elemekből összeállíthatók olyan kapcsolások, amelyekkel kapacitást, vagy induktivitást lehet elektronikusan leutánozni [16]. Ha ilyen kapcsolást szorzóáramkörrel egészítünk ki, akkor feszültséggel vezérelt kapacitást, vagy induktivitást nyerhetünk. A 7-42. ábra mutat be egy vezérelt kapacitást megvalósító áramkört.

Az áramkör a „be” pont és a 0 között U_v feszültséggel vezérelt kapacitásként viselkedik. Ha a vezérlőfeszültség $U_v = 0$, akkor a C_1 kondenzátorra a teljes bemenő feszültség rájut, a kifelé mutatott kapacitás $C = C_1$. Ha $U_v = K$, a C_1 -re jutó feszültség 0, a kondenzátoron nem folyik áram, így a bemeneti kapacitás 0.



7-42. ábra. Vezérelt kapacitás

Hasonló módon lehet feszültség vezérelt induktivitást megvalósítani az ún. girátorral. Az elvi kapcsolást a 7-43. ábra mutatja. Az integrátor veszteséges induktivitást szimulál, amelynek veszteségét a bemenő erősítő pozitív visszacsatoló körében



7-43. ábra. Feszültségvezérelt induktivitás

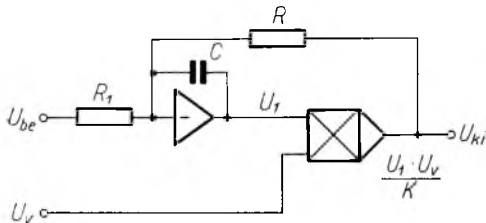
levő R_2 ellenállás kompenzálja. A bemenő erősítő és integrátor között műveleti erősítőből és szorzóáramkörből álló osztó foglal helyet.

Az osztóáramkör az integrátor időállandóját változtatja, és ezzel vezérli az induktivitást. Az induktivitás értéke:

$$L = \frac{1}{2} R_1 R_2 C \frac{U_v}{K},$$

Vezérelhető határfrekvenciájú aluláteresztő szűrő

Szorzóáramkörök segítségével az RC elemekből és műveleti erősítőkkel álló, ún. aktív szűrők határfrekvenciája is folyamatosan változtatható (l.: 7-44. ábra). Ha



7-44. ábra. Vezérelt határfrekvenciájú aluláteresztő szűrő

a vezérlőfeszültség $U_v = K$, a szorzó kimenő feszültsége $U_{ki} = U_1$. A szűrő határfrekvencia alatti erősítése ekkor $A = -R/R_1$ és a határfrekvencia $f_n = 1/2\pi RC$. Más vezérlőfeszültség esetén a szűrő áteresztő sávjában az erősítés konstans, mivel az R ellenállással létesített negatív visszacsatoló körben a szorzó is benne van. Magasabb frekvenciákon az integrátor erősítése annyira lecsökken, hogy a külső negatív visszacsatolás hatástalan lesz. A kap-

csolás határfrekvenciája annál magasabb, minél nagyobb a vezérlőfeszültség

$$f_g = \frac{1}{2\pi RC} \frac{U_v}{K}$$

Az aluláteresztőhöz hasonló módon építhető külső vezérlőfeszültséggel hangolható felüláteresztő, sávszűrő, sávzáró stb. is.

Irodalom

- [1] *Sevin J. Leonce*: Tervezrlésú tranzisztorok. Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1967.
- [2] The applications of linear microcircuits. I—II kötet. Az SGS cég kiadványa.
- [3] *Gelder, E.—Hirschmann, W.*: Schaltungen mit Halbleiterbauelementen. A Siemens cég kiadványa.
- [4] *Tietze, U.*: Analogmultiplizierer mit isolirenden Kopplern. Elektronik 1968. 8. füzet, p: 233—238.
- [5] *Tietze, U.—Schenk, C.*: Analogmultiplizierer mit Stromverteilungssteuerung. Elektronik 1971. 6. füzet, p: 189—194.
- [6] *Grünberg, W. D.*: Analoges Multiplizieren und Dividieren nach dem Sägezahnverfahren. Elektronik 1969. 2. füzet, p: 43—45.
- [7] *Günzel, K.—Spiesberger, G.*: Statische Leistungsmessumformer zur Fernmessung von Leistungen in Starkstromnetzen. Siemens Zeitschrift 1971. 1. füzet, p: 41—48.
- [8] *de Vonarburg, H.—Vries, J. H.*: Elektronischer Elektrizitätszähler hoher Präzision. Bull. ASE 1971. 7. szám, p: 371—373.
- [9] *Bellamy, N. W.—West, M. J.*: A high accuracy four-quadrant time-division analogue multiplier. Electronic Engineering 1970. július, p: 30—35.
- [10] *Miyaji Tomota—Takashi Sugiyama—Keiki Yamaguchi*: An electronic multiplier for accurate power measurements. IEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1968. 4. sz. p: 245—251.
- [11] *Schenk, C.—Tietze, U.*: Aktive Filter. Elektronik. 1970. 10, 11. szám.
- [12] *Devine, M. L.*: A. C. performance of f. e. t. analogue switch. PROC. IEE. 117. k. 7. sz. p. 1205—1210.
- [13] *Wollesen, Donald L.*: Analog switching-high speed with J-FET'S. END. 1970. január, p: 38—40.
- [14] *Kvamme, E. Floyd*: Analog switching-high complexity with MOS-FET'S. EDN. 1970. január, p: 34—38.
- [15] Fairchild és Texas Instruments gyártmányú műveleti erősítők adatlapjai.
- [16] *Öve, W. Hadrian*: Elektronische Nachbildung von Induktivitäten mit Operationsverstärkern. E und M. 87. évf. 1. füzet, p: 64—68.

8.

Nagyteljesítményű háromfázisú inverterek szükségáramforrás céljára

FÜZESI ENDRE — LENCSÉS JÓZSEF

ÖSSZEFOGLALÁS

A híradástechnikai készülékeknek és biztosítóberendezéseknek az energiaellátását a hálózati táplálás kimaradása esetén is biztosítani kell. E készülékeknek és berendezéseknek nagy része néhány kVA-tól néhányszor 10 kVA-ig terjedő teljesítményt igényel. Ennek a teljesítménytartománynak az átfogására a Villamosipari Kutató Intézet nagyteljesítményű inverter sorozatot dolgozott ki. A sorozat jellemzőit 20 kVA teljesítményű háromfázisú inverter alapján ismertetjük. A készülékek jó hatásfokú energiaellátást biztosítanak a hálózat meghibásodása esetén, maximum 100 ms-ig terjedő időtartamú feszültségmentesítéssel.

МОЩНЫЕ ТРЕХФАЗНЫЕ ИНВЕРТОРЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ИСТОЧНИКАХ АВАРИЙНОГО ПИТАНИЯ

Э. Фюзеси—Й. Ленцеш

Резюме

Снабжение электроэнергией устройств техники связи и предохранительных устройств (защиты) необходимо обеспечить и в случае провала сетевого напряжения питания. Большинство этих устройств требует для питания мощность от нескольких кВА до нескольких 10 кВА. Для охвата этих диапазонов мощности Научно-исследовательским институтом электрической промышленности было разработано семейство мощных инверторов. Характеристики семейства описываются на примере трехфазного инвертера мощностью 20 кВА. Устройства обеспечивают снабжение электроэнергией при высоком к. п. д. в случае дефекта электросети с максимальной длительностью провала сетевого напряжения 100 мсек.

DREIPHASIGE HOCHLEISTUNGS-WECHSELRICHTER FÜR NOTSTROMANLAGE

E. Füzesi—J. Lencsés

Zusammenfassung

Die Energieversorgung nachrichtentechnischen Geräte und der Sicherheitseinrichtungen muss auch beim Ausfall der Netzspeisung gesichert werden. Ein grosser Teil dieser Geräte und Einrichtungen beansprucht eine Leistung, die von einigen kVA bis mehrmals 10 kVA reicht. Um diesen Leistungsbereich zu umfassen, hat das Forschungsinstitut der Elektroindustrie eine Hochleistungs-Wechselrichterserie ausgearbeitet. Die Kennwerte der Serie werden durch einen 20 kVA Dreiphasen-Wechselrichter dargelegt.

Die Geräte sichern eine Energieversorgung guten Wirkungsgrades beim Ausfall des Netzes mit einem Spannungsausfall bis max. 100 ms.

HIGH-POWER THREE-PHASE INVERTERS FOR EMERGENCY SUPPLY PURPOSES

E. Füzési—J. Lencsés

Summary

The power supply of communication equipments, safety appliances, etc. must be maintained in the event of mains drop-out. The majority of appliances and equipments belonging to this group represent loads ranging from a few kilovolt-amperes to a few tens of kilovolt-amperes. To cover this range of loads a high-power inverter series has been developed by the Research Institute of Electrical Industry. The main features of the series are described on the basis of the 20 kVA three-phase inverter. The devices provide high-efficiency power supply with drop-out times not exceeding 100 ms in the case of mains failures.

Bevezetés

A cikkben olyan inverteres szükségáramforrás-rendszert ismertetünk, amely tirisztoros inverter alkalmazásával akkumulátor egyenfeszültségéből szinuszos váltakozófeszültséget állít elő a fogyasztók táplálásának biztosítására a hálózati váltakozófeszültség kimaradásakor. Az inverteres szükségáramforrások két csoportra oszthatók: megszakításmentes és megszakításos áramforrások. A megszakításmentes áramforrások biztosítják a fogyasztók folytonos energiaellátását, míg a megszakításosak esetében a hálózat és a szükségáramforrás közötti átkapcsolások miatt az energiaellátás — az alkalmazott rendszertől függően — néhányszor 10 ms-tól néhányszor 100 ms-ig megszakadhat.

Az inverteres szükségáramforrásokat sok helyen alkalmazzák, pl. híradástechnikai berendezések (távíró, átviteltechnikai berendezések), biztosítóberendezések,

8-1. táblázat

Javasolt, kivitelezett és jelenleg fejlesztett teljesítményű inverterek

Táp-feszültség V	Fázis-szám	Teljesítmény, kVA												
		0,4	0,63	1	1,6	2,5	4	6,3	10	16	25	40	63	
24	1	⊗												
48	1	⊗	⊗	×	×	⊗		+						
	3					×	×	⊗			+			
110	1	×	⊗	×	⊗	×		⊗						
	3					×	×	×	×	⊗				
220	1	×	×	⊗	⊗	×		+	×	×	+			
	3					×	×	×	×	×	×	×	×	×

× A „Híradástechnikai áramforrások” című tanulmányban javasolt érték

+ A fenti javaslatlól eltérő érték

⊗ VKI által kivitelezett típus

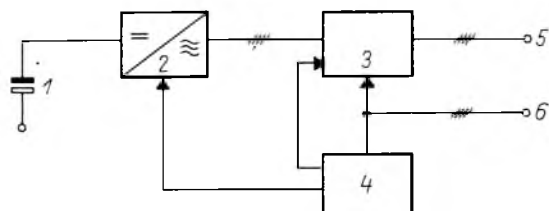
⊕ VKI által jelenleg fejlesztett típus

műszerek, automatikák stb. táplálására. A hazai inverteres szükségáramforrás-igényről — a KGM megbízásából — a VKI által készített „Híradástechnikai áramforrások” című tanulmány keretében készült felmérés. A tanulmány figyelembe vette a híradástechnikai gyártásban és felhasználásban közvetlenül érdekelt vállalatokon kívül más felhasználók (MÁV, MALÉV, KPM Hajózási Főosztály stb.) véleményét is. A hozzászólások alapján a tanulmány az 8-1. táblázat szerinti teljesítményű és tápfeszültségű inverterek alkalmazását javasolta (×-szel jelölt típusok). Ezt a javaslatot figyelembe vettük a nagyteljesítményű inverterek fejlesztése során. A 8-1. táblázatban ○-val jelöltük meg azokat a típusokat, amelyeket vagy amelyekhez közel eső névleges teljesítményű invertereket 1971-ig a VKI-ban kidolgoztunk.

Az igényfelmérés és az eddig kidolgozott VKI típusok összevetése alapján célszerűnek tűnt, hogy 220 V tápfeszültségű, nagyobb teljesítményű invertereket dolgozzunk ki. E fejlesztést megelőzte a 110 V tápfeszültségű 6,3 kVA teljesítményű egyfázisú és a 16 kVA teljesítményű háromfázisú inverterek kidolgozása. E cikkben részletesen ismertetjük ezeknek az invertereknek a felépítését és működését. A 8-1. táblázatban feltüntetett 48 V tápfeszültségű két invertertípus nem szerepel a tanulmányban javasolt típusok között, mert ilyen teljesítményű invertert általában nagyobb tápfeszültséggel célszerű megvalósítani. Ezeknek a típusoknak a fejlesztését a Posta megrendelésére vállaltuk el.

1. Megszakításos inverteres szükségáramforrás felépítése

A szükségáramforrás elvi felépítése a 8-1. ábrán látható. Az 1 akkumulátor egyenfeszültségét 2 háromfázisú inverter háromfázisú váltakozófeszültséggé alakítja át. 4 hálózatfigyelő egység a hálózati feszültség nagyságának a függvényében vezérli a 2 invertert és 3 átkapcsoló automatikát. Ha van hálózat, ami azt jelenti, hogy mindegyik fázisfeszültség meghatározott értéknél nagyobb, akkor letiltja az invertert és a 6 hálózatra kapcsolja az 5 fogyasztókat az átkapcsolórendszeren keresztül. Ha nincs hálózat, vagyis legalább az egyik fázisfeszültség kisebb egy előre beállított értéknél, akkor az inverter tiltását megszünteti és az inverter kimenetére kapcsolja a fogyasztókat az átkapcsolórendszeren keresztül.



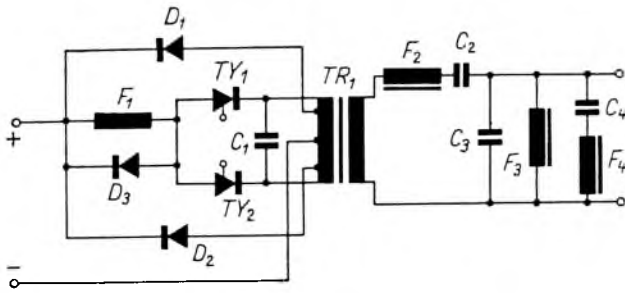
8-1. ábra. Szükségáramforrás elvi felépítése

1 akkumulátor; 2 háromfázisú inverter; 3 átkapcsoló automatika;
4 hálózatfigyelő egység; 5 fogyasztók; 6 háromfázisú hálózat

1.1 Háromfázisú inverter

A háromfázisú inverter három egyfázisú inverterből áll. A kimeneti váltakozófeszültségek 120° -os eltolását a vezérlőimpulzusok fáziseltolása biztosítja. Az egyfázisú inverter áramkör felépítése a 8-2. ábrán látható. Az áramkör működését részletesen ismertettük a VKI Közlemények 3. számában [1], ezért ezt most csak röviden foglaljuk össze.

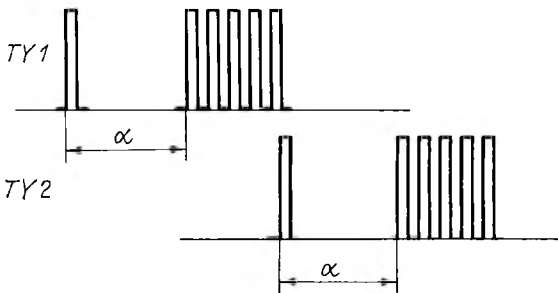
Az egyenfeszültség pozitív pontját $TY1$ és $TY2$ tirisztorok félperiódusonként váltakozva kapcsolják a TRI transzformátor középmegcsapolású primer tekercsének



8-2. ábra. Egyfázisú inverteráramkör

szélső pontjaira. A $TR1$ transzformátor szekunder tekercsén megjelenő váltakozófeszültség alapharmonikusát a soros és párhuzamos rezgőkörökből álló szűrőáramkör átengedi, a felharmonikusokat elnyomja.

A váltakozófeszültség szabályozása a kettős gyújtás elve alapján történik. A tirisztorok gyújtóimpulzusai a 8-3. ábrán láthatók. A tirisztorokra félperiódusonként váltakozva kapcsolt gyújtóelemek egyetlen impulzusból és azt α szabályozási szögnek megfelelő késleltetéssel követő impulzuscsoomagból állnak. A tirisztorok a vezetési félperiódusukon belül az impulzuscsoomag időtartamában folyamatosan vezetnek,



8-3. ábra. Kettős gyújtású inverter gyújtóimpulzusai

míg a tüimpulzus hatására csak rövid ideig vezetnek a korábban vezető tirisztor oltásának biztosítására. Az oltás céljából bekapcsolt tirisztor kialakását $D3$ dióda és $TR1$ transzformátor induktív jellegű terhelése biztosítja, amelyek együttes hatásaként az oltás után mind az oltó, mind az oltott tirisztor árama nullára csökken. A szabályozási szöggel változtatni lehet a kimeneti váltakozófeszültséget.

A kettős gyújtású rendszernek a főáramkör egyszerű felépítésén kívül az az előnye, hogy a gyújtóimpulzusok letiltásával és felengedésével a főáramkör ki- és bekapcsolható folytonos egyenfeszültségű táplálás esetén is. Invertereknek a tirisztorok gyújtóimpulzusainak tiltásával való kikapcsolásához — a gyújtóimpulzusok kikapcsolásakor vagy azt követően — a tirisztoroknak kikapcsolt állapotban kell lenniük. A kettős gyújtású rendszerben ez automatikusan teljesül akkor, ha az oltást megvalósító egy tüimpulzus a tartós vezetést létrehozó impulzuscsoomag végéhez van rendelve. Ha a tiltás olyan időpontban lép fel, amikor egyik tirisztor sem vezet, akkor természetesen a tiltást követően egyik tirisztor sem kapcsol be. Ha tiltás időpontjában valamelyik tirisztor vezet, akkor abban a pillanatban megszűnik a vezető tirisztor gyújtójele, és ezt követően az ellenütem tirisztorra egyetlen gyújtóimpulzust kap, aminek végső eredményeként mindkét tirisztor kialszik. A rendszernek ez a tulajdonsága lehetővé teszi, hogy szükségáramforrásként való alkalmazásakor az inverter a tiltást felengedő vezérlőjel kiadását követően kb. 100 ms időn belül a névleges feszültséget szolgáltatssa a fogyasztóknak.

1.2 Hálózatfigyelő egység

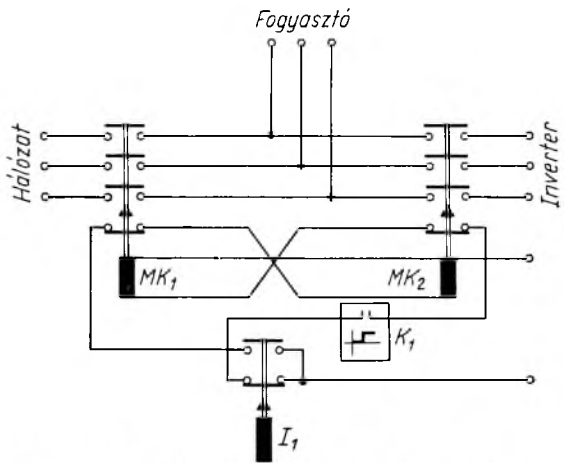
A hálózatfigyelő egység a hálózati fázisfeszültségek nagyságát figyeli. Ha bármelyik fázisfeszültség előre meghatározott érték alá csökken, akkor az egység parancsot ad az átkapcsoló automatikának, hogy a fogyasztókat a hálózatról az inverterre kapcsolja át és az inverternek, hogy a vezérlés tiltását oldja fel.

Ha a hálózat mindhárom fázisfeszültsége előre meghatározott értéknél nagyobb, akkor a hálózatfigyelő egység kb. 20 s késleltetési idő után a hálózati és az inverterfeszültség szinkron helyzetében parancsot ad az átkapcsoló automatikának a fogyasztók hálózatra való kapcsolására és az inverternek a vezérlés letiltására. A 20 s késleltetésre azért van szükség, hogy az átkapcsolás nyugodt hálózatra történjék.

1.3 Átkapcsoló automatika

Az átkapcsoló automatika kapcsolja a fogyasztókat a hálózatra vagy az inverterre. Az átkapcsolórendszer működése a 8-4. ábra alapján a következő.

Ha nincs hálózat, akkor a $J1$ jelfogó elejtett állapotban van, aminek következtében $MK2$ mágneskapcsoló meghúzott, $MK1$ mágneskapcsoló pedig elejtett állapotban van. Hálózatvisszatéréskor $J1$ meghúz, aminek következtében elejt $MK2$, amit K késleltetett működésű kapcsoló zárása után $MK1$ meghúzása követ. $K1$ késleltetése úgy van beállítva, hogy az inverterről hálózatra való átkapcsolás alatt a fogyasztói tápfeszültség kimaradásának ideje a periódusidő egész számú többszöröse legyen. Mivel a figyelőegység az inverterről hálózatra való átkapcsolásra a két feszültség szinkron helyzetében ad ki parancsot, ez biztosítja, hogy a fogyasztói feszültségből egész számú periódus hiányzik. Ha az átkapcsolás nem a leírt módon, hanem véletlenszerűen megy végbe, akkor a legkedvezőtlenebb esetben előfordulhat, hogy a fogyasztókra egymást követően két azonos polaritású feszültség-félhullám jut, ami a fogyasztói transzformátorok vasmagját telítheti és nagy áramfelvételt okozhat. Ez a különösen meredek telítési vasmagok esetén kritikus, amikor a transzformátor tápáramkörében levő védelem a telítési áram hatására leoldhat.



8-4. ábra. Fogyasztókat ellátó átkapcsoló rendszer

2. Megszakításmentes inverteres szükségáramforrás

A megszakításmentes szükségáramforrással szemben az a követelmény, hogy az előírt tűréshatáron belül állandó nagyságú és folytonos váltakozófeszültséget szolgáltatson. Az állandó nagyság szempontjából megkülönböztetünk tranziens és stacioner állandóságot. A folytonosságot úgy értelmezzük, hogy a fogyasztói fe-

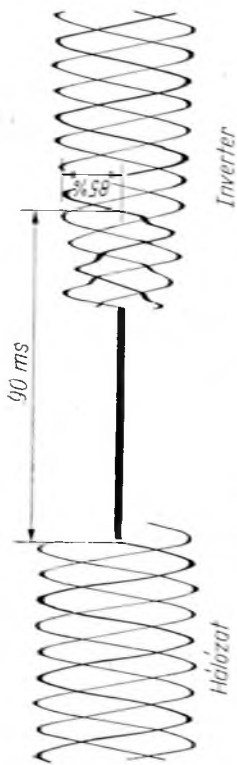
szűlség 200 μ s-nál hosszabb ideig nem lehet nulla, amely idő kb. 4° -nak felel meg 50 Hz frekvenciájú táplálás esetén.

A fenti értelemben vett megszakításmentes áramellátás inverter és hálózat kombinációjával vagy inverterek kombinációjával biztosítható. Az inverter—hálózat-rendszer elvi felépítése megegyezik a 8-1. ábra szerinti megszakításos rendszer felépítésével azzal az eltéréssel, hogy az abban szereplő egységek másként üzemelnek. A 2 inverter állandóan üzemel és a 6 hálózathoz szinkronizált háromfázisú váltakozó-feszültséget állít elő. 4 hálózatfigyelő egység 2 inverternek most csak a szinkronizáló jeleket szolgáltatja, ezenkívül a hálózati feszültség függvényében vezérli 3 átkapcsoló automatikát, amelynek működése ugyanolyan jellegű, mint a megszakításos rendszerben. A hálózatfigyelő és az átkapcsoló egység azonban a működés gyorsasága szempontjából eltér a megszakításos rendszerétől. Ez az eltérés az egységek más felépítését is igényli. Megszakításos esetben az átkapcsolási idők lehetővé tették relés figyelő és mágnescapcsolós átkapcsoló egységek alkalmazását, viszont megszakításmentes esetben ezek csak félvezetős kivitelűek lehetnek. Az átkapcsoló egység tirisztoros kapcsolókkal valósítható meg, amelyek közül a hálózati oldalú kapcsolónak olthatónak kell lennie. Ez azért szükséges, mert ha a hálózatkimaradást a betáplálás felőli zárlat idézte elő, akkor a fogyasztó az éppen vezetõ hálózati oldali tirisztoron keresztül zárlatban marad, ha indukzív jellegű terhelés miatt éppen visszatáplálás volt.

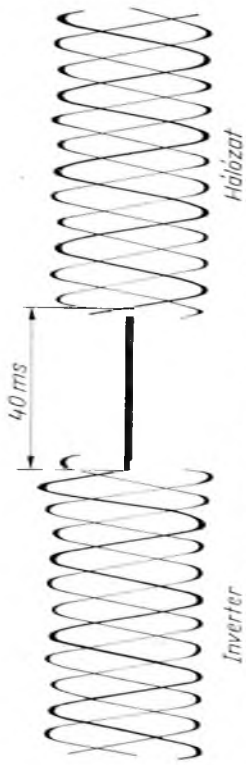
Az inverter—hálózat rendszernél problémát jelenthet az, hogy a névleges terhelésnek az inverterre való rákapcsolása 30...50% nagyságú tranziens feszültségletörést okoz, amelynek a kiszabályozási ideje 50...100 ms, ami egyes esetekben nem engedhető meg. Az inverter—hálózat rendszer nem alkalmazható olyan esetekben, ha a fogyasztók az ipari hálózatnál jobb minőségű feszültségtartást igényelnek, márpedig a megszakításmentes áramellátást igénylõ fogyasztók többsége ilyen. A felsorolt hátrányokkal szemben a rendszernek elõnye, hogy az áramellátást az üzemidõ nagy részében hálózatról biztosítja és csak kisebb részben az akkumulátor-töltõ—akkumulátor—inverter rendszeren keresztül.

A megszakításmentes rendszer másik változatában több párhuzamosan kapcsolt inverter biztosítja a fogyasztók folytonos áramellátását. E rendszerben az inverterek bemenetei és kimenetei párhuzamosan vannak kapcsolva és a vezérléseik egymáshoz szinkronizálva vannak, hogy a kimeneti feszültségek azonos fázishelyzetűek legyenek. Az inverteregységek teljesítménye úgy van megválasztva, hogy valamelyik egység meghibásodása esetén az üzemben maradó egység vagy egységek teljesítménye elegendõ legyen a fogyasztók táplálásához.

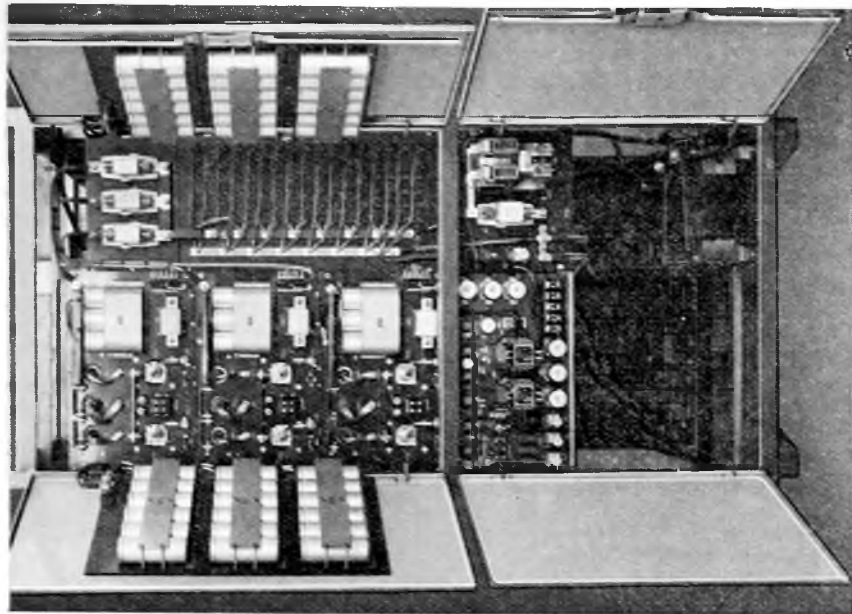
Ha az inverterek kimenetei párhuzamosan vannak kapcsolva, akkor az egyik inverternek a meghibásodása akkor befolyásolja lényegesen a másik inverter kimeneti feszültségét, ha a meghibásodás a 8-2. ábra szerinti inverteráramkör szűrõ-fokozatának a kimenettel párhuzamosan kapcsolt részében van, pl. C3 kondenzátor valamelyik egysége zárlatos lesz. Ennek a meghibásodásnak a valószínűségét a szűrõ-áramkör jó méretezése esetén igen kicsinek tartjuk. Ezt a véleményt annak a tapasztalati adatnak az alapján mondhatjuk, hogy 6 db egyenként 2,5 kVA teljesítményű inverteregység kerekén 130 000 h-s összegezett üzemideje alatt ilyen jellegű meghibásodást nem tapasztaltunk. Ez egységenként közel 2,5 év folytonos üzemnek felel meg. Ha a fenti rezgõköri meghibásodástól eltekintünk, akkor az egyik inverter meghibásodása nem befolyásolja lényegesen a többi inverter kimeneti feszültségét. Így meghibásodás esetén elegendõ, ha a hibás inverter bemenetét és kimenetét mágnescapcsolókkal a többi inverter megfelelõ pontjairól leválasztják és nincs szükség a hálózat—inverter rendszernél alkalmazott bonyolult hálózatfigyelõ és átkapcsoló rendszerre.



8-6. ábra. Átkapcsolás a hálózati feszültség kimaradásakor



8-7. ábra. Átkapcsolás a hálózati feszültség visszatérésekor



8-5. ábra. 20 kVA teljesítményű háromfázisú inverter

A párhuzamos inverterekből álló rendszernek az a hátránya, hogy a fogyasztók energiaellátása állandóan egyenirányítón, akkumulátoron és inverteren keresztül történik és a szükséges összegzett inverterteljesítmény nagyobb a fogyasztói teljesítménynél.

A két megszakításmentes energiaellátó rendszer előnyeit és hátrányait összehasonlítva a párhuzamosan kapcsolt inverterekből álló rendszert tartjuk jobb megoldásnak. Ez a rendszer független a hálózat tranzienseitől és zavaraitól, nagy amplitúdó- és frekvenciastabilitást biztosít. Ezek az előnyök kompenzálják a rendszer rosszabb összehatásfokát.

3. Kivitelezett inverteres szükségáramforrás műszaki jellemzői

A Posta megrendelésére 110 V tápfeszültségű 20 kVA teljesítményű háromfázisú invertert készítettünk megszakításos üzemű szükségáramforrás céljára. Az inverter elvi felépítése a 8-1. ábra, inverteráramköre a 8-2. ábra, átkapcsoló automatikája a 8-4. ábra szerinti. Az inverter főbb műszaki jellemzői az alábbiak:

tápfeszültség	110...140 V
kimeneti váltakozófeszültség	$3 \times 220 \text{ V} \pm 3\%$
frekvenciája	$50 \text{ Hz} \pm 1\%$
torzítása névleges jellemzőknél	5%
névleges teljesítmény	20 kVA
hatásfok névleges jellemzőknél	78%
átkapcsolási idő	
a hálózati feszültség kimaradásakor	100 ms
a hálózati feszültség visszatérésekor	40 ms

Az inverter fényképe a 8-5. ábrán látható. A fénykép bal oldalán alul az átkapcsoló automatika, felette a három fázis tirisztoros inverteráramkörei láthatók. A 8-6. és 8-7. ábra oszcillogramjai a fogyasztói feszültséget mutatják hálózatkimaradásakor és hálózati feszültség visszatérésekor.

4. Összefoglalás

Megszakításos és megszakításmentes váltakozóáramú energiaellátást biztosító inverteres szükségáramforrások rendszereit vizsgáltuk meg. A megszakításos rendszerhez célszerű olyan invertert alkalmazni, amely az inverter, ill. tirisztorok vezérlésének tiltása és felengedése révén ki- és bekapcsolható. Ily módon 100 ms-nál kisebb átkapcsolási idők valósulnak meg. Erre a célra jól alkalmazható a kettős gyűjtésű inverterrendszer. Megszakításmentes energiaellátás biztosítására a párhuzamosan kapcsolt inverterekből álló, a hálózat tranzienseitől és zavaraitól mentes áramforrás a legkedvezőbb rendszer.

Irodalom

Füzesi E.—Kondor T.: Tirisztoros inverterek szükségáramforrások céljára. VKI Közlemények 3. sz. 175—186. oldal.

9.

Váltakozóáramú szaggatón át táplált aszinkron motor alkalmazásának korlátai

MARTI SÁNDOR

ÖSSZEFOGLALÁS

A háromfázisú váltakozóáramú szaggatón át táplált rövidrezárt forgórészű aszinkron motor üzemét vizsgálva, az elemzések, ill. az ellenőrző mérések azt mutatták, hogy a változtatott fordulatszámú aszinkron motor típusjelzésitménység megválasztása még akkor is külön vizsgálatot igényel, ha a hajtás teljesítménye a fordulatszám harmadik hatványával változik (pl. ventilátor, szivattyú stb). E cikk a méretezőkor figyelembe veendő alapvető összefüggéseket ismerteti.

ПРЕДЕЛЫ ПРИМЕНЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПИТАЕМОГО ЧЕРЕЗ ПРЕРЫВАТЕЛЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Ш. Марти

Резюме

При исследовании работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором питаемого через трехфазный прерыватель переменного тока контрольные измерения и анализ доказали, что выбор типовой мощности асинхронного двигателя с регулируемой скоростью вращения требует выполнения дополнительных исследований даже и в тех случаях, когда мощность привода изменяется пропорционально третьей степени скорости вращения (например: вентилятор, насос и т. д.). В статье приводятся основные взаимосвязи и зависимости, которые необходимо принимать во внимание при расчетах.

ANWENDUNGSGRENZEN DES DURCH DREHSTROMSTELLER GESPEISTEN ASYNCHRONMOTORS

S. Marti

Zusammenfassung

Den Betrieb des durch Drehstromsteller gespeisten Käfigläufermotors prüfend, haben die Analysen bzw. die Kontrollmessungen gezeigt, dass bei der Auswahl der Typenleistung des drehzahlsteuerbaren Asynchronmotors auch dann eine Extraprüfung unbedingt nötig ist, wenn sich die Leistung des Antriebes mit der dritten Potenz der Drehzahl ändert. (Z. B. Ventilator, Kreiselpumpe usw.) Der Aufsatz legt die bei der Bemessung zu berücksichtigenden grundlegenden Zusammenhänge dar.

LIMITATIONS IMPOSED ON THE APPLICATION OF ASYNCHRONOUS INDUCTION MOTORS FED THROUGH A. C. CHOPPER

S. Marti

Summary

Investigating the operation of three-phase squirrelcage asynchronous induction motors fed through a. c. chopper, analyses and checking measurements have shown that the selection of the rated power of variable-speed asynchronous motors requires special attention even if the output of a drive varies with the third power of the r. p. m. value (such as in the case of fans, pumps, etc.). The fundamental relations to be considered in the dimensioning of such drives are described.

1. Bevezetés

A villamos hajtásokban előszeretettel alkalmaznak rövidrezárt forgórészű aszinkron motorokat, mert a felépítésük egyszerűsége — ezzel együtt alacsony árak — és minimális karbantartási igényük ezt indokolja. Folyamatosan változtatható fordulatszámú hajtásokban azonban a rövidrezárt forgórészű aszinkron motort frekvenciaváltóval kell táplálni vagy az állórészfeszültség változtatásával lehet korlátozott mértékben változtatni a fordulatszámot. Az előbbi módszer elvben veszteségmentes, de mozgó alkatrész nélküli elektronikus megoldása igen összetett feladat. Az utóbbi módszert megvalósító váltakozóáramú szaggató kapcsolások felépítésükben egyszerűek, azonban a fordulatszám változtatása ez esetben még elvben sem veszteségmentes. Az alkalmazási lehetőségét elsősorban a terhelés jellege (nyomaték—fordulatszám összefüggése) és a gép jellemzői határolják. A következőkben elsősorban ezekre a kérdésekre fordítunk figyelmet, mivel a váltakozóáramú szaggató kapcsolások működését, továbbá az előforduló áramkörüi kérdéseket a szakirodalomban már részletesen tisztázták.

2. Ideális aszinkron motor változó nagyságú tápfeszültséggel táplálva

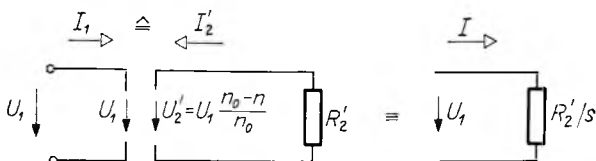
Az aszinkron motorokban az állórészre kapcsolt háromfázisú feszültségrendszer állandó amplitúdóval egyenletesen körbeforgó főmezőt hoz létre, ez a forgórész tekercselésében a főmező és a forgórész fordulatszámának a különbségével és menet-számáttétellel arányos feszültséget indukál. A forgórésztekercselésben indukált feszültség áramot indít, amelynek gerjesztését az állórészen keresztül felvett áram gerjesztése ellensúlyozza. A forgórészáram és a főmezőfluxus kölcsönhatására nyomaték keletkezik. Ha a másodlagos jellemzőket, vagyis az állórésztekercselés ellenállását és szórási reaktanciáját, a főmező létrehozásához szükséges mágnesezőáramot és a forgórésztekercselés szórási reaktanciáját elhanyagoljuk, a változtatható fordulatszámú üzemmód szemléltetésére elegendő csupán a forgórésztekercselés ellenállását figyelembe venni. Ez az elhanyagolás igen durvának tűnik és csak többfázisú, forgómezős motorra engedhető meg, de — mint a későbbiekben bebizonyítjuk —, ha a gép fordulatszámát tág határok között kívánjuk állítani, olyan nagy forgórészellenállásra van szükség, hogy mellette ezek az elhanyagolások megengedhetők és az egyszerűsítéssel kapott eredmények a valóságtól nem esnek túlságosan messze.

Az aszinkron gép ismert egyfázisú helyettesítő kapcsolását eszerint a 9-1. ábra vázlatára egyszerűsíthetjük; itt U_1 az állórészre kapcsolt fázisfeszültség, R_2' a forgórész

egy fázisának ellenállása a primer oldalra redukálva és s a gép szlipje:

$$s = (n_0 - n)/n_0,$$

amelyben n_0 a gép szinkron fordulatszáma, n az üzemi fordulatszám.



9-1. ábra. Aszinkron motor helyettesítése a forgórész-ellenállással

Az „ideális” gépben keletkező P_{Vi} veszteség (a három fázisban együtt)

$$P_{Vi} = 3I^2 R_2', \quad \text{ahol} \quad I_2' = I_1 = I = \frac{U_1}{R_2'} s, \quad \text{így} \quad P_{Vi} = 3 \frac{U_1^2}{R_2'} s^2. \quad (1)$$

A hálózathoz felvett P_H teljesítmény:

$$P_H = 3U_1 I = 3 \frac{U_1^2}{R_2'} s. \quad (2)$$

A tengelyen leadott P_T mechanikai teljesítmény a felvett teljesítmény és a veszteségi teljesítmény különbsége:

$$P_T = P_H - P_{Vi} = 3 \frac{U_1^2}{R_2'} s(1 - s) = k_m n M, \quad (3)$$

ahol M a gép nyomatéka,

k_m pedig az arányossági tényező.

Ha valamilyen módon csökkentjük a gép fordulatszámát, a gép hatásfoka is csökken, és az η_i ideális hatásfok

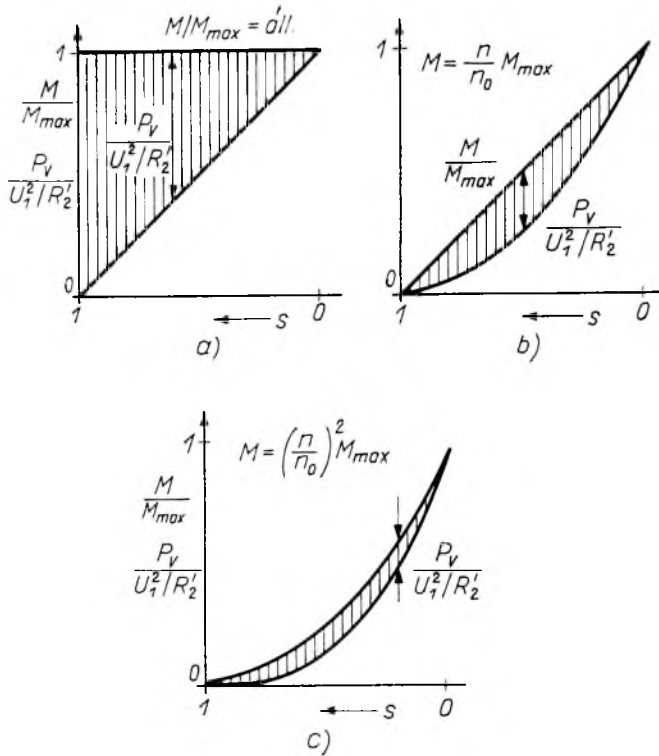
$$\eta_i = \frac{P_T}{P_H} = 1 - s = \frac{n}{n_0}, \quad (4)$$

a fordulatszám csökkentésével arányosan romlik. (Ha a forgórész ellenállását is elhanyagolnánk, akkor veszteség nem lenne, de a gép csak szinkron fordulatszámmal működhetne, mert a legkisebb fordulatszámcsökkenés hatására is végtelen nagy áramot venne fel.)

Ha a terhelhetőség meghatározása érdekében a gépben állandósult állapotban keletkező veszteséget kívánjuk meghatározni, figyelembe kell venni a terhelőnyomaték és a fordulatszám összefüggését is. Mivel a leadott teljesítmény a nyomaték és a fordulatszám szorzatával, a hatásfok pedig a szlippel arányos, belátható, hogy a veszteség a terhelőnyomaték—fordulatszám összefüggéstől függően a 9-2. ábra szerint változik. Az ábra alapján könnyen belátható, hogy *elsősorban négyzetesen változó terhelőnyomaték* (ventillátoros terhelés) esetén érdemes egyáltalán *állandó üzemi* hajtással foglalkozni, mert az *a* és *b* esetben a fordulatszám csökkenésekor fellépő nagymértékű veszteségnövekedés — a gép állandó külső hűtése esetén, de különösen önszellőztött gépekben — az állórészfeszültség változtatásával elérhető fordulatszám szabályozást illuzórikussá teszi.

Ventillátoros terhelés:

$$M_T = (n/n_n)^2 M_{Tn} \quad (5)$$



9-2. ábra. Ideális aszinkron motor vesztesége a terhelőnyomaték és a fordulatszám összefüggésének függvényében

esetén induljunk ki abból, hogy a gép telítése az állórészfeszültséget U_{1n} névleges értékre korlátozza. Ebben az esetben az n_0 szinkron fordulatszám terhelés közben nem érhető el, és a gép M_n nyomatékhoz n_n névleges fordulatszám, s_n névleges szlip és P_n névleges leadott teljesítmény tartozik:

$$P_n = 3 \frac{U_{1n}^2}{R_2'} s_n (1 - s_n) = k_m n_n M_n. \quad (6)$$

A feltételezés szerint a terhelőnyomaték a fordulatszám csökkenésével négyzetesen változik, ami azt jelenti, hogy az adott esetben a gép leadott teljesítménye a fordulatszám csökkenésekor a fordulatszám harmadik hatványa szerint csökken:

$$P_T = P_{Tn} \left(\frac{n}{n_n} \right)^3. \quad (7)$$

Határozzuk meg a gép névleges veszteségét a (4) képlet segítségével:

$$P_{v_n} = \left(\frac{1}{\eta_n} - 1 \right) P_n = \frac{s_n}{1 - s_n} P_n, \quad (8)$$

amelyben η_n a névleges szliphez tartozó hatásfok. A (8) összefüggés nemcsak a névleges fordulatszámra igaz, ezért általában négyzetes terhelőnyomaték esetén

$$P_V = \left(\frac{s}{1-s} \right) P_T = \left(\frac{s}{1-s} \right) \left(\frac{n}{n_n} \right)^3 P_{Tn} = \frac{s(1-s)^2}{(1-s_n)^3} P_{Tn}, \quad (9)$$

amelyben a (7) képletet használtuk fel. Hasonlítsuk össze a P_V veszteséget a (8) képlettel adott névleges veszteséggel

$$P_V = \frac{s}{s_n} \frac{(1-s)^2}{(1-s_n)^2} P_{Vn}. \quad (10)$$

Ez az egyenlőség a névleges üzemi jellemzők feltételezésével kapott veszteséget veti össze a csökkentett fordulatszám esetén létrejövő veszteséggel. A fordulatszámcsökkentés során a szlip (szélső esetben) 0...1 között változik. Az $s(1-s)^2$ szorzatnak $s=1/3$ értéknél maximuma van, aholis a (10) képletbe visszahelyettesítve:

$$P_{V \max} = \frac{0,148}{s_n(1-s_n)^2} P_{Vn}. \quad (11)$$

Belátható, hogy a nevezőben levő kifejezés mindenképpen kisebb a számlálóban levő 0,148 (=4/27) értéknél, kivéve, ha $s_n=1/3$.

Vizsgáljuk meg, hogy a névleges szlip függvényében mekkorának kell lennie a gép névleges teljesítményének a ventilátor névleges teljesítményéhez képest. Induljunk ki abból, hogy leszabályozott állapotban a névleges veszteséget nem haladhatjuk meg.

Az „ideális” motorban a veszteség az állórészáram négyzetével arányos (l. az (1) képletet). A veszteség korlátozása tehát azt jelenti, hogy a gépnek a névleges I_{1n} áramánál nagyobb áramot nem szabad felvennie. Határesetben állandó állórészáram esetén a gép nyomatéka a gép fluxusával, tehát az állórészre kapcsolt feszültséggel arányos. A (3) képlet eszerint így alakítható át:

$$I_2' = I_1 = I = \frac{U_1}{R_2'} s = \text{áll.}; \quad M = k_u U_1 = \frac{k_s}{s}. \quad (12)$$

A nyomaték tehát — állandó állórészáramot feltételezve — a szlippel fordított arányban változik. Az állandó veszteséghez tartozó *nyomatékhiperbola* menete a képlet számlálójában levő állandótól függ.

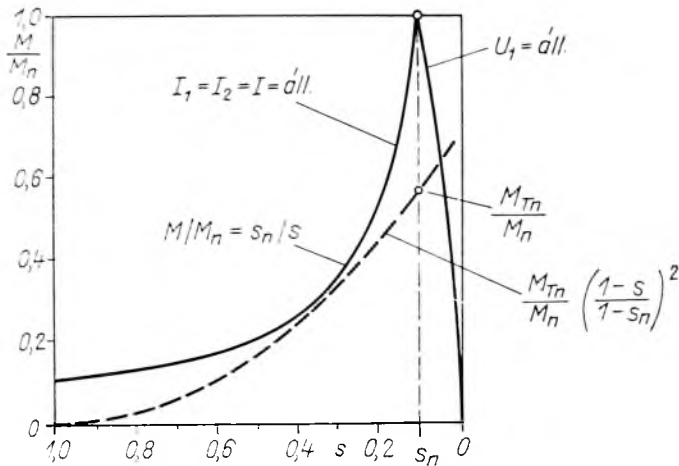
Tegyük fel, hogy a választott gép adatai névleges jellemzők mellett $s=s_n$; $U_1=U_{1n}$ és $M=M_n$. Ezeket viszonyítási alapként felhasználva, a (12) képlet így alakul:

$$\frac{M}{M_n} = \frac{s_n}{s}. \quad (13)$$

Számítsuk most ki, hogy mekkora lehet az a legnagyobb nyomaték, amit a gép ezekkel a feltételekkel négyzetesen változó terhelőnyomatékkal szolgáltatni képes.

A 9-3. ábra alapján könnyen belátható, hogy az állandó áramhoz tartozó hiperbolikus nyomatékgörbe csak akkor jár felette a négyzetesen változó terhelőnyomatéknak, ha a terhelőnyomaték M_{Tn} névleges értéke kisebb a gép névleges nyomatékánál. Eszerint a következő egyenlőtlenségnek kell teljesülnie:

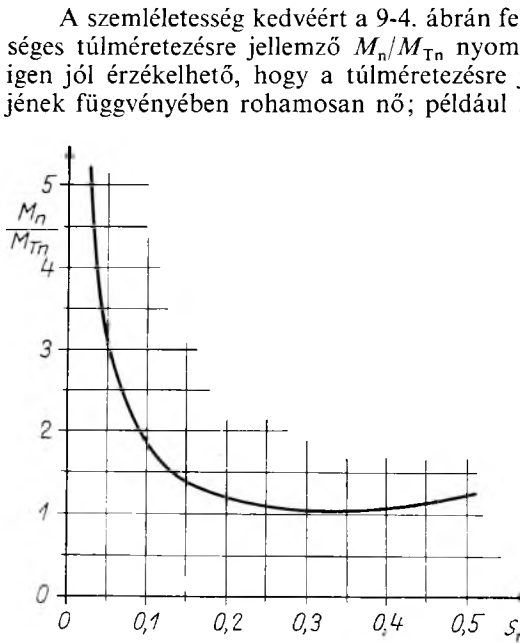
$$\frac{s_n}{s} \geq \frac{M_{Tn}}{M_n} \left(\frac{1-s}{1-s_n} \right)^2; \quad (14)$$



9-3. ábra. Ideális aszinkron motor nyomatéka állandó forgórészvesztés mellett — négyzetesen változó terhelőnyomatékkal összevetve

az egyenlőtlenség határesetéhez tartozó (s_h) szlip $s_h = 1/3$. Eszerint

$$s_n(1 - s_n)^2 \cong 0,148 \frac{M_{Tn}}{M_n} \quad (15)$$



9-4. ábra. Ideális aszinkron motor túlméretezési tényezője a névleges szlip függvényében, ventilátoros terhelés mellett, szinuszos feszültséggel táplálva

A szemléletesség kedvéért a 9-4. ábrán felrajzoljuk az s_n névleges szlip és a szükséges túlméretezésre jellemző M_n/M_{Tn} nyomatékviszony összefüggését. Az ábrából igen jól érzékelhető, hogy a túlméretezésre jellemző tényező a gép névleges szlipjének függvényében rohamosan nő; például 5% névleges szlippel működő „ideális” gép esetében a gép névleges nyomatéka több, mint háromszorosa kell legyen a ventilátor jellegű terhelés névleges nyomatékának, ami egyben az aszinkron motor névleges teljesítményének és a ventilátor névleges teljesítményének viszonyát is jelenti. Ez az optimális eset tovább romlik, ha figyelembe vesszük a valóságos esetben a gépben keletkező veszteségeket.

2.1 Aszinkron gép hatásfoka az állórészimpedancia figyelembevételével

Ha nagy forgórész-ellenállású motort alkalmazunk is, nem tekinthetünk el teljesen az állórész impedanciájától. A forgórész-ellenállás mellett azonban legyen elhanyagolható

a forgórész szórási reaktanciája. A helyettesítő kapcsolás ebben az esetben a 9-5. ábra szerinti. A gép felvett árama ekkor (komplex értékekkel):

$$I_1 = I_2 = \bar{I} = \frac{U_1}{jX_1 + R_1 + R_2'/s}, \quad (16)$$

vesztésége

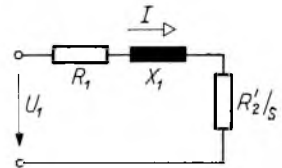
$$P_V = 3(\bar{I}\bar{I}^*)(R_1 + R_2') = \frac{3U_1^2(R_1 + R_2')}{x_1^2 + (R_1 + R_2'/s)^2}, \quad (17)$$

felvett teljesítménye:

$$P_H = 3U_1 \operatorname{Re}(I) = \frac{3U_1^2(R_1 + R_2')}{x_1^2 + (R_1 + R_2'/s)^2}; \quad (18)$$

végül hatásfoka:

$$\eta = 1 - \frac{P_V}{P_H} = 1 - \frac{R_1 + R_2'}{R_1 + R_2'/s}. \quad (19)$$

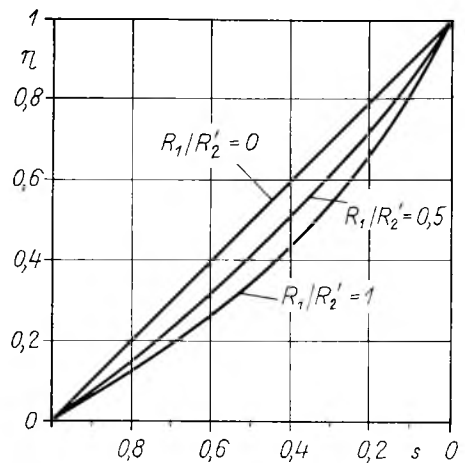


9-5. ábra. Aszinkron motor helyettesítő kapcsolása az állórész-impedancia figyelembevételével

A hatásfokot tehát az állórész- és forgórész-ellenállás viszonya és a szlip befolyásolja. A hatásfokot a szlip függvényben, az ellenálláson R_1/R_2' hányadosával, mint paraméterrel a 9-6. ábrán rajzoltuk fel. Láthatóan kedvezőtlenebb viszonyokat kapunk, ha az állórész-ellenállását is figyelembe vesszük. Ha pl. $s=0,3$, a hatásfok az $R_1/R_2' = 1$ esetben 70%-ról kb. 55%-ra csökken. Ez további túlméretezést tesz szükségessé.

2.2 A hűtés hatása

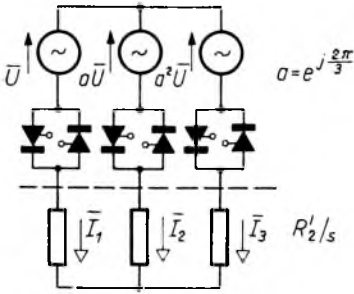
Az eddigiekben feltételeztük, hogy a gépben megengedhető veszteség állandó. Ez a feltételezés csak akkor helytálló, ha a gép külső szellőzésű vagy a fordulatszám-csökkentés viszonylag kismértékű. A gép fordulatszámával négyzetesen csökken általában a saját ventilátorral szállított légmennyiség, ez azonban nem jelenti a hűtőhatás ugyanilyen csökkenését. A hőátadás a légsebesség függvényében — meghatározott sebesség felett — alig változik, ezért megfelelően méretezett ventilátor 1:2/3 fordulatszám-változás mellett is kielégítő hűtést biztosíthat. Ezt a körülményt adott géptípusra esetenként ellenőrizni kell.



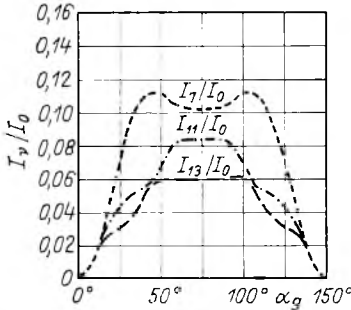
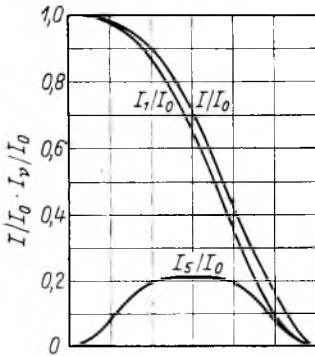
9-6. ábra. Aszinkron motor hatásfoka az állórész-impedancia figyelembevételével

3. Járulékos veszteségek váltakozóáramú szaggató kapcsolásban

Visszatérve a 9-1. ábra szerinti „ideális” motorra, a felharmonikus áramok okozta veszteséget a következő gondolatmenettel lehet közelítően meghatározni. Tekintsük a nullavezeték nélküli szimmetrikus háromfázisú váltakozóáramú szaggató kapcsolást



9-7. ábra. Váltakozóáramú szaggató és ideális aszinkron motor



9-8. ábra. Szimmetrikus, nullavezető nélküli váltakozóáramú szaggató kapcsolás felharmonikusai a vezérlési szög függvényében, ellenállásterhelés mellett

$$I_0 = U/R;$$

I a hálózati áram effektív értéke, I_v a v -edik harmonikus effektív értéke

ellenállásterheléssel (9-7. ábra). A váltakozóáramú szaggató kapcsolás — a kapcsolás kialakításától és a terhelés jellegétől függően — a kimenetén felharmonikus feszültségeket állít elő. Szimmetrikus kapcsolásban és ellenállásterhelés esetén irodalmi adatok szerint [6] 5, 7, 11, 13 stb. rendszámú felharmonikusfeszültségek jelentkeznek, a 9-8. ábrán felrajzolt amplitúdóval.

A gép hatásfokának számítására eddig alkalmazott gondolatmenet felharmonikusok jelenlétében úgy használható, ha a felharmonikusokra külön-külön állapítjuk meg a gép helyettesítő kapcsolását. Az ötszörös, hétszeres stb. felharmonikusokhoz tartozó szinkron fordulatszám a gép (alapharmonikusú) szinkron fordulatszámához képest olyan nagy, hogy a felharmonikusokra vonatkozó s_v szlip közelítőleg 1-nek vehető. Ezzel a feltevéssel a gép felvett P_H teljesítménye:

$$P_H \approx \frac{U_1^2}{R_2'} s + \frac{U_5^2}{R_2'} + \frac{U_7^2}{R_2'} + \dots, \quad (20)$$

vesztése pedig

$$P_V \approx \frac{U_1^2}{R_2'} s^2 + \frac{U_5^2}{R_2'} + \frac{U_7^2}{R_2'} + \dots, \quad (21)$$

Hatásfoka eszerint

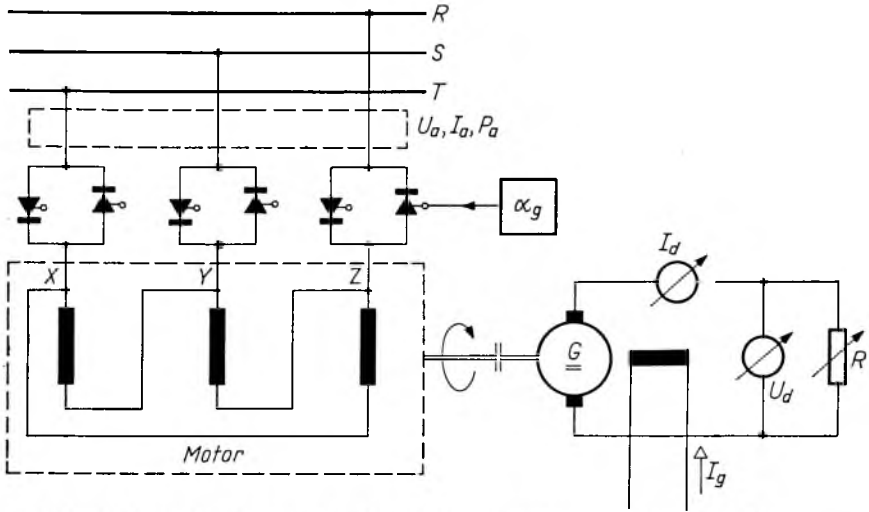
$$\eta \approx 1 - \frac{P_V}{P_H} = 1 - \frac{s + \frac{1}{s} \sum_{v=5}^{\infty} (U_v/U_1)^2}{1 + \frac{1}{s} \sum_{v=5}^{\infty} (U_v/U_1)^2} \quad (22)$$

legyen, pl. $s = 1/3$ és $\sum U_v^2/U_1^2 = 0,1$. Ekkor a szinuszos tápláláskor 66,7%-os hatásfok 51,3%-ra csökken. Más szempontból vizsgálva a felharmonikusvesztések okozta többletvesztés a gép további — nem jelentéktelen — túlméretezését teszi szükségessé.

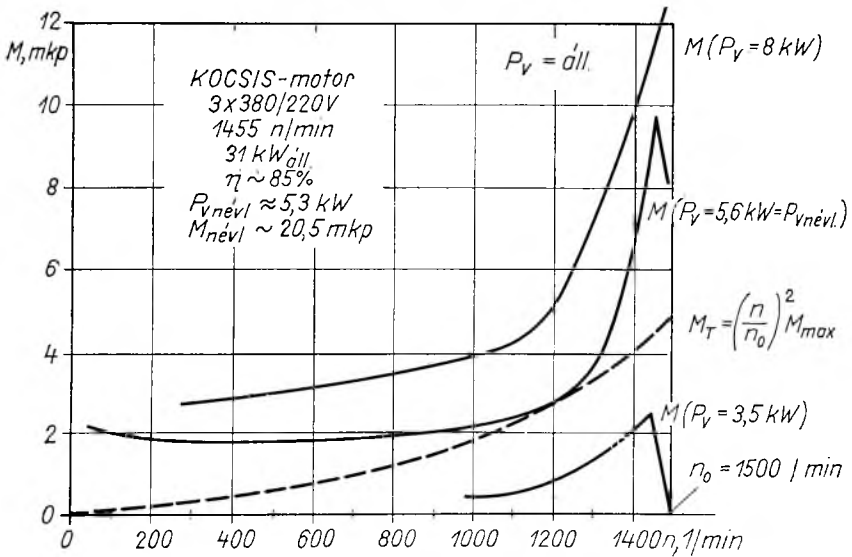
Pontosabb számítás szerint, ha valóságos gépet vizsgálunk, a szórási reaktanciák nagyobb frekvenciára vonatkoztatva nagyobbak, tehát a felharmonikus áramok kisebbek, de az áramkiszorítás is nő, tehát a tekercselések ellenállása növekszik. E két tényező együttes hatását csak adott gépen lehet vizsgálni, általánosítható következtetéseket nem lehet levonni.

4. Fordulatszám-szabályozás váltakozóáramú szaggató kapcsolással

Amennyiben a terhelés és a motor úgy van egymáshoz rendelve, hogy állandósult állapotban a motor a megengedett áramnál többet nem vesz fel a hálózatból, a szabályozás feladata csak az, hogy a tirisztorok vezérlési szögét a kívánt fordulatszám beállításához megfelelően változtassa.



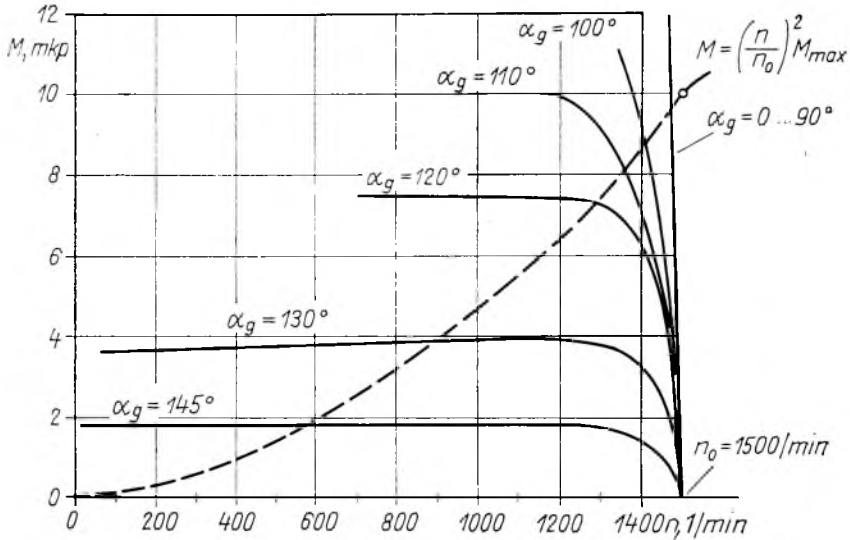
9-9. ábra. Mérőkapcsolás aszinkron gép váltakozó áramú szaggatós vezérléséhez



9-10. ábra. Aszinkron motor állandó veszteséghez tartozó nyomatéka a fordulatszám függvényében. ($M_n/M_{\text{max}} = 20,5/5 \approx 4$)

Megfelelően nagy forgórész-ellenállás mellett az állandó vezérlési szöghöz tartozó nyomaték a fordulatszám csökkentésekor emelkedik, így a szabályozóval szemben különleges igények nem merülnek fel. A beépített nagy forgórész-ellenállás azonban nem teszi lehetővé, hogy a szinkron fordulatszámot kellően megközelítsük. Bár a szükséges túlméretezés tényén ez nem változtat, előnyös olyan motort választani, amelynek a forgórész-ellenállása a forgórészfrekvencia növekedésekor nő. Ilyen típusú motor pl. az ún. „Kocsis-motor”, amely különleges kialakítása révén ezzel az előnnyel rendelkezik.*

A méréseket Kocsis-motor egy típusával végeztük, ennek eredményei láthatók a 9-10., 9-11. ábrán.



9-11. ábra. Aszinkron motor (31 kW-os Kocsis-motor) nyomatéka állandó α_g gyújtásszög mellett

Irodalom

- [1] Gerecke, E.: Asynchronmaschine mit primärseitig eingebauten Steuerbaren Ventilen. Neue Technik 1962/3. 125—134. old.
- [2] Otto, H.: Drehzahlregelung der Asynchronmaschine durch Veränderung ihrer Ständerspannung über die Anschnittsteuerung von Thyristoren. Fördern und Heben. 1966/8. 679—686. old.
- [3] Paice, D. A.: Induction Motor Speed Control by Stator Voltage Control. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1968/2. 585—590. old.
- [4] Hunyár M.: Aszinkron motorok vezérlése primer oldali antiparalel kapcsolású tirisztorpárral. Elektrotechnika. 1970/5—6. 189—200. old.
- [5] Gutt, H. J.: Bemessung stellergespeister Asynchronmaschine für bürstenlose drehzahlsteuerbare Antriebe. Siemens Zeitschrift. 1970/8. 531—534. old.
- [6] Hoffmann, D.—Michel, M.: Vergleich der Eigenschaften der vollgesteuerte und der halbgesteuerte Drehstromsteller-Schaltung. ETZ-A 1971/4. 219—222. old.

* A motortípust Kocsis László okl. gépészmérnök tervezte.

10.

Analóg modellezés a hajtásszabályozás területén

BALLÓK IMRE—WEINER GYÖRGY

ÖSSZEFOGLALÁS

Hengerművi sorvonó motor szabályozását vizsgáltuk analóg számítógépen. Meghatároztuk a szabályozókörök optimális struktúráját és beállítási értékeit. Félvezetős szabályozott hajtások modellezésére egy cél-számítógépet építettünk.

ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛОГОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ОБЛАСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРИВОДА

И. Баллок—Д. Вейнер

Резюме

Было выполнено исследование с помощью аналоговой вычислительной машины регулирования приводного двигателя прокатного стана. Были определены оптимальная структура цепей регулирования и устанавливаемые величины. Для моделирования приводов регулируемых полупроводниковыми регуляторами была построена целевая вычислительная машина.

ANWENDUNG DER ANALOGEN MODELLIERUNG AUF DEM GEBIETE DER ANTRIEBSREGELUNG

I. Ballók—Gy. Weiner

Zusammenfassung

Wir haben die Prüfung der Regelung eines in einem Walzwerk angewendeten Walzenzugmotors durch einen analogen Rechenautomaten durchgeführt. Die optimale Struktur und die Einstellungswerte der Regelkreise haben wir bestimmt. Um die durch Halbleiter geregelten Antriebe zu modellieren, haben wir einen Ziel-Rechenautomaten gebaut.

APPLICATION OF ANALOGUE SIMULATION IN THE FIELD OF DRIVE CONTROL

J. Ballók—Gy. Weiner

Summary

The control of a rolling mill drive has been investigated by means of an analogue computer. Optimum set-up and setting values of control circuits have been determined. For simulating drives controlled by semiconductor devices, a single-purpose computer has been constructed.

1. Bevezetés

A technológiai folyamatok állandó fejlődése mind szigorúbb követelményeket támaszt a villamos gépek szabályozott hajtásaival szemben. A szabályozási pontosság növelésének és a beállási idő csökkentésének határt szab a hajtás stabilitása. Szabályozott hajtások stabilitásának és minőségi jellemzőinek vizsgálatára több módszer is ismeretes, az egzakt matematikai megoldás azonban már egyszerű felépítésű szabályozott hajtások esetén is nehézkes. Bonyolult, többhurkos szabályozások vizsgálatához már a probléma matematikai megfogalmazása is nehézségekbe ütközik. A matematikai vizsgálatok további hátránya, hogy a legtöbb esetben a kiinduló adatok igen pontatlanok és nehéz követni, hogy az egyes paraméterek változása hogyan befolyásolja a szabályozás minőségi jellemzőit.

Modellezés segítségével a tervező még a részletes tervezés megkezdése előtt ellenőrizheti az elképzelt szabályozórendszer statikus és dinamikus tulajdonságait, és megállapíthatja a paramétereknek azokat az értékeit, amelyekkel a szabályozás iránti követelmények kielégíthetők.

A hajtásszabályozások területén alapvetően matematikai és fizikai modellezést különböztethetünk meg.

Matematikai modellezés esetén a szabályozott hajtás és a matematikai modell differenciálegyenletei azonosak, a modellt általában villamos analóg számítógéppel valósítjuk meg.

Fizikai modellezés esetén létrehozuk az eredeti hajtás kicsinyített mását. Ez esetben az eredeti hajtás és a modell között rendkívül szoros kapcsolat van, és így olyan jelenségek is vizsgálhatók, amelyeket matematikailag nem tudunk leírni.

Egyes esetekben a két módszert ugyanazon a modellezésen belül együttesen is használják.

A következőkben a két módszerre egy-egy példát mutatunk be.

2. A feladat ismertetése

A Dunai Vasmű Meleghengerművében a vízszintes sorvonó motort 1969-ben nagyobb teljesítményűre cserélték ki. Az új Ganz gyártmányú motor adatai:

$$P_n = 6200 \text{ kW}, \quad n_n = 50 \text{ 1/min} \text{ (mezőgyengítéssel } n_{\max} = 100 \text{ 1/min),}$$

$$U_n = 1000 \text{ V}, \quad I_n = 6650 \text{ A.}$$

A sorvonó motort Ward—Leonard-rendszerben két párhuzamosan kapcsolt generátor táplálja. A generátorok cseréjével egyidejűleg osztályunk megbízást kapott, hogy a Ward—Leonard-rendszerben az eredetileg erősítőgépes, amplitúdós szabályozórendszer helyett korszerű, tirisztoros szabályozást készítsen. A szabályozásnak a következő követelményeket kell kielégíteni:

a) A sorvonó motor fordulatszámát $-100 \text{ 1/min} \dots +100 \text{ 1/min}$ értékek között folyamatosan lehessen változtatni.

b) Az irányváltás -50 1/min fordulatszámról $+50 \text{ 1/min}$ fordulatszámmra 1 s-nál rövidebb idő alatt történjen.

c) A szabályozás a beállított fordulatszámot, 2%-nál kisebb hibával tartsa.

d) Áramkorlátozás biztosítsa, hogy az armatúraáram sem gyorsítás, sem fékezés közben, ill. a hengerlési szűrások alatt a beállított érték fölé ne növekedhessen.

e) Az áramkorlátozási érték a névlegesig terjedő fordulatszám-tartományban

(2,5...3) I_n értékre legyen állítható, és ez a mezőgyengítéses tartományban a fordulatszám függvényében folyamatosan (1,6...1,8) I_n értékre csökkenjen.

f) Az armatúraáram változási sebessége maximum 150 000 A/s legyen.

E követelmények kielégítésére a 10-1. ábrán látható szabályozást terveztük.

A tervezés során a következő kérdésekre kellett választ adnunk:

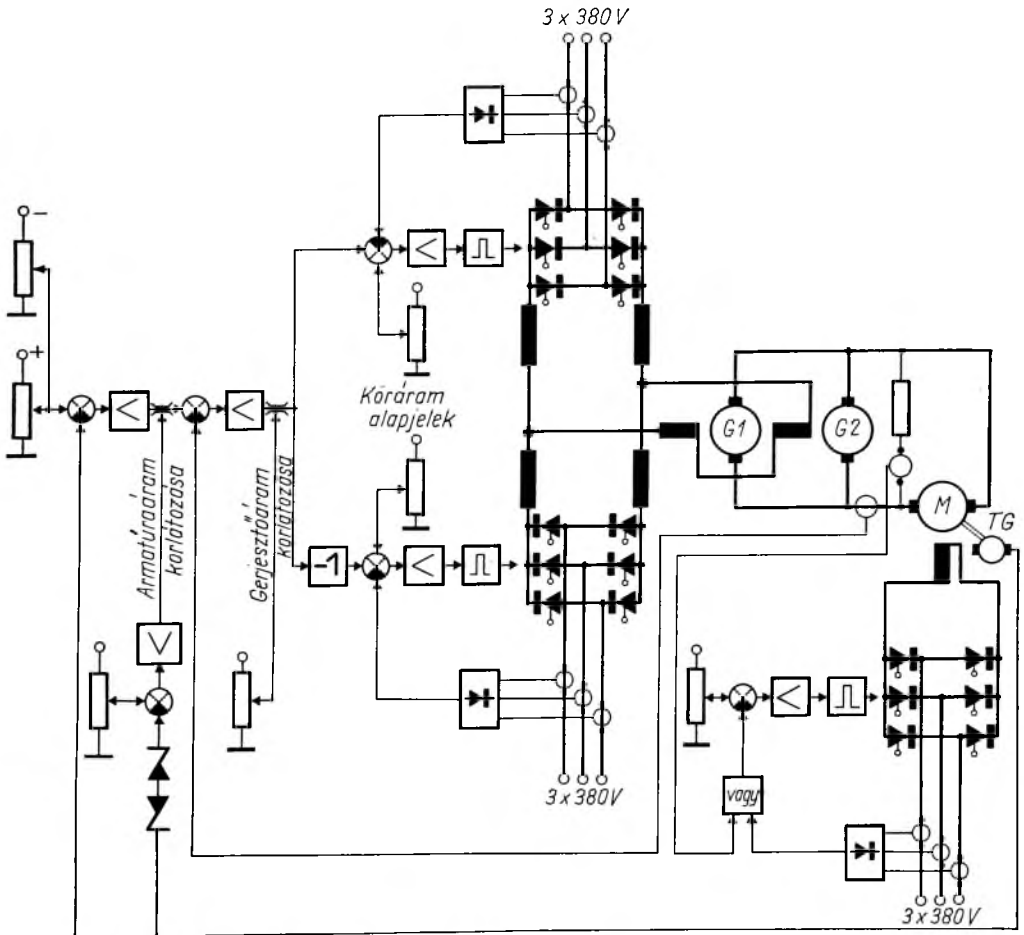
— A gerjesztőfeszültség forszírozását hányszorosra kell választani az 1 s-on belüli reverzáláshoz? A generátorok sorbakapcsolt gerjesztőkörének adatai:

$$U_{Ggn}=60 \text{ V}, \quad I_{Ggn}=400 \text{ A}, \quad T_{Gg}=3,3 \text{ s.}$$

A motor gerjesztőkörének adatai:

$$U_{Mgn}=160 \text{ V}, \quad I_{Mgn}=630 \text{ A}, \quad T_{Mg}=5 \text{ s.}$$

— Ez a forszírozás biztosítja-e, hogy a viszonylag gyors sorvonó motor ellenére (elektromechanikai időállandó 40 ms, villamos időállandó 30 ms) a gyorsítások alatt az armatúraáram végig az áramkorlátozási értéken maradjon?



10-1. ábra. Sorvonó motor szabályozási hatásvázlata

— Az armatúraáram maximális változási sebességére megadott $150\,000\text{ A/s}$ nem jelent-e korlátozást a forszírozás kihasználásában?

A 10-1. ábrán látható szabályozórendszerben milyen jellegűek legyenek a szabályozóerősítők, erősítésüket és frekvenciamenetüket milyen értékre kell választani?

— Nem kell-e módosítani a szabályozórendszeren (pl. dI/dt visszavezetést is alkalmazni)?

E kérdések vizsgálata során figyelembe kell venni, hogy az egyenáramú gépek mágnesezési jelleggörbéinek telítődése miatt az előbbieken megadott időállandók a mágnesezési görbe kezdeti szakaszára vonatkoznak, a névleges gerjesztés környezetében az időállandók kb. harmadára csökkennek.

Ha a gerjesztőköri egyenirányítók tápfeszültségét 380 V -nál nagyobbra kell választani, akkor a tirisztoros egyenirányító egységek előállításának költségei ugrás-szerűen megnövekednek. Ekkor ugyanis a feszültségnövelő transzformátoron kívül vagy drága, nagy zárófeszültségű nyugati tirisztorokat kell beszerezni, vagy a könnyen beszerezhető szovjet gyártmányú tirisztorokból ($T-150-10$) soros kapcsolást kell kialakítani. A tirisztoros egységek 380 V -os táplálása a generátoroknál kb. nyolcszoros, a motornál kb. háromszoros forszírozást biztosít.

A szabályozás analóg számítógépeken való modellezéséhez a következő egyszerűsítő feltételezéseket tettük:

1. A $G1$ és $G2$ generátorok között a terheléskiegyenlítés tökéletes, tehát a két gép egyetlen géppel helyettesíthető.

2. A lendítőtömeg hengerlés közbeni változását elhanyagoljuk.

3. A köráramos, ellenpárhuzamos kapcsolású áramirányító egység egyetlen, mindkét irányban áramot adó egységgel helyettesíthető.

4. A tirisztoros híd teljesen sima egyenfeszültséget szolgáltat (csak a feszültség középértékét vesszük figyelembe).

5. A szabályozás holtidőit elhanyagolhatók.

6. Az áram- és feszültségváltók átviteli függvényei ideálisak.

3. A feladat modellezése analóg számítógéppel

Mindezek figyelembevételével elkészítettük a hajtás modelljét analóg számológépen. A számítási vázlat — a 10-2. ábra jelöléseivel — a 10-3. ábrán látható. A mágnesezési görbék nemlinearitását a $FG I$ és $FG II$ függvénygenerátorokkal képeztük le. A 10-3. ábra jelölései:

$GG\dot{A}SZ$ a generátor gerjesztőáram-szabályozója,

$\dot{A}SZ$ az armatúraáram szabályozója,

FSZ fordulatszám-szabályozó,

$MG\dot{A}SZ$ a motor gerjesztőáramának szabályozója,

K komparátor,

R_{Gg} a generátor gerjesztőköri ellenállása,

R_{Mg} a motor gerjesztőköri ellenállása,

L armatúraköri induktivitás,

R armatúraköri ellenállás,

Θ a motor tehetetlenségi nyomatéka,

L_M a motor armatúraköri induktivitása,

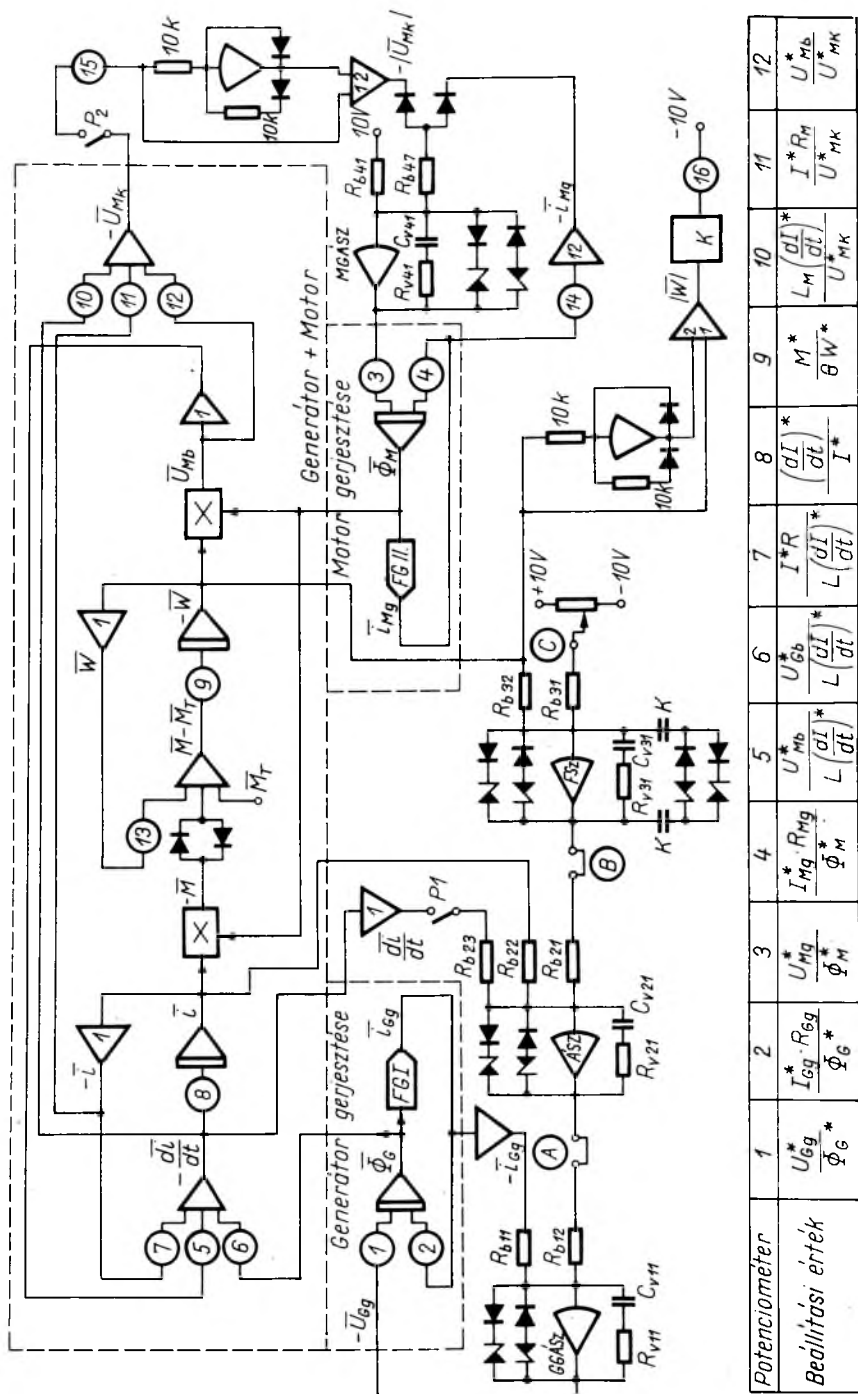
R_M a motor armatúraköri ellenállása,

I_{Gg} a generátor gerjesztőárama,

Φ_G a generátor fluxusa,

Műveleti egység neve	Művelet	Elvi kapcsolás	Számítási vázlatban alkalmazott jelölés	Megjegyzés
Együttható potencióméter	Szorzás állandóval			$0 \leq a \leq 1$
Műveleti erősítő	Jel-fordítás			$R_V = R_b$
	Szorzás állandóval			$a = \frac{R_V}{R_b}$
	Összegezés			$a_i = \frac{R_V}{R_{bi}}$
	Integrálás			$T_i = R_b C_V$ C_V -t U_0 értékre feltölteni! $[U_0 = U_k(t=0)]$
	Differenciálás			$T_D = R_V C_b$ nem alkalmazzuk
	Átviteli függvény leképezése		$U_k(s) = -\frac{Z_V(s)}{Z_b(s)} U_b(s)$	S a Laplace-operátor
Szorzó	Szorzás	Géptípustól függ		
Függvénygenerátor	A függvény előállítása	Géptípustól függ		Az $f(U_b)$ tetszőleges függvény lehet

10-2. ábra. Műveleti egységek jelölései



* Felvehet maximális értékek

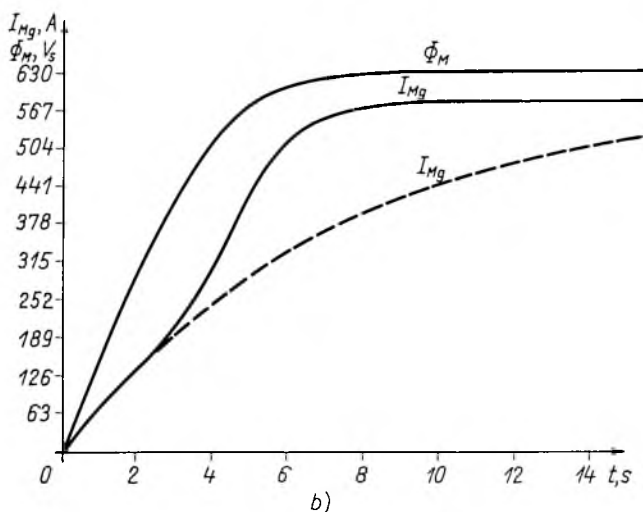
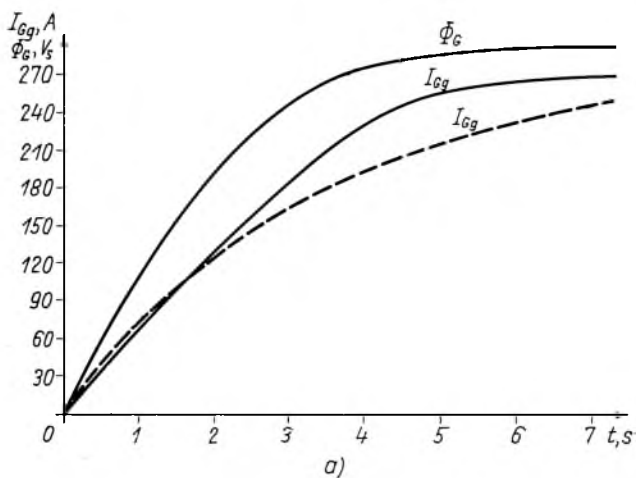
Potenciometer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Beállítási érték	\bar{U}_{eg}^*	$\bar{I}_{eg}^* \cdot R_{bg}^*$	\bar{U}_{Mg}^*	$\bar{I}_{Mg}^* \cdot R_{Mg}^*$	\bar{U}_{Mb}^*	\bar{U}_{gb}^*	$I^* R$	$\frac{dI}{dt}$	M^*	$L_M \left(\frac{dI}{dt} \right)^*$	$I^* R_M$	$\frac{U_{Mb}^*}{U_{Mk}^*}$
	$\bar{\Phi}_g^*$	$\bar{\Phi}_g^*$	$\bar{\Phi}_M^*$	$\bar{\Phi}_M^*$	$L \left(\frac{dI}{dt} \right)^*$	$L \left(\frac{dI}{dt} \right)^*$	$L \left(\frac{dI}{dt} \right)^*$	I^*	$\frac{M^*}{\theta W^*}$	$\frac{L_M \left(\frac{dI}{dt} \right)^*}{U_{Mk}^*}$	$\frac{I^* R_M}{U_{Mk}^*}$	$\frac{U_{Mb}^*}{U_{Mk}^*}$

10-3. ábra. Sorvonó motor szabályozásának analóg számítógépes programja

- U_{Gg} a generátor gerjesztőfeszültsége,
- I a motor armatúraárama,
- M a motor nyomatéka,
- M_T terhelőnyomaték,
- W a motor fordulatszáma,
- U_{Mb} a motor belső feszültsége,
- U_{Mk} a motor kapocsfeszültsége,
- I_{Mg} a motor gerjesztőárama,
- Φ_M a motor fluxusa,
- U_{Mg} a motor gerjesztőfeszültsége.

A felülhúzással jelölt mennyiségek a maximális értékre vonatkoztatott viszonylagos mennyiségeket jelentik, a csillaggal jelöltek pedig a felvett maximális értékeket.

A generátor, ill. a motor gerjesztőáramának időfüggvénye egységugrás alakú gerjesztőfeszültség-változás esetén a 10-4. ábrán látható. Szaggatott vonal jelöli



10-4. ábra. Generátor (a) és motor (b) felgerjedési jelleggörbéi

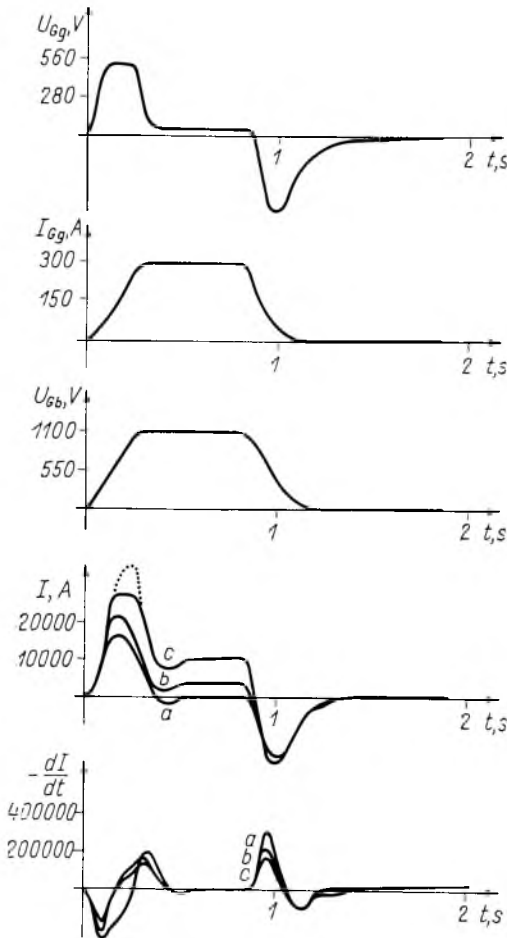
a gerjesztőáram változását abban az esetben, ha nem vesszük figyelembe a mágnesezési görbe nemlinearitását. Megfigyelhető, hogy az áramok mindkét esetben azonos meredekséggel indulnak, de később a telítés miatt jelentősen eltérnek.

A szabályozóköroket a következő lépésekben állítottuk be:

1. A generátor gerjesztőáram-szabályozójának beállítása.
2. Az áramszabályozó beállítása.
3. A fordulatszám-szabályozó beállítása.
4. A motor gerjesztőáram-szabályozójának beállítása.

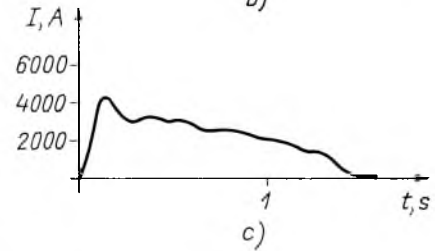
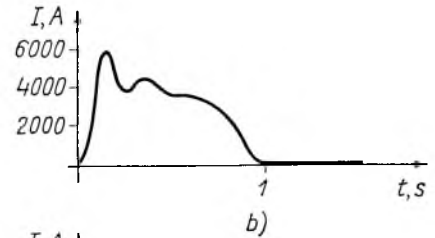
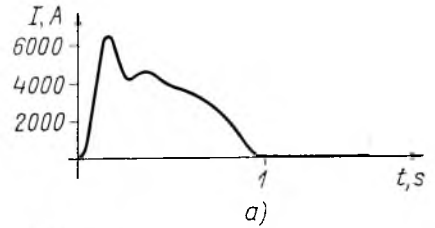
Szükség esetén az előzőleg beállított szabályozókat is módosítottuk.

1. A motornak állandó névleges gerjesztést adunk, a fluxuscökkenést a motor gerjesztőáram-szabályozójának beállításáig kikapcsoljuk (P2 KI állásban). Az A pontban bontjuk a rendszert (10-3. ábra) és egy kapcsolón keresztül egység-



10-5. ábra. Generátor gerjesztőáram-szabályozó körének átmeneti függvényei

a görbe üresjárás; b görbe 4000 A terhelés; c görbe 10 000 A terhelés; $R_{b11} = R_{b12} = 10 \text{ k}\Omega$; $R_{v11} = 120 \text{ k}\Omega$; $C_{v11} = 5 \text{ }\mu\text{F}$



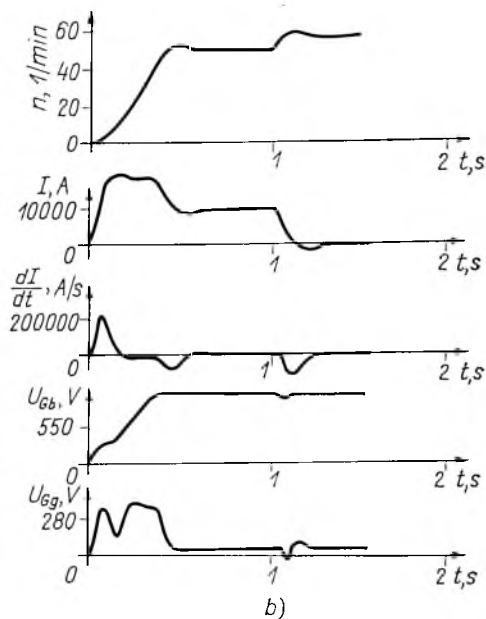
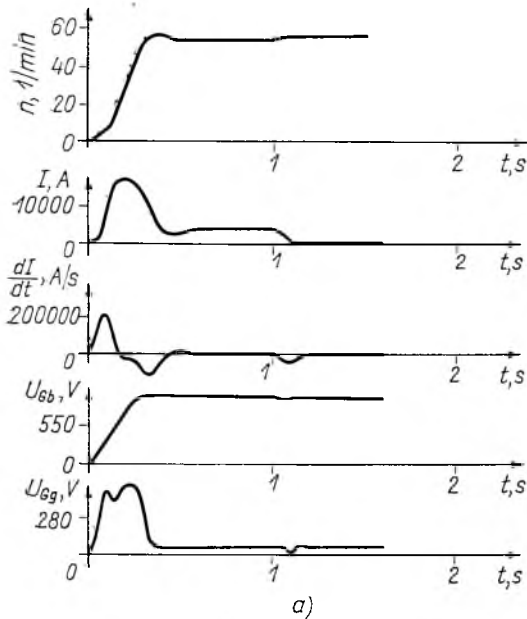
10-6. ábra. Armatúraáram-szabályozó kör átmeneti függvényei (PI jellegű áramszabályozó)

$$R_{b11} = R_{b12} = 10 \text{ k}\Omega, \\ R_{v11} = 120 \text{ k}\Omega, \\ C_{v11} = 5 \text{ }\mu\text{F}.$$

a) $R_{b21} = R_{b22} = 20 \text{ k}\Omega,$
 $C_{v21} = 25 \text{ }\mu\text{F};$
 $R_{v21} = 5 \text{ k}\Omega,$

b) $R_{v21} = 5 \text{ k}\Omega,$
 $R_{b21} = R_{b22} = 20 \text{ k}\Omega,$
 $C_{v21} = 10 \text{ }\mu\text{F};$

c) $R_{b21} = R_{b22} = 20 \text{ k}\Omega,$
 $R_{v21} = 1 \text{ k}\Omega,$
 $C_{v21} = 25 \text{ }\mu\text{F};$



10-7. ábra. Armatúraáram-szabályozó kör átmeneti függvényei (di/dt visszacsatolással)

a) üresjárásban,
 $R_{b11} = R_{b12} = 10 \text{ k}\Omega$,
 $R_{v11} = 120 \text{ k}\Omega$,
 $C_{v11} = 5 \text{ }\mu\text{F}$;

b) terheléssel
 $R_{b21} = R_{b22} = R_{b23} = 10 \text{ k}\Omega$,
 $R_{v21} = 10 \text{ k}\Omega$,
 $C_{v21} = 5 \text{ }\mu\text{F}$.

10-8. ábra. Fordulatszám-szabályozó kör átmeneti függvényei

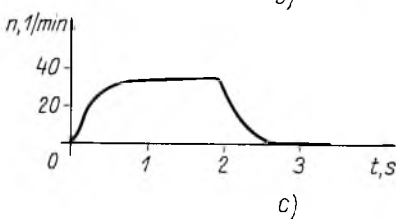
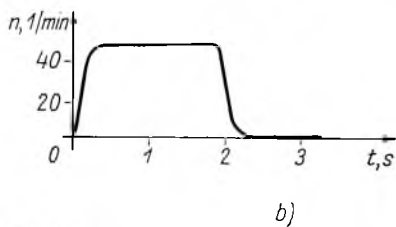
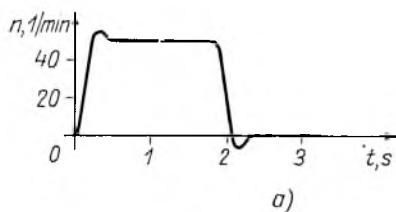
$R_{b11} = R_{b12} = 10 \text{ k}\Omega$,
 $R_{v11} = 120 \text{ k}\Omega$,
 $C_{v11} = 5 \text{ }\mu\text{F}$;

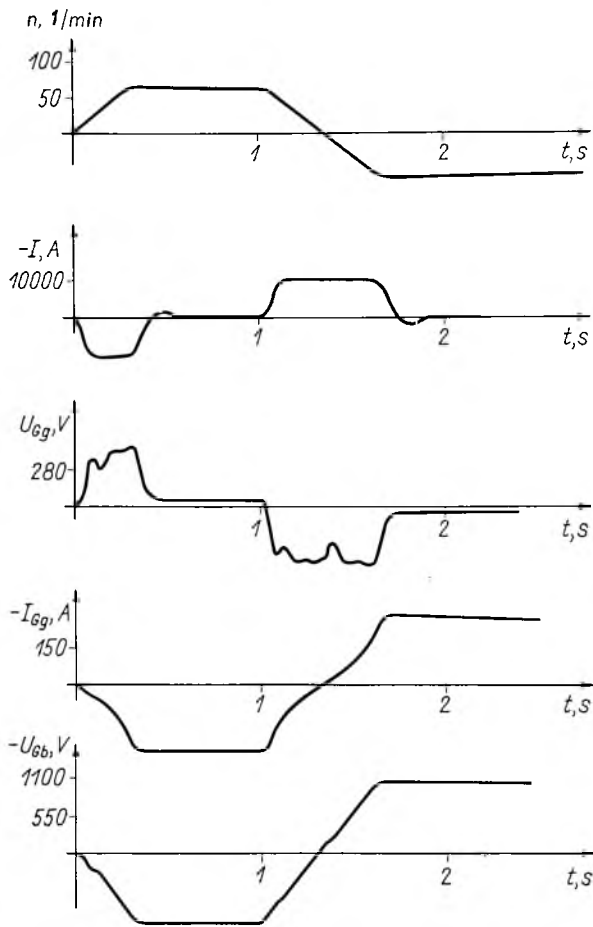
$R_{b21} = R_{b22} = R_{b23} = 10 \text{ k}\Omega$,
 $R_{v21} = 10 \text{ k}\Omega$,
 $C_{v21} = 5 \text{ }\mu\text{F}$.

a)
 $R_{b31} = R_{b32} = 10 \text{ k}\Omega$,
 $R_{v31} = 20 \text{ k}\Omega$,
 $C_{v31} = 0 \text{ }\mu\text{F}$;

b)
 $R_{b31} = R_{b32} = 5 \text{ k}\Omega$,
 $R_{v31} = 20 \text{ k}\Omega$,
 $C_{v31} = 0 \text{ }\mu\text{F}$;

c)
 $R_{b31} = R_{b32} = 10 \text{ k}\Omega$,
 $R_{v31} = 10 \text{ k}\Omega$,
 $C_{v31} = 0 \text{ }\mu\text{F}$;





10-9. ábra. Indulás és reverzalás üresen járó motorral

$R_{b\ 11} = R_{b\ 12} = 10\ \text{k}\Omega,$	$R_{b\ 21} = R_{b\ 22} = 1\ \text{k}\Omega,$	$R_{b\ 31} = R_{b\ 32} = 5\ \text{k}\Omega,$
$R_{v\ 11} = 120\ \text{k}\Omega,$	$R_{b\ 23} = 2,5\ \text{k}\Omega,$	$R_{v\ 31} = 50\ \text{k}\Omega,$
$C_{v\ 11} = 5\ \mu\text{F};$	$R_{v\ 21} = 10\ \text{k}\Omega,$	$C_{v\ 31} = 5\ \mu\text{F}.$
	$C_{v\ 21} = 5\ \mu\text{F};$	

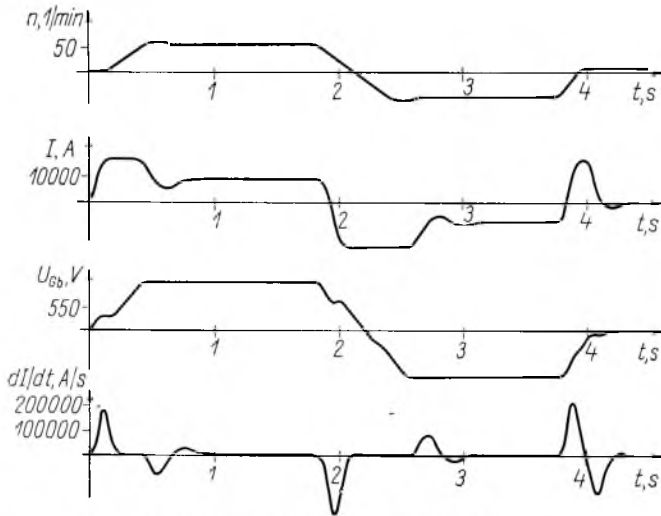
3. Az alapjelet a C pontban adjuk, a motor gerjesztése változatlanul a névleges. A 10-8. ábrán különböző fordulatszám szabályozó beállításokhoz láthatók felvételek. A 10-9. és 10-10. ábrákon a szabályozó optimálisnak talált beállításával reverzalási folyamat látható üresen járó és terhelt motorral.

Az eddigiek alapján megállapítható, hogy üresen járó motor esetén a kb. tízszeres forszírozású gerjesztőfeszültség még nem biztosítja az állandó árammal (20 000 A) történő gyorsítást (10-5. ábra), de 10 000 A-es áramkorlátozás (10-9. ábra) vagy terhelt gép (10-7b ábra) esetén ezt a forszírozást már nem lehet kihasználni. Az 1 s-on belüli reverzalás pedig már kb. nyolcszoros forszírozással biztosítható.

4. A fluxuscökkentéssel kiegészített teljes szabályozási rendszert vizsgáljuk. A motor gerjesztőáram-szabályozója a motor kapcsolófeszültségéről egy diódán ke-

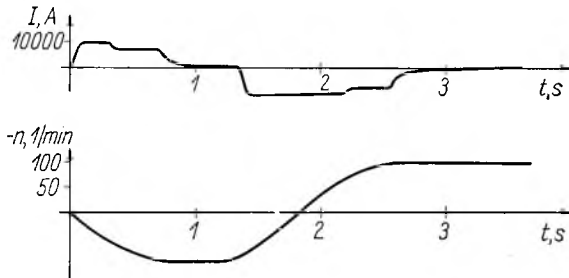
ugrasszerű alapjelet adunk a generátor gerjesztőáram-szabályozójára. A generátor gerjesztőfeszültségének maximális értéke 560 V. A generátor gerjesztőáram-szabályozóját úgy állítjuk be, hogy I_{Gg} a lehető legrövidebb idő alatt, túllendülés nélkül érje el állandósult állapotát. Az ily módon optimálisan beállított szabályozókkal vettük fel a 10-5. ábrát. A felvételekből megállapítható, hogy az armatúraáram, már kis terhelés esetén is eléri a korlátozási (20 000 A) és a dI/dt a megengedett (150 000 A/s) értéket.

2. Ez esetben a B pontban bontjuk a rendszert, és ide adjuk az egységugrasszerű alapjelet. Az áramszabályozó beállításának kritériuma, hogy egységugrás alakú alapjel esetén az áramban ne legyen túllendülés, és a motor állandó árammal gyorsuljon fel. Ezeknek a követelményeknek PI-jellegű áramszabályozóval nem lehet kielégítően eleget tenni (10-6. ábra), ezért az áramszabályozóba a dI/dt -től negatív visszacsatolást vezetünk (PI kapcsoló BE), amellyel már megfelelő minőségi követelményeknek lehetett eleget tenni. A szabályozó optimálisnak talált beállításával vettük fel a 10-7. ábrát.



10-10. ábra. Indulás és reverzálás terhelt motorral

$R_{b11} = R_{b12} = 10 \text{ k}\Omega,$	$R_{b21} = R_{b22} = 1 \text{ k}\Omega,$	$R_{b31} = R_{b32} = 5 \text{ k}\Omega,$
$R_{v11} = 120 \text{ k}\Omega,$	$R_{b23} = 2,5 \text{ k}\Omega,$	$R_{v31} = 50 \text{ k}\Omega,$
$C_{v11} = 5 \text{ }\mu\text{F};$	$R_{v21} = 10 \text{ k}\Omega,$	$C_{v21} = 5 \text{ }\mu\text{F}.$
	$C_{v21} = 5 \text{ }\mu\text{F};$	



10-11. ábra. Indulás és reverzálás mezőyengítéssel

$R_{b11} = R_{b12} = 10 \text{ k}\Omega,$	$R_{b31} = R_{b32} = 5 \text{ k}\Omega,$
$R_{v11} = 120 \text{ k}\Omega,$	$R_{v31} = 50 \text{ k}\Omega,$
$C_{v11} = 5 \text{ }\mu\text{F};$	$C_{v31} = 5 \text{ }\mu\text{F};$
$R_{b21} = R_{b22} = 1 \text{ k}\Omega,$	$R_{b41} = R_{b42} = 10 \text{ k}\Omega,$
$R_{b23} = 2,5 \text{ k}\Omega,$	$R_{v41} = 120 \text{ k}\Omega,$
$R_{v21} = 10 \text{ k}\Omega,$	
$C_{v21} = 5 \text{ }\mu\text{F};$	

resztül negatív visszacsatolást kap ($P2$ kapcsoló BE). A 15 és 14 jelű potenciométerekkel lehet beállítani a fluxuscsökkenés kezdetét. A folyamatos áramkorlát-csökkentést az analóg számítógépen nem lehetett egyszerű eszközökkel megoldani, ezért egy komparátorral a névleges fordulatszám elérésekor az áramkorlátozás értékét ugrás-szerűen csökkentettük. A 10-11. ábrán egy bekapcsolási és reverzálási folyamat látható.

4. A vizsgálatok elemzése

A vizsgálatok eredményét, válaszul a korábban feltett kérdésekre — az eddig elmondottak kiegészítéseként — a következőkben foglalhatjuk össze:

1. Elegendő nyolcszoros forszírozást (380 V-os tápfeszültséget) használni.

2. A jó stabilitás és áramkorlátozás érdekében az áramszabályozóba negatív dI/dt visszacsatolás is kell.

3. A szabályozóerősítők P és PI jellegűek lehetnek, és a visszacsatoló elemeket a következő értékek környezetében kell megválasztani:

a) a generátor gerjesztőáram-szabályozója:

$$R_{b11} = R_{b12} = 10 \text{ k}\Omega,$$

$$R_{v11} = 120 \text{ k}\Omega,$$

$$C_{v11} = 5 \text{ }\mu\text{F};$$

b) armatúraáram-szabályozó:

$$R_{b21} = R_{b22} = 1 \text{ k}\Omega,$$

$$R_{b23} = 2,5 \text{ k}\Omega,$$

$$R_{v21} = 10 \text{ k}\Omega,$$

$$C_{v21} = 5 \text{ }\mu\text{F};$$

c) fordulatszám-szabályozó:

$$R_{b31} = R_{b32} = 5 \text{ k}\Omega,$$

$$R_{v31} = 50 \text{ k}\Omega,$$

$$C_{v31} = 5 \text{ }\mu\text{F};$$

d) a motor gerjesztőáram-szabályozója:

$$R_{b41} = R_{b42} = 10 \text{ k}\Omega,$$

$$R_{v41} = 120 \text{ k}\Omega,$$

(P -jellegű).

4. A 150 000 A/s-nál nagyobb áramváltozási sebességek elkerülése érdekében esetleg nemlineáris dI/dt visszacsatolás szükséges.

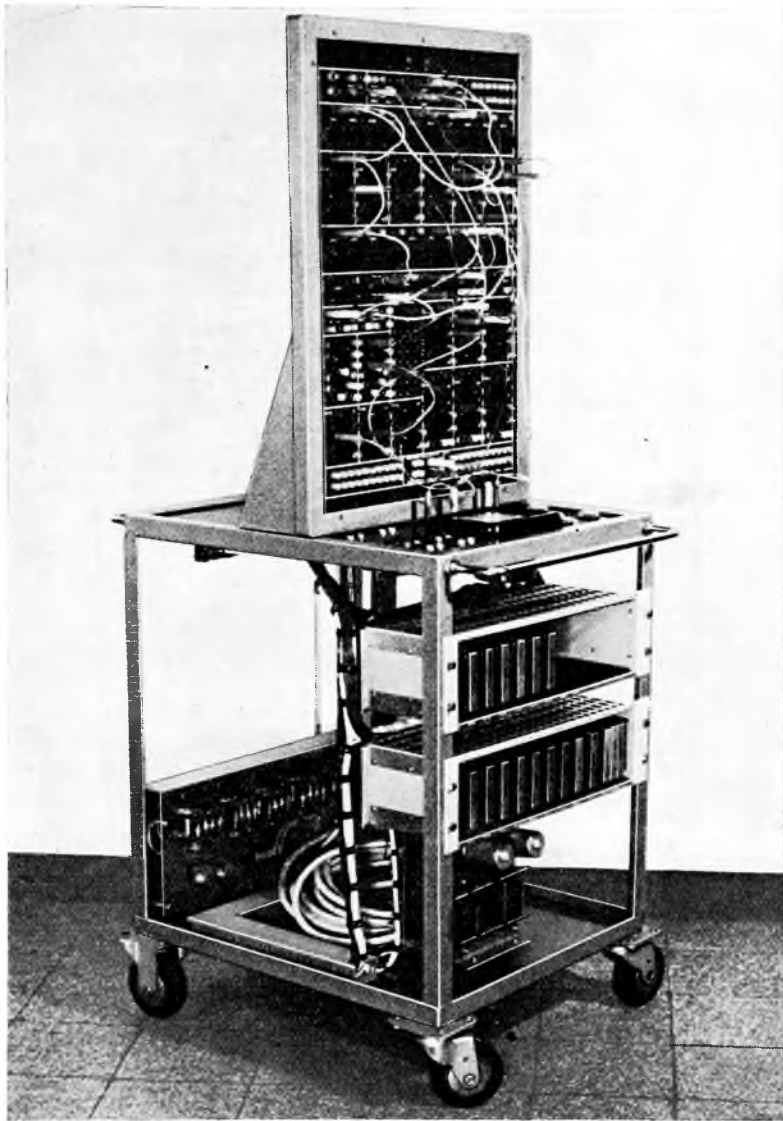
5. Cél-számítógép hajtásszabályozások vizsgálatához

Analóg számítógépen való modellezésre nincs mindig lehetőség, ezenkívül sok esetben a számítógépen egyáltalán nem, vagy csak bonyolult programozással modellezhetők olyan jelenségek, amelyek a valóságos szabályozásokban állandóan fellépnek, elsősorban a zavarokra, telítődésekre, holtávokra és nemlinearitásokra gondolunk.

E hiányosságok kiküszöbölésére osztályunkon analóg modellezőberendezést készítettünk. A berendezés elsősorban tirisztoros beavatkozószervekkel rendelkező hajtások modellezésére alkalmas, és azokból a tipizált egységekből épül fel, amelyeket a végleges berendezés elkészítéséhez is alkalmazunk.

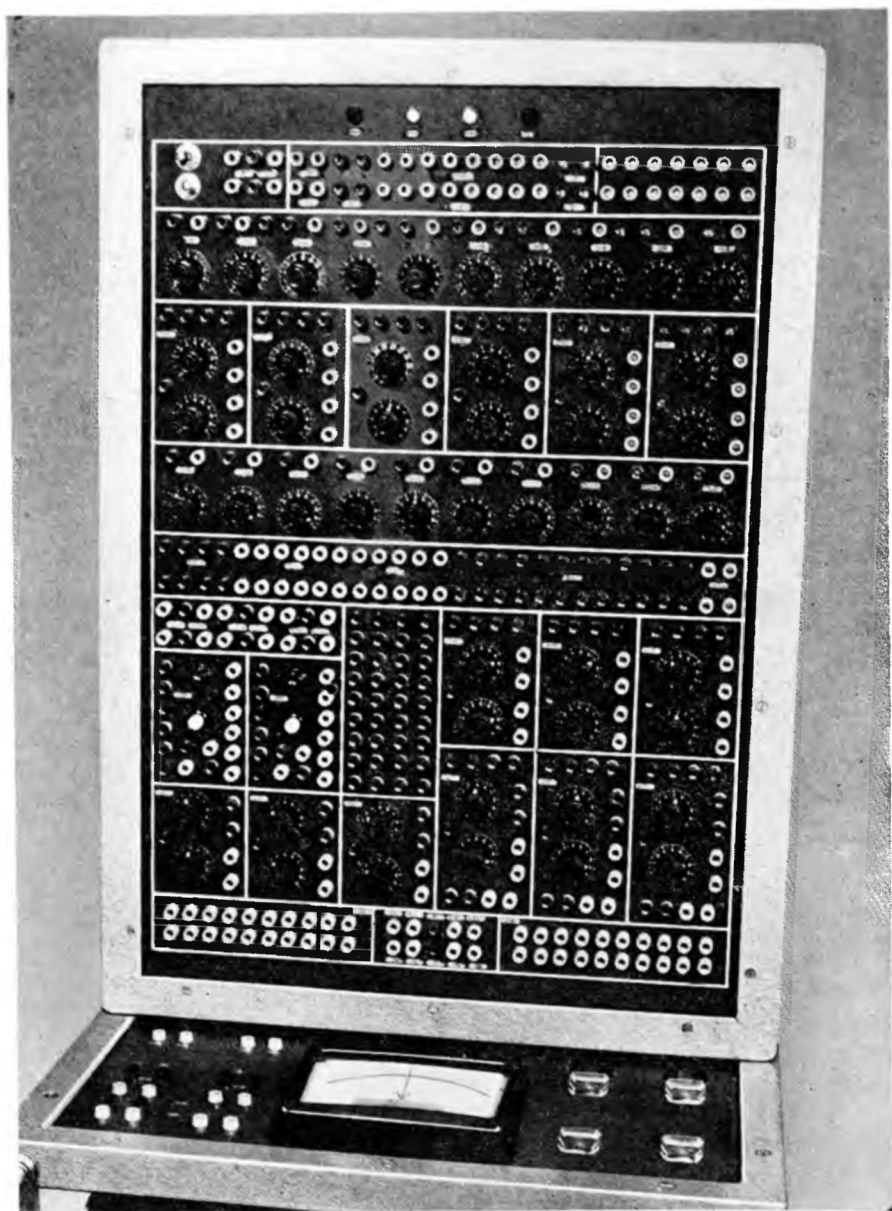
<i>Elemek</i>	<i>Típus</i>
1 db tápegység	TE-12
3 db szinkronozótranszformátor	ST-3
6 db gyűjtőegység	GT-1/2
6 db impulzustranszformátor	IT-8
9 db műveleti erősítő	ME-2
2 db elektronikus védelem	EV-1
2 db komparátor	K-1/2
4 db relé	MY-2
potenciométerek, kondenzátorok, ellenállások, kapcsolók, jelzőlámpák, műszerek.	

A berendezés fényképe a 10-12. ábrán látható.



10-12a ábra. Analóg modellező egység félvezetős hajtások számára

Az egységek bemeneti, kimeneti és fontosabb ellenőrző pontjai egységenként csoportosítva az előlapon található. Az előlapon levő pontok összedugasolásával rövid idő alatt bármelyik, a gyakorlatban használatos szabályozórendszer összeállítható. Modellezés közben a szabályozóerősítők visszacsatolásai, korlátozásai, a visszavezetett jelek szűrése, a szabályozókörök körerősítése és frekvenciamenete gyorsan és kényelmesen változtathatók. A tirisztoros beavatkozószervekhez a gyűjtőegységekről vagy az impulzustranzformátorokról lehet csatlakozni. Háromfázisú és egyfázisú tipizált tirisztoros beavatkozóegységek a laboratóriumban általában rendelkezésre állnak, így kisebb teljesítményű hajtásokat (néhányszor 10 kW) vég-



10-12b ábra

leges formájuknak megfelelően lehet összeállítani és a kísérletek lefolytatása után a bonyolultabb szabályozott hajtások is biztonságosan gyárthatók. Nagyobb teljesítményű hajtások esetén az osztályon található motorokkal vagy a géptermi gépcsoportokkal kisebb teljesítményszinten lehet a hajtást modellezni. Ez esetben úgy kell a gépeket kiválasztani, hogy a legfontosabb paraméterek (elektromechanikai, villamos, gerjesztőköri időállandók, az armatúrákör relatív ellenállása) megegyezzenek vagy arányosak legyenek a nagyteljesítményű hajtások adataival.

11.

Tirisztoros áramirányítók rövidzárlatvédelme, a kommutációs fojtótekerics méretezése

MLINKÓ TAMÁS

ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozat foglalkozik a tirisztoros áramirányítókból előfordulható rövidzárási áramokkal olyan mértékben, hogy a kommutációs fojtótekerics méretezési eljárása követhető legyen. A méretezési szempontok felsorolásán túlmenően diagramokat közöl a konkrét feladatok megvalósításához. Példát és mérési eredményt tartalmaz adott áramirányítóhoz tartozó kommutációs fojtótekericsről.

ЗАЩИТА ОТ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ КОНВЕРТЕРОВ НА ТИРИСТОРАХ, РАСЧЕТ КОММУТАЦИОННОГО ДРОССЕЛЯ

Т. Млинко

Резюме

В статье рассматриваются токи короткого замыкания, встречающиеся в конвертерах, построенных на тиристорах с такой подробностью, чтобы можно было проследить процесс расчета параметров коммутационного дросселя. Помимо перечисления принципов проведения расчета приводятся и диаграммы для конкретной реализации технического задания. Статья содержит пример и результаты измерения о коммутационном дросселе, относящемся к данному конвертеру.

KURZSCHLUSSSCHUTZ THYRISTORISierter STROMRICHTER, BEMESSUNG DER KOMMUTATIONS-DROSSEL

Т. Млинко

Zusammenfassung

Der Aufsatz befasst sich mit den in den thyristorisierten Stromrichtern auftretenden Kurzschlussströmen in solchem Mass, dass, das Bemessungsverfahren der Kommutationsdrossel verfolgt werden kann. Ausser der Aufzählung der Bemessungs-Gesichtspunkte gibt er Diagramme zur Ausführung konkreter Aufgaben an. Er enthält ein Beispiel und ein Messergebnis über die zum gegebenen Stromrichter gehörige Kommutationsdrossel.

SHORT CIRCUIT PROTECTION OF THYRISTOR RECTIFIERS. DIMENSIONING OF COMMUTATION CHOKE-COILS

T. Mlinkó

Summary

The short-circuit currents expectable in thyristor rectifiers are dealt with in such a detail as to permit better understanding of the procedure of dimensioning commutation choke-coils. In addition to enumerating the aspects of dimensioning, diagrams are shown to facilitate the solution of practical tasks. An example and the result of measurements performed on a commutation choke-coil of a given rectifier are included in the paper.

1. Bevezetés

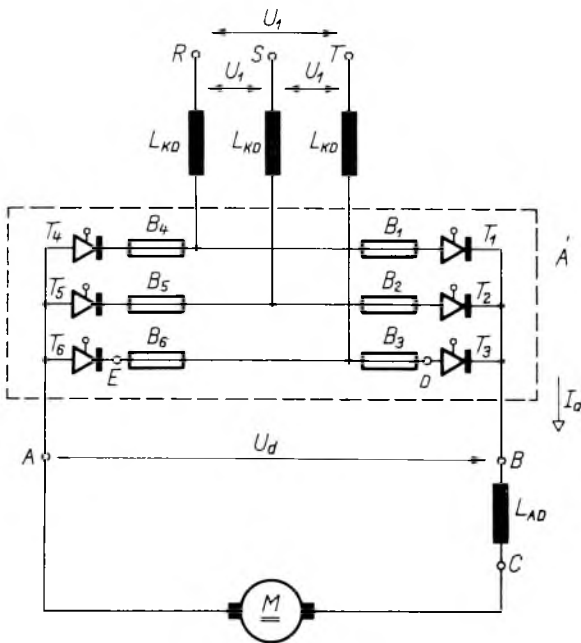
A tirisztorok megjelenése hatalmas fejlődést jelentett az erősáramú elektronikában, ami a villamos hajtások területén is érezeti hatását. Az elmúlt évtizedben számtalan új, tirisztoros kapcsolási elrendezés jött létre, amelyek segítségével jó dinamikai tulajdonságú villamos hajtásokat lehet felépíteni. A szabályozott hajtások kifogástalan üzemeltetésének egyik legfontosabb feltétele a túlfeszültségre és túláramra közismerten érzékeny tirisztorok védelmének kialakítása.

E dolgozatban a tirisztorok zárlatvédelmével foglalkozunk, elsődleges cél a zárlatvédelem méretezésének ismertetése. A zárlati

áram kialakulásával, matematikai tárgyalásával, csak olyan mértékben foglalkozunk, ami a méretezési eljárás követéséhez feltétlenül szükséges.

2. Zárlati áramok

A szabályozott egyenáramú hajtásokban alkalmazott különböző tirisztoros kapcsolási elrendezések leggyakrabban teljesen vezérelt, háromfázisú hídkapcsolások, ezért a továbbiakban ezen a kapcsolási elrendezésen mutatjuk be a tirisztorok zárlatvédelmének méretezési eljárását. A 11-1. ábra az áramirányítót és az egyenáramú motort ábrázolja. (A kapcsolási rajzba csak a zárlatvédelemmel kapcsolatos elemeket rajzoltuk be.) Az A' áramirányító váltakozóáramú pontjai az U_1 feszültségű háromfázisú váltakozóáramú hálózat R , S és T pontjai-



11-1. ábra. Teljesen vezérelt háromfázisú hídkapcsolású áramirányító egyenáramú motorral

ra az L_{KD} kommutációs fojtótekercsen keresztül kapcsolódnak. Az áramirányító valamennyi ágába a T tirisztorral sorbakapcsolt B biztosító van beiktatva. Az áramirányító egyenáramú sinjeire M egyenáramú motor L_{AD} armatúraköri simító—fojtó tekercsen keresztül kapcsolódik. A további vizsgálatainkhoz feltételezzük, hogy az áramirányítót tápláló hálózat ideális, ún. végtelen hálózat.

Az áramirányító kompletten összeszerelve olyan önálló egységet alkot, amelynek a különböző potenciálú pontjai között a rövidzárlat előfordulási valószínűsége minimális. Az áramirányító, és kisebb hajtások esetén az L_{AD} armatúraköri simító—fojtó tekercs is, szekrényben van elhelyezve. Az egyenáramú motor a technológiai követelményeknek megfelelően a hajtott berendezés közelében helyezkedik el. Az elrendezésből látható, hogy rövidzárlat elsősorban az áramirányítót a hajtómotorral összekötő kábel mentén léphet fel.

A 11-1. ábrába berajzoltuk azokat a pontokat, amelyek között a rövidzárlat elsősorban bekövetkezhet. Ezek a következők:

1. $A-B$ pontok között: áramirányító kapocs-zárzata,
2. $A-C$ pontok között: egyenáramú motor kapocs-zárzata,
3. $D-A$, vagy $D-B$, ill.

$E-A$, vagy $E-B$ pontok között: a tirisztor kapocs-zárzata.

A harmadik pontban említett rövidzárlat természetesen nemcsak a T_3 vagy T_6 tirisztor kapcsain következhet be, hanem a hat tirisztor közül bármelyiken.

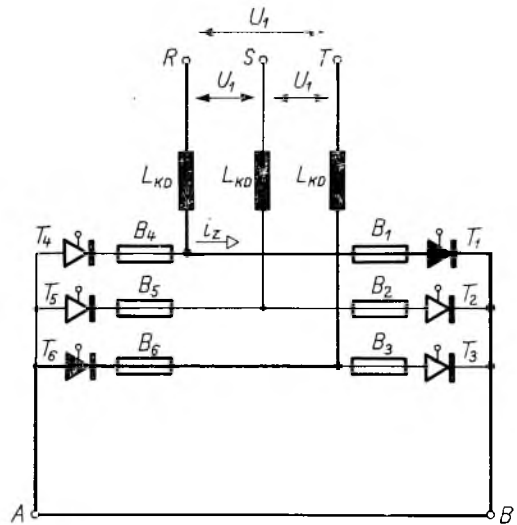
A három eset közül az első és a harmadik esetben azonos nagyságú független zárlati áram jön létre. A második esetben a független zárlati áram nagyságát az L_{AD} simító—fojtótekercs is korlátozza. Az első és harmadik esetben kialakuló független zárlati áram ennek megfelelően nagyobb, mint ami a második esetben kialakulhat, ezért a zárlati áram kialakulását az első esetre vizsgáljuk. Az $A-B$ pontok közötti rövidzárlatkor kialakuló i_z zárlati áram útját a 11-2. ábra szemlélteti.

A független zárlati áram maximális értéke állandósult állapotban i_{zmax} , ha a zárlati áramkör rezisztenciáját elhanyagoljuk:

$$i_{zmax} = \frac{\sqrt{2}U_1}{2X_{KD}}, \quad (1)$$

ahol X_{KD} a kommutációs fojtótekercs reaktanciája a váltakozóáramú hálózat frekvenciáján.

Tekintettel arra, hogy a zárlati áramkör erősen induktív jellegű, és a zárlat különböző fázishelyzetekben következhet be, a kialakuló független zárlati áram maximális értéke a tranzienst folyamat ideje alatt nagyobb lesz az (1) kifejezésben szereplőnél.



11-2. ábra. Teljesen vezérelt háromfázisú hidkapcsolású áramirányító kapocsrövidzárata a T_1 , T_6 tirisztorok vezetésekor

A tetszőleges időpillanatban bekövetkező zárlat hatására kialakuló i_z független zárlati áram:

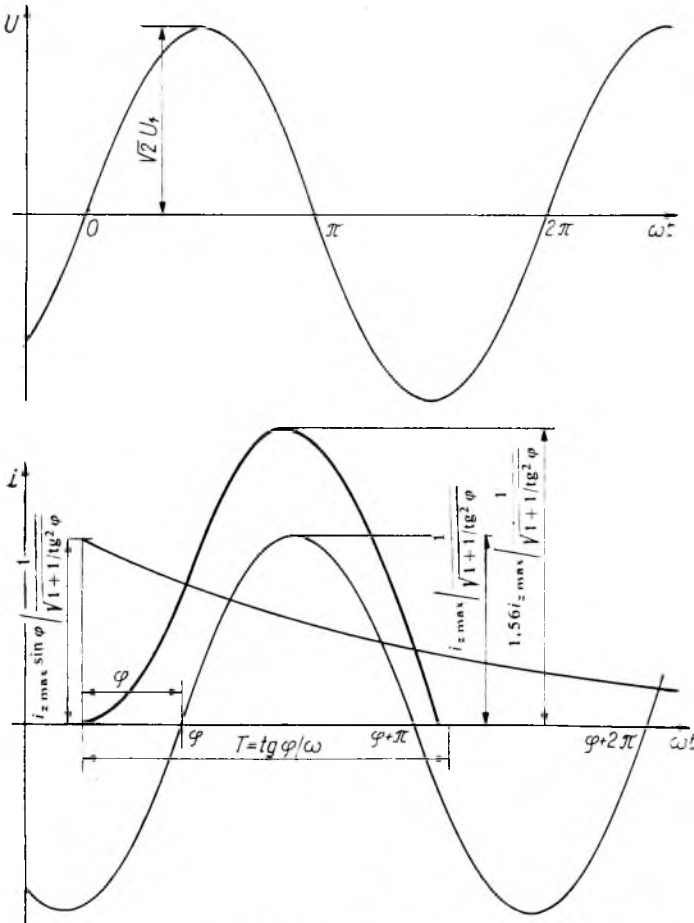
$$i_z = i_{z \max} \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}} [\sin(\omega t - \varphi) + \sin \varphi e^{-t/T}], \quad (2)$$

ahol

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L_{KD}}{R_{KD}}, \quad (3)$$

$$T = \frac{L_{KD}}{R_{KD}} = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\omega}, \quad (4)$$

ahol R_{KD} a kommutációs fojtótekeres rezisztenciája. A tápfeszültség nullátmenetének időpillanatában bekövetkező zárlat hatására kialakuló független zárlati áram időbeli változását $\operatorname{tg} \varphi = 5$ esetében a 11-3. ábra szemlélteti.



11-3. ábra. A független zárlati áram változása $\operatorname{tg} \varphi = 5$ esetében

A független zárlati áram két komponensből tevődik össze. Egyrészt az állandósult zárlati áramból, ami φ szöggel késik a feszültséghez képest, maximális értéke:

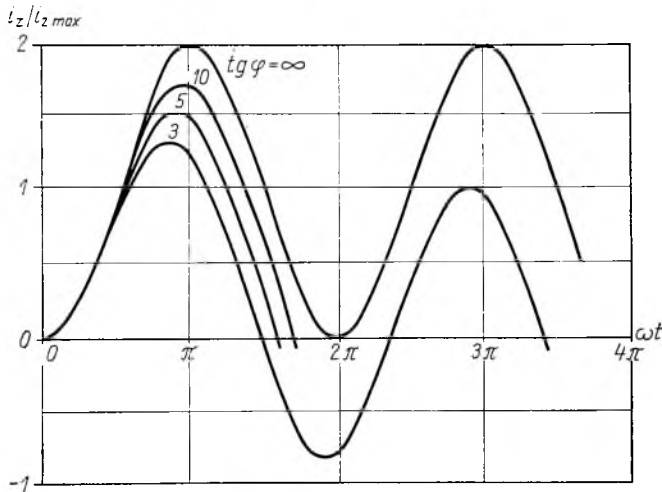
$$i_{z \max} \frac{1}{\sqrt{1 + 1/\operatorname{tg}^2 \varphi}}. \quad (5)$$

Másrészt az exponenciálisan csökkenő tranzienst zárlati áramból, aminek maximális értéke a zárlat bekövetkezésének időpillanatában van:

$$i_{z \max} \frac{1}{\sqrt{1 + 1/\operatorname{tg}^2 \varphi}} \sin \varphi. \quad (6)$$

A két komponensből összetevődő független zárlati áram maximális értéke induktív zárlati áramkör esetén a tranzienst időszakban mindig nagyobb az állandósult zárlati áram maximális értékénél, ha a zárlat nem az áram nullátmenetének időpillanatában következik be. Ha a zárlat $0 < t < \frac{\varphi}{\omega}$ időpillanatban következik be, akkor a független zárlati áram maximális értéke a tranzienst időszakban kisebb lesz adott φ szög esetében, mint a $t=0$ időpillanatban bekövetkező zárlat hatására kialakuló zárlati áramcsúcs.

Adott kommutációs fojtótekerics ($\operatorname{tg} \varphi$) esetében tehát a független zárlati áram csúcserőteke a feszültség nullátmenetének időpillanatában bekövetkező zárlat esetében lesz a legnagyobb, és mint ez a későbbiekben látható lesz, ezt a legkedvezőtlenebb esetet kell mértékadónak tekinteni a kommutációs fojtótekerics méretezésekor.



11-4. ábra. A független zárlati áramok változása relatív egységekben különböző $\operatorname{tg} \varphi$ értékek esetében

A feszültség nullátmenetének időpillanatában bekövetkező zárlat hatására kialakuló független zárlati áramok időbeli változását relatív egységekben a 11-4. ábra szemlélteti különböző $\operatorname{tg} \varphi$ értékek esetében. Az ábrából látható, hogy a legkedvezőtlenebb esetben kialakuló független zárlati áramok $0 < t < \frac{\pi}{2\omega}$ időtartományban

különböző $\operatorname{tg} \varphi$ értékek esetében alig különböznek egymástól. Ebben az időtartományban a zárlati áram (2) kifejezését a következőképpen közelíthetjük:

$$i_z \approx i_{z,\max} \frac{1}{\sqrt{1 + 1/\operatorname{tg}^2 \varphi}} [1 - \cos \omega t]. \quad (7)$$

A (7) kifejezés annál pontosabban közelíti a zárlati áram (2) kifejezésben szereplő változását, minél nagyobb $\operatorname{tg} \varphi$ értéke.

A tirisztoros áramirányító kimenetén bekövetkező rövidzárlat hatására kialakuló zárlati áram, mint az a 11-2. ábrából jól látható, keresztülfolyik az áramirányító tirisztorain is (T_1, T_6). A tirisztor szempontjából is az a legkedvezőtlenebb eset, ha zérus gyűjtáskésleltetés esetén a zárlat a feszültség nullátmenetének időpillanatában következik be. Ha a tirisztorok nincsenek biztosítva, a kialakuló független zárlati áram a nullátmenetéig keresztülfolyik a tirisztorokon, ha a kapcsolási elrendezés többi tirisztorra ez alatt az idő alatt nem kap gyűjtőimpulzust. A tirisztor kristály lapkájának kis hőkapacitása miatt, a zárlati áram hatására a tirisztorban keletkező hőmennyiség a tirisztor tönkretetheti. A tirisztor csak olyan biztosítóval lehet megvédeni, amelyek a független zárlati áram első félciklusában működik. Ezt a célt szolgálják a tirisztorok (diódák) védelmére kifejlesztett gyorsbiztosítók.

3. A biztosítóval szemben támasztott követelmények

A jó minőségű gyorsbiztosítónak a következő három követelményt kell egyidejűleg kielégíteni.

1. A kiolvadási és ívelési ideje nagyon kicsi legyen,
2. Nagy megszakító képességgel rendelkezzen,
3. Áramkorlátozó képessége a túláramok tartományában is érvényesüljön.

Ez a három követelmény, a biztosító szerkezeti kialakítását tekintve egymásnak ellentmondó. A gyorsbiztosítók szerkezeti kialakításával nem foglalkozunk, csak megjegyezzük, hogy az ún. kombinált ívöltású gyorsbiztosítók teljesítik a legjobban e három követelményt [1].

A jó minőségű gyorsbiztosítók áramkorlátozó hatása már a $3,5 \dots 6 I_n$ áram tartománytól kezdve érvényesül, ívfeszültségük az ívelési idő kezdetétől számítva kb. $0,1 \dots 0,4$ ms alatt eléri a maximális értékét, ami a tápfeszültség maximális értékének $1,1 \dots 1,4$ -szerese szokott lenni.

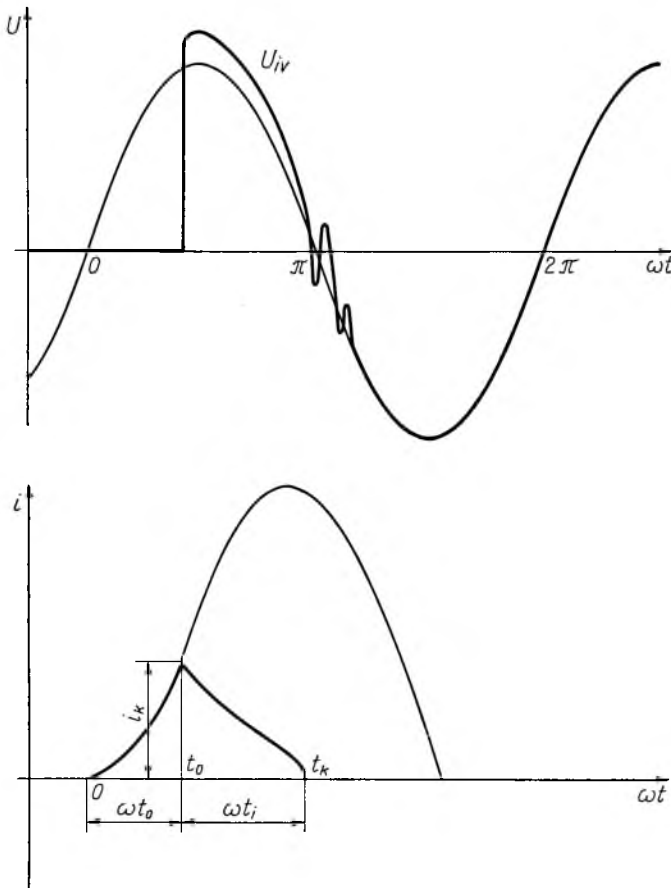
A 11-5. ábrán megmutattuk a biztosító működésekor kialakuló áram, illetve feszültség időbeli változását a feszültség nullátmenetének időpillanatában bekövetkező zárlatkor $\operatorname{tg} \varphi = 5$ esetében.

A zárlat bekövetkezésének időpillanatától kezdve egészen a t_0 kiolvadási időtartamig a biztosítóban fémes vezetés van, az áram azonos a független zárlati árammal, a biztosító sarkai között a feszültség zérus. A t_0 időpillanatban a biztosítóban a fémes vezetés megszűnik, és kialakul a nagy ellenállású ívfeszültség. Ebben a tartományban az áram és a feszültség között az összefüggés:

$$U_{iv} = U_{\text{hálózat}} + 2L_{KD} \frac{di}{dt}. \quad (8)$$

Az ívfeszültség alakjának pontos ismeretében az áramot az ívelési időszakban lehet számítani, a számítások azonban általában csak közepesnek nevezhető közze-
lítások, mert az ívfeszültség alakjának közelítése erősen idealizált. Ennek tárgyalásába

nem mélyedünk bele, mert a kommutációs fojtótekerics méretezése szempontjából nincs jelentősége, ellenben hivatkozunk a szakirodalomra [2]. Megjegyezzük, hogy az ívelési időszakban kialakuló áram ún. macskahát jellegű görbéjének alakja akkor kedvező, ha a változás se nem túl nagy, se nem túl kicsi: előző esetben az ívfeszültség, az utóbbiban pedig az íváram értéke lenne túl nagy. Mindkét esetben nagy a biz-



11-5. ábra. Feszültség- és áramviszonyok a gyorsbiztosító működésekor $\operatorname{tg} \varphi = 5$ esetében

tosító ívenergiája, ami szélsőséges esetben a biztosító felrobbanására vezethet. A 11-5. ábrában jól látható, hogy az áram i_k korlátozott értékénél éri el a maximumát, amit *első vágási áramnak* neveznek. A legújabb kutatások bebizonyították, hogy a t_i időtartam végén az áram nem folyamatosan csökken le zérusra, hanem törésponttal rendelkezik. A töréspontban az áram értéke néhány amper nagyságú, ezt az áramot nevezik *második vágási áramnak*. Az áram megszűnése után a biztosító kapcsain megjelenő feszültség transziens része a visszaszökő feszültség. A visszaszökő feszültség periódusát a váltakozóáramú kör induktivitása és kapacitása szabja meg.

4. A biztosító kiválasztása

A biztosító kiolvadását a kiolvadási áramintegrál (W_0) jellemzi:

$$W_0 = \int_0^{t_0} i^2 dt, \quad (9)$$

amelynek értékét a katalógusok mindig megadják; mértékegysége: A^2s .

Bizonyítás nélkül közöljük, hogy növekvő $i_{z\max}$ (csökkenő L_{KD}) esetén azonos $tg \varphi$ -vel rendelkező zárlati áramköröket feltételezve, ugyanazon fázishelyzetben bekövetkező zárlat hatására t_0 értéke csökken, i_k értéke pedig nő.

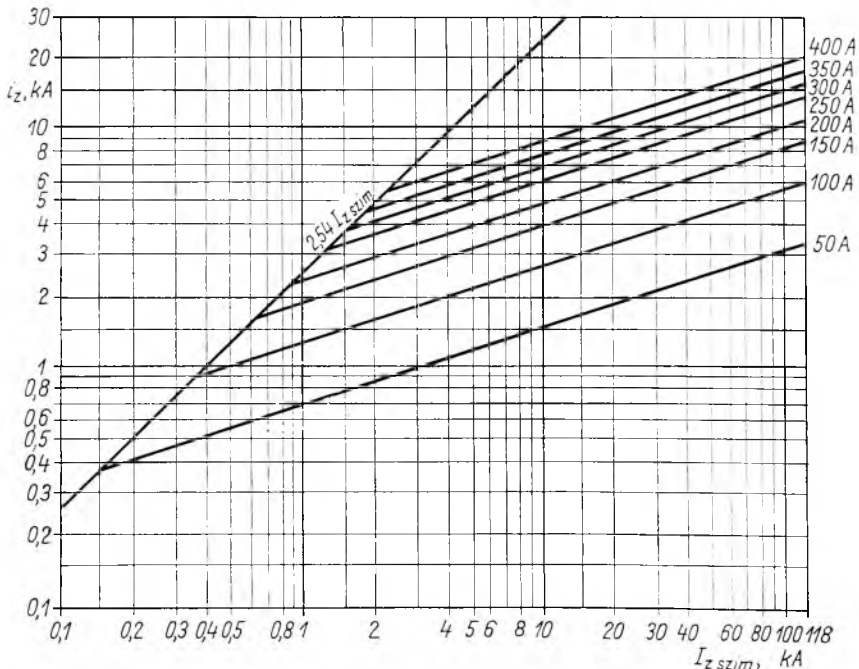
A biztosító ívelési szakaszát az ívelési áramintegrál (W_i) jellemzi:

$$W_i = \int_{t_0}^{t_k} i^2 dt. \quad (10)$$

A katalógusok W_i értékét nem közlik, mert az változó. Nagysága függ a szimmetrikus független zárlati áram csúcserősségétől ($i_{z\max}$), a zárlati áramkör $tg \varphi$ -jétől, a zárlat bekövetkezésének időpillanatától és az előzőkből következően az ívfeszültségtől is. A tapasztalat szerint W_i/W_0 értéke a szokásos áramköri paraméterek mellett 1,5...2,5 között változik, de 0,8-nál kisebb, és 3,2-nél nagyobb értékek nem fordulhatnak elő.

A biztosító megválasztásának legfontosabb követelményét a (11) összefüggés fejezi ki.

$$W_0 + W_i < W_c, \quad (11)$$



11-6. ábra. Gyorsbiztosítók jelleggörbéi

ahol W_1 a tirisztorra megengedett áramintegrál. A tirisztorkatalógusok közlik az adott típus áramintegrálját, a réteghőmérséklet és az idő függvényében. Rendszerint 10 ms és 1 ms időtartamra adják meg, 45 °C-ra és maximális réteghőmérsékletre. A biztosítót a (11) kifejezés alapján kiválasztva, az i_k korlátozott áram értékét kell meghatározni. A biztosítót gyártó cégek katalógusai közlik a szimmetrikus független zárlati áram effektív értékének függvényében az első levágott áram nagyságát. Szimmetrikus zárlati áramon az áram nullátmenetének pillanatában bekövetkező zárlat hatására kialakuló zárlati áramot értjük.

A tapasztalat szerint a feszültség nullátmenetének pillanatában bekövetkező zárlat (aszimmetrikus zárlat) hatására kialakuló zárlati áram csúcserőteke legfeljebb 1,8-szerese a szimmetrikus zárlati áram csúcserőtékeének. Ha a biztosító éppen az aszimmetrikus zárlati áramcsúcs értékénél olvad ki, a biztosító nem fejt ki áramkorlátozó hatást. Ez az eset az áramkorlátozás szélső helyzete, amihez a szimmetrikus zárlati áram effektív értékének 2,54-szerese tartozik. A kétszeres logaritmikus léptékben rajzolt görbesereget a 11-6. ábra szemlélteti. A görbesereg határgörbéje az $i_{z\max} = 2,54 I_{z\text{szim}}$ egyenes. Adott típusú biztosítót jellemző görbe töréspontjához tartozó szimmetrikus zárlati áram értékénél kisebb zárlati áram esetében a biztosító nem fejt ki áramkorlátozó hatást, a töréspontban határeset van, a nagyobb áramok tartományában viszont a biztosító áramkorlátozó hatása érvényesül.

5. A kommutációs fojtótekeres méretezése

A kommutációs fojtótekeres méretezése akkor helyes, ha adott tirisztor, és a (11) összefüggés szerint kiválasztott biztosító esetében, az i_k első vágási áram kisebb a tirisztorra megengedett lököáram határértékénél. A tirisztorkatalógusok közlik az adott típusra megengedett lököáram határértékét 10 ms, ill. 1 ms időtartamra, 45 °C és maximális réteghőmérséklet esetén.

Az előzők alapján a kommutációs fojtótekeres méretezésének szempontjai:

1. A hajtás áramigénybevételének ismeretében kiválasztjuk az áramirányító tirisztorait. A katalógusból kikeressük a 10 ms-ra és a maximális réteghőmérsékletre megengedett lököáram I_{FSL} határértékét.

2. A kiválasztott tirisztorokhoz illesztjük a gyorsbiztosítót a (11) összefüggés szerint.

3. Az I_{FSL} lököáram-határértékből meghatározzuk a biztosító első vágási áramát aszimmetrikus zárlat esetében a következők szerint.

a) Feltételezzük, hogy a zárlat időpillanatában a hálózati feszültség értéke a maximálisan megengedett:

$$U = 1,1 U_1.$$

b) a tirisztor biztos védelme érdekében kb. 10% biztonsági tényezővel számolunk. Az előzők alapján az első vágási áram:

$$i_k = \frac{I_{\text{FSL}}}{1,2}. \quad (12)$$

4. A biztosítókatalógusból kikeressük a (12) kifejezésben szereplő i_k értékéhez tartozó $I_{z\text{szim}}$ szimmetrikus zárlati áram effektív értékét.

5. A kommutációs fojtótekeres induktivitása:

$$L = \frac{U_1}{2I_{z\text{szim}} \omega}. \quad (13)$$

A fojtótekercest a gyakorlatban a százalékos reaktanciájával jellemezzük:

$$\varepsilon = \frac{I_n}{I_{zszim}} 100\%, \quad (14)$$

ahol I_n a fojtótekerics névleges árama:

$$I_n = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{Dn}, \quad (15)$$

ahol I_{Dn} az áramirányító névleges árama.

Végezetül közöljük, hogy ha $i_k \leq I_{zszim}$, akkor a biztosító kiolvadási idejét a következő közelítő képlettel számíthatjuk:

$$t_0 \approx 3 \arccos \frac{2,54I_{zszim} - i_k}{2,54I_{zszim}} \text{ ms}, \quad (16)$$

ha \arccos értékét radiánban helyettesítjük be. Ha a biztosítót és kommutációs fojtótekercest helyesen választjuk meg, a különböző zárlatok hatására kialakuló áram a biztosító kiolvadása esetén a tirisztorban semmiféle meghibásodást nem okoz.

Hangsúlyozni szeretnénk, hogy a kommutációs fojtótekerics a kiindulási feltevéleink mellett ugyanolyan fontos szerepet tölt be a tirisztor védelmében zárlat esetén, mint a biztosító. Hiába választjuk meg helyesen a biztosítót, ha a biztosító első vágási árama a tirisztort tönkreteszti. Természetesen, ha az áramirányítót nem végtelen hálózatról, hanem közvetlen szigetelőtranszformátorról vagy autotranszformátorról tápláljuk, a kommutációs fojtótekerics nagyságát a tápláló transzformátor rövidzárási impedanciájának (reaktanciájának) megfelelő értékkel csökkenteni kell. Autotranszformátor esetében biztos, hogy kommutációs fojtótekerics is szükséges, amennyiben az áramirányítót áram szempontjából kihasználjuk. Szigetelőtranszformátor esetében a kommutációs fojtótekerics alkalmazását mérlegelni kell.

Már itt szeretnénk utalni arra a döntő fontosságú tényre, hogy a jól kialakított kommutációs fojtótekerics drága, egyedi felépítésénél fogva a tirisztorok árának állandó csökkenése következtében ma már drágább a védendő tirisztoros áramirányítónál is. Különösen szembetűnő az áraránytalanság, ha figyelembe vesszük, hogy a gyengébb paraméterekkel rendelkező (kis I_{FSL}) olcsóbb tirisztorokhoz igen nagy induktivitásokra van szükség. Ilyen esetben nagyobb típusjelű tirisztorokat célszerű alkalmazni kisebb biztosítóval, mert ekkor a kommutációs fojtótekerics mérete nagymértékben csökkenthető. Példaképpen megemlítjük, hogy T 150 szovjet gyártmányú tirisztorok, és NOSi 200 magyar gyártmányú gyorsbiztosítók esetén a kommutációs fojtótekerics szükséges induktivitása 3×400 V tápfeszültség esetén 0,25 mH [3]. Ez az áramirányító teljes kihasználása esetén $\varepsilon = 6,75\%$ rövidzárási reaktanciának felel meg. Ha az áramirányítót 75%-ban használjuk ki, azaz NOSi 150 biztosítót alkalmazunk, a szükséges induktivitás értéke 0,19 mH-re csökken, ami $\varepsilon = 5,1\%$ rövidzárási reaktanciának felel meg.

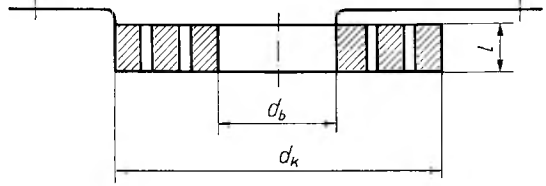
Ha adott típusjelű tirisztor esetén nagyobb lököáram-határértékű tirisztort választunk, akkor a kommutációs fojtótekerics mérete tovább csökkenthető.

A kommutációs fojtótekerics (13) kifejezésében szereplő induktivitása állandó értékű kell, hogy legyen egészen i_k áram értékéig. Kis teljesítményű áramirányítók esetében (transzformátor nincs) kb. 50 kW teljesítményszintig lehetséges vasmagos kivitel alkalmazása. A nagyobb teljesítmények tartományában vasmagos fojtótekerics alkalmazása esetén méretezhetetlen, nagy légrések adódnak. A légrés csak

a vasmag keresztmetszetének növelésével csökkenthető, ami a fojtótekeres méreteit és súlyát is jelentősen megnöveli. Ilyen esetekben célszerűbb a légmagos fojtótekeres.

A 11-7. ábra egyfázisú kommutációs fojtótekerest ábrázol, amely a jó hűtést biztosító függőleges hűtőcsatornák miatt három részből áll. Az ábrába a fojtótekeres kivezetéseit is berajzoltuk.

A fojtótekeres induktivitását jó közelítéssel a *Nagaoka*-képlet segítségével számíthatjuk ki.



$$L = N^2 dF \left(\frac{d}{l} \right), \quad (17)$$

ahol N a tekeres menetszáma,

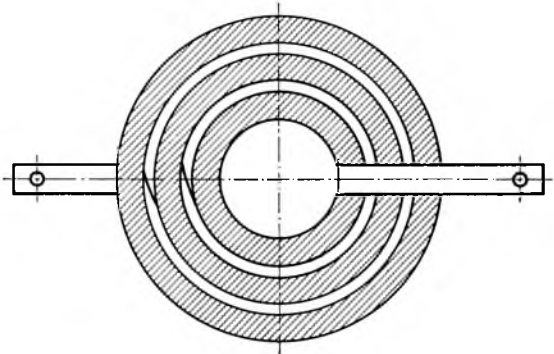
$$d = \frac{d_b + d_k}{2} \text{ cm,}$$

$F = F \left(\frac{d}{l} \right)$ függvény, amelyet

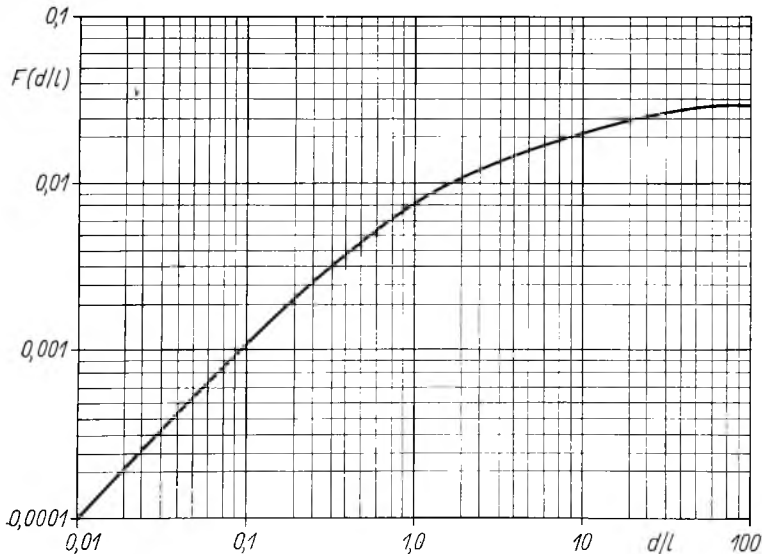
a 11-8. ábrán ábrázoltunk,

L a fojtótekeres induktivitása, μH .

A (17) képlet segítségével jó közelítéssel méretezhető a fojtótekeres induktivitása.



11-7. ábra. Egyfázisú kommutációs fojtótekeres



11-8. ábra. $F(d/l)$ diagram a *Nagaoka*-képlet használatához

6. A fojtótekeres kiviteli módja

Háromfázisú áramirányító esetén a három fázis fojtótekerceit egymás felett építő-kocka elv szerint rakják össze, és szorítószerkezettel összefogják. Az egyes fázisok tekercei között fellépő kölcsönös induktivitás hatására a fojtótekercek reaktanciája csökken. A két szélső tekercesé szimmetrikusan kisebb mértékben, a középső tekercesé nagyobb mértékben. A csökkenés mértéke annál kisebb, minél távolabb helyezkednek el egymástól a fojtótekercek.

Mérések alapján közöljük, hogy $d_k=400$ mm külső és $d_b=200$ mm belső átmérőjű, $l=80$ mm hosszú fojtótekercek induktivitása 160 mm osztástávolság esetén, a két szélső tekerces esetében kb. 15%-ot, a középső esetében kb. 25%-ot csökken. Az induktivitás helyes megválasztásán kívül ügyelni kell a fojtótekerces melegedésére is. Megfelelő hűtőcsatornák alkalmazásával a fojtótekerces áramsűrűségét 1,5 A/mm²-re választhatjuk meg. Ebben az esetben legalább 20 mm széles hűtőcsatornákra van szükség.

Ha a légmagos fojtótekerceset vasszerkezetű szekrényben helyezik el, ügyelni kell arra, hogy a szórt fluxusok ne záródjanak a közel levő vas alkatrészekben keresztül, mert úgy a szerkezeti elemek melegszenek. A háromfázisú egységet képező három fojtótekerces aszimmetrikus reaktanciáját az induktivitás méretezésekor figyelembe kell venni. Az aszimmetria az áramirányító normális üzemeltetését nem befolyásolja.

7. Túlfeszültségvédelem

Bár nem tartozik szorosan a tirisztorok zárlatvédelméhez, megemlítjük, hogy az áramirányító váltakozóáramú körében levő induktivitások hatására, a váltakozóáramú oldalon történő lekapcsoláskor jelentős túlfeszültségek keletkeznek a tirisztorok kapcsain. A tirisztorokkal párhuzamosan kapcsolt soros RC elemek a váltakozóáramú oldali lekapcsolásból származó túlfeszültségek ellen nem védik meg a tirisztorokat, ezért a kommutációs fojtótekercek és az áramirányító váltakozóáramú pontjai közé csillag, vagy háromszög kapcsolásban kondenzátorokat kell elhelyezni. Nagy induktivitású fojtótekercek alkalmazásakor nagy kapacitású kondenzátorok szükségesek.

Befejezésképpen hangoztatjuk, hogy a fojtótekerces helyes megválasztása mindig komplex feladat, amelyben az áramirányító üzemét, kapcsolási elrendezését, a táphálózat jellemzőit, a tirisztorok és biztosítók tulajdonságait egyidejűleg kell vizsgálni. Természetesen az ismertetett módszer diódákra is érvényes, azzal a megjegyzéssel, hogy azonos típusjelű tirisztor és dióda közös használata esetén mindig a tirisztor paraméterei a mértékadók.

Irodalom

- [1] *Dr. Mocsáry J.*: Igen gyors kioldvasú áramkorlátozó olvadóbiztosítók félvezetőgyenirányítók védelmére. *Elektrotechnika* 57 (1964) 455—460. oldal.
- [2] *Dr. Kümmel F.*: Kurzschlusschutz von Thyristor-Stromrichtern in Dreiphasen-Brückenschaltung. *ETZ-A* 86 (1965) 102—109. oldal.
- [3] Tirisztornije preobrazovateli szerij PTT i PTTR Katalógus, 05.03.30—69.
- [4] *Млинко Т.*: Защита тиристорных конвертеров при коротких замыканиях, расчет коммутационного дросселя. („Automatizált villamos hajtások” III. Nemzetközi Tudományos Konferencia). Prága, 1971. okt.

12.

Áramirányítós kaszkád hajtások

MÉSZÁROS BÉLA

ÖSSZEFOGLALÁS

Az áramirányítós kaszkád hajtások csúszógyűrűs aszinkron motorok veszteségmentes fordulatszám-szabályozását oldják meg félvezetők alkalmazásával. A cikk áttekinti az áramirányítós kaszkád hajtások működési módját, röviden összefoglalja tulajdonságait, foglalkozik a meddőteljesítmény-fogyasztással, majd egy újszerű, csoportos kaszkád hajtást ismertet.

КОНВЕРТЕРНЫЕ КАСКАДНЫЕ ПРИВОДЫ

В. Мезарош

Резюме

Конвертерные каскадные приводы путем применения полупроводников решают проблему регулирования без потерь скорости вращения асинхронных двигателей с контактными кольцами. В статье приводится обзор о режимах работы конвертерных каскадных приводов, кратко суммируются их свойства, рассматриваются условия потребления реактивной мощности и описывается принципиально новый групповой каскадный привод.

STROMRICHTER-KASKADENANTRIEBE

B. Mészáros

Zusammenfassung

Die Stromrichter-Kaskadenantriebe lösen die verlustfreie Drehzahlverstellung der Schleifring-Asynchronmotoren durch Anwendung von Halbleitern. Der Aufsatz bietet einen Überblick über die Betriebsmethode der Stromrichter-Kaskadenantriebe, fasst kurz ihre Eigenschaften zusammen, beschäftigt sich mit dem Blindleistungsverbrauch, dann legt er einen neuartigen Gruppen-Kaskadenantrieb dar.

RECTIFIER CASCADE DRIVES

B. Mészáros

Summary

Loss-free speed regulation of asynchronous slip-ring motors can be achieved by rectifier cascade drives using semiconductor circuit elements. A survey of the operation of rectifier cascade drives is given, their properties are briefly summarized, reactive power consumption is dealt with and, finally, a new-type cascade group drive is described.

1. Bevezetés

Az utóbbi években a tirisztorok felhasználási területe tovább bővült, többek között az olyan aszinkron motoros hajtásokkal, amelyekben a motor álló- vagy forgórész körében, esetleg mindkettőben a motor fordulatszámának változtatására tirisztorokat alkalmazunk. Ezen hajtások közül az ún. áramirányítós kaszkád hajtás egyes felhasználási területeken gazdaságos megvalósíthatósága folytán utolérte, néhol kiszorítja az egyenáramú hajtásokat, pl. ahol a fordulatszám-változtatási tartomány viszonylag szűk ($0,5 \dots 1 \cdot n_{\text{névleges}}$) és villamos fékezésre nincs szükség. Szokásos felhasználási terület még a meglévő hajtások modernizálása, ahol a meglévő csúszógyűrűs aszinkron motort kiegészítve egy fordulatszám-szabályozó be-
rendezéssel, a megnövekedett igényeket gazdaságosan ki lehet elégíteni.

A csúszógyűrűs aszinkron motorok fordulatszámát a forgórész körbe kapcsolt ellenállások vagy az ugyanide kapcsolt külső feszültség segítségével lehet változtatni.

Az ellenállások segítségével történő fordulatszám-változtatás — hátrányai miatt — csak viszonylag kis teljesítményeknél, vagy szakaszos üzemű működés esetén jön számításba. Hátrány a nagymértékben terhelésfüggő fordulatszám és a fordulatszámától és terheléstől függő hőenergia keletkezése, amely a motor álló állapotában névleges áramfelvétel esetén a motorteljesítménnyel egyenlő nagyságú.

A szlipteljesítmény az ún. hátsógépes kaszkádok különféle változatain kívül az áramirányítós kaszkád hajtással hasznosítható. Az áramirányítós kaszkád a forgórész körüli villamos teljesítménynek a forgórészben keletkező veszteség levonása után fennmaradó részét a csúszógyűrűkre csatlakozó egyenirányítón és ezzel egyenáramú oldalon összekapcsolt váltóirányítón keresztül a váltakozóáramú hálózatba táplálja (12-1. ábra). Az M motor n fordulatszámát a V váltóirányító által a csúszógyűrűkről táplált E egyenirányító kapcsaira kényszerített U_e egyenfeszültség szabja meg. Az F fojtótekerics az egyenáramú kör áramát simítja. A váltóirányító U_e egyenfeszültségét az α_g gyújtáskésleltetési szög határozza meg. A Tr transzformátor a váltóirányítót illeszti a hálózati feszültséghez. Az $\alpha_{g \max}$ szög esetén az M motor minimális fordulatszámmal forog.

12-1. ábra

A motor csúszógyűrűi és a visszatáplálást fogadó hálózat közé iktatott elemek soros elrendezéséből következik, hogy annál nagyobb részben sikerül a szlipteljesítményt a hálózatba visszajuttatni, minél kisebb rész marad ebből vissza veszteségi teljesítmény formájában a forgórész körüli egyenirányítóban, a simító—fojtótekericsben, a váltóirányítóban és annak transzformátorában.

2. Az áramirányítós kaszkád hajtás tulajdonságai

a) Megfelelő feszültségátfogású inverterrel a motor fordulatszáma motoros üzemben álló állapottól a névleges fordulatszámot megközelítő maximális fordulatszámig fokozatmentesen változtatható.

b) A fordulatszám-szabályozás a vezérelt egyenirányítóról táplált egyenáramú gépek szabályozására használt módszerekkel (pl. alárendelt áramszabályozással)

valósítható meg. Ez lehetőséget ad a fordulatszámnak valamilyen üzemi jellemző alá való rendelésére.

c) A hajtás meddőteljesítmény-igénye minden fordulatszámon nagyobb, mint az azonos nyomatékkal terhelt, de rövidrezárt forgórészszel, névleges fordulatszámon üzemelő motoré.

d) A kaszkád hajtás legnagyobb meddőteljesítmény-többletet a névleges fordulatszám közelében veszi fel. A fordulatszámmal csökkenő nyomatékú hajtás meddőteljesítmény-felvétele csökkentett fordulatszámon előnyösebben alakul, mint állandó nyomaték esetében.

e) A meddőteljesítmény-többlet egyébként azonos üzemi viszonyok között annál nagyobb, minél nagyobb a váltóirányító által biztosított fordulatszám-csökkenési tartomány. Legnagyobb akkor, ha a berendezéssel a motor fordulatszámát álló állapotig lehet csökkenteni.

f) A forgórészáram effektív értéke azonos nyomaték kifejtése esetén nagyobb, mint a természetes jelleggörbéjén üzemeltetett motoré. Az áram effektív értéke kb. 10%-kal növekszik, ezért a gép kihasználhatósága csökken.

g) A motor az egész fordulatszám-változtatási tartományban csak akkor terhelhető közel névleges nyomatékkal, ha külső szellőzést létesítünk. A motor saját ventilátorának légszállítása a fordulatszámmal közelítőleg négyzetesen csökken, és ezért külső szellőzés nélkül a motor csak a csökkent szellőzőhatásnak megfelelő árammal terhelhető.

h) Fékezőnyomaték szinkron alatti fordulatszámon nem fejthető ki. Ha a terhelés nem fejt ki fékezőnyomatékot, megállás vagy fordulatszám-csökkentés csak szabad kifutással, ill. valamilyen ismert fékkapcsolással lehetséges.

i) A gyűjtásszög-változtatás elvéből következően a hajtás (motor és váltóirányító) által a hálózatból felvett áram felharmonikusokat tartalmaz.

j) Ha a váltóirányító által átfogott fordulatszám-tartomány nem terjed az álló állapotig, akkor a motor indítását és a fordulatszám-változtatási tartomány alsó határáig való gyorsítását indítóellenállással kell elérni.

k) A visszatáplálás határfoka szempontjából kívánatos, hogy a motor forgórész-feszültsége minél nagyobb legyen.

l) A forgórész körüli egyenirányítót, a váltóirányítót és az illesztőtranszformátort csak az aszinkron motor teljesítményének szlipszeresére kell méretezni.

m) A forgórész körüli egyenirányító vagy váltóirányító üzemképtelensége esetén a hálózati visszatáplálás lehetetlenné válik. A hajtás azonban szükségüzemben tartható a motor névleges fordulatszámán (természetes jelleggörbéjén) vagy csökkentett fordulatszámon is, ha megfelelő teljesítményű forgórész körüli ellenállás áll rendelkezésre. Az utóbbi esetben természetesen le kell mondani a fordulatszám—nyomaték jelleggörbék merevségéről.

Az áramirányítós kaszkád hajtás felsorolt tulajdonságaiból adódnak azok az üzemi feltételek, amelyek gazdaságos felhasználását elősegítik. Ezek a következők:

a) Ha a motor fordulatszámát a névleges értékhez képest nem kell nagymértékben csökkenteni, tehát a fordulatszám-változtatás tartománya szűk.

b) Ha a motort főként csak a fordulatszám-változtatási tartomány alsó határa közelében és a névleges fordulatszámon kell üzemeltetni, közbelső fordulatszámon nem. Ebben az esetben a névleges fordulatszámot a csúszógyűrűk rövidrezárásával biztosítjuk.

c) Ha a terhelés jellege olyan, hogy a motor által kifejtendő nyomaték a fordulatszámmal erősen csökken.

d) Ha a hajtás üzembiztonsága megkívánja, hogy az legalább a maximális fordulatszámon mindig üzemképes legyen, amíg maga a motor üzemképes.

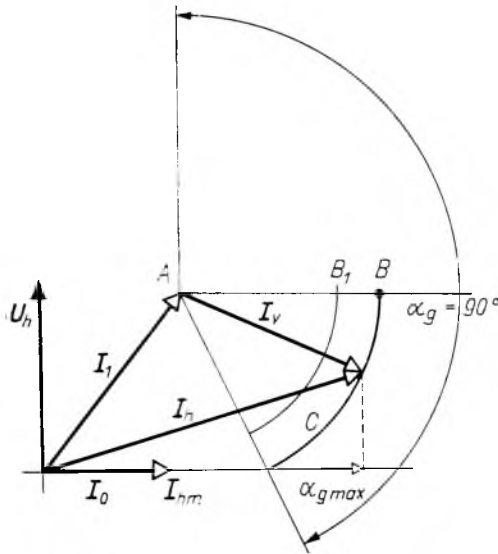
e) Ha villamos fékezésre nincs szükség.

Az áramirányítós kaszkád hajtások alkalmazásának fontos kérdése a meddőteljesítmény-fogyasztás.

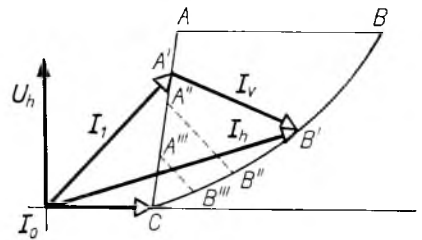
3. A meddőteljesítmény-fogyasztás és csökkentése

A váltóirányító működési módjából következik, hogy üzemelése közben a hálózattól meddő teljesítményt vesz fel. A meddőteljesítmény-felvétel függ az α_g gyűjtáskésleltetési szögtől és a terhelőáramtól. Teljesen vezérelt hídkapcsolásban, állandó terhelőáramot feltételezve, az áram fázishelyzetét a váltakozóáramú hálózat feszültségéhez viszonyítva, az áramvektor egy félköríven mozog akkor, amikor az α_g szöveg 0° -tól 150° -ig változtatjuk. A meddőteljesítmény-felvétel maximális értéket ér el,

ha az $\alpha_g = 90^\circ$. Az áramirányítós kaszkád hajtás meddőteljesítmény-fogyasztásának meghatározására a csúszógyűrűs aszinkron motor és a váltóirányító viszonyainak együttes vizsgálata ad lehetőséget. Feltételezve, hogy a váltóirányító ugyanarra a hálózatra kapcsolódik, mint az aszinkron motor, vektorábrán szemléltetjük az aszinkron motor és a váltóirányító feszültség—áram viszonyait.



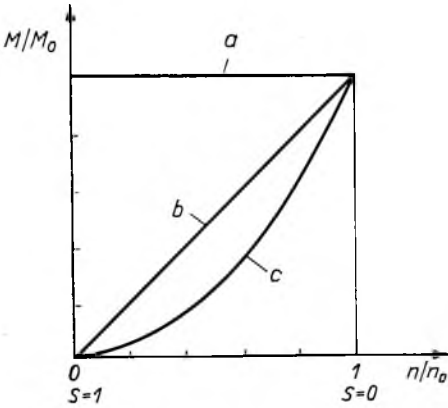
12-2. ábra



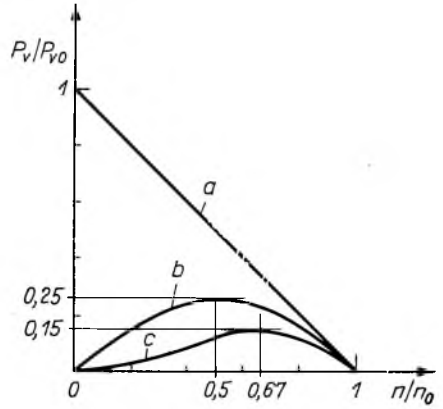
12-3. ábra

A 12-2. ábrán állandó terhelőnyomatékú hajtás feszültség—áram viszonyai láthatók. A hajtás a megállásig szabályozott. Az I_1 áram a motor primer áramát, I_v a váltóirányító hálózati áramát, I_h az eredő hálózati áramot, U_h a hálózati feszültséget jelenti. Mivel a terhelés nyomatéka állandó, az I_1 áram vektora a fordulatszám-szabályozás alatt helyben marad (A pont). Az I_v váltóirányító áramvektorának végpontja a BC köríven mozog az α_g szög függvényében. Az $\alpha_{g \max}$ szögnél az aszinkron motor álló állapotban van. Ha az illesztőtranszformátor olyan áttételű, amellyel az aszinkron motor fordulatszámát nem lehet megállásig változtatni, akkor a munkadiagram állandó nyomatékú hajtásnál a fordulatszám tartomány arányában rövidülő sugarú körré ($B_1 C_1$) változik, amelynek középpontja az A pont marad. Az ábrából látható, hogy a hálózattól felvett meddő teljesítmény, amely az I_h hálózati áram I_{hm} komponensével arányos, legkisebb az $\alpha_{g \max}$ szögnél. Viszonylag kis fordulatszám-

csökkentés esetén a hálózathoz felvett meddő teljesítmény a névleges fordulatszámú ponthoz viszonyítva nem változik meg lényegesen. Ha a terhelőnyomaték a fordulatszámmal csökken (12-3. ábra), akkor csökkenő fordulatszámnál maga az A pont sem marad helyben, hanem nagyjából a motor kördiagramját követve mozog (AC vonal). A váltóirányító AB , $A'B'$ stb. hálózati árama csökken és elfordul. Végpontjai egyrészt az AC görbén, másrészt a BC görbén mozognak. Az utóbbit a nyomaték—fordulatszám összefüggés határozza meg.

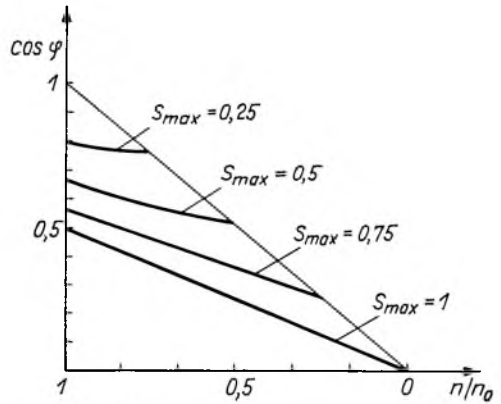


12-4. ábra



12-5. ábra

A nyomaték—fordulatszám összefüggés három tipikus hajtásra a 12-4. ábrán látható. Az a görbe a fordulatszámtól független, a b görbe a fordulatszámmal lineárisan változó és a c görbe a fordulatszámmal négyzetesen változó nyomatékú hajtás jelleggörbéje. A hajtás nyomatékigényétől függ még a hálózatba visszatáplált teljesítmény nagysága is. Az előző típusú hajtások által visszatáplált teljesítmény a fordulatszám függvényében a 12-5. ábrán látható. Ezen görbék segítségével megszerkeszthető a hálózati $\cos \varphi$ változása a fordulatszám függvényében. Állandó nyomatékú hajtás esetén ez a jelleggörbe a 12-6. ábrán látható. Az egyes görbéken a paraméter a fordulatszám-változtatási tartomány nagysága.



12-6. ábra

A vektorábrákból megállapítható, hogy a hálózathoz felvett meddő teljesítmény három paramétertől függ: $a)$ a fordulatszám-változtatási tartománytól, $b)$ a tényleges fordulatszámtól és $c)$ a terhelőáramtól.

A meddőteljesítmény-fogyasztás csökkentése érdekében a három paramétert célszerűen kell megválasztani.

$a)$ A fordulatszám-változtatási tartománnyal a meddőteljesítmény-igény arányosan változik, ezért célszerű, ha a fordulatszám-csökkentési tartomány kicsi.

b) A meddőteljesítmény-felvétel a minimális fordulatszámon a legkisebb, ezért a hajtást ezen a fordulatszámon érdemes tartósan üzemeltetni. Ha a fordulatszám-tartományban több kitüntetett fordulat van, amelynek környezetében tartósan üzemel a berendezés, akkor gazdaságos az illesztőtranszformátort több megcsapolással készíteni. A transzformátormegcsapolások átkapcsolásával elérhető az, hogy a hajtás a legszűkebb fordulatszám-változtatási tartományban és ennek a tartománynak is a minimális fordulatszámán üzemeljen, így a meddőteljesítmény-fogyasztás jelentősen csökkenthető.

c) Egy adott fordulatszámon a meddőteljesítmény fogyasztás arányos a terhelőárammal. A terhelőáramot a hajtás nyomatékigénye szabja meg, így ez egy adott hajtásnál egyértelműen meg van határozva a fordulatszám-tartomány legnagyobb részében. A névleges fordulatszám közelében üzemelő hajtás meddőteljesítmény-igénye a köráram-szabályozási módszerrel csökkenthető.

4. Üzemeltetés kis szlippel köráram-szabályozással

Az előzőkben leírt kaszkád hajtás fordulatszámát azzal az egyenfeszültséggel változtattuk, amit a váltóirányító az egyenirányító sarkaira kényszerít. Az egyenfeszültség nagyságát a váltóirányító gyújtásszöge szabja meg. Zárthurkos fordulatszám-szabályozás esetén a motor fordulatszámával arányos jelet hasonlítjuk össze egy beállítható alapjellel. A szabályozókör kimenetéről a váltóirányító gyújtási szögét vezéreljük olyan módon, hogy növekvő fordulatszám a váltóirányító egyenfeszültségét növelje.

A fordulatszám-szabályozó alárendelt áramszabályozással egészíthető ki. Az áramszabályozó érzékelt és szabályozott mennyisége az egyenirányítót és a váltóirányítót összekötő körben folyó egyenáram. Ez a szabályozó-rendszer az áramirányítós kaszkád hajtás fordulatszámának kifogástalan szabályozását teszi lehetővé a váltóirányító maximális egyenfeszültsége által megszabott tartomány legnagyobb részében. Nehézség lép azonban fel a motor névleges fordulatszámának közelében.

Ha az alapjelet növeljük, de a fordulatszám nem tud tovább növekedni, a váltóirányító egyenirányító üzembe megy át. Az egyenáramú körben a korlátozási értéknek megfelelő nagyságú egyenáram fog folyni. Ez az áram az egyenirányító diódáin keresztül záródik és azoknak nagy áramelőfeszítést ad, így a motor forgórészárama a korlátozási árammal előfeszített diódákon keresztül akadálytalanul tud folyni. A motor szekunder kapcsain csak a diódák vezetőirányú feszültségeseésének megfelelő minimális feszültség jelenik meg. A motor közel névleges fordulatszámával forog. Ebben az üzemállapotban a motor forgórészárama nincs többé határozott viszonyban az egyenáramú körben folyó árammal.

Ennek az a következménye, hogy főként a motor részleges terhelésénél a váltóirányítón keresztül fölöslegesen nagy áram folyik, ami a váltóirányítót tápláló hálózatról szükségtelenül nagy meddőteljesítmény-felvétellel jár.

A meddő teljesítmény csökkentése érdekében az lenne a kívánatos, hogy az egyenirányító üzemben működő váltóirányító mindig csak akkora áramot engedjen az egyenáramú körben és a diódákon keresztül folyni, amekkorát a motor mindenkori forgórészárama szükségessé tesz.

A fordulatszám-szabályozó alárendelt áramszabályozó részét a motor névleges fordulatszámának közelében tehát úgy kell befolyásolni, hogy az egyenáramú körben folyó egyenáram a diódák szükséges előterhelését hozza létre. Ehhez a motor szekunder áramának érzékelése szükséges, vagy pedig olyan műkapcsolás, amelyben

a forgórészárammal arányos mennyiséget az állórészáram és az üresjárási áram különbségeként állítjuk elő. A forgórészáramot érzékelő kör kialakításakor nehézség származhat abból, hogy a forgórészáram periódusszáma igen kicsi. A műkapcsolás esetén primerköri áramváltót kell alkalmazni és ezenkívül pl. egy fojtótékercset is, amellyel az üresjárási áramot modellezzük és az áramot az áramváltó szekunder áramából levonjuk. Az áramváltó költséges, és különösen nagyobb tápfeszültségű motoroknál szigeteltsége ellenére nem kívánatos kapcsolatot képvisel a táphálózat és a hajtás szabályozó áramkörei között. A Villamosipari Kutató Intézet szabadalmaztatás alatt levő találmánya segítségével az előbbi hátrányok kiküszöbölhetőek. A találmány — kizárólag a motor szekunder körében alkalmazott érzékeléssel — egyszerűen, gazdaságosan és üzembiztosan oldja meg ezt a feladatot.

A találmány alap gondolata az a felismerés, hogy a kaszkád hajtás egyenáramú áramkörében a diódák előterhelése az egyenirányító kapcsain fellépő feszültség polaritásának és nagyságának érzékelésével mérhető. Ezt a feszültséget áramszabályozási célra fel lehet használni.

Beavatkozás nem szükséges mindaddig, míg az egyenirányító sarkain a feszültség a normális üzemenek megfelelő. A normális üzemállapot akkor bomlik meg, amikor az egyenirányító sarkain a feszültség megfordul. Ez azt jelenti, hogy a váltóirányító egyenirányító üzembe ment át, és a motor forgórész körű árama számára nyitja az egyenirányító diódáit. Az egyenáram nagysága akkor éppen megfelelő, ha az egyenirányító sarkain a feszültség polaritása megfordul, de a feszültség nagysága a diódák névleges feszültségeséséhez képest kicsi marad. Ezt az állapotot változó terheléseknél úgy biztosíthatjuk, ha az érzékelt feszültség növekedése az áramszabályozó által létrehozott áramot csökkenti. A szabályozási kör ilyen elvű felépítésével elérhető, hogy a berendezés a hálózatból a minimális meddő teljesítményt vegye fel a névleges fordulatszám közelében.

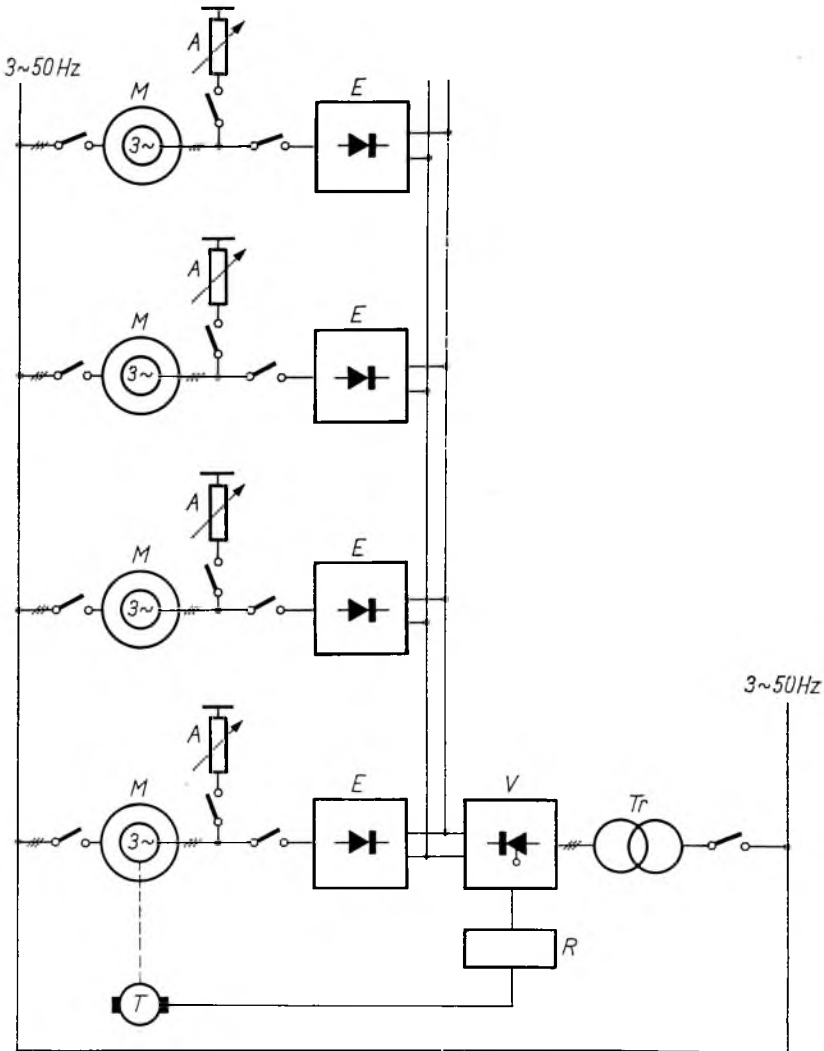
5. Csoportos hajtás közös forgórész körű váltóirányítóval

Az áramirányítós kaszkád hajtás gazdaságos felhasználásának egy további lehetősége a csoportos hajtás. Ez a hajtási mód lehetőséget ad több aszinkron motor együttes fordulatszám-szabályozására.

Áramirányítós kaszkád hajtás esetén a váltóirányító és az illesztőtranszformátor a berendezés árának jelentős részét szolgáltatja. Ha egy felhasználási területen több aszinkron motort kell fordulatszám-szabályozott üzemben járattatni, és a motorok közös fordulattal járhatnak, akkor a fordulatszám-szabályozó berendezés ára csökkenthető úgy, hogy az aszinkron motorok közös váltóirányítóra és illesztőtranszformátorra kapcsolódnak. A motorok csúszógyűrűi e megoldásban egyenként egy-egy háromfázisú, hídkapcsolású egyenirányító váltakozóáramú kapcsaira, az egyenirányítók közös egyenáramú kapcsai pedig a váltóirányító egyenáramú bemenetére csatlakoznak. A váltóirányító váltakozóáramú oldala feszültségillesztőtranszformátoron keresztül csatlakozik a hálózatra. A 12-7. ábrán négy aszinkron motor csoportos hajtásának elvi kapcsolási rajza látható. A váltóirányító a motorok forgórész körű egyenirányítóira közös feszültséget kényszerít és így a motorok — ha azonos típusúak és terhelésük is azonos — azonos fordulatszámúval üzemelnek.

Ilyen felépítésű csoportos kaszkád hajtás egyik alkalmazási területe pl. örvényszivattyúk fordulatszámának változtatása. Az örvényszivattyúk fordulatszám-változtatására akkor lehet szükség, ha az üzemre nagymértékben változó szállítomagasság jellemző (öntözőszivattyúk), vagy állandó szállítomagasság mellett változtatni kell

a szállított vízmennyiséget. A csoportos hajtás tulajdonságainak vizsgálatára a Villamosipari Kutató Intézet megépített egy berendezést, amely négy örvényszivattyú közös fordulaton való járását biztosítja. Az örvényszivattyúk hajtómotorai egyenként 110 kW-os csúszógyűrűs aszinkron motorok, melyeknek a közös fordulatszámát 975/min és 725/min között lehet változtatni. A négy szivattyúmotor csúszógyűrűire



12-7. ábra

egy-egy hídkapcsolású diódás egyenirányító csatlakozik. Az egyenirányítók egyenáramú kapcsai össze vannak egymással kötve. A közös fordulatszámot a tirisztoros váltóirányító gyűjtásszögével változtatható egyenfeszültség szabja meg, amelyet a váltóirányító az egyenirányítók közös kapcsaira kényszerít.

A váltóirányító teljesen vezérelt hídkapcsolás, amelynek váltakozófeszültségét transzformátor illeszti a hálózati feszültséghez.

A motorok egyedi indítása egyetlen, az egyes motorokra átkapcsolható indítóellenállással történik. Az indítóellenállás teljes rövidzárása után a forgórészkeri átkapcsoló segítségével az indítóellenállást leválasztjuk a csúszógyűrűkről és átkapcsoljuk a motorhoz tartozó egyenirányítóra. A motor ezt követően addig lassul, amíg el nem éri a már forgó motor vagy motorok fordulatszámát. Ekkor áram kezd folyni a motor egyenirányítóján keresztül. A motor fordulatszáma a fellépő forgatónyomaték hatására ezen a fordulaton állandósul.

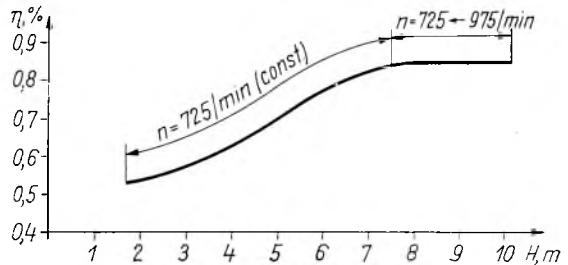
Elsőként az ún. vezetőmotort kell elindítani, amelynek tachométer-generátoros fordulatszám-érzékeléssel működő fordulatszám-szabályozása van alárendelt áramszabályozással kiegészítve.

Ezt a berendezést egy öntözés céljára létesített vízkivételi műben használják. A vízzállításra az erősen változó szállítómagasság a jellemző, amely a folyó mindenkori vízállásának megfelelően változik. A vízkiemelő mű villamosítását az eddigi dízelmotoros üzem nagy önköltsége és a sok karbantartási munka tette szükségessé. Aszinkron motoros hajtással a karbantartási munka a minimumra csökkenthető, és a könnyű fordulatszám-változtatás lehetőségével a hajtás az önköltség tekintetében optimumra állítható.

Előzetes számítások szerint a vízkiemelő mű villamosítása 5 év alatt az energia-megtakarításokból és a karbantartási munkák csökkenése miatt megtérül. A vízkiemelő mű villamosítását elősegítette az a körülmény is, hogy a szükséges villamos energia a közelben rendelkezésre állt. A vízkiemelő mű vízzállításának állandó értéken tartására nincs merev előírás. A szabályozás módját a gazdaságos üzemvitel szabja meg. A gazdaságos üzemeltetés szempontjából a vízzállítást a legkedvezőbb hatásokon célszerű végezni. A változó vízmennyiséghez való alkalmazkodást egy újabb gépegység üzembehelyezésével vagy leállításával lehet megvalósítani. A szivattyúk $Q-H$ jelleggörbéjében (szállított vízmennyiség—szállítómagasság) az azonos hatásfokú pontok összeköthetők.

Az optimális hatásfokú pontok segítségével megszerkeszthető a szivattyúmotorok szükséges fordulatszáma a szállítómagasság függvényében. Az alkalmazott szivattyútípusra ez a jelleggörbe közelítőleg egyenes.

Ha a fordulatszám-szabályozó berendezés fordulatszám-alapjelét a szállítómagasság függvényében ennek a jelleggörbének megfelelő értékre állítjuk be, akkor a szivattyúk optimális hatásfokkal üzemelnek. Ha a szükséges szállítómagasság tartomány nagyobb, mint amit a szivattyúk fordulatszám-változtatásával optimális hatásfok mellett át lehet fogni, akkor a legkisebb szabályozható fordulatszámon való üzemeltetés esetén a hatásfok rohamosan csökken, a szállítómagasság csökkenése esetén. Ilyen jellegű szabályozás megvalósítása esetén a hatásfok a szállítómagasság függvényében a 12-8. ábrán látható. A görbe egyes szakaszain a paraméter a fordulatszám. A szivattyúmotorok fordulatszám-tartományát ennek figyelembevételével kell megválasztani úgy, hogy a szükséges fordulatszám-tartományban való üzemeltetésekor a szivattyúmotorok optimális hatásfokkal dolgozzanak.



12-8. ábra

FÉLVEZETŐ
FŐOSZTÁLY

13.

A termovillamos generátorok fejlesztésének jelenlegi helyzete

*MOLNÁR ISTVÁN—TÖRÖK TIVADAR—
RENNER GÁBOR—SZŐNYI LÁSZLÓ*

ÖSSZEFOGLALÁS

A termovillamos effektusok elmúlt században történt felfedezése óta a szilárdtestfizika és az anyagkutatás fejlődése nyomán lehetőség nyílt ezen effektusok közvetlen energiaátalakításra történő felhasználására. Az utóbbi 10 évben egyre szélesebb körű a termovillamos generátorok használata. Közleményünk röviden kitér a termovillamos effektusok ismertetésére, összefoglalja az eszköz hatásfokát befolyásoló fontosabb tényezőket és a termovillamos anyagok kutatásának eredményeit. Ismerteti továbbá a kaskád felépítésű termovillamos generátor egyes alkalmazási kérdéseit és a Villamosipari Kutató Intézetben elért eredményeket a külföldiekhez viszonyítva.

ПОЛОЖЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ

И. Молнар—Т. Тэрэк—Г. Реннер—Л. Сени

Резюме

Со времени открытия в прошлом столетии термоэлектрических эффектов развитие физики твердых тел и исследования новых материалов сделало возможным использование этих эффектов для непосредственного преобразования энергии.

За последних 10 лет все более широко начинают применять термоэлектрические генераторы. Наше сообщение в качестве дополнения к вышеприведенным кратко останавливается на описании наиболее важных термоэлектрических эффектов и суммирует наиболее важные факторы, влияющие на их к. п. д. и важнейшие результаты исследований, проводимых в области термоэлектрических материалов.

Кроме того статья занимается отдельными вопросами применения термоэлектрических генераторов каскадной схемы, результатами достигнутыми в ходе работ, проводимых в Научно-исследовательском институте электрической промышленности в аспекте результатов, достигнутых зарубежными исследователями.

GEGENWÄRTIGE LAGE DER THERMOELEKTRISCHEN GENERATOREN

I. Molnár—T. Török—G. Renner—L. Szőnyi

Zusammenfassung

Nachdem die thermoelektrischen Effekte im vorigen Jahrhundert entdeckt worden waren, ermöglichten die Festkörperphysik und die Entwicklung der Materialforschung, diese Effekte zur direkten Energieumwandlung anzuwenden.

In den letzten 10 Jahren hat sich die Anwendung der thermoelektrischen Generatoren immer mehr verbreitet. Der Aufsatz, sich den oben erwähnten Feststellungen

anschliessend, legt kurz die wichtigsten thermoelektrischen Effekte dar, fasst die den Wirkungsgrad des Mittels beeinflussenden wichtigsten Faktoren und die wichtigsten Ergebnisse der thermoelektrischen Materialforschung zusammen.

Ferner legt die Mitteilung die einzelnen Anwendungsfragen des thermoelektrischen Generators von Kaskadenaufbau sowie die im Forschungsinstitut der Elektroindustrie erzielten Ergebnisse dar und vergleicht sie mit den Ergebnissen im Ausland.

PRESENT STATE OF THERMOELECTRIC GENERATORS

I. Molnár—T. Török—G. Renner—L. Szönyi

Summary

Although the thermoelectrical effects were discovered in the past century, the application of these effects to direct energy conversion has only become feasible with the development of solid-state physics and advanced research of materials.

In the past decade the use of thermo-electric generators has been steadily gaining ground. Surveying this progress, the most important thermo-electrical effects are briefly described, the major factors influencing the efficiency of such equipment are examined, and the achievements in the research of thermo-electrical materials are summarized. Some application problems of the cascade thermoelectric generator are discussed, and the accomplishments of the Research Institute of Electrical Industry in this field are compared with results achieved abroad.

1. Bevezetés

A Seebeck-effektus 1821-ben történt felfedezése — ami 5 évvel megelőzte az Ohm-törvény képletszerű megfogalmazását — a szakembereket kísérletezésre serkentette, hogy a hőenergiából közvetlenül villamos energiát nyerjenek. A lényegében fémek vagy fémötvtözetek felhasználásával készített termovillamos generátor kifejlesztésére irányuló tevékenység azonban a sikertelenségek következtében a századforduló után gyakorlatilag megszűnt és csak a félvezetőanyagok századunk közepén való megjelenése adott új lendületet a fejlesztéshez.

Az utóbbi 10 évben egyre szélesebb körben alkalmaznak termovillamos generátorokat. Azok a jellegzetes felhasználási területek, ahol legelőször terjedtek el, elsősorban a közvetlen energiaelőállítás lehetőségét használják ki, vagy pedig azokat a különleges előnyöket, amikkel a hagyományos energiaelőállító berendezések nem rendelkeznek. A termovillamos generátorok lényeges előnyei, hogy mozgó alkatrészeket nem tartalmaznak, és emiatt lényegében karbantartásra, felügyeletre nincs szükség, a hőenergián kívül más szolgáltatást nem igényelnek, zajmentesen működnek, magas üzemi hőmérsékleten használhatók, kis fajlagos méret és súly jellemzi őket.

Mind ezek az előnyök és nem utolsósorban a magas előállítási költségek indokolták, hogy először csak világűrkutatói célokra, továbbá légi, földi és vízalatti katonai berendezésekben használták a termovillamos generátorokat. A megépített generátorokkal szerzett tapasztalatok, az elért élettartamértékek és az utóbbi évek fejlesztési eredményei alapján azonban felmerült a generátorok szélesebb körű alkalmazásának lehetősége is. 1968-tól folyamatosan megjelentek a kereskedelemben a nagy villamos cégek első termovillamos generátorai, amelyek a villamos hálózattól távoli rádió- és televízió-reléállomásokat, kihelyezett vízi és meteorológiai állomásokat, csőtávvezetékek korrózióvédelmét biztosító berendezéseket táplálnak.

Ezek az alkalmazási területek mindinkább sürgetik egy eddig alig jelentkező kérdés, az energiaátalakítás hatásfokának és a gazdaságosságának az elemzését is.

1969-től megjelentek olyan összehasonlító, gazdaságosságot elemző tanulmányok, amelyek vizsgálták a beruházási és üzemeltetési költségeket is és igyekeztek behatárolni a különböző teljesítményértékű termovillamos generátorok legelőnyösebb felhasználhatósági területeit.

Közleményünk röviden kitér a termovillamos effektusok ismertetésére, összefoglalja az eszköz hatásfokát befolyásoló legfontosabb tényezőket és a termovillamos anyagok kutatásának eredményeit, kitér a kaszkád felépítésű termovillamos generátor alkalmazási kérdéseire, majd röviden ismerteti a Villamosipari Kutató Intézetben folyó munka során elért eredményeket a hasonló külföldi eredményekhez viszonyítva.

2. Termovillamos alapjelenségek

Egy szilárd test hő- és villamos vezetési jelenségei az irreverzibilis termodinamika tárgyalásmódjában az Onsager-féle transzportegyenletekkel és egy disszipációs egyenlettel értelmezhetők teljes általánosságban. Fentiekből egyszerű feltételezésekkel levezethetők ezen jelenségek leírására általánosan használt fenomenologikus összefüggések és effektusok ([1] és [2]). Ezen összefüggések közül röviden foglalkozunk a *Seebeck*-, *Peltier*- és *Thomson*-effektussal.

Seebeck-effektus

Ha két különböző termovillamos anyagból zárt áramkört létesítünk és az egyik kötési helyet melegítve dT hőmérsékletkülönbséget tartunk fenn a két kötési hely között, akkor az áramkörben

$$dU = \alpha dT \quad (1)$$

feszültség keletkezik. Itt α (V/°K) a Seebeck-együttható, ami a használt kétféle anyag abszolút Seebeck-együtthatójának előjeles összege, független a kontaktusok méretétől, csak az anyagminőségtől és a hőmérséklettől függő paraméter.

A termovillamos hatásra a következő kvalitatív értelmezés adható. Amennyiben egyetlen termovillamos anyagból készült oszlop két vége között állandó hőmérsékletkülönbséget tartunk fenn, akkor a melegebb oldalon az elektronok nagyobb kinetikus energiát nyerve a hidegebb oldal felé diffundálnak és feszültségkülönbséget hoznak létre az oszlop két vége között. Egyensúlyi állapotban a feszültségkülönbség hatására keletkező télerősség a diffúziós árammal egyenlő nagyságú, de ellentétes irányú áramot hoz létre és így az oszlop bármely keresztmetszetén az elektromos töltésáramlás eredője zérus.

Peltier-effektus

Ha két különböző termovillamos anyag kötési helyén (átmenetén) I áram halad át, akkor az átmenet felmelegszik vagy lehűl az áram irányától függően. Ez a Peltier-effektus és az átmeneten időegység alatt keletkező hőmennyiség (hőáram)

$$q = III \quad (2)$$

összefüggéssel írható le. Itt a II (V) a Peltier-együttható, ami az anyagi jellemzőktől és a hőmérséklettől függő előjeles mennyiség.

Thomson-effektus

Ha egyetlen, termovillamos anyagból készült oszlopon I áramot vezetünk át és ugyanakkor az oszlop két vége között hőmérsékletgradiens áll fenn, akkor az oszlop dx hosszúságú szakaszán

$$dQ = \tau I \left(\frac{dT}{dx} \right) dx \quad (3)$$

hőmennyiség szabadul fel. Ez a Thomson-hő, τ ($V/^\circ K$) pedig a Thomson-együttható, ami anyagi jellemzőktől és hőmérséklettől függő szám.

3. A termovillamos energiaátalakítás hatásfokát meghatározó tényezők

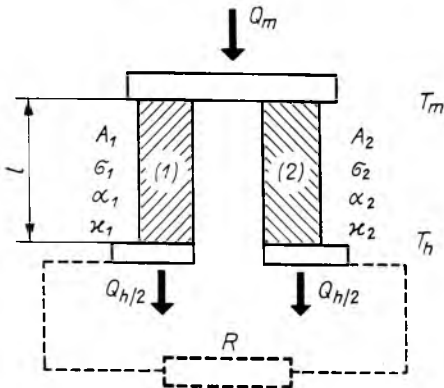
A hőenergiának közvetlen villamos energiává való átalakítására az nyújt lehetőséget, hogy a szilárd testben a hőmérsékletkülönbség hatására a hidegoldal felé diffundált elektronok egy részét alkalmasan illesztett külső áramkörön keresztül vezetjük vissza. Ha folyamatosan gondoskodunk az anyag két vége közötti hőmérsékletkülönbség fennmaradásáról, a külső áramkörben folyamatosan villamos energiát nyerhetünk. Az energiaátalakítás hatásfoka a külső körben nyert villamos teljesítmény és a hőmérsékletgradiens fenntartásához szükséges hőteljesítmény viszonya:

$$\eta = \frac{P}{Q_m} \quad (4)$$

A hatásfok természetesen függ a generátor terhelési körülményeitől, ill. a készítéséhez felhasznált anyagok fajlagos anyagállandóitól is, valamint a működési hőmérséklettartománytól. Ezek bevezetésével:

$$\eta = \frac{T_m - T_h}{T_m} \frac{\frac{m}{m+1}}{1 + \frac{Kr}{\alpha^2} \frac{m+1}{T_m} - \frac{T_m - T_h}{2T_m} \frac{1}{m+1}}, \quad (5)$$

ahol $m = \frac{R}{r}$ a terhelés és a belső ellenállás aránya, T_m és T_h a meleg- és hidegoldali hőmérsékletek, K pedig a két oszlop eredő hővezetése.



$$K = K_1 + K_2 = \frac{\kappa_1 A_1 + \kappa_2 A_2}{l}, \quad (6)$$

ahol κ_1 és κ_2 (W/cm fok) a két oszlop anyagától függő hővezetési tényező. Az egyéb szimbólumok értelmezését a 13-1. ábra adja meg, amely egy szokásos felépítésű termovillamos elem sémája.

A hatásfok (5) képletéből jól látható, hogy a hőmérsékleti határokon, ill. a terhelési viszonyokon kívül, a hatásfokot az anyagállandókból képezhető, következő kifejezés befolyásolja alapvetően:

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\kappa} \quad (7)$$

13-1. ábra. Termovillamos generátorelem felépítésének vázlatla

Illetve anyagpárra vonatkoztatva:

$$Z = \frac{\alpha_{12}^2}{\left(\sqrt{\frac{\kappa_1}{\sigma_1}} + \sqrt{\frac{\kappa_2}{\sigma_2}}\right)^2} \quad (8)$$

Z egy anyag termovillamos alkalmazhatóságára jellemző mennyiség, az ún. termovillamos jósági tényező. Dimenziója: $1/^\circ\text{K}$.

Az előbbi jelölést alkalmazva, a legnagyobb kivehető villamos teljesítményhez tartozó hatások $m=1$ esetén

$$\eta_{\max} = \frac{T_m - T_h}{T_m} \frac{1}{2 \left(1 + \frac{2}{Z T_m} - \frac{1}{4} \frac{T_m - T_h}{T_m} \right)}, \quad (9)$$

A legnagyobb hatások viszont

$$\eta_{\text{opt}} = \frac{T_m - T_h}{T_m} \frac{M - 1}{M + \frac{T_h}{T_m}}, \quad (10)$$

ahol

$$M = \sqrt{1 + \frac{Z(T_m + T_h)}{2}}.$$

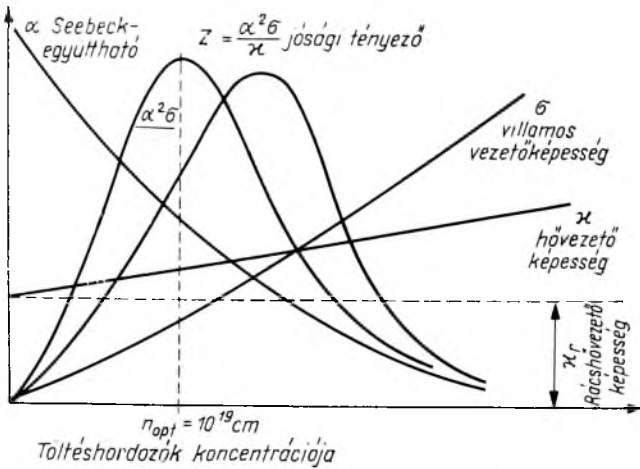
Az optimális hatások az $\frac{R}{r} = M$ terhelési helyzetben valósul meg.

Látható, hogy a hatásokot kifejező egyenletek egyik tényezője mindkét esetben az ún. Carnot-hatások. Megállapítható tehát, hogy a jó hatások elérése nagy hőmérséklet-különbség létrehozását követeli meg a hideg- és melegoldal között, ezért a melegoldal hőmérsékletét minél magasabbra célszerű beállítani és ugyanakkor az anyagnak nagy Z jósági tényezőjűnek kell lennie. Az utóbbi követelmény szükségessé teszi, hogy a választott anyagoknak

- nagy legyen az α Seebeck-együtthatója,
- nagy legyen a σ villamos vezetőképessége,
- kicsi legyen a κ hővezető képessége.

A Wiedemann—Franz összefüggés ismeretében — ami a villamos vezetőképesség és hővezetőképesség kényszerkapcsolatát írja le — belátható, hogy nagy jósági szám fémekkel nem érhető el és a megoldást csak a félvezető anyagok biztosíthatják. Ezt támasztja alá az a tény is, hogy a félvezető anyagok villamos vezetőképességét közel hét nagyságrend tartományban tudjuk változtatni a szennyezéskonzentráció módosításával és ugyanakkor a σ/κ hányados értékét is módunkban áll befolyásolni. A Seebeck-effektussal kapcsolatban elmondottak ismeretében az is nyilvánvaló, hogy a termovillamos anyagnak célszerűen egyféle töltéshordozóval kell rendelkeznie, és a termovillamos elem két oszlopát — az abszolút Seebeck-együtthatók előjeles értékét is figyelembe véve — kétféle, p és n típusú félvezető anyagból kell kialakítani.

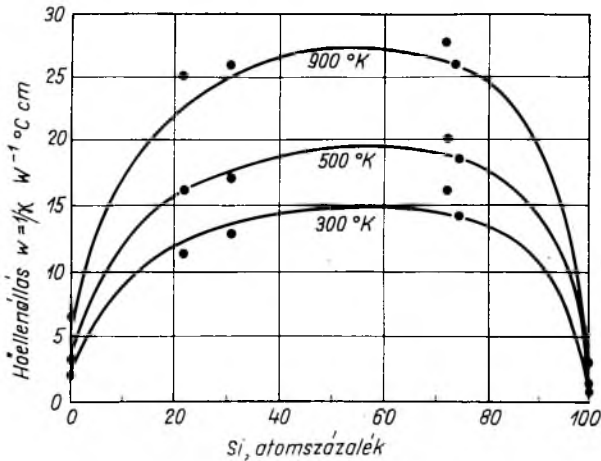
A termovillamos jósági számban szereplő anyagállandók mélyebb fizikai értelmezését nem adhatjuk meg e rövid tanulmányban, csak vázlatos kvalitatív összefoglalásra szorítkozunk. Ezekről bőseges felvilágosítást nyújt a [3], [4] és [5] irodalom. A 13-2. ábrán, amely a Seebeck-együttható és a villamos vezetőképesség



13-2. ábra. Termovillamos anyagra jellemző paraméterek viselkedése a töltéshordozó-koncentráció függvényében

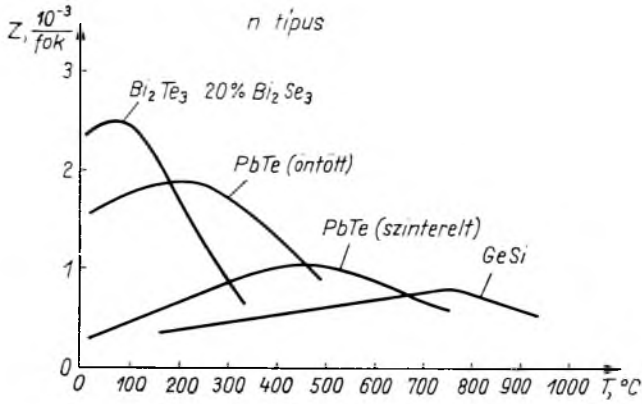
változását is feltünteti a töltéshordozók koncentrációjának függvényében, jól látható, hogy míg a Seebeck-együttható a növekvő töltéshordozó-koncentráció mellett csökkenő tendenciát mutat, addig a vezetőképesség fordított viselkedésű. Az ábrán feltüntettük az $\alpha^2 \sigma$ szorzatot is, ennek maximuma kb. $10^{19}/\text{cm}^3$ töltéshordozó-koncentrációnál van.

A hőenergia szilárd testben való terjedésének leírására vonatkozóan többféle mechanizmust tételeznek fel. Ennek megfelelően, a hőenergia terjedése szabadelektronok vagy lyukak révén, fononok révén, termikus elektron—lyuk párok képződésével, excitonok révén folyik le. A transzportált energiamennyiségeket figyelembe véve, egy anyag hővezető képességének számításakor az első két mechanizmust

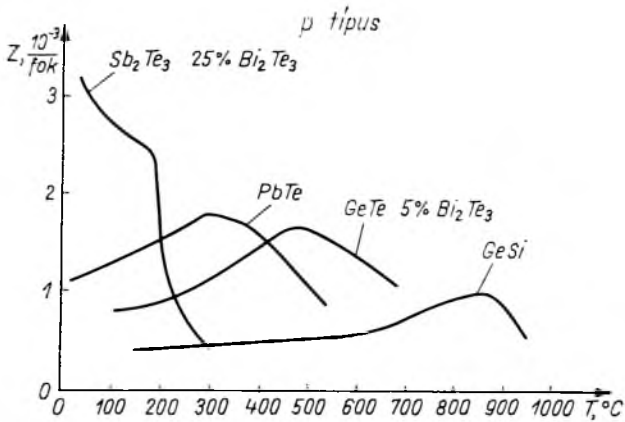


13-3. ábra. GeSi vegyeskristály fajlagos hőellenállásának változása a Si-koncentráció és a hőmérséklet függvényében [5]

szokták figyelembe venni. A szabad töltéshordozók okozta hővezető képesség ki-
elégítően leírható a *Wiedemann—Franz—Lorenz-törvénnyel*. A hővezető képesség
fononos komponense a fononok terjedési sebességének és szabad úthosszának függ-
vénye. Befolyásolása, a kristályrács periodicitásának megőrzése mellett, a rácsot kis-
mértékben torzító atomok beépítésével lehetséges. A rácsállandóval azonos hullám-
hosszúságú fononhullámokra ezek a torzulások erős szóróhatást gyakorolnak, a
töltéshordozó mozgékonyasága azonban alig változik, mivel a nagyobb hullám-
hosszú elektronhullámok az akadályt gyakorlatilag nem érzékelik.



13-4. ábra. n típusú termovillamos anyagok jósági tényezőinek hőmérsékletfüggése [5]



13-5. ábra. p típusú termovillamos anyagok jósági tényezőinek hőmérsékletfüggése [5]

Az eddigieknek megfelelően, a jó termovillamos anyagok két vagy több kompo-
nens ötvözetéből állnak. Jó példa erre a germánium-szilícium vegyeskristály, amely-
nek fajlagos hőellenállását a 13-3. ábra mutatja, három különböző hőmérsék-
leten.

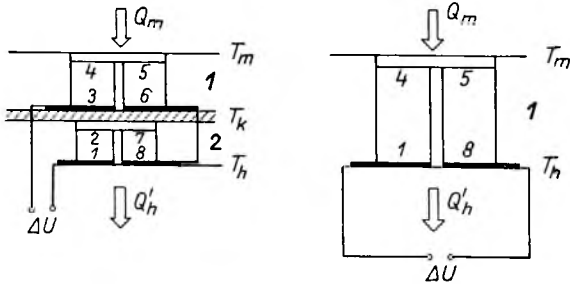
Az eddigi fejtegetések során, a termovillamos jellemzők hőmérsékletfüggéséről
nem tettünk említést. A 13-4. és 13-5. ábra különböző termovillamos anyagok jó-

sági számának alakulását mutatja a hőmérséklet függvényében. Meg kell jegyezni, hogy gyakorlati számításokat (hatásfok stb.) a termovillamos jellemzőknek az adott hőmérséklet-határok között felvett átlagos értékével kell végezni.

A 13-4. és 13-5. ábrából jól látható, hogy a termovillamos jósági szám erősen hőmérsékletfüggő, a maximális közeli értékek csak szűk tartományon belül használhatók ki. Önmagát kínálja az a gondolat, építsünk olyan termovillamos elemet, amely termikus szempontból sorbakötött különböző anyagokat tartalmaz, amelyek mindegyike a saját maximális termovillamos jósági számához tartozó hőmérséklet-határok között működik. *S. W. Angrist* professzor [1] könyvében részletesen tárgyalja az ily módon konstruált generátorokkal elérhető energiaátalakítás hatásfokát. Az elv alkalmazására pedig jó példát találunk *Rocklin* [6] közleményében. E helyen inkább az elv alkalmazásának feltételeiről ejtünk néhány szót.

4. Kaszkád rendszerek alkalmazásának feltétele

Egy egyszerű, két anyagból felépített termovillamos rendszer vázlatja a 13-6. ábrán látható. A rendszer az 1 és 2 egységek villamosan és termikusan soros összekapcsolásából áll. (Az 1 és 2 egység természetesen jelenthet több elemből álló elrendezést



13-6. ábra. Kaszkád elrendezés vázlatja

is, az elemek soros-párhuzamos villamos kapcsolásával.) Az 1 rendszer T_m és T_k , a 2 rendszer T_k és T_h hőmérsékletek között alakítja át a hőenergiát villamos energiává. Az 1 fokozat elemei nagy hőmérsékleten dolgoznak, a 2 fokozat elemei kisebb hőmérsékleten dolgoznak jó hatásfokkal. Mivel az alacsonyabb hőmérséklettartományban az ott kisebb hatásfokú 1 fokozatbeli anyagot helyettesítettük egy alacsony hőmérsékleten jobb hatás-

fokú anyaggal, az egész rendszer hatásfoka várhatóan megnövekszik. Van azonban egy tényező, amely a hatásfok növekedésével szemben hat: ez a belső ellenállások növekedése a kontaktusok számának növekedésével.

A kaszkád elrendezés akkor előnyös, ha a 2 fokozat nagyobb hatásfokkal működik, mint az 1 fokozatbeli anyagból készült generátor a 2 fokozat hőmérséklet-határai ($T_k - T_h$) között (l. 13-6. ábrát). Ez akkor teljesül, ha

$$\left(\frac{Kr}{\alpha^2}\right)_1 = \left(\frac{Kr}{\alpha^2}\right)_2 \quad (11)$$

A 2 fokozat belső ellenállása az anyag ellenállásából és a kontaktusok (1, 2, 7, 8) ellenállásából tevődik össze:

$$r_2 = r_{a2} + r_{k2} \quad (12)$$

Az 1 fokozatbeli anyagból készült összehasonlító generátor $T_k - T_h$ hőmérséklet-határok között működő részének belső ellenállásaként csak az anyag ellenállását kell figyelembe venni.

$$r_1 = r_{a1} \quad (13)$$

A 2 fokozat kontaktus és anyagellenállásának hányadosa legyen

$$b = \frac{r_{k2}}{r_{a2}} \quad (41)$$

Gyakorlati esetekben:

$$1 < b < 2, \quad (15)$$

$$\frac{K_1 r_{a1}}{\alpha_1^2} = \frac{K_2 r_{a2}}{\alpha_2^2} (1 + b), \quad (16)$$

mivel

$$\frac{K_1 r_{a1}}{\alpha_1^2} = \frac{1}{Z_1}; \quad \frac{K_2 r_{a2}}{\alpha_2^2} = \frac{1}{Z_2}, \quad (17)$$

$$\frac{1}{Z_1} = \frac{1}{Z_2} (1 + b), \quad (18)$$

ahol Z_1 és Z_2 a megfelelő anyagokra jellemző termovillamos jósági szám.

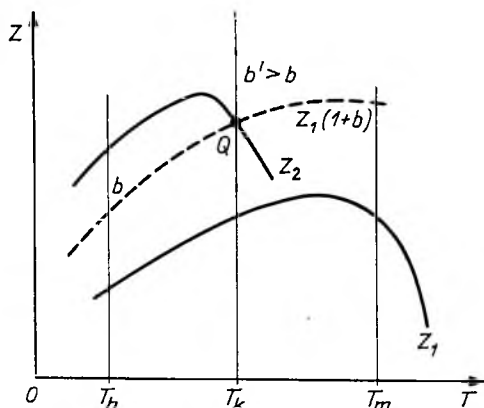
Látjuk, hogy a kaszkád elrendezés akkor jöhet szóba, ha az 1 generátoranyaghoz található olyan 2 generátoranyag, amelyre legalább

$$Z_2 = Z_1(1 + b), \quad (19)$$

teljesül és akkor előnyös, ha

$$Z_2 > Z_1(1 + b) \quad (20)$$

a $T_k - T_h$ hőmérséklet-tartományban (l. 13-7. ábra). Ez egyúttal azt is jelenti, hogy a kaszkád elrendezés az anyagok és a generátorkészítés technológiájának meghatározott szintjén felül akkor előnyös, ha a b görbe megfelelő metszésbe kerül Z_2 -vel. Másrésztől viszont, ha ez a helyzet előállt, az egyenlet lehetőséget ad az elválasztó felület hőmérsékletének (T_k) meghatározására. Ezt a hőmérsékletet az ábrából láthatóan a Q pont jelöli ki. Összefoglalva tehát, a fenti körülmények között a $T_k - T_h$ hőmérséklet-tartományban a 2 anyag használata biztosítja a legjobb hatásfokot, a $T_m - T_k$ hőmérséklet-tartományban pedig az 1 anyag használata.



13-7. ábra. Kaszkád generátorhoz elvileg használható kétféle termovillamos anyag jósági tényezőinek hőmérsékletfüggése az előnyös illesztés szempontjából lényeges korrekciós görbe

5. Termovillamos anyagok

A következőkben röviden összefoglaljuk azoknak a termovillamos anyagoknak a leglényegesebb jellemzőit, néhány előállítási módszerét, amelyek a szobahőmérséklet és 1000 °C közti hőmérséklet-tartományban leggyakrabban használatosak.

Szobahőmérséklet és 500 °C között használható anyagok közé sorolhatjuk a legkülönbözőbb összetételű bizmuttelluridokat, az ólomtelluridot, a germániumtelluridot, valamint a PbTe, GeTe és Bi₂Te₃ szilárd oldatstruktúrájú ötvözeteit.

Ezek az anyagok általában azzal jellemezhetők, hogy a fononos hővezetésük alacsony ($0,006 \dots 0,02 \text{ W/cm fok}$), tiltott sáv szélességük tartománya pedig $0,17 \dots 0,32 \text{ eV}$. Mindkét féle töltéshordozó-mozgékonyosság $100 \dots 1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ értékhatáron belüli, és a *Seebeck*-koefficiens értéke kb. $200 \mu\text{V/fok}$.

Az említett anyagok közül a szobahőmérséklet és kb. $250 \text{ }^\circ\text{C}$ hőmérséklet-tartományban termovillamos energiaátalakításra az Sb_2Te_3 — Bi_2Te_3 , ill. Bi_2Te_3 — Bi_2Se_3 -ből álló pszeudobiner rendszerek használatosak. Ezeket az anyagokat vagy normál befagyasztásos módszerrel készítik leforrasztott ampullákban, vagy porkohászati úton, homogén porkeverék préselésével és szinterelésével. A bizmut-telluridnak, bizmutszeleniddel, ill. antimontelluriddal való ötvözése rács-hővezető-képességcsökkenést eredményez, amelynek minimuma $70 \text{ mol } \%$ antimontellurid, ill. $15 \dots 20 \text{ mol } \%$ bizmutszelenid tartalomnál van. Így a pszeudobinér rendszerekkel a bizmuttelluridénál magasabb termovillamos jósági szám érhető el. n vezetési típust a bizmuttellurid-szelenid rendszer esetén halogén (rézbromid) doppelással, p vezetési típust a bizmut-antimontellurid rendszerben a sztöchiometrikusnál magasabb tellurtartalommal lehet elérni.

Mint az a 13-4. és 13-5. ábrából is látható, $200 \dots 250 \text{ }^\circ\text{C}$ -nál magasabb hőmérsékleteken az előző bekezdésben említett rendszerek termovillamos jósági száma erősen csökken, ezért kb. $600 \text{ }^\circ\text{C}$ -ig az ólomtelluridot és a germániumtelluridot, valamint ezeknek szilárd oldat struktúrájú ötvözeit használják. Ezen anyagok ugyancsak előállíthatók porkohászati módszerrel és normál összeolvasztással is. Ólomtellurid esetén p vezetési típus elérésére általában nátriumdoppelést, n vezetés elérésére jóddoppelést alkalmaznak. A germániumtelluridban a normál befagyasztással való előállításakor fellépő kis tellurfölösleg akceptorokat hoz létre. A fázisdiagramból adódó vegyületösszetétel esetén a töltéshordozó-koncentráció kb. $10^{21}/\text{cm}^3$ érték, és ez két nagyságrenddel nagyobb az optimálisnál. A germániumatomok egy részét bizmutatomokkal helyettesítve, a lyukak egy része kompenzálható, és így az optimális töltéshordozó-koncentráció beállítható. A germániumtellurid az előzőeknek megfelelően p típusú termovillamos oszlopként alkalmazható. A 13-4. és 13-5. ábrából az is látszik, hogy mind a germániumtelluridnak, mind az ólomtelluridnak egészen $700 \text{ }^\circ\text{C}$ -ig nagy a termovillamos jósági száma, azonban ezeknek az anyagoknak a termikus instabilitásai, nevezetesen a tellur elpárolgása, az alkalmazási felső hőmérsékletet kb. $500 \text{ }^\circ\text{C}$ -ban szabja meg.

Az 550 és $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ közötti hőmérséklet-tartományban működő termovillamos generátorok kifejlesztéséhez kizárólag germánium—szilícium ötvözetkristály jöhet szóba. Alkalmazásának leglényegesebb előnyei a következőkben foglalhatók össze:

- $600 \text{ }^\circ\text{C}$ feletti hőmérséklet esetén termovillamos tulajdonságai a legjobbak,
- tekintettel az anyag viszonylag kis atomsúlyára, a nyerhető fajlagos teljesítmény ($0,5 \dots 0,8 \text{ W/g}$) kedvező,
- az anyag nem bomlékony, mechanikailag és kémiaiilag stabil marad, akár levegőn, akár vákuumban $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ körüli hőmérsékletekig. *Dietz és Herrmann* [7] közölte, hogy még $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ -on sem talált változást. A kristálynak ez a tulajdonsága lehetővé teszi, hogy 5—10 éves élettartamú berendezéseket készítsenek belőle [3].

Komoly előnye még, hogy akár radioaktív izotópos hőforrás, akár olaj- vagy gáztüzelés esetén is alkalmazható és közvetlenül is fűthető lánggal. Kétségtelen előnyeit figyelembe véve, a VKI-ben folyó, hazai termovillamos generátor fejlesztésére irányuló munka is GeSi ötvözetre épül. Tekintettel arra, hogy a GeSi vegyeskristályban a rács-hővezető-képesség minimális értéke 70 atomszázalék szilíciumtartalomnál van, $\text{Ge}_{0,3}\text{Si}_{0,7}$ összetételű germánium-szilícium vegyeskristályt használunk.

A megfelelő összetételű és homogenitású GeSi ötvözetkristály előállítására többféle módszer ismert. Ezek közül a leglényegesebbek a vízszintes zónázás, a szakaszos öntés, a melegpréselés és a gőzfázisból történő redukció. Ezen módszerek közül a vízszintes zónázással és a szakaszos öntéssel végeztünk a Villamosipari Kutató Intézetben kísérleteket és vizsgálatokat, s ennek alapján röviden összefoglaljuk az általunk megvizsgált módszerek alkalmazhatóságát.

A vízszintes zónázási folyamat végrehajtásához saját építésű zónázóberendezést használtunk, az olvadt zónát 500 kHz-es generátor segítségével hoztuk létre. Az eljárással jó homogenitású anyagot kaptunk, azonban véleményünk szerint — s ez egybeesik az irodalomból ismeretes [7] közléssel is — ipari alkalmazásra ez az eljárás nem számíthat, tekintettel az alacsony növesztési sebességre, és az ebből származó kis termelékenységre.

A szakaszos öntésnek a vízszintes zónázáshoz viszonyítva számos előnye van. Az eljárás során inert fedőgázban vagy vákuumban egy nagyobb térfogatú tégelyben egyszerre olvasztanak meg viszonylag nagy mennyiségű germániumot és szilíciumot a kívánt összetételnek megfelelő arányban, és ebbe az olvadékba juttatják a kívánt mennyiségű adalékanyagot is, amely az olvadékban feloldódik és a nagyfrekvenciás melegítés és a termokonvekció hatására tökéletesen elkeveredik. Az anyag teljes megolvadása, ill. az adalékanyag feloldódása után a tégely fenekén levő nyílást megnyitják a behelyezett kvarcdugó felemelésével, és a nyíláson keresztül az olvadékot egy, a GeSi-ötvözet olvadáspontjánál alacsonyabb hőmérsékleten tartott felfogó edénybe csöpögtetik. A kifolyás sebességét a dugó fel-le mozgásával szabályozzák, és úgy állítják be, hogy a lehulló cseppek szétterülve azonnal megfagyjanak. Így szegregációs effektusok csak a lehullott csepp térfogatának megfelelő méretekben léphetnek fel. Ezzel az eljárással lehetőség nyílik arra, hogy hengeres és szögletes keresztmetszetű GeSi rudak is készülhessenek.

A módszer alkalmazása során a legnagyobb nehézséget az okozta, hogy az 1200...1300 °C-os olvadékhőmérsékleten a kvarcdugós megoldás rendszeresen tégelytöréshez, ill. a dugó elrepedéséhez vezetett. A megoldást végül is a következő formában találtuk meg. Egy speciális felfüggesztésű és az alján kónikus, lyukkal ellátott grafit-tégelybe pontosan illeszkedő kvarctégelyt helyeztünk. A komponensek megolvasztása és homogenizálása után, a tégely fenékén molibdén dárddal kiszűrtük. Az olvadék kifolyásának sebességét a molibdén-csúcs mozgásával lehetett szabályozni. A kifolyó olvadékot a hőzóna alkalmas részén elhelyezett grafit-tégelyben fogtuk fel, gondoskodva annak egyenletes lassú kihűléséről. A vázolt eljárással kb. 60 mm átmérőjű és 60...80 mm magasságú hengeres GeSi öntecseket készítettünk. Az ily módon nyert (l.a 13-8. ábrát) GeSi ötvözetkristályok termovillamos jellemzői jó egyezést mutatnak a hasonló összetételű anyagokra vonatkozó irodalmi adatokkal.

Tekintettel arra, hogy a tiszta GeSi ötvözetkristályban a töltéshordozó-koncentráció igen távol esik az optimális értéktől, a 10^{19} – $10^{20}/\text{cm}^3$ optimális töltéshordozó-koncentráció értéket adalékolással lehet beállítani. A szóba jöhető elemek n típusú anyag esetén foszfor, arzén és antimon, p típusú anyag esetén bór, alumínium és gallium. Az említett anyagok esetében az oldékonysági határ $2 \cdot 10^{19}/\text{cm}^3$ és $1,5 \cdot 10^{21}/\text{cm}^3$ érték között van, a létrehozni kívánt adalékanyag-koncentráció pedig $10^{20}/\text{cm}^3$ értékű. Kísérleteink során elsősorban bórt és foszfort alkalmaztunk.

Munkánk során sikerült megoldani mind a bór, mind pedig a foszfornak kívánt mennyiségben történő beötvözését a termovillamos célokra szolgáló GeSi ötvözetkristályokba. Megállapítottuk, hogy a bór jelentős szegregációs effektust nem mutat, illetőleg a kipárolgás is elhanyagolhatóan kicsi, s így a kívánt fajlagos vezetőképesség

elérését a számított mennyiségű bórpúdernak a GeSi olvadékban való feloldásával meg lehet oldani. A művelet során az olvadékot körülvevő atmoszféra — az előbb említett tulajdonságok figyelembevételével — 10^{-5} torr értékű vákuumatmoszféra lehet, ami különösen előnyös abból a szempontból, hogy a megszilárduló anyag salakosodását, illetve idegen anyagzárványok képződését kiküszöböli.



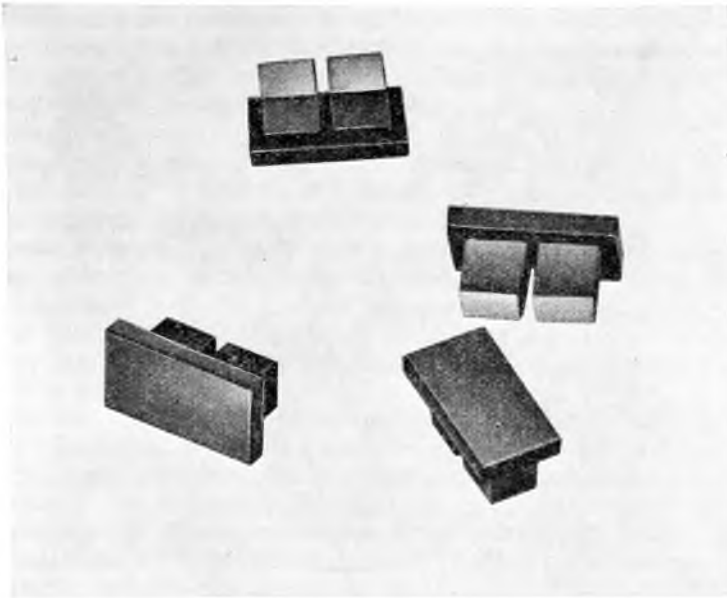
13-8. ábra. Szakaszos öntési-eljárással a VKI-ban készült GeSi öntecsek

Foszforral való ötvözés esetén az előbbieken vázolt eljárás szintén alkalmazható azzal a lényeges különbséggel, hogy a foszfor illékonyága miatt fedőgázként nagy tisztaságú, légköri nyomású argon, illetőleg argon—hidrogén elegyet használunk. A doppelóanyagot elemi foszfor formájában juttattuk az olvadékba, ahol az olvadékkal való reakciója nagy sebességgel játszódik le és még a kristályrácsba való beépülése előtt kémiaiilag megkötődik. Az elpárolgásból adódó adalékanyag-veszté-
séget empirikusan vettük figyelembe.

6. GeSi termovillamos elem jellemzői

Az ismertett technológiával készült termovillamos anyagokból különböző segédanyagok felhasználásával konstruáltuk a VKI-ban (950°C melegoldali és 250°C hidegoldali hőmérsékletek alapulvételével) a 13-9. ábrán látható termovillamos elemet, amelynek működési jelleggörbéit a 13-11. ábra mutatja.

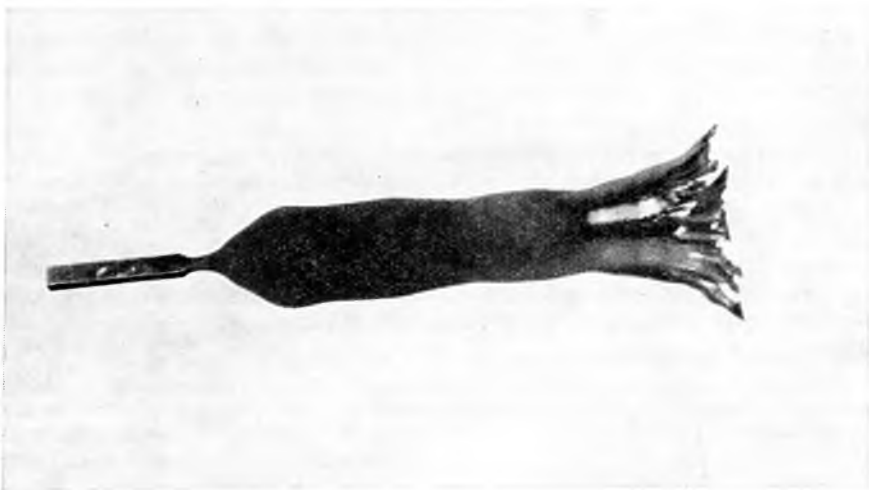
A híd anyaga molibdén-szilicid és szilícium eutektikus ötvözet. Használatát a szilíciumhoz hasonló jó kémiai ellenállóképesség és magas szennyezettségnek



13-9. ábra. VKI-ban készült GeSi termovillamos generátorelemek

megfelelő ($1000 \dots 5000 \text{ 1}/\Omega\text{cm}$) vezetőképesség mellett az indokolja, hogy mechanikai tulajdonságai a szilíciuménál kedvezőbbek. A 13-10. ábra Chochralski-módszerrel készült MoSi hídanyag öntecset mutat be.

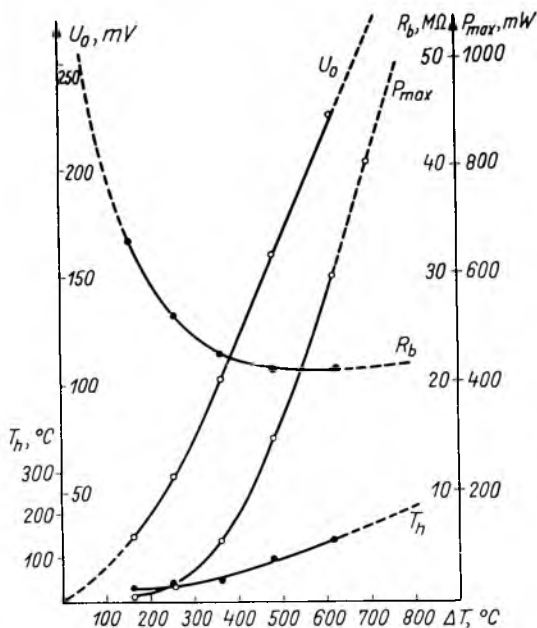
A molibdén-szilícid híd, valamint az n és p típusú GeSi oszlopok között megfelelően szennyezett germánium lemezek felhasználásával alakítjuk ki a kapcsolatot ötvözéssel. Hasonlóképpen járunk el a hidegoldalán, a GeSi oszlopok és a wolfram saruk közötti kötések létrehozásakor. Az így kialakított négy kötés összes ellenállása



13-10. ábra. VKI-ban Chochralski-technikával készített MoSi hídanyag-öntecs

2...6 m Ω . A GeSi oszlopok termovillamos tulajdonságait (szobahőmérsékletre vonatkozó adatok) az alábbiakban rögzítjük:

	n típus	p típus
Fajlagos ellenállás, Ωcm	$3 \dots 5 \cdot 10^{-3}$	$1 \dots 2 \cdot 10^{-3}$
Seebeck-együttható, $\mu\text{V}/^\circ\text{K}$	200...230	120...140
Jósági szám, $1/^\circ\text{K}$	$0,2 \cdot 10^{-3}$	$0,25 \cdot 10^{-3}$



13-11. ábra. VKI típusú GeSi termovillamos elem villamos jellemzőinek hőmérsékletfüggése

A 13-11. ábrából kitűnik, hogy a tervezett 700 °C hőmérséklet-különbség esetén egy-egy termovillamos elem kb. 260 mV-os Seebeck-feszültséget szolgáltat, belső ellenállása 20...23 m Ω közötti értékre adódik. Ezen adatoknak megfelelően, a kivethető teljesítmény elemenként 0,8 W.

7. A termovillamos generátor jellemzői

A Villamosipari Kutató Intézet 1969-től foglalkozik — vállalati kutatási megbízás alapján — a VKO 250/30 típusjelzésű propán-bután gáztüzelésű generátor kifejlesztésével. A generátor a következő adatokkal jellemezhető:

- maximális villamos teljesítmény: 250 W
- kapocsfeszültség, névleges teljesítménykivétel esetén: 30 V.

A berendezésnek biztosítania kell a $-40 \dots +50$ °C környezeti hőmérséklet-tartományon belül az üzembiztos működést a szabadterre telepített berendezésekkel szemben támasztott egyéb követelmények mellett. A berendezés maximális fűtőanyag-fogyasztása (0,6 p/cm³ fajsúlyú folyékony propán-bután gázból) 3 l/h.

A teljes termovillamos generátor rész 360 db, a 13-9. ábrán látható elemből épül fel. A termovillamos elemek $950 \pm 50^\circ\text{C}$ melegoldali és maximum 250°C hidegoldali hőmérséklet-tartományban működnek az optimális terhelési viszonyokhoz közel-eső munkapontban. A berendezés hatásfoka, azaz a bevezetett fűtőanyagból fel-szabadítható energia és a kivett villamos teljesítmény viszonya 1,3%.

A szakirodalomban, illetőleg külföldi cégek prospektusaiban ismertetett gáz-tüzelésű generátorok [8] (3M Co és Thomson CSF katalógusok) hasonló működési feltételek mellett 2...2,8% hatásfokot biztosítanak.

A hazai fejlesztésű berendezés és a külföldi berendezések hatásfoka közötti különbség elsősorban konstrukciós kérdésekre vezethető vissza, melyek közül a tüzelőberendezés konstrukciójának kérdése emelkedik ki, mivel a berendezés működése kb. 10 W/cm^2 hőbetáplálást kíván meg a 950°C -os melegoldalon. Ez a tény egyúttal kijelöli a további fejlesztés irányát is az intenzív technológiai és anyagkutatás mellett.

Végezetül, a termovillamos generátorok perspektív felhasználásával kapcsolatban idézzük *dr. Lukács József* 1957-ben adott prognózisát [9]. „Érdekes szerepet játszhat-nak a hővillamos energiaátalakítók kisebb családi házak és lakóépületek energia-rendszerében is. Érdekes megvizsgálni egy ilyen családi ház, esetleg szabad lakóépület fűtés-, melegvíz-, ill. villamosenergia-igényének arányát. Azt találjuk, hogy hazánk-ban ez általában a téli hónapokban 20:1 és 10:1 arány között mozog. Ebből viszont az következik, hogy — ha sikerül 5%, ill. 10% hatásfokú hővillamos generátort szerkeszteni, úgy — a fűtés során mintegy mellékesen, villamos energiát is nyer-hetünk, amelyet megfelelő tárolással és átalakítással a nap bármely szakában fel-használhatóvá tehetünk.”

A fenti prognózis realizálása ma már kétségtelen. *S. W. Angrist* professzor (Carnegie-Mellon Institute of Technology) a Budapesten 1971. szeptemberében megtartott előadásorozata keretében reális USA-beli tervként említette, hogy nagy-városoktól távoli és villamosenergia-ellátástól távol eső kisvároscentrumok kiépítése során komolyan gondolnak az energiaellátás kizárólag olajjal, ill. gázzal való meg-oldására. Ebből kiindulva — gazdaságossági okok miatt — termovillamos generá-torok, ill. tüzelőanyagcellák közbeiktatásával helyi villamosenergia-fejlesztést kíván-nak megvalósítani.

Irodalom

- [1] *Angrist, S. W.*: Direct Energy Conversion. Mc Graw Hill. Second Edition, 1971.
- [2] *Fényes I.*: Termosztatika és termodinamika Budapest, Műszaki Könyvkiadó. 1962.
- [3] *Raag, V.*: The performance characteristics of Silicon-Germanium Alloys in Thermoelectric Applications. (Resalab Scientific, Menlo Park, California.)
- [4] *Ure, Jr. R. W.*—*Heikes, R. R.*: „Theory of Thermoelectric Materials” in Thermoelectricity. Science and Engineering eds. Heikes, R. R. — Ure Jr. R. W. New York, Interscience Publishers, Inc. (1961) Chapter 15. p. 342.
- [5] *Rosí, F. D.*: Thermoelectricity and Thermoelectric Power Generation. Solid-State Electronics **11**, (1968) p. 833—868.
- [6] *Rocklin, S. R.*: Development of a High-Efficiency Cascaded Thermoelectric Module. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems **5**, (1969) p. 595—605.
- [7] *Dietz, W. H.*—*Herrmann, H. A.*: The methods of making GeSi alloys, their properties and their use in thermoelectric generators. Uncorrected Preprint of the paper presented at the Sixth International Power Source Symposium held at Brighton, Sussex **23—25** September (1968) p. 449.
- [8] *Dr. Euler, K. J.*: Auszeig vom Energia-Direktum-wandlung. Verlag K. Thiemig, KG-München p. 63—100.
- [9] *Dr. Lukács J.*: Hővillamos generátorok félvezető anyagokból. Elektrotechnika, 50/4 (1957).

14.

A plazma- és ionimplantációs technika felhasználási perspektívái speciális erősáramú félvezetőeszközök számára

PÁLFY MIKLÓS—BÖHÖNYEY FERENC—
OROSZ GYŐZŐ—PALOTAI GÉZA

ÖSSZEFOGLALÁS

A szerzők ismertetik a plazmatechnika és ionimplantáció fizikai és technológiai alapjait. A félvezetők technológiájában való felhasználhatóságuk szempontjából vizsgálják ezen eljárások alkalmazási területeit. Az eljárások adta lehetőségek figyelembevételével mérlegelik az említett technikák szerepét a jelenlegi félvezető technológiák között és megkísérlik behatárolni az egyes perspektív felhasználási területeket.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ И ИОНИМПЛАНТАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ СОЗДАНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

M. Pálfi—Ф. Бехеней—Д. Орос—Г. Палотай

Резюме

Статья описывает физические и технологические основы плазменной техники и ионимплантации. Рассматривает области применения этих процессов с точки зрения возможности применения в области технологии полупроводников. С учетом возможностей, обеспеченных отдельными методами анализирует роль перечисленных технологий среди имеющихся в настоящее время технологических методов и делает попытку на определение отдельных перспективных областей применения

ANWENDUNGSAUSSICHTEN DER PLASMA- UND IONIMPLANTATIONSTECHNIK FÜR SPEZIALE HALBLEITERBAUELEMENTE

M. Pálfi—F. Böhönyey—Gy. Orosz—G. Palotai

Zusammenfassung

Der Aufsatz legt die physischen und technologischen Gründe der Plasmatechnik und Ionimplantation dar. Die Anwendungsmöglichkeiten in der Halbleitertechnologie berücksichtigend, prüft er die Anwendungsgebiete dieser Verfahren.

Unter Berücksichtigung dieser durch dieses Verfahren gebotenen Möglichkeiten behandelt er die Rolle der erwähnten Techniken unter den gegenwärtigen Halbleitertechnologien und versucht die einzelnen perspektiven Anwendungsgebiete zu begrenzen.

PROSPECTS OF THE APPLICATION OF PLASMA AND ION IMPLANTATION TECHNIQUES FOR SPECIAL SEMICONDUCTOR DEVICES

M. Pálfi—F. Böhönyey—Gy. Orosz—G. Palotai

Summary

Physical and technological fundamentals of plasma techniques and ion implantation are described. Fields of application of these processes are investigated with special regard to their possible uses in semiconductor technology. Considering the possibilities offered by these methods, the role of the latter among present semiconductor techniques is examined, and attempt is made to determine the limits for the various fields of their prospective application.

1. Bevezetés

A félvezető eszközök gyártásában az 1950-es évek elején megindult és jelenleg is tartó nagyarányú fejlődés alapvető irányai, mint a határfrekvencia növelése, méretcsökkentés és a megbízhatóság növelése, nap mint nap új technológiai eljárások fejlesztését igénylik. Egy-egy új technológiai eljárás bevezetése általában a kezdeti időszakban többnyire egy új eszközhöz vagy eszközcsaládhoz kapcsolódik, majd az alkalmazási kör egyre nagyobb mértékben kiterjed, végül a gyakorlati tapasztalatok és a gazdaságossági szempontok alapján, elfoglalja helyét a technológusok repertoárjában. Az új eszközök által megkívánt követelmények és az újabb technológiák által nyújtott lehetőségek újra és újra felvetik a régebbi eljárások újraértékelésének és továbbfejlesztésének a lehetőségét. (A legjellemzőbb példa erre, hogy napjainkban is számos ötvözesi problémákkal foglalkozó publikáció jelenik meg.) Egy adott időszakban lényeges szempont az új eljárások valóban megfelelő helyét és lehetőségeit megkeresni, a már bevált és az iparban alkalmazott eljárások között és — ha erre mód van — azokon túl is.

Mi ebben a tanulmányban két, viszonylag új technológiai eljárást, a *plazmaszórást* és az *ionimplantációt* értékeljük, az erősáramú félvezetők technológiájában betöltött és betölthető szerepük szerint. Egy eszköz tervezése — mint azt már annyiszor hangoztatták — a rendelkezésre álló lehetőségek közül az optimális eljárások megkeresését jelenti. Ezzel a munkánkkal ilyen optimumkereséshez szeretnénk — tőlünk telhetően — hozzájárulni. Analizáljuk az eljárások adta lehetőségeket, majd ezeket szintetizálva, megkíséreljük a felhasználási terület behatárolását.

1. Plazmatechnika

A plazmaszórás — mint vékonyréteg-ülepítő technológia — a mikroelektronika kifejlődésével együtt jelentkezett; fém, szigetelő, ellenállás, félvezető, szupravezető rétegek készítésére egyaránt alkalmas. A korábbi vékonyréteg-előállító eljárásokkal (vákuumpárolgatás, kémiai ülepítés stb.) szembeni fő előnye sokoldalú felhasználási lehetőségében rejlik.

A negyedik halmazállapotként tekintett plazmaállapotban az anyag ionizált gáz, amely az áramot jól vezeti. A gázplazma legalább három komponensből áll: elektronokból, gázionokból és semleges molekulákból vagy atomokból. A jellemzésül használt *ionizációs fok*, amely a töltött és semleges részecskék arányát jellemzi, szoros összefüggésben van a plazma vezetőképességével.

A plazmaállapot kialakítására több lehetőség van. Míg a szilárd—cseppfolyós, cseppfolyós—gáz átalakulás részecskénként mintegy 10^{-2} eV energiabefektetést igényel, addig a gáz—plazma átalakuláshoz minden részecske számára 1...30 eV szükséges. Ezt az energiát termikus úton, nagy térerősséggel, ionizációs sugárzásokkal, nagyfrekvenciás elektromágneses tér alkalmazásával, lökeshullámok segítségével lehet a részecskékkel közölni. Végeredményben, a plazma létrehozása kisülési folyamat megindítását és annak fenntartását követeli meg.

A plazmaszórás mechanizmusa a következő: a bevonandó hordozót (substrate) a működő plazma terébe kell helyezni. A bevonó, ill. szórando anyag (target) általában a rendszer katódját képezi. A plazmában generált gázionok a katód irányába felgyorsulnak, majd becsapódnak a katódba és atomokat távolítanak el annak felületéről. Ezek az atomok egy vékony réteg formájában lerakódnak a hordozón. Mivel a katódból eltávozó atomok számára az eltávozási energiát a becsapódó ionok szolgáltatják, a szórási eljárás hozama függ a katód (target) kristályszerkezetének szilárdságától, a becsapódó ionok tömegétől, sebességétől és a becsapódás szögétől.

A gyakorlatban többféle szórási eljárás alakult ki. A legegyszerűbb az ún. *diódás szórás*, amelynek során a vákuumkamra terében egy korong alakú anód és egy katód helyezkedik el egymással szemben. A szórando anyagot a katódhoz erősítik, a hordozókat pedig az anódra helyezik. Az anód—katód feszültség 1...5 kV tartományban van. A működési nyomás 10^{-1} ... 10^{-2} torr, ami viszonylag nagy és káros a rétegek minőségére. A tapadóképeség viszont igen jónak bizonyult, ugyanis a szórt atomok nagy gyorsulással szabadulnak ki a katódból és csak kis energiát veszítve, nagy sebességgel csapódnak az anódon levő hordozóba. A diódás szórás ebben az egyszerű formájában csak fémek szórására alkalmas.

Az ún. *triódás rendszer* három önállóan szabályozható elektródát használ. Egy elektronforrást, egy anódot, amelyre a hordozót helyezik és egy katódot. A plazma gerjesztéséhez szükséges nyomás 10^{-3} ... 10^{-4} torr, kisebb mint a diódás rendszer esetén. A plazma a targettől függetlenül tartható fenn, illetve szabályozható az elektronforrás segítségével. Az elektronforrás nagyobb ionizációs valószínűséget biztosít, mint ami a diódás rendszerrel elérhető. Az ionizáció további növelésére gyakran külső mágneses teret alkalmaznak. A *rádiófrekvenciás* (RF) plazmaszórási eljárás kiküszöböli az elektronforrás és a mágneses tér szükségességét, de megtartja a kis nyomású szórási technika előnyeit. A termoelektronforrás helyett egy RF mező gerjeszti az ionos plazmát, és kis nyomáson is nagyfokú ionizációt okoz. Az RF eljárást szigetelő targetek szórására fejlesztették ki, ugyanis az előző két eljárásnál — ahol a targetek egyenpotenciálón vannak — ha a target anyag szigetelő, a felületén egy pozitív töltés alakul ki, melynek taszító hatása megakadályozza a további szórást. Az RF jel azonban a pozitív félperiódusban eltávolítja a felgyülemlt töltésréteget és lehetővé válik a folyamatos működés. Az RF szórásnál alkalmazott frekvenciatartomány 10 MHz tartományba esik.

1.1 A plazmaszórási technika fő alkalmazási területei

Ülepítés. A plazmaszórással ülepített rétegek általában előnyösebb tulajdonságokat mutatnak, mint egyéb, pl. vákuumpárolgató eljárással készült rétegek. Az előnyök az ülepített rétegek egyenletességében és jobb tapadóképeségében nyilvánulnak meg.

Előfeszítéses szórás. Előfeszítéses szórás esetén a hordozó a targeténál lényegesen kisebb, negatív potenciálón van. A pozitív ionok kismértékben a hordozót is bombázzák, és így az ülepítési folyamat közben, rendkívül hatásos tisztítási művelet jön létre.

Reaktív szórás. A félvezető eszközök felületének passziválására ez az egyik legalkalmasabb eljárás. A folyamat olyan atmoszférában megy végbe, amely a munkagázon (argon) kívül, megfelelő reaktív gázt (oxigén, nitrogén stb.) is tartalmaz. A gázionok reakcióba lépnek a targetból kirepült atomokkal és vegyületek formájában rakódnak le a hordozóra. Ennek az eljárásnak rendkívül nagy előnye, hogy egy targettal különböző rétegeket lehet szórni. (Pl. szilícium, szilíciumoxid, szilíciumnitrid.)

Többtargetes szórás. Számos, többkomponensből álló ötvözet vagy vegyület target formában (vékony korong) való elkészítése, rendkívül nehéz vagy sok esetben lehetetlen. Több target egyidejű szórásával ez a probléma megoldható. Ilyen esetben a homogén réteg készítése céljából, a substrate-tartót forgatni kell. Egy másik ilyen lényeges felhasználási terület, amikor több targettel időben egymás után végzünk szórást. Ilyen módon réteges (szendvics) szerkezet állítható elő, amely a félvezető eszközök számára, a legjobb minőségű kontaktusokat eredményezi.

Szórómarás. A plazmaszórásnak az ülepítéssel ellentétes alkalmazása a szórómarás. Azonos berendezés használható erre a célra is, de itt a mintákat a katódra kell helyezni. A bombázó ionok a minták felületéről anyagot távolítanak el, ezért rendkívül hatásos tisztítás jön létre, azonkívül egyenletes szemcsés szerkezetű felületet eredményez, ami kiválóan alkalmas kontaktusok készítésére. A szórómarást gyakran alkalmazzák a félvezető technológiában, a hagyományos kémiai maratások helyett, vékonyrétegek maratására. Nagy előnye, hogy maszkolt mintáknál teljesen kiküszöböli az alámarást.

A plazmaszórás technológiai előnyeiről szólva meg kell még említeni, hogy a minták hőmérséklete általában szabályozható (a mintaasztal fűthető, hűthető) és így az eljáráshoz legkedvezőbb hőmérséklet állítható be. Az előbbieken felsorolt alkalmazási lehetőségeket általában ugyanaz a berendezés biztosítja, egy üzemmód-kapcsolóval a kívánt folyamat beállítható. Így lehetőség nyílik több technológiai folyamat egy helyen történő elvégzésére.

2. Ionimplantáció

Egy anyag felületközeli sajátságainak módosítása egy másik anyag ionjainak nagysebességű belövésével régóta ismert eljárás, de csak az utóbbi években, a félvezető technológiában való alkalmazásával váltott ki óriási gyakorlati érdeklődést. Alkalmazásával a mikroelektronikai eszközök méretei csaknem egy nagyságrenddel csökkenthetők és számos, eddig komoly problémát jelentő technológiai folyamat megoldását jelentheti.

Az eljárás lépései a következők: az ionforrás-egységben gázplazma segítségével, az adalékatomokból ionokat képeznek, ezeket ionsugár alakjában felgyorsítják kb. 10 keV szintre, majd egy mágneses szeparátorba vezetik, a szeparátort elhagyva teljesen tiszta ionnyalábot nyernek, melyet továbbgyorsítanak és fókuszálják, majd kb. 100 keV nagyságrendű energiával, a céltárgy (target) felületébe ütköztetik. A belőtt ionok a target felületétől bizonyos mélységben megállnak és ezzel kialakítható a kívánt szennyezési koncentráció.

A targetba becsapódó részecske lelassul és kb. 10^{-4} s-on belül nyugalomba kerül. A becsapódáskor létrejövő ütközések lehetnek atomos ütközések, ahol az átvitt energia teljes mértékben átadódik a targetatomoknak, és beszélünk elektronos ütközésről, amelynek során a mozgó részecske elektronokat lök ki (gerjeszt) az atomból. Az atomos ütközésre (megállásra) a kisebb E energia és a becsapódó részecske nagyobb Z_1 atomszáma jellemző, míg az elektronos megállás a nagyobb

energiák esetén és a kisebb Z_1 számoknál dominál. Egykristályok esetén, alacsony indexű orientációban a „csatornázott” ionok nagyságrenddel mélyebbre haladhatnak, mint az azonos energiával kevésbé átlátszó kristálytani irányokba belőtt ionok. Amorf targetben az ütközés alatti úthossz és az ütközés alatt átvitt energia találmokra változik, ezért az egyedi ionok statisztikus eloszlásban helyezkednek el, a felülettől számított mélységben. Csatorna (channel) hiányában ez a behatolási eloszlás durván Gauss-típusú és egy közepes behatolási maximummal (R_p) és ezen maximum körüli eltéréssel jellemezhető. Ezen Gauss-görbével leírt koncentrációeloszlás felülettől mért távolsága és a szélessége az implantáló energiával nő. Channel jelenlétében az R_p -vel jellemzett amorf csúcs mellett kb. hússzor mélyebben egy újabb, éles levágású maximum jelentkezhet. (Channelling-csúcs.) Amíg a lövedékanyag jelentősen nehezebb, mint a targetatomok ($M_1 > M_2$), az implantált atomok koncentrációja a felületi mezőben kicsi. Könnyű implantált anyag és nehéz targetatomok esetén ($M_1 < M_2$) a felületi mezőben a koncentráció észrevehető.

Az ionbeépülés egyesített és ma elfogadott elméletét *Lindhard, Scharff* és *Schiott* szolgáltatják (röviden: LSS-elmélet). A Thomas—Fermi-statisztika felhasználásával az LSS-elmélet alapján, egy univerzális összefüggést származtattak, amely dimenzió nélküli távolság- és energiaparaméterekkel jellemzi az ionok behatolását. A konkrét számításokhoz táblázatok készültek, amelyek segítségével adott doppeló- és targetanyagokra nézve, adott energiájú implantálás esetén a szennyezéseloszlási profil fő jellemzői meghatározhatók.

Az ionimplantációval létrehozott félvezető rétegeknek számos előnyük van a hagyományos technológiákkal előállítható átmenetekkel szemben. A következőkben ezeket vizsgáljuk.

Igen keskeny és éles határú rétegek állíthatók elő. Míg diffúzióval nagyságrendileg 1μ az elérhető minimális pn átmenet mélység, addig ionimplantáció esetén ez az érték $0,1 \mu$ nagyságrendbe esik.

A szennyezések mélységbeli eloszlása és az eloszlás profilja, az ionsugár-nyaláb energiaprogramozásával jól kézben tartható. Az energiaprogramot úgy kell meghatározni, hogy az egyes energiaszinteken végzett implantálások Gauss-görbéinek eredője adja a kívánt szennyezési profilt.

Igen nagy tisztaságú szennyezés valósítható meg, mivel az ionsugár létrehozására használt mágneses szeparátor gyakorlatilag spektrumtisztaságot biztosít.

Az implantálás széles hőmérséklettartományban végezhető. Viszonylag kis hőmérsékleten mód van két- és többkomponensű félvezetők esetén olyan doppelási folyamatokra, amelyeknél az egyes komponensek göznyomásai eltérők (pl. GaAs, InSb stb.).

Implantáció segítségével meg lehet valósítani olyan nagy sáv szélességű anyagok doppelását is, ami a viszonylag magas aktiváló energia miatt, túl magas diffúziós hőmérsékletet igényelne (pl. SiC).

A kristályba olyan szennyezők kényszeríthetők be, amelyek a normál gyakorlatban azokban kémiaileg nem oldódnak. Ezzel a befogó anyagban egy szennyezővel túltelített oldat hozható létre, amely érdekes villamos tulajdonságokkal rendelkezik (pl. gyémánt szennyezése).

Fókuszált ionnyaláb alkalmazásával a nyalábnak kívánt módon, számítógépes vezérlésével (scanningelés) eszkörsorozatokat lehet létrehozni. Ez a lehetőség a mikroáramkörök tömeggyártása terén rendkívül előnyös.

Az ionimplantációs technika számos előnye mellett hátránya pl., hogy nem minden kristályba ültetett atom válik ott elektromosan is aktívvá, hanem rácskárosodások keletkezhetnek, rekombinációs centrumok maradhatnak vissza. A károsodások csök-

14-1. táblázat

Ionimplantációs technológia	Plazmaszórási technológia
hálózati egyenirányítók, nagyfrekvenciás diódák	
<p>Kis R_t, gyors működés, kis U_{ny} (sekély átmenet), Avalanche-karakterisztika, kedvező dinamikus tulajdonságok (egyenletes átmenet)</p> <p>Nagy működési hőmérséklettartomány (pl. SiC)</p>	<p>stabil zárókarakterisztika (egyenletes felületvédelem)</p> <p>kedvező dinamikus tulajdonságok (szendvics-kontaktus)</p>
Változtatható kapacitású diódák	
<p>Széles tartományban tetszőleges $C=f(U)$ karakterisztika (tetszőleges szennyezési profil)</p>	<p>időben stabil karakterisztika (egyenletes felületvédelem)</p>
Hálózati és nagyfrekvenciás, több pn átmenettel rendelkező eszközök (tranzisztor, tirisztor, diac, triac, fototirisztor stb.)	
<p>Avalanche-karakterisztika (egyenletes síkátmenet)</p> <p>Igen kedvező dinamikus tulajdonságok, nagy dI/dt és dU/dt, igen jól kézben tartott erősítési és vezérlési paraméterek, nagy határfrekvencia, nagy fotoérzékenység (sekély átmenet, egyenletes profil)</p>	<p>időben stabil karakterisztika (egyenletes felületvédelem)</p> <p>kedvező dinamikus tulajdonságok (szendvics-kontaktus)</p>
Integrált eszközök (teljes hullámú egyenirányítók, vezérlőgenerátorral egybeépített tirisztor, triac stb.)	
<p>Kis méretek, gyors működés (tailored profil és rétegek, beírt pn átmenetek)</p>	<p>időben stabil karakterisztika (egyenletes felületvédelem, kedvező maszkolási lehetőségek)</p>
Fotoelektromos eszközök (napelemek, fényemittáló diódák, lézervediódák, display-rendszerek)	
<p>Nagy megbízhatóság, jó kvantumhatásfok (sekély, nagy pontosságú átmenet és kontaktus, beírt kontaktus)</p>	<p>időben stabil karakterisztika, kis reflexióstényező, jó hatásfok (egyenletes, vékony felületvédelem)</p>

R_t termikus ellenállás;
 U_F nyitóirányú feszültségesés;
 $C=f(U)$ a kapacitás feszültségfüggése;
 dI/dt kritikus árammeredekség;
 dU/dt kritikus feszültségmeredekség.

kentésére csak néhány száz keV-es energiákat használnak és a szokásos felületet érő dózisszint sem haladja meg a 10^{16} ion/cm² értéket. Mindazonáltal azt tapasztaljuk, hogy előnyös tulajdonságai folytán egyre nagyobb érdeklődést vált ki, és az 1971. év az ionimplantáció ipari tömeggyártásba való bevezetésének éve a világ vezető cégeinél.

3. Alkalmazási területek

Az eddigiekben áttekintettük a plazma és az ionimplantációs technika alapvető fizikai és technológiai folyamatait. Általánosságban megállapíthatjuk, hogy e technikák kifejlődését elsősorban a mikrominiaturizálás predesztinálta, de a kialakult eljárások számos olyan lehetőséget teremtenek, amelyek a félvezetőtechnika egyéb területein, valamint más ipari folyamatokban rendkívül előnyösen hasznosíthatók.

Összegezve: mindkét eljárásra jellemző az, hogy vékony, igen jól reprodukálható rétegek nagy pontosságú és tisztaságú előállítására alkalmasak. Az eljárások rendkívül rugalmasak és alkalmasak több technológiai folyamat egyfázisban történő elvégzésére, mint pl. szórómarás, többtargetes szórás, reaktív szórás stb. a plazmatechnikánál, ill. különböző energiákkal, különböző típusú félvezető rétegek kialakítása ionimplantáció esetén. További előny a pontossági és tisztasági követelmény messzemenő kielégítésén túl, a gyártási idő nagymértékű csökkenésében is jelentkezhet.

A következőkben a teljesség igénye nélkül összefoglaljuk — pn átmenetektől felépített eszközöknél — azokat a speciális előnyöket, amelyek elsősorban indokolják ezen technológiai eljárások alkalmazását.

Az összefoglalás az erősáramú, ill. nagyfelületű eszközöket tartja elsődlegesen szem előtt. A felsorolásból látható, hogy lényegében véve nem különböztetünk meg hálózati és nagyfrekvenciás eszközöket, mert ilyen eljárások alkalmazásával a frekvenciatartomány lényegesen kitolódik a kedvező dinamikus tulajdonságok biztosításával együtt. Jól elkülönül a két technológiai eljárás alkalmazási területe. Ionimplantáció esetében a pn átmenet létrehozása dominál, plazmaszórásnál a felületvédelem és a kontaktírozás kerül előtérbe. Végül a felsorolással kapcsolatban megjegyezzük, hogy e technológiák alkalmazásától lehet várni az igazán jó, nagy megbízhatóságú, reprodukálhatóan jó hatásfokú napelemek előállítását is.

Befejezésül meg kell még említeni az egyéb félvezető eszközöket is, mint a termoelektromos átalakítók, mágneses memóriaegységek, szupra- és hibrid vezetőrétegek, szerves félvezető átmenetek, tenzometrikus eszközök stb., amelyeknek előállításában szintén nagy perspektívái lehetnek az említett technológiai eljárásoknak.

Irodalom

- [1] Mayer—Ericsson—Davies: Ion Implantation in Semiconductors.
- [2] Európai Ionimplantációs Konferencia Reading, 1970. szept. 7—9.
- [3] Ionimplantáció félvezetőkben. Konferencia, Garmisch-Partenkirchen 1971.
- [4] 3. Nemzetközi Vákuumtechnikai Konferencia. Stuttgart 1965.
- [5] Electro-Chemical Society. Cleveland Meeting 1966.
- [6] MRC Conference and School on Sputtering. Peeble Black, California 1969.
- [7] Ruge, I.—Müller, H.: Die Ionenimplantation als Dotierungstechnologie. München, NTZ. 10 (1968).
- [8] Large, L. N.: Ion Implantation: A New Method of Doping Semiconductors, I.—II. Contemp. Phys. Vol. 10. 5 (1969).
- [9] Jackson, G. N.: Thin Solid Films. 1970. p. 209—246.
- [10] Brodie, I.: J. of V. Sc. and Techn. Vol. 6. 1.
- [11] Cormia, R. L.: Solid State Technology. 1969. dec. p. 58.
- [12] Davide, P. D.: J. Electrochem. Soc. 1969. jan. p. 100—103.

15.

Nagy átmérőjű szilícium előállítására irányuló technológiai kutatások.

I. Mikrokristályok

*HORVÁTH PÁL—JEDLOVSZKY PÁLNÉ—
GADÁNYI PÉTER*

ÖSSZEFOGLALÁS

A Szerzők vizsgálják az egyensúlyi desztilláció matematikai modellezése útján kapott legfontosabb eredményeket, amelyeket figyelembe véve megvalósítható egy adott berendezéskonstrúció és félvezető célra alkalmas minőségű szilícium alapanyag állítható elő, tekintetbe véve azon mennyiségi irányadatokat, amelyeket egy nagy hozamú reaktor szükségletei jelentenek. Rámutatnak olyan problémákra, amelyek reakciókinetikai megfontolások alapján egyrészt az optimális szilíciumkitermelés elérése, másrészt az alkalmas reaktorkonstrúció szempontjából döntöek. A reakció üzemi hőmérsékletét biztosító áramforrás teljesítményigényére jól használható becslést adnak.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОВОДИМЫЕ С ЦЕЛЮ СОЗДАНИЯ КРЕМНИЯ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА.

I. МИКРОКРИСТАЛЛЫ

П. Хорват—П. Йедловски—П. Гадани

Резюме

Авторы рассматривают важнейшие результаты, полученные на базе математического моделирования равновесной дестилляции, с учетом которых данная конструкция устройств может быть реализована и может быть изготовлен кремний такого качества, которое пригодно для изготовления полупроводниковых приборов. При этом принимались во внимание количественные ориентировочные данные, которые связаны с потребностью высокопроизводительного реактора. Авторы также указывают на проблемы, которые являются решающими с точки зрения реакционно-кинетических принципов для достижения оптимального выработки кремния и выбора подходящей конструкции реактора. Дается хорошо используемая ориентировочная оценка на мощность источника питания, обеспечивающего рабочую температуру реакции.

TECHNOLOGISCHE FORSCHUNGEN ZUR HERSTELLUNG VON SILIZIUM MIT GROSSDURCHMESSER

I. MIKROKRISTALLE

P. Horváth—Frau P. Jedlovszky—P. Gadányi

Zusammenfassung

Die Verfasser prüfen die auf Grund des mathematischen Modellbaus der Gleichgewicht-Destillation erhaltenen wichtigsten Ergebnisse, unter denen Berücksichtigung die gegebene Einrichtungskonstruktion ausgeführt und Silizium-Grundstoff in zum Halbleiterzweck geeigneter Qualität hergestellt werden kann, die Quantitäts-Rich-

tungsdaten berücksichtigend, die sich im Bedarf eines Reaktors grosser Produktivität melden. Sie weisen auf die Probleme hin, die auf Grund der reaktionskinetischen Überlegungen von ausschlaggebender Bedeutung sind, teils zur Erzielung der optimalen Siliziumproduktion, teils zur geeigneten Reaktorkonstruktion. Sie geben eine gut anwendbare Schätzung zum Leistungsanspruch der die Betriebstemperatur der Reaktion sichernden Stromquelle an.

TECHNOLOGICAL RESEARCH OF LARGE-DIAMETER SILICON PRODUCTION

I. MICROCRYSTALS

P. Horváth—Mrs. P. Jedlovsky—P. Gadányi

Summary

The authors examine the most important results obtained by mathematical modelling of equilibrium distillation, by the aid of which a reactor can be constructed to a given specification and suitable starting material for high power rectifiers, nuclear radiation detectors etc. can be produced meeting the requirements of a high-yield reactor. Problems of decisive importance with respect to reactor-kinetics, partly of obtaining optimum silicon recovery and partly of suitable reactor design are considered. Good approximate figures for the selection of ratings to ensure suitable working temperatures for the action are given.

1. Bevezetés

Az egykristály-előállítás alapanyagául szolgáló, mikrokristály állapotú szilícium előállításakor — függetlenül ennek dimenzionális feltételeket kielégítő technológiai követelményeitől — kizárólagosan fontos szempont az idegen szennyezőanyagok rendkívül alacsony szinten tartása. Az egykristály minőségi követelményei leggyakrabban n vezetési típust eredményező, ún. donor típusú foszfor — ritkábban arzén, antimon doppeló anyag 100...0,1 ppb nagyságrendnyi jelenlétét (a szokásosabb mértékegysége: $6 \cdot 10^{15}$... $5 \cdot 10^{12}/\text{cm}^3$) igényli, ugyanakkor egyéb szennyezők ennél lényegesen alacsonyabb szintje indokolt, ha ez megvalósítható. Az anyag és belőle készített eszközök dinamikus tulajdonságaira a nehézfém szennyezők — a kisebbségi töltéshordozók élettartamát meghatározó tulajdonságuk révén — veszélyesek, de viszonylag könnyen és jó hatásokkal eltávolíthatók, ugyanakkor pl. oxigénre 200 ppb-nél kisebb értéket technológiailag szinte lehetetlen biztosítani. A p vezetési típust okozó, ún. akceptor típusú, elektromosan aktív szennyezőanyag-nak, mint pl. bór, alumínium, gallium stb. 0,15 ppb-nél alacsonyabb szinten kell lennie ($6 \cdot 10^{12}/\text{cm}^3$). Ezek közül a bórnak különleges jelentőséget ad az a tulajdonsága, hogy a fémes állapotú szilícium szokásos tisztítási módjaival nem, ill. rendkívül kis mértékben és rendkívül költségesen tisztítható. Ez egyben azt is jelenti, hogy a kémiai tisztítási műveletekkel előállított mikrokristály bórtartalma határozza meg a belőle készíthető egykristály bórtartalmát, amelyet a bórtartalomnak megfelelő töltéshordozószám által — egyéb szennyező hiányában ($\sim 0\%$ kompenzáció) — létrejövő fajlagos ellenállással, mint az anyag bórszintjével mérjük.

A félvezető minőségű szilícium előállítási céljaira ma már szinte kizárólagosan a szilícium halogénvegyületeit használják. Ezek közül a technológiailag megvalósítható hőmérsékleti tartományokban — mint azt később majd részletezzük — a triklórszilán felhasználásával biztosítható a legmagasabb szilíciumkitermelési százalék [1]. Az előzőekben említett okok miatt a triklórszilán bórtartalmát legalább

0,1 ppb-s (közel 3000 Ωcm -es bórszint) értékre kell csökkenteni. A választandó tisztítási módszernek az egyéb szennyezőkre vonatkozóan is biztosítania kell a kívánt szintet.

A lehetséges tisztítási módszerek közül az adszorpciós és komplexképzéses módszerek vitathatatlan hátránya, hogy idegen anyagokkal kell kontaktusba hozni a tisztítandó alapanyagot, míg az egyensúlyi desztillációval el lehet kerülni nem kívánt idegen szennyezőanyagok jelenlétét, s alkalmasan választott üzemeltetési feltételekkel folyamatos, ill. kvázifolyamatos üzemmód valósítható meg.

2. A desztilláció vizsgálata

Bórtriklorid—triklór-szilán rendszer elemzéséhez számításokat végeztünk, feltételezve a következőket:

— a triklór-szilán a bórszennyezőt triklorid formájában tartalmazza. Feltételezésünk jogosságát igazolja az a körülmény, hogy a triklór-szilán előállításakor ferroszilíciumot sósavval kezelik, így a szennyező komponensek minden valószínűség szerint kloridok formájában jutnak a reaktort elhagyó gáznemű fázisba,

— a bórtriklorid-triklór-szilán elegy ideális kétkomponensű rendszer,

— az elemzést $n=n(R)$ elméleti tényérral jellemzett rektifikációs oszlopra terjesztjük ki,

— a rektifikációs oszlop különböző tényérrajain keletkező és kondenzálódó gőzök molszáma azonos,

— a bórtriklorid móltörtje olyan alacsony (kisebb mint 10^{-4}), hogy a relatív illékonyága az elegy forráspontján konstans: $\alpha=1,9$, az egyensúlyi görbe helyettesíthető egy, az origót metsző α iránytangensű egyenessel.

Az előzőekben vázolt modell alapján kívánjuk meghatározni azt az $n=n(R)$ elméleti tényérszámot és R refluxarányt, amelynek alapján az elkészített oszlop és technológiai paraméterei lehetővé teszik a kívánt tisztaságú anyag előállítását.

Szakaszos üzemű desztillálást vizsgálva [2], [3], az analitikus számítások eredményeként — a részletek mellőzésével — a következő összefüggéseket kapjuk:

$$n = \frac{\lg [x_D R(\alpha - 1)] - \lg [\alpha x_0 (R[\alpha - 1] + \alpha) \frac{x_D}{x_0}]}{\lg \frac{\alpha(R + 1)}{R}} \quad (1)$$

Az oszlop elválasztó képessége:

$$K = \frac{x_0}{x_D} = \frac{1}{\alpha + R(\alpha - 1)} \left[\frac{R^{n+1}(\alpha - 1)}{(R + 1)^n \alpha^{n+1}} + 1 \right], \quad (2)$$

ahol x_0 az elegyenben a BCl_3 móltörtje D mólnyi desztillátum elvétele után,

x_D a desztillátumban a BCl_3 móltörtje.

Adott $(n; R)$ számpárral jellemzett oszlop, ill. üzemeltetési feltételek mellett a zárt desztilláló rendszerbe kezdetben bevezetett B_0 mólnyi anyagból (B_0 a boilerba bevezetett anyag mennyisége mólban, x_{00} az ezen anyagban mért BCl_3 móltört), D mólnyi desztillátum elvétele után az alábbi mérlegegyenlet írható fel:

$$(B_0 - D)x_0 = B_0 x_{00} - \int_0^D x_D dD, \quad (3)$$

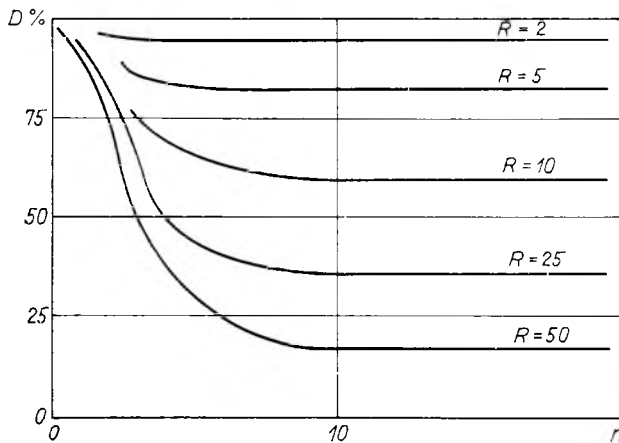
amennyiben nem jelentős az oszlop folyadékfelvétele. A (3) egyenletet megoldva:

$$x_0 = x_{00} \left(1 - \frac{D}{B_0} \right)^{\frac{1}{k} - 1} \quad (4)$$

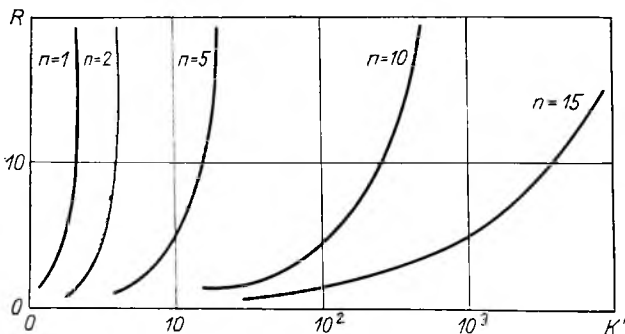
Ezen egyenlet megoldását $x_0/x_{00}=10^{-4}$ -re, azaz négy nagyságrendnyi tisztításra a 15-1. ábrán láthatjuk. Az ábrán bemutatjuk az elméleti tányérszám függvényében, refluxarányal paraméterezve, ezt a mindenkori desztillátummennyiséget, amelyet az előírt négy nagyságrendnyi tisztaság eléréséhez a rendszerből el kell távolítani.

Folyamatos üzemű desztillálást vizsgálva [4] a számításokat az előbbiekhöz hasonlóan végezve, az n -edik tányéron folyamatos betáplálást és a 0-dik tányéron folyamatos hasznos párlatlevételt feltételezve az x_{00} és x_D hányadosára a következő összefüggést kapjuk:

$$K' = \frac{x_{00}}{x_D} = \frac{1}{R(\alpha - 1) - 1} \left[\left(\frac{R\alpha}{R+1} \right)^n R(\alpha - 1) - 1 \right] \quad (5)$$



15-1. ábra. Az n elméleti tányérszám és a négy nagyságrendnyi tisztításhoz eltávolítani szükséges desztillátum mennyiségének összefüggése, R refluxarányal paraméterezve



15-2. ábra. Folyamatos üzemű desztilláló elválasztóképessége a refluxarány függvényében, a tányérszámmal paraméterezve

A (4)-ben szereplő x_0 megegyezik az (5)-ben használt x_D fizikai-kémiai jelentésével, azaz mindkettő a tiszta anyaghozam illékonyabb komponensének (BCl_3) móltörtjét jelenti. Az (5) összefüggést n paraméterei szerint $K' = K'(R)$ függvénykapcsolatként ábrázoljuk a 15-2. ábrán.

Annak eldöntésére, hogy a termelékenységszemponjtából a folyamatos vagy a szakaszos üzemű desztilláció optimálisabb-e, összehasonlító számításokat végeztünk. Egy adott oszlopot szakaszos, ill. folyamatos üzeműben vizsgálva (megszabva, hogy mindkét üzeműben a kapott desztillátum tisztasági foka azonos legyen) eredményeink a következőképpen összegezhetők: a folyamatos üzemű abban az esetben termelékenyebb, ha a 15-3. ábrán látható görbe feletti üzemi paraméterekkel jellemezhető, minden más esetben a szakaszos üzemű a termelékenyebb. A folya-

matos üzemmódú rendszer technikai alkalmazása némi problémát jelent, ha megfontoljuk, hogy az oszlopra folyamatosan szennyezett anyagot vezetünk, tehát külső körülmények (pl. fűtési teljesítményingadozások, környezeti hőmérsékletingadozás stb.) jelentősen eltolhatják az optimális elválasztást biztosító munkapontot [5], [6], [7].

Megvizsgáltuk egy Raschig-töltésű oszlopnak triklórszilán szétválasztásához szükséges ún. egy átviteli egységre eső hosszát [9], amely számot ad arról, hogy adott n elméleti tényér biztosításához mekkora oszlophosszra van szükség. Az egy átviteli egységre eső kolonnahossz — teflon szerkezeti anyag alkalmazása esetén, 70 mm belső átmérőjű oszlopra és $6 \times 6 \times 1$ mm-es Raschig-töltetre — közel 30 cm-nek adódik. Ez azt jelenti, hogy $n=10$ realizálásához közel 3 m összes kolonnahossz szükséges.

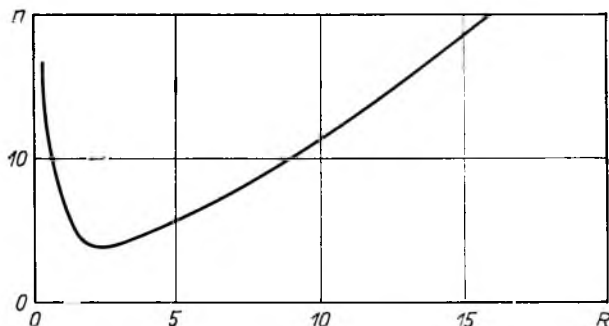
Az előzőekben említett méretű oszlop vizsgálataink szerint közel 0,5 m/s elárasztási gőzsebességű. Ezt a biztonságos üzemmód miatt 60% terheléssel használva a folyadékterhelés közel 16 l/h, amely még $R=20$ esetén is 0,8 l/h páratelvélt eredményezhet. Ez különösen a szakaszos üzemmód esetén jelentős előny, mivel nagy refluxok alkalmazását is lehetővé teszi, ami jelentős elválasztáshoz különösen indokolt.

Ugyanezeket a számításokat hasonló feltételezésekkel $\text{PCl}_3\text{—SiHCl}_3$ rendszerre is elvégeztük. Tekintettel arra, hogy a PCl_3 -nak SiHCl_3 -ban a relatív illékonysága 4,6 [8] (ha a móltörtje kisebb, mint 10^{-4}) és a PCl_3 a SiHCl_3 -nál nehezebben illó komponens vagyis a boylerban dúsul fel. Lényeges eredmény, hogy fémes szilíciumban tetszőleges mennyiségű foszfor-szennyezőt juttathatunk be $\pm 20\%$ -os pontossággal a mikrokristályos szilícium előállításával azonos lépésben, függetlenül a kiindulási elegy tulajdonságaitól. A doppelóanyag ellenőrzött szinten tartását az teszi lehetővé, hogy a PCl_3 szennyezőkomponens esetén az elméleti tényérszám növelésével, üzemmódtól függetlenül, tetszőlegesen növelhető az oszlop elválasztóképesége ($n=10$ és $R=5$ esetén az elválasztás 10^6 nagyságrendű).

Az eddigiekből megállapítható:

— Triklórszilán—bórtriklorid rendszert vizsgálva a 15-1. ábrából nyilvánvaló, hogy adott szétválasztáshoz létezik olyan n tényérszám, amelynél nagyobb választani szakaszos üzemmód esetén nem célszerű, R növelése pedig azt jelenti, hogy kevesebb desztillátumot kell előpárlatként elvezetnünk. A 15-2. ábrából látszik, hogy folyamatos üzem alkalmazásakor n növelésével az elválasztást minden határon túl növelhetjük, R növelése viszont nem indokolt.

— Mivel rendkívül fontos gazdaságossági szempont, hogy a szilíciumhalogenid anyagvesztés minél kevesebb legyen, ezért folyamatos rendszer esetén még a bórtrikloridban „szegényítő” oszlopszakaszon kívül a betáplálási tényér fölé egy „dúsító” szakaszt is kell alkalmazni, amelyre nagyjából ugyanazon megállapítások érvényesek, mint amit a szakaszos üzemmódra elmondtunk. Ez a 15-3. ábra tanúságai szerint



15-3. ábra. Folyamatos és szakaszos üzemi desztillációs kolonna ekvivalenciájához tartozó üzemi paraméterek

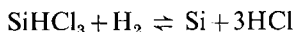
ugyanolyan méretű szakaszos üzemű oszlop termelékenyebbé váló tendenciáját jelenti ($n_{\text{folyamatos}} > n_{\text{szakaszos}}$).

Mindezeket figyelembe véve, tisztítóképeséget és üzembiztonságot elsődlegesnek tekintve a szakaszos üzemű desztilláló rendszert tartjuk célszerűbbnek.

Az itt leírt megfontolások szerint készített berendezéseink tisztítási hatásfokát analitikai vizsgálatokkal ellenőrizve arra a megállapításra jutottunk, hogy a reális rendszer számítása az előzőekben megadott feltételezések figyelembevételével helyesen történt. Az analitikai vizsgálatok többek között kiterjedtek a nyers, tisztítatlan, valamint a desztillált fejtermék tisztaságának vizsgálatára. Az eredmények a kolonna tisztítóképeséget BCl_3 -ra nézve 4 nagyságrendűnek mutatják, az optimális esethez tartozó $n-R$ alkalmazása esetén, amely számításainkkal teljes egyezést mutat. Az analitikai vizsgálatokat dr. Vecsernyés Lajos kandidátus végezte, kvarc-spektrográffal, a vizsgálatoknál a kimutathatósági határ 10^{-10} g fém/g SiHCl_3 [10].

3. SiHCl_3 hidrogénes redukciója

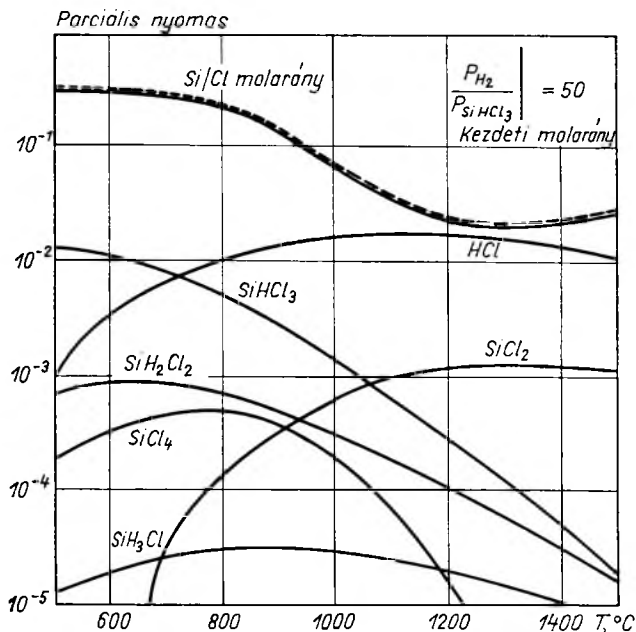
A hidrogénes redukció elemzése során figyelemmel kell kísérni egyrészt a triklórszilán termikus diszproporcionálódásának révén keletkező komponensek jelenlétét [1], [11], másrészt a



elsődleges reakcióban keletkező HCl melléktermék további reakciókban történő részvételét, mind homo-, mind hetero-disszociációja miatt, amely gyökös és ionos reakciókat is eredményez. Így a kiindulási komponensekkel együtt Si, SiCl , SiCl_2 , $\text{H}_n\text{SiCl}_{4-n}$ ($n=0 \dots 4$), HCl, H_2 jelenlétével is számolnunk kell. Az így felírható egyensúlyi reakciók figyelembevétele mellett — az irodalomban [1], [11], [12]

található, nem mindig elmentőmentes képződési entrópia- és entalpia- adatok alapján — felírható a hőmérséklet függvényében a különféle komponensek parciális nyomása, egy rögzített kiindulási mólarány esetén, amelyet a 15-4. ábrán mutatunk be. Az ábrán bemutatott Si/Cl mólarány csökkenő jellege a szilíciumnak gőzfázisból szilárd fázisba történő kiválását jelzi [11].

Az eddigiekből nyilvánvalónak látszik, hogy technikai körülmények között a reaktorban fennálló hőmérsékleti gradiensek (a reaktor fala az apparatúra szennyezések eliminálása érdekében vízhűtéses) és a reakciókomponensek ki- és belépési pontjainak

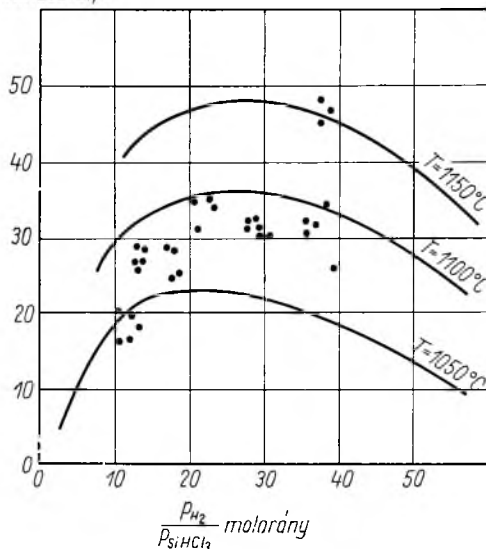


15-4. ábra. Hidrogén—triklór-szilán 50-es kezdeti mólaránya esetén a gázelegyenben megjelenő különféle komponensek parciális nyomásai a T hőmérséklet függvényében

környezete ellenőrizhetetlenné tesz a kiindulási és a vázolt egyensúlyi reakciók, valamint a végtermékek közti átmeneti állapotokat, amelyek során tapasztalatok szerint egyéb mellékreakciók termékeként polimerizációs vegyületek képződnek. Ezek feleslegének folyamatos eltávolítását a 100...200 h-s reakcióidőtartamok alatt a berendezés kialakításakor biztosítani kell.

A 15-4. ábrán bemutatott értékekkel, Si-kitermelési százalékokra nézve becsléseket végeztünk, amelyek szerint — a kísérleti eredményekkel összhangban — realizálhatók 35...45%-os kihozatali százalékok a mikrokristályos szilíciumrúd 1100...1150 °C-os felületi hőmérséklete esetén feltéve, hogy a kiindulási elegyben a hidrogén és a triklórszilán mólaránya 25...50 közötti érték (15-5. ábra).

η kihozatal, %



15-5. ábra. Si-kitermelési százalékok a kiindulási elegy $H_2/SiHCl_3$ mólaránya függvényében különböző előállítási hőmérsékleteken.

4. A szükséges reakcióhőmérséklet biztosítása és ezzel kapcsolatos problémák

A mikrokristályos állapotú szilícium előállításához a szilíciumnak a redukciós téréből a szilárd fázisba történő kiválása érdekében a rúd alakú Si hordozók felületét — az előzőkben elmondottak szerint — 1100~1150 °C hőmérsékleten kell tartani, azok rögzített átmérőig tartó folyamatos gyarapodása közben. Ha célul a kb. 80 mm átmérőt tűzzük ki és a megfelelő hőmérsékleti stabilitást a teljes folyamat alatt biztosítani akarjuk, közvetlen, szabályozott és stabilizált elektromos fűtést kell alkalmazni. A teljesítményigényeket a következők szerint becsülhetjük. Az időegység alatt betáplált I^2R hőmennyiségnek egyensúlyban kell lennie a feszültségforrásra kapcsolt Si-rudak felületén leadott hőmennyiséggel, amely feltételezésünk szerint arányos a felülettel. A feszültségforrásra kapcsolt Si-rudak R ellenállása:

$$R = \rho \frac{l}{r^2 \pi},$$

ahol ρ a Si fajlagos ellenállása ($\rho_{1100} \text{ °C} = 5 \cdot 10^3 \text{ } \Omega\text{cm}$),

r a rudak sugara,

l a rudak hossza.

Az arányossági tényező a reaktorra és a geometriai elrendezésre jellemző paraméter.

1 m hosszú Si rúdra és hengeres reaktorra az arányossági tényező értéke $K \approx 18 \frac{W}{\text{cm}^2 \text{ h}}$.

Ez az érték elméletileg is számolható, ha feltesszük, hogy az eldisszipált hő legalább 95%-a a hőmérsékleti sugárzás formájában távozik. Ennek felhasználásával az

$$I(r) = 2,67 \cdot 10^2 r^{3/2} \text{ A},$$

ami $r=40$ mm esetén $I=2140$ A-t eredményez, $l=100$ cm esetén $U_{\min}=21,3$ V fűtőfeszültség mellett. $U>U_{\min}$ biztosítása esetén — $R(T)$ exponenciálisan csökkenő jellege miatt — áramstabilizált rendszerrel kell dolgozni.

A nagy áramok, valamint amiatt a tény miatt, hogy e hőmérsékletek a szilíciumnak a plaszticitási hőmérséklet-tartományához közeli értékek — váltakozóáramú izzítást alkalmazva — különösen több rudat előállító reaktor esetén az elektrodinamikussal is kell számolni. Ez vizsgálataink szerint azt jelenti, hogy legalább 4 cm-es távolságot kell biztosítani az egyes hordozók között, amely kezdeti fázisban a hordozók közt legalább 12 cm-es távolságot jelent.

5. Következtetések

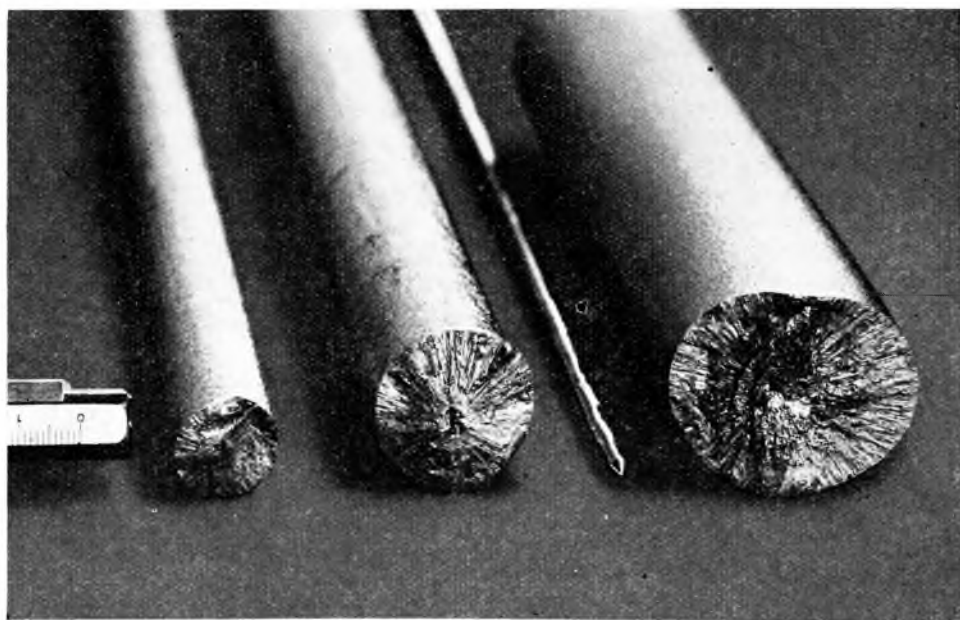
Az elmondottakból nyilvánvalónak tűnik, hogy a biztonságos és gazdasági optimumot jelentő Si-termelő folyamathoz biztosítani kell:

— Az előzőekben részletezett tulajdonságokkal rendelkező desztilláló berendezést, amelynek óránként legalább 1 l, BCl_3 -ra 0,15 ppb-ig tisztított, PCl_3 -ból pedig rögzített értéknit tartalmazó SiHCl_3 -at kell szolgáltatnia.

— A vázolatok szerint megkonstruált redukációs kemencét el kell látni a hidrogén-triklórszilán mólarányt 25...50 szinten tartani tudó elpárolgató, illetve telítő előtéttel.

— A szilícium rögzített hőmérsékleten való izzítását biztosító áramforrásnak a vázolt karakterisztikával kell rendelkeznie. Ugyanakkor, biztosítani kell minden zavaró külső körülménytől függetlenül legalább 5%-os stabilitást.

Az így létrehozott berendezéskomplexum alkalmasnak ígérkezik megfelelő minőségű és paraméterű mikrokristályos állapotú szilíciumrudak előállítására.



15-6. ábra. Különböző átmérőjű mikrokristályos szilíciumrudak sora

Elméleti és technológiai kutatásainkat együttesen reprezentálja a 15-6. ábrán bemutatott Si-rudak sora.

*

A szerzők köszönetet mondanak *dr. Lukács Józsefnek*, a műszaki tudományok doktorának — az Intézet igazgatójának — és *Molnár István* tudományos főosztály-vezetőnek a felmerült problémákkal kapcsolatban nyújtott konzultatív támogatásért, nem utolsó sorban pedig azért, hogy lehetőséget biztosítanak a munkák eredményes végzéséhez.

Köszönetet mondanak még *Dombai Ágnes* és *Pelikán Lászlóné* vegyésztechnikusoknak a kísérleti munkák során nyújtott gyakorlati tevékenységükért és a számítások elvégzésében nyújtott segítségükért.

Irodalom

- [1] *Niederborn, I.—Wohl, A.*: Thermodynamic Study on Advanced Purification of Silicon. I. Revue Roumaine de Chimie. **11**. (1966) p. 85—101.
- [2] *Wohl, A.*: Contributie la calculul colonnelor de rectificare I. Revista de Chimie. (1962) 351—355.
- [3] *Wohl, A.*: Contributie la calculul colonnelor de rectificare II. Revista de Chimie. (1963) 90—94.
- [4] *Horváth P.—Vezér Sz.*: Triklórszilán folyamatos desztillációjának vizsgálata gazdasági szempontok figyelembevételével. VKI tanulmány. 1970.
- [5] *Benedek—László*: A vegyészmérnöki tudomány alapjai. Műszaki Könyvkiadó Bp. 1964.
- [6] *Krell, E.*: Laboratóriumi lejárás. Műszaki Könyvkiadó Bp. 1966.
- [7] *Hála—Pick—Fried—Wilim*: Gőz-folyadék egyensúlyok. Műszaki Könyvkiadó Bp. 1965.
- [8] *Perry, J. H.*: Vegyészmérnökök kézikönyve I—II. Műszaki Könyvkiadó Bp. 1968.
- [9] *Preisich*: Vegyészek zsebkönyve. Műszaki Könyvkiadó Bp. 1963.
- [10] *Vecsernyés L.*: Nyomelemek spektrokémiai meghatározása SiCl_4 -ban és SiHCl_3 -ban. Magyar Kémiai Folyóirat, 72. éf. 1966. IX. 377—380.
- [11] *Lever, R. F.*: The Equilibrium Behavior of the Silicon-Hydrogen-Chlorine System. IBM Journal September (1964) 460—465.
- [12] *Ashen, D. J.—Bromberger, G. C.—Lewis, T. J.*: Kinetics of the Reduction of Silicon Tetrachloride and Trichlorsilan by Hydrogen. J. appl. Chem., **18** (1968) 348—352.

16.

Nagy energiájú félalakítási technológiák kutatása

DENK REZSŐ—BALOGH ISTVÁN

ÖSSZEFOGLALÁS

A szerzők áttekintést adnak a nagy energiájú fémmegmunkálási eljárások alkalmazásának gazdasági indokairól. Ismertetik a nagy sebességű képlékeny alakítási technológiákat. A gyakorlat számára jól használható számítási módszereket adnak az elektrohidraulikus fémmegmunkálási eljárás tervezéséhez.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОВОДИМЫЕ В ОБЛАСТИ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ БОЛЬШИМИ ЭНЕРГИЯМИ

Р. Денк—И. Балог

Резюме

Авторы дают обзор экономических причин применения методов обработки металлов большими энергиями. Описывают технологии высокоскоростных пластических обработок. Дают методику расчета хорошо используемую на практике, при проектировании электрогидравлической обработки металлов.

FORSCHUNG DER TECHNOLOGIE HOCHENERGIE-METALLUMFORMUNG

R. Denk—I. Balogh

Zusammenfassung

Die Verfasser bieten einen Überblick über die wirtschaftlichen Gründe der Anwendung der Hochenergie-Metallumformungsverfahren. Sie legen plastische Hochgeschwindigkeitsumformung dar. Sie bieten eine praktisch gut anwendbare Rechenmethode zur Planung des elektrohydraulischen Metallbearbeitungsverfahrens.

RESEARCH OF HIGH-POWER METAL FORMING TECHNIQUES

R. Denk—I. Balogh

Summary

A survey of economical justification of the high-power metal-forming method is given by the authors. The high-speed plastic metalworking techniques are described. Computation methods suitable for practical purposes are proposed for the elaboration of electrohydraulic metalworking procedures.

1. Áttekintés a forgácsolás nélküli technológiákról

Korunk hatalmas méretű technikai fejlődése, a társadalom igényeinek rohamos növekedése permanensen napirenden tartja a termelékenység állandó növelését, a termékek önköltségének csökkentését. Legnagyobb termelékenységnövekedést és önköltségcsökkentést a gyártmányok anyagköltségeinek és munkaigényének csökkentésével lehet megvalósítani. Ebben az összefüggésben döntő hatása van az előgyártásnak, mivel az előgyártmány méret- és alakpontossága meghatározza a további megmunkálások munkaigényességét és az anyagvesztéseket.

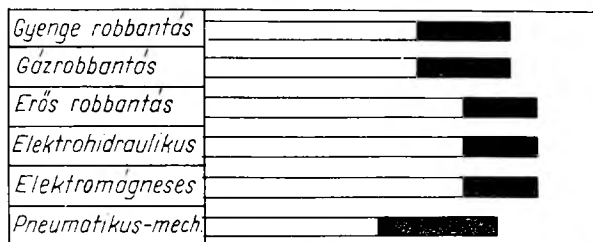
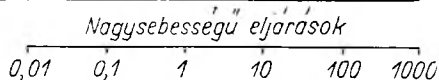
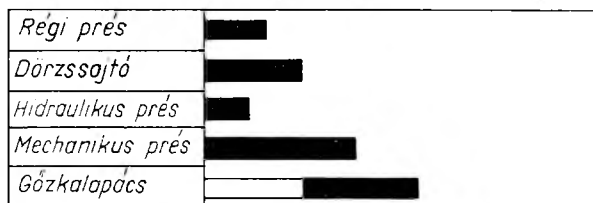
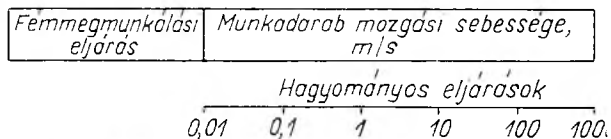
A gyártmányok alkatrészeinek megmunkálását három szakaszra lehet bontani:

- előgyártás,
- mechanikai megmunkálások (többnyire forgácsolás),
- szereléskor végzendő utánmunkálások.

Az alkatrészek előállításának gazdaságossága e felsorolás sorrendje szerint biztosítható. A gyártás műszaki és gazdaságossági színvonalára, a megmunkálási időnek a három szakaszra vonatkoztatott százalékos aránya, jó tájékoztatást ad. Fejlett ipari országokban jelenleg az előgyártási idő, az összes megmunkálási időnek 15...20%-a, hazánkban mindössze 2...3%.

Az utóbbi időkben egyre erőteljesebb tendencia mutatkozik olyan irányban, hogy a méret- és alakadás legmunkaigényesebb második szakaszát — a forgácsoló műveleteket — mindinkább leszűkítsék vagy teljesen el is hagyják. Erre akkor van lehetőség, ha az előgyártmány olyan alak- és méretpontossággal készül, hogy meg-

egyeznek a kész alkatrésszel. Amikor az előgyártmány és a kész alkatrész fogalma technológiai szempontból egybeesik, akkor a legnagyobb az anyagmegtakarítás, az önköltség a legkisebb és rendszerint a termelékenység is a legjobb.



(a NASA's Technical Utilization Division adatai)

2. A nagy sebességű alakítóeljárásokról általában

Az utóbbi évtizedben az előgyártási folyamatok meggyorsítására, az elérhető méret- és alakpontosság növelésére, valamint a hagyományos előgyártási módokkal meg nem munkálható anyagfélések forgácsmentes alakítására egyre elterjedtebben kezdik alkalmazni a nagy sebességű eljárásokat. Közös jellemzőjük, hogy sebességtartományuk legalább egy nagyságrenddel nagyobb, mint a hagyományos

16-1. ábra. Alakítási sebességek összehasonlítása

eljárásoké. A nagy sebességű eljárásoknak olyan új metallurgiai jellemzői is vannak, amelyek a konvencionális módszerek esetén nem jelentkeznek.

A 16-1. ábra összehasonlító áttekintést nyújt a hagyományos és nagy sebességű fémmegmunkálási eljárások deformációsebességének tartományai között.

3. Nagy sebességű elektrodinamikus fémmegmunkálási eljárások

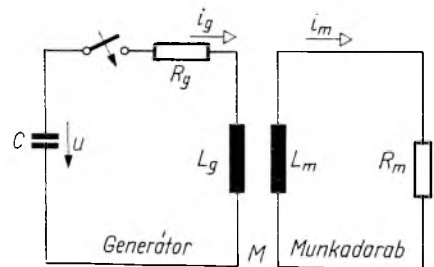
A nagy sebességű alakítási eljárások között három módszer van, amely igen jól kézben tartható. Ezek az elektromágneses, elektrohidraulikus és a pneumo-mechanikus eljárások. Az alakító berendezésnek az a része, amelyik közvetlenül a megmunkálást végzi, viszonylag egyszerű, maga az eljárás automatizálható és így tömeggyártásra is alkalmassá tehető. Az elektromágneses és elektrohidraulikus eljárás tekinthető a legkorszerűbbnek, ugyanis az alakítási processzusban mozgó tömegek nem vesznek részt vagy minimálisak, így az energiának deformációs munkává való átalakítását — bizonyos esetekben — a legjobb hatásokkal végezhetik.

Az elektromágneses megmunkálás alapelve régóta ismert. Tulajdonképpen az árammal átjárt vezetők közötti erőhatásokat használja fel alakítási munka végzésére.

A teljes alakítóberendezés legfontosabb elemei: a kondenzátortelep mint energiatároló egység, valamint a munkatekeres, a vele transzformátoros kapcsolatban álló munkadarabbal.

A többi elem a technológiai folyamat értékelése szempontjából elhanyagolható. Az energiatároló kondenzátor és a munkadarabbal egy egységet képező munkatekeres helyettesítő kapcsolása többféle megfontolás alapján adható meg. A 16-2. ábra szerinti vázlat jellemzi legjobban az alakítási folyamatot.

Az áramkör kapacitív, rezisztív és induktív tagjai tartalmazzák az energiatároló és a munkatekeres megfelelő elemeit. Ezek képezik a primer áramkört. A munkatekeresbe helyezett munkadarab induktivitása és rezisztenciája (ellenállása) alkotja a szekunder áramkört. A kettő közötti kapcsolatot az M kölcsönös induktivitás fejezi ki.



16-2. ábra. Elektromágneses alakítógép helyettesítő kapcsolási vázlata

4. Elektrohidraulikus fémalakítás

Közismert, hogy a tárolt villamos energia kisütése folyadékba merített elektródok között, nagy sebességű lökéshullámok előállításának hatékony módja. Az elektrohidraulikus eljárás, akárcsak az elektromágneses eljárás, az elektromos energiának kondenzátortelepben való tárolásával kezdődik. Ez az energia két olyan elektród között kisül, amelyeket vagy egy szikraköz választ el egymástól, vagy egy vékony, ún. robbantóhuzal köt össze.

Az elektrohidraulikus alakítógép — felépítését tekintve — megegyezik az elektromágneses alakítógéppel, azzal az eltéréssel, hogy a munkatekeres helyét a hidraulikus alakítófej foglalja el.

Ha a kisülési folyamat elindítására robbantóhuzalt használunk, akkor a villamos energia a robbantóhuzalban először Joule-meleggé alakul át. A kezdeti árammeredekség értékét a kondenzátortelep feszültségének megválasztása után az áramkörbe iktatott induktivitással állíthatjuk be.

A skin-effektus következtében a huzal felülete olvad meg először, és az olvadási zóna innen halad befelé. A folyamat azonban olyan gyors, hogy a külső megolvadt réteg nem tud számottevően elmozdulni, mielőtt az egész szál meg nem olvad. Az eredmény egy olvadt fémszalag, aminek térfogata első közelítésben megegyezik az eredeti huzal térfogatával.

Az olvadt fém belsejében igen nagy erők ébrednek. Az elmozdulást a jelenlevő mágneses tér és az olvadt fémszalagot körülvevő folyadék tehetetlensége akadályozza. Eközben a nyomás és a hőmérséklet fokozatosan nő, az olvadt fém plazmaállapotba megy át, és az elektródákat fémplazmából és olvadt fémrészecskékből álló csatorna választja el.

A huzal elgőzölgésekor az elektródok közötti ellenállás megnő, az áramerősség esik. A korlátozó mágneses mező csökken és a plazmaállapotban levő fém expandálni kezd. Azt az időszakot, amíg az áram rohamosan csökken, nyugalmi időnek nevezik. Az áram mindaddig kicsi marad, amíg az elektródok közötti molekulák sűrűsége annyira le nem csökken, hogy egymással való ütközések folytán ionizálódni tudnak. Ekkor az elektródok közötti ellenállás csökken, az áram nő és az ív visszagyűjt.

A fémplazma expanziója a nyugalmi idő kezdetén nyomáshullámot kelt. Az így kialakult nyomásimpulzust — amely a szikracatornától távolodva egyre csökken — használjuk fel az alakítási munka elvégzésére.

Az elektrohidraulikus alakítási folyamat összetettebb, mint az elektromágneses. Többféle energiaformával találkozunk, amelyek egymást követik. Az egyes energiaformák közötti átalakulások összhatásfoka határozza meg az elektrohidraulikus eljárás hatásfokát. Célszerű ezért az egyes energiaformákat és a részhatásfokokat megismerni, mert csak az esetben tudjuk egy adott alakítási feladathoz az optimális paramétereket meghatározni.

Az elektrohidraulikus folyamat során létrejövő energiaformák az alábbiak:

töltési energia,
ívenergia,
nyomási energia,
kinetikai energia,
alakítási munka.

Az egyes energiaformák minden esetben és szükségszerűen létrejönnek. Az alakítási munka nagyságát az egyes energiafajták közötti átalakulási hatásfok szabja meg.

a) Elektromos hatásfok

$$\eta_{el} = \frac{E_{iv}}{E_T}$$

Az elektromos hatásfok a töltési energiával nő, mivel a kondenzátorok párhuzamos kapcsolása révén, a berendezés összellenállása csökken. Jól megépített berendezések elektromos hatásfoka optimális esetben 10 kWs-os tárolóképessegre nézve kb. 70%, 50 kWs-os berendezésre vonatkoztatva 85%.

b) Nyomáshatásfok

$$\eta_p = \frac{E_p}{E_T}$$

A töltési energia és ívenergia közötti hatásfok (η_{ei}) egzakt érték, ami tulajdonképpen egy rezgőkör villamos adataiból viszonylag egyszerűen meghatározható. Ugyanez nem vonatkozik a nyomáshatásfokra. A nyomáshatásfok kb. 60...70% körül mozog 5 kWs feletti energiák esetén. E töltési energiaszint alatt rohamosan csökken a maximális hatásfok. A nyomáshatásfok nagymértékben függ a robbantószál anyagától, geometriai méreteitől és a kör inductívásától.

A robbantóhuzal 1 cm-es szakaszára vonatkoztatott 300 Ws/mm² energiasűrűség és kis, $E_T < 5$ kWs energiaszint alatt az áramkör viszonylag nagy $L > 8...10$ μ H körüli inductívása esetén alumínium robbantószállal érhető el a legnagyobb hatásfok.

300...600 Ws/mm² energiasűrűség esetén vörösréz huzal adja a legjobb eredményt. $E_T > 5$ kWs és 600 Ws/mm² energiasűrűség felett, 4 μ H körinductívás alatt wolfram vagy kanthal robbantószál használatával 60% fölé emelkedik a nyomáshatásfok.

c) Geometriai hatásfok.

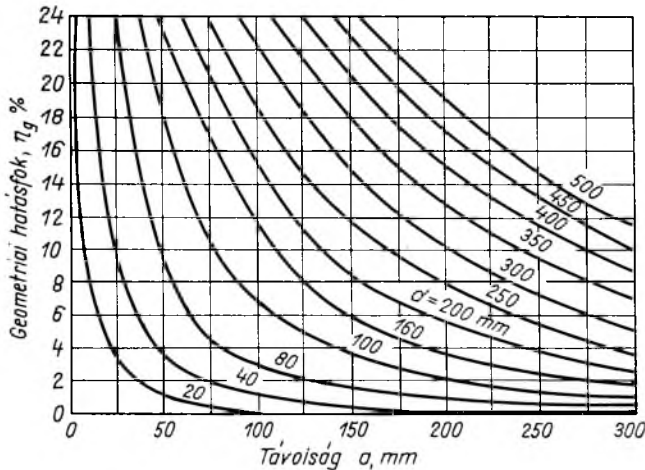
$$\eta_g = \frac{A_{mdb}}{A_h},$$

ahol A_{mdb} a munkadarab felülete,

A_h a gömb alakú lökéshullám-front felülete.

A geometriai hatásfok adja meg, hogy a lökéshullám energiájának milyen geometriai részaránya vesz részt a munkadarab alakításában.

A geometriai hatásfok meghatározása még bonyolultabb, mint a nyomáshatásfoké. Függ az alakítókamra méreteitől, a munkadarab méreteitől, alakjától,



16-3. ábra. Geometriai hatásfokok az elektrohidraulikus szabadalakításoknál, síklemez munkadarabok esetén

a munkadarabnak a szikracsatornától mért távolságától. Sík lemezek alakításakor általában a 30%-ot sem éri el, mint azt a 16-3. ábra nomogramjai is mutatják. A geometriai hatásfok nagytérű sík lemezek alakításakor növekszik. Ha lehetőség van több szikraközlel közelítőleg sík hullámok előállítására, 40%-ot érhet el. Bizonyos esetekben javít a reflektorok alkalmazása is.

Nagy l/D viszonyú, kisebb átmérőjű csövek megmunkálásakor érhető el a legnagyobb, maximálisan mintegy 90%-os geometriai hatások.

d) Alakítási hatások.

Ez a hatások tulajdonképpen az alakváltozási munka és a tárolt energia hányadosa.

$$\eta = \frac{W}{E_T}$$

Ez az a hatások, ami a legtöbbet fejez ki az alakítás folyamatából. Magában foglalja az összes többi hatásokot. Sajnos éppen ezért számítással nem követhető. Az előző hatásokot befolyásoló tényezőkön kívül a munkadarab alakítási szilárdsága, a szerszám felülete, tömege, a leSORÍTÓ ERŐ nagysága stb. is befolyásolja az értékét.

A nehézségek áthidalására hasonlósági törvények vezethetők be, amelyek az elektrohidraulikus megmunkálás során fellépő végső alakváltozást előre számíthatóvá teszik. A hasonlósági törvényeket két esetre dolgoztuk ki: hengeres burkolat (cső) és síklemezek alakváltozására. A számítások a legnagyobb csúsztatófeszültség állandóságának elméletén és a Newton-féle mozgásegyenleteken alapulnak.

Hengeres burkolat alakváltozására a következő összefüggés érvényes

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{2\pi} \frac{W_c}{k_f r_0 h_0},$$

ahol $\bar{\varepsilon}$ a burkolat kerület menti logaritmikus alakváltozása,

k_f a burkolat anyagának folyási feszültsége,

r_0 a burkolat kezdeti belső sugara,

h_0 a burkolat kezdeti vastagsága,

W_c a nyomásimpulzus által a burkolatban végzett képlékeny munka a hosszegységre vonatkoztatva.

Kör alakú síklemez alakváltozására a következő két összefüggés érvényes:

$$\bar{\varepsilon}_h = \frac{1}{2} \frac{I_0^2}{\gamma k_f h_0^2},$$

$$\frac{\delta_0}{d_0} = \frac{I_0}{\sqrt{\gamma k_f h_0}},$$

ahol $\bar{\varepsilon}_h$ a lemezvastagság átlagos változása,

δ_0 a lemez középponti behajlása,

d_0 a szerszám (húzógyűrű) sugara,

γ a lemez fajsúlyja,

k_f a lemez folyási feszültsége,

h_0 a lemez kezdeti vastagsága,

I_0 a lemez felületegységére ható nyomás impulzusa.

Ezeknek az egyenleteknek az alkalmazásával a burkolatok vagy lemezek végső alakváltozása meghatározható, amennyiben egy előzetes alakváltozási vizsgálatot végzünk.

Az előzetes alakváltozási kísérletek paramétereit a indexszel és azokat, amelyek az adott feltételek mellett alakítandó munkadarabra vonatkoznak b indexszel jelöljük. Felírva az alakváltozások arányát, abból az ismeretlent kifejezve, a kér-

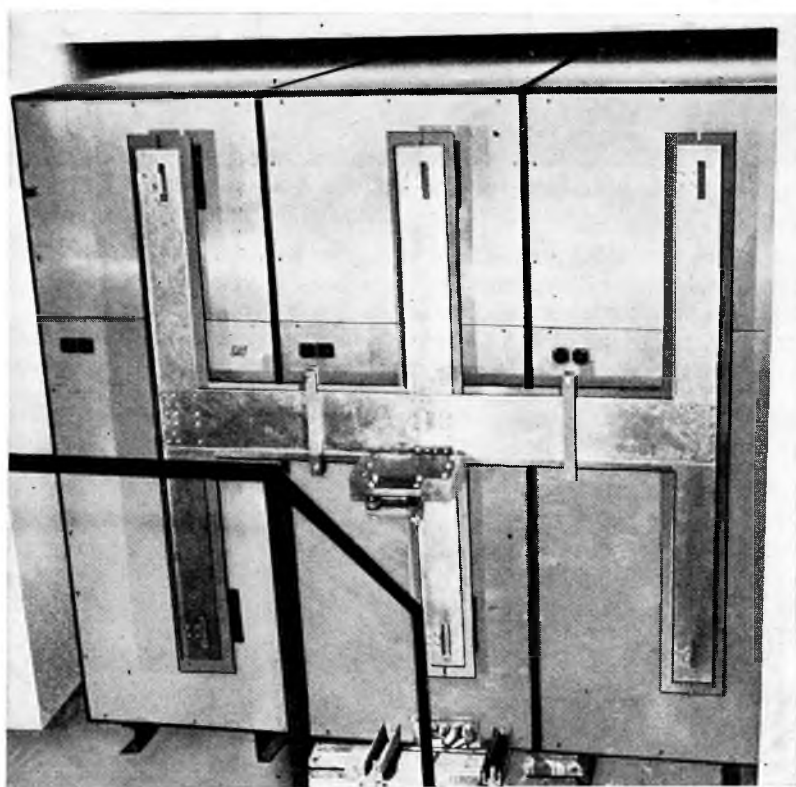
déses jellemzők számíthatók. Ha nem ismerjük előre a deformáció sebességét vagy más egyéb okokból a k_f nem ismert, közelítőleg számolhatunk a sztatikus vizsgálatokból nyert σ_F értékekkel a következő két, kísérleti úton kapott összefüggés felhasználásával:

$$\frac{\bar{\epsilon}_{0b}}{\bar{\epsilon}_{0a}} = \left(\frac{\sigma_{Fa} r_{0a} h_{0a} W_{eb}}{\sigma_{Fb} r_{0b} h_{0b} W_{ea}} \right)^n,$$

$$\frac{\delta_{0b}}{\delta_{0a}} = \left(\sqrt[3]{\frac{\gamma_a \sigma_{Fa}}{\gamma_b \sigma_{Fb}} \frac{a_{0b} h_{0b} I_b}{a_{0a} h_{0a} I_a}} \right)^N,$$

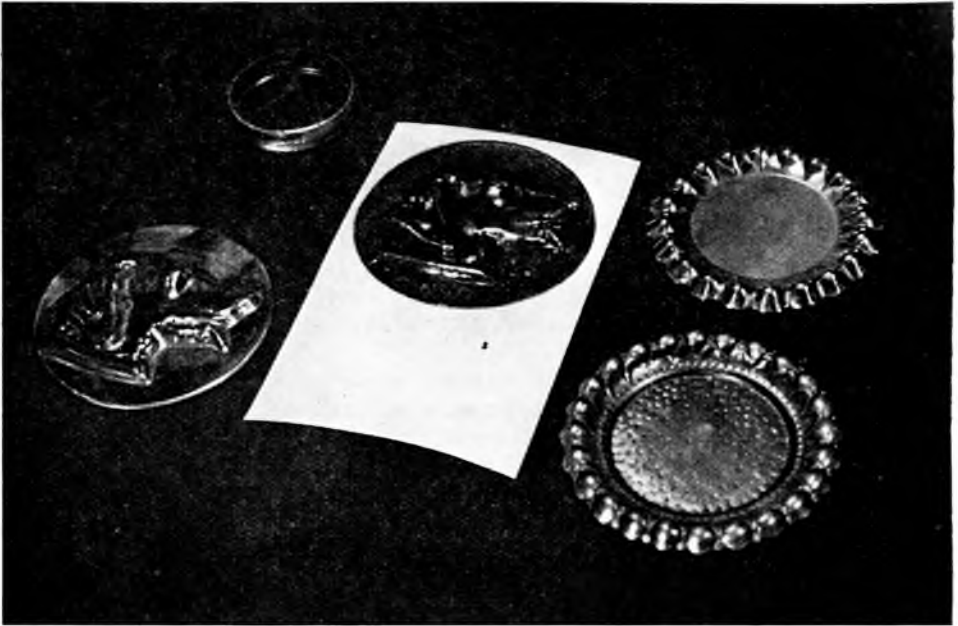
ahol n és N hatványkitevők 0,8...1,0 között vannak, első közelítésben elhanyagolhatók.

Az elektrodinamikus képlékeny alakítási technológiák fizikai törvényszerűségeit a VKI Félvezető Főosztályán négy éve folyó kutatások eredményeként sikerült



16-4. ábra. 54 kW-os elektrodinamikus alakító gép

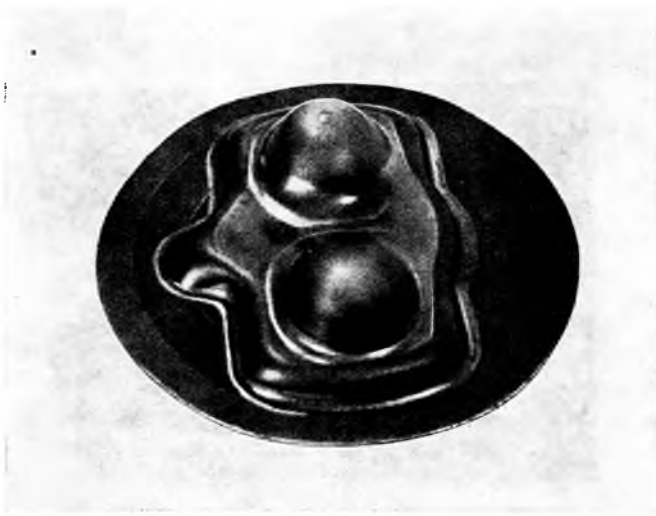
tisztázni. Az eljárások laboratóriumi méretű alkalmazásai révén az ipari megvalósítások során várható problémákat is ismerjük. A munkadarabok egyes részeinek — a képlékeny alakítások eddigi gyakorlatától eltérő — nagy mozgási sebessége újszerű szerkesztési elvek alkalmazását követeli meg a konstruktőröktől. A gyárt-



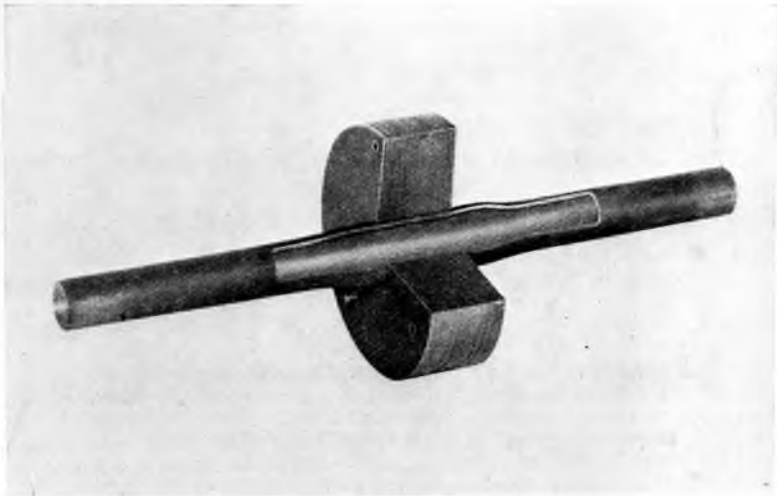
16-5. ábra. Elektromágnesesen alakított díztárgyak

mánytervezésben — főleg az újszerű szemlélet meghonosodásáig — jelentkező nehézségeket azonban túlkompenzálják az eljárások kétségtelen előnyei: a megmunkálási és anyagköltségek csökkenése.

Befejezésül megmutatjuk a VKI-ben készült — sorozatgyártásra is alkalmas — 54 kW-os elektrodinamikus alakítóberendezést (16-4. ábra). Elektromágnesesen



16-6. ábra. Elektrohidraulikus megmunkálással előállított konyhafelszerelési_cikk



16-7. ábra. Elektrohidrolikusan megmunkált csőtengely

megmunkált dísz tárgyakat mutat a 16-5. ábra. Az elektrohidrolikus és elektromágneses képlékeny alakításokhoz kifejlesztett 54 kW-os alakítóberendezésen készíthető munkadarabokra ad jó példát az elektrohidrolikusan alakított, mélyhúzólemez alapanyagú konyhafelszerelési cikk és az elektrohidrolikusan megmunkált csőtengely (16-7. ábra).

Irodalom

- [1] Müller, H. P.: Elektrohydraulisches und electromagnetisches Umformverfahren in der Fertigung. *Industrie Anzeiger*. **38** (1970) 844—848. old., **49** (1970) 1100—1103. old.
- [2] Oyane, M.—Masaki, S.: Fundamental Study on Electrohydraulic Forming. *Bulletin of JSME*. **30** (1965) 251—258. old.
- [3] Oyane, M.—Masaki, S.: Fundamental Study of Electrosark Forming. *Bulletin of JSME*. **44** (1968) 366—372. old.
- [4] Oyane, M.—Masaki, S.: Development of Laws of Similarity for Electrosark Forming. *Bulletin of JSME*. **45** (1968) 545—553. old.
- [5] VKI—GTI: Az elektromágneses alakítás hazai kifejlesztése. Zárójelentés. 1970.

17.

A nagyhőmérsékletű tüzelőanyagelem-kutatás helyzete

*KRAJCSOVICS FERENC—GERZSENYI GYÖRGY—
DÁVID PÉTER*

ÖSSZEFOGLALÁS

A nagyhőmérsékletű tüzelőanyagelemek kutatása világszerte nagy erővel folyik. A hazai kutatás célkitűzései, helyzete, irányvonala és terjedelme a szénhidrogén-bázis felhasználása szerint alakul. Gazdaságossági szempontok: az üzemanyagok és a katalizátorok szerepe, a cikk ismerteti a tüzelőanyagelem áramforrás gazdasági jelentőségét, különös tekintettel a hazai viszonyokra. Nagyhőmérsékletű elemtípusokat mutat be és egy alaptípus VKI-ban megvalósított változatait (1 kW-os tüzelőanyagelem megvalósítása 1971-ben). Bemutatjuk a fejlesztés során végzett speciális villamos vizsgálatokat.

ПОЛОЖЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Ф. Крайчович—Д. Герзсени—П. Давид

Резюме

Исследования в области высокотемпературных топливных элементов во всем мире проводятся очень интенсивно. Цели, положение, направление и объем отечественных исследований определяются соответственно использованию углеводородной базы. Экономические принципы, роль топлива и катализаторов. Экономическое значение источника электроэнергии на топливных элементах с обращением особого внимания на отечественные условия. Типы высокотемпературных топливных элементов представляют собой видоизменения основного типа реализованного в Научно-исследовательском институте Электротехнической промышленности (топливный элемент 1 кВт был реализован в 1971 г.). Были проведены специальные электрические испытания в ходе процесса разработки.

ZUSTAND DER HOCHTEMPERATUR-BRENNSTOFFZELLEN-FORSCHUNG

F. Krajcsovics—Gy. Gerzsenyi—P. Dávid

Zusammenfassung

Internationale Lage der Brennstoffzellen-Forschung. Zielsetzungen, Zustand, Richtlinie und Umfang der einheimischen Forschung. Anwendung der Kohlenwasserstoffreserven. Wirtschaftliche Gesichtspunkte, Rolle des Brennstoffes und der Katalysatoren. Wirtschaftliche Bedeutung der Brennstoffzellen-Stromquelle: mit besonderer Rücksicht auf die einheimischen Verhältnisse. Zellentypen hoher Temperatur. Die im Forschungsinstitut der Elektroindustrie ausgeführten Varianten eines Grundtyps. (Ausführung einer Brennstoffzelle von 1 kW im Jahre 1971.) Spezial elektrische Prüfungen im Laufe der Entwicklung.

THE PRESENT STATE OF HIGH TEMPERATURE FUEL-CELL RESEARCH

F. Krajcsovics—Gy. Gerzsenyi—P. Dávid

Summary

All over the world intense research work is in progress in the field of high-temperature fuel cells. In Hungary the objectives, state, trend and scope of research are dependent on the utilization of hydrocarbon resources. Economical aspects and the role of fuels and catalysts are dealt with. Economic importance of fuel-cell power sources are discussed, with special regard to the conditions prevailing in Hungary. Types of high-temperature cells and variants of a basic type developed by the Research Institute (construction of a 1 kW fuel cell in 1971) are described. Special electrical tests applied during development are described.

1. Bevezetés

Az utóbbi évtizedben fokozott érdeklődés kíséri a tüzelőanyagelemek fejlesztését. Mint ismeretes, ezek az elemek a tüzelőanyagokban rejlő energiát közvetlenül, elektrokémiai módon alakítják át villamos energiává, vagyis elektrokémiai energiaátalakító berendezések. Mint ilyenek, működés közben — elvben — nem használnódnak el, invariánsak, kizárólag a beléjük vezetett tüzelőanyagot és oxigént használják fel. (Mint látni fogjuk, ennek az invarianciának a gyakorlati megvalósítása a fejlesztés egyik legfontosabb feladatát jelenti.)

A hagyományos villamosenergia-termelő eljárásokkal max. 33...35%-os hatásfokot érhetünk el, ugyanakkor az elektrokémiai elven működő tüzelőanyagelemek (fuel cell-ek) képesek már jelenlegi technikai állapotukban is mintegy 70% átalakítási hatásfokot elérni. Meg kell jegyeznünk, hogy a fuel cell-elv 100%-os hatásfokot is lehetővé tesz; ezt az értéket azonban jelenleg technikai és technológiai korlátok miatt igen nehéz megközelíteni.

Az elektrokémiai átalakítási mód jellegéből adódik egy másik igen fontos előny; nevezetesen az, hogy az áramforrás működés közben nem termel mérgező és szennyező melléktermékeket. Ez az energiaforrás járműhajtásra különösen ideális, mert csökkenti a levegő szennyezettségét. Közlemények szerint a világ nagyvárosainak egyes nagyforgalmú kerületeiben már most olyan nagymértékű a légszennyezettség, hogy a forgalom kitiltásával, ill. törvényekkel való szabályozásával foglalkoznak.

A multiplikatlan (elemi) tüzelőanyagelem-egység kifeszültségű, egyenfeszültségű áramforrás, általában 1 V alatti kapocsfeszültséggel. A kutatás jelenlegi szintjén néhány tucat, de különösen több száz elemi egység villamos multiplikálása megbízható és gyakorlatilag is használható egységgé minden vonatkozásban igen fejlett gyártástechnológiát igényel. Különösen vonatkozik ez a nagyhőmérsékletű elemekre, amelyek esetében az elemek invarianciája nyilvánvalóan fokozott veszélyben van.

Nagyhőmérsékletű típuson azokat a megoldásokat értjük, ahol a gazdaságossági igények kedvéért nemesfém katalizátorokat nem alkalmaznak, viszont vállalják a reakció fenntartásához szükséges hőmérséklet biztosítását és ennek összes kedvezőtlen hatását, leggyakrabban 700...1100 °C tartományban. Ezek után érthető, miért jelent világszerte még manapság is kutatási feladatot a berendezések ilyen hőmérsékleten invariáns módon való működtetése és miért állítják világcégek is „csatasorba” ezért a célt a technológiai fejlődés eredményeit. Egyrészt éppen az utóbbi évtized technológiai előrehaladása, másrészt az erősáramú félvezetőtechnika

fejlődése eredményeképpen a nehézségek ma már nem tekinthetők leküzdhetetleneknek. A tirisztor-, ill. az invertertechnika bizonyos alkalmazott fejlesztés mellett lényegében máris lehetővé tenné a fuel cell-nek mint kisfeszültségű, nagyáramú áramforrásnak akár motorikus, akár másfajta felhasználását.

Egyes alkalmazási területeken igen nagy jelentőséget tulajdonítanak a tüzelőanyagcellás kivitelben kifejlesztett, üzembiztosan üzemelő ún. kihelyezett elemrendszernek. Ezek általában híradástechnikai vagy jelzési célokra lennének elsősorban alkalmasak. E helyeken inkább kisebb teljesítményt, viszont hosszú élettartamot, ill. ún. készenléti működést várnak az elemtől. Valószínű, hogy éppen ezeken a területeken hódít majd teret az újfajta áramforrás, a nem is oly távoli jövőben.

Nemzetközi viszonylatban elfogadott álláspont, hogy a nagyhőmérsékletű elem-típusok közül elsősorban a karbonátolvadékos, másodsorban a szilárdelektrolitos rendszer alkalmas gazdaságos egységek létrehozására [1]. A gazdaságos tüzelőanyag-elem főbb paramétereiként 30 dollár/kW anyagköltséget, 113 dollár/kW előállítási költséget és 54 hónap élettartamot adnak meg.

Jelenleg a karbonátolvadékos elemnek létezik olyan mintapéldánya is, amelynek a közlemények szerint teljesítménysűrűsége 1000 W/m^2 , anyagköltsége 20...40 dollár/kW és élettartama pedig 12000 h (az elektród platinamentes).

Általánosan elfogadott becslés szerint jelenleg évenként ötvenmillió dollárt fordítanak a kutatásokra világviszonylatban. (Egyes források tudni vélik, hogy egyedül az USA-ban fordítanak ennyit a nagyhőmérsékletű tüzelőanyag-elemek kutatására.)

A legjelentősebb megbízásokat a Texas Instruments, a Westinghouse, ill. az Institute of Gas Technology részére adták ki az USA-beli kutatásokat koordináló szervezetek.

2. A hazai kutatás célkitűzései

A világszerte folyó kutatások indokoltá tették, hogy hazánk is bekapcsolódjék a tüzelőanyag-elemek kifejlesztésére irányuló munkába.

A legnagyobb volumenű vállalkozást e téren a Villamosipari Kutató Intézet kezdte el 1966-ban, bizonyos kapcsolódó kérdések kutatásában együttműködve más hazai kutatóbázisokkal. A vállalkozás a kutatásnak mind terjedelmét és irányát, mind pedig kockázati viszonyait tekintve már induláskor jelentős volt.

Az irányelvek elsődlegesen vették figyelembe a hazai viszonyokat, különös tekintettel az energiahordozókra. A számba jöhető nagyszámú energiahordozó közül elsősorban a földgáz, a bizonyos vegyipari folyamatoknál keletkező, nagy hidrogénkoncentrációjú melléktermékgázok, másodsorban pedig metanol, az alacsony oktánszámú benzinek, illetőleg a szénmonoxid (városi gáz) hasznosítása kerülhetett előtérbe.

A Villamosipari Kutató Intézet már a kutatás megindításakor jelentős erőket irányított az egyik nagyhőmérsékletű elemváltozat, a karbonátolvadékos rendszer kutatására. Mint ismeretes, a rendszer igen jelentős előnye, hogy katalizátorként alkalmazható a Pt-hoz képest viszonylag olcsó ezüst és nikkell, valamint a szintén olcsónak mondható Li-, Na- és K-karbonát elektrolitanyagok.

Az előnyök mellett bizonyos nehézségekkel is számolni kell. Az alkáli-karbonát ömledék tudvalevően rendkívül korrozív, áramot vivő rendszerben pedig különösen az. Ez utóbbi, ún. elektrokémiai korrózió hatását főként szerencsés konstrukcióval

lehet csökkenteni. Nem kevesebb gondot okoz az ún. termikus korrózió, amely elsősorban a szerkezeti anyagokkal szemben támaszt jelentős követelményeket.

Az első időkben vizsgálataink sok tekintetben alap kutatás jellegűek voltak. A kutatás pillanatnyi, ipari beállítottságú helyzetének elemzése azonban már azt mutatja, hogy eredményeink nem maradnak el a világszínvonalától, mivel hazánkban is megkezdhetjük nagyobb tüzelőanyagelem-telepek megvalósítását (l. az 5. pontot).

3. Gazdasági szempontok

Bármely fajta tüzelőanyagelem-rendszert tekintjük is, a működtetés gazdaságossági viszonyainak megítéléséhez jelenleg három szempontot kell figyelembe vennünk: Egyrészt az üzemanyagok ára, másrészt az aktivátor (katalizátor) problémája, harmadrészt pedig az előállítás költségei jönnek súlyozva tekintetbe.

E három szempontot illetően a tüzelőanyagelemnek is vannak természetesen olyan alkalmazási lehetőségei, amelyek bizonyos értelemben alárendeltté teszik a pénzügyi megfontolásokat. Elsősorban az úrhajózási és katonai alkalmazásokra gondolunk, másrészt fontos készenléti jellegű áramigényekre.

Általános jellegű felhasználások esetén további szempont a gazdaságos típus kiválasztásához az is, hogy mobilis vagy helyhez kötött esetről van-e szó.

3.1 Az üzemanyagok és a katalizátorok szerepe

Tüzelőanyagelemben való széles körű felhasználásra elsősorban a konvencionális tüzelőanyagok számíthatnak. Ezeket általában elektrokémiai reakcióképességük sorrendjében szokás felsorolni [2, 3] (l. a 17-1. táblázatot).

17-1. táblázat

Tüzelőanyagok energiatartalma

Tüzelőanyag	Reakcióhő			kg/kWh			NI/kg
	kcal/mól	kcal/kg	kWh/kg	n=100%	n=50%	n=30%	
Hidrogén	68,3	33 900,0	39,4	0,025	0,050	0,083	11 200,0
Metán	213,0	13 300,0	15,5	0,065	0,130	0,216	1 400,0
Bután	690,0	11 840,0	13,8	0,072	1,144	0,240	385,0
Benzin	—	11 000,0	12,8	0,078	0,156	0,260	1,35
Grafit (kristály)	94,5	7 900,0	9,2	0,108	0,216	0,360	0,44
Ammónia	91,5	5 380,0	6,25	0,160	0,320	0,533	1 320,0
Metanol	173,0	5 420,0	6,31	0,158	0,316	0,530	1,26
Hidrazin	148,6	4 640,0	5,4	0,185	0,370	0,620	≈ 1,0
Szénmonoxid	67,7	2 420,0	2,8	0,357	0,714	1,190	800,0

A sorban első helyen álló hidrogén hosszú ideig úgyszólván kizárólagos helyet foglalt el az elemkutatások üzemanyagai között, amit elsősorban kiváló reaktivitásának köszönhet. Néhány előnytelen tulajdonsága miatt azonban — magas beszerzési ár, nehézkes kezelhetőség és tárolás stb. — más tüzelőanyagok felhasználásával is folynak próbálkozások.

Nagy hőmérsékletű rendszerekben jelentős szerepre számíthat még a metanol is, mint üzemanyag; különösen nagyobb egységteljesítményű elemekben. A metanol

üzemanyag tüzelőanyagelemben való felhasználhatóságának tanulmányozása céljából a Nagynyomású Kísérleti Intézettel együttműködve kísérleti metanolbontó berendezést készítettünk.

Az összes tüzelőanyag közül legnagyobb érdeklődésre kétségkívül a különféle szénhidrogén tüzelőanyagok tarthatnak számot, amelyek más tüzelőanyagokhoz képest olcsók, kezelhetőségük, tárolásuk különösebb nehézséget nem okoz. Előnyös tulajdonságaikkal szemben áll viszont kisebb reakcióképességük; a felhasználást megelőzően bontási folyamatokra van szükség. E folyamatok során az összetett (általában hőbontási) reakciók eredményeként sokféle termék keletkezik, ami az elem működésében behatároltabb üzemi feltételek biztosítását igényli (pl. a szénkiválás hőmérsékletfüggése miatt egy nagyobb, gazdaságosabb egységnél szűkebb működési hőmérséklet-tartományt stb.).

Hazai viszonyaink között kétségtelen, hogy a kutatást szénhidrogén-bázisra (szénhidrogénekből előállított H_2 -CO elegyre) kell alapítani, ami gazdaságilag a legelőnyösebb választás. Mindezt alátámasztja az is, hogy a legnagyobb USA-beli kutatóbázisoknak kiadott megbízások szintén nagyhőmérsékletű (karbonátolvadékos és szilárd elektrolitos) rendszerek fejlesztésére vonatkoznak. E rendszerek tudvalevően igen jól képesek hasznosítani a szénhidrogének kémiai energiáját. Ez az energiahordozó az, amely az elkövetkező évtizedekben versenyképes lesz más anyagokkal szemben, és jelenleg hazánkban is megfelelő mennyiségben hozzáférhető.

Ismeretes, hogy az alacsony hőmérsékletű cellák igen drága, nemesfém katalizátorai (Pt, Pd stb.) jelentősen és előnytelenül befolyásolják a kész elem gazdaságosságát [4]. Nagyhőmérsékletű cellákban Pt vagy más, értékes nemesfém-katalizátorok a hőmérsékleti gerjesztés folytán eleve nem szükségesek; sőt elképzelhető, hogy a jelenleg széles körűen alkalmazott kevésbé nemes ezüst is olcsóbb anyagokkal (Fe, fémoxidok, félvezetőrétegek, Cu stb.) lesz helyettesíthető.

Természetesen a drága nemesfémek elhagyhatóságának „ára” van, jelen esetben ez éppen a nagy hőmérséklet. A hőmérséklet emelésével (termikus gerjesztéssel) elért szükséges aktiválási szint ugyanis, más oldalról az egész elemrendszer nagy működési hőmérséklete folytán az elugárzás miatt hatásfokromlással jár, valamint a nagy hőmérséklet számos technikai problémát okoz. A hőszigetelési viszonyok és a konstrukció megfelelő javításával lehetőség van a veszteségek és egyéb problémák csökkentésére, ill. kiküszöbölésére.

3.2 A tüzelőanyagelem-áramforrás gazdasági jelentősége

Ismeretes, hogy valamely nagyobb gazdasági terület jellemző összefüggést mutathat ki a specifikus népgazdasági össztermék, valamint a rendelkezésre álló, ugyancsak specifikus villamos energiatömeg között.

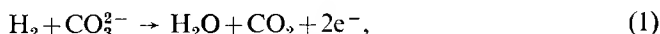
Hazai viszonylatban távlati szinten a termelés fejlesztésének alapfeltétele a nagyüzemi villamosenergia-termelés bővítése, amelyre a széles körű nemzetközi kooperáció ellenére is szükség van.

Az erőművi kapacitást az ágazat rendkívül beruházásigényes jellege (6 MFt/MW) miatt — a népgazdaság arányos fejlesztésére vonatkozó koncepciók megtartása mellett — csupán az igény szint időbeli követése alatt lehet bővíteni. Ha figyelembe vesszük a konvencionális módszerek mintegy 30%-os hatásfokát a tüzelőanyag-elemek várhatóan 50%-os hatásfokával szemben, valamint azt, hogy az energia-komplexumok előreláthatóan kisebb fajlagos költséggel, gyorsabban felépíthetők, látható, hogy nem csupán a kisebb egységjelzőmennyeknél jelentkeznek előnyök.

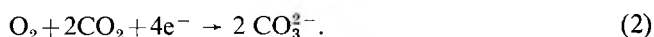
A kisebb, 10 kW körüli teljesítményű, mobil üzemre is alkalmas elemkivitelek összjelentőségükben — különösen a közlekedésre kifejlesztett költségsökkentő, illetőleg környezethigiénés szerepük folytán — legalábbis összemérhető jelentőségűeknek látszanak a nagy, stabil változatokkal.

4. A nagyhőmérsékletű tüzelőanyagelem két típusának általános ismertetése

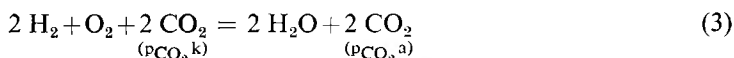
A VKI által választott ún. karbonátolvadékos változat alapfolyamatai a következők: az anódon:



a katódon:



Tisztán H_2 -vel működő elemre a



bruttó egyenlet írható fel.

(2) alapján látható, hogy az átalakult karbonátionok pótlására a katódpárhoz még bizonyos mennyiségű CO_2 -t kell keverni.

Az elem mintegy 720°C -os működési hőmérsékletén az átlépési polarizáció nagy áramsűrűségek esetén is kicsi. A fő kapcsolószükség-csökkentő tényező a rezisztív (ohmos) feszültségesés, amely az elektrolit alkalmazási módjával van összefüggésben. A MgO -os pépesítés a Na_2CO_3 - LiCO_3 eutektikum vezetőképességét mintegy felére csökkenti. Az elemi egység optimálisra vékonyításával — ami a kényes technológia folytán igen nagy nehézségekkel jár — lehetőség van e kérdésben egy kompromisszumos, elfogadható érték beállítására.

A nagyhőmérsékletű elemrendszer egy másik típusa az ún. szilárd elektrolitos típus. Az elem elektrolitja stabilizált ZrO_2 (fémoxidokkal módosulatváltozás-mentessé tett anyag), szintén igen nagy, $1000 \dots 1100^\circ\text{C}$ körüli működési hőmérséklettel. A szilárd elektrolit legfőbb előnye az, hogy nem korrozív, azonkívül katódgázához nem kell kiegészítő gázkomponenst keverni, ami a karbonátolvadékos elem elektrolitjának legfontosabb invarianciafeltétele. Az elem működése szempontjából lényeges, hogy elektronoknak nem szabad részt venniük az áramvezetésben, mert akkor belső zárlat lép fel [4].

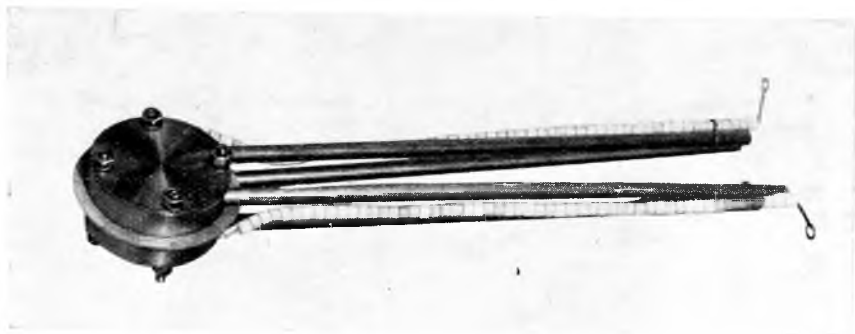
A szilárd elektrolitos tüzelőanyagelem kutatása a karbonátolvadékoshoz hasonlóan szintén előrehaladott állapotban van. Elsősorban az USA-ban, ahol pl. a Westinghouse Electric Co. dolgozik jelenleg is igen nagyszabású kísérleti programon: 1973-ig MW nagyságrendű egység létrehozása szerepel a célkitűzésekben. A General Electric Research Laboratory szintén jelentős programon dolgozik, kompaund jellegű berendezést fejleszt ki [5].

5. A nagyhőmérsékletű elemrendszer VKI-ban megvalósított változatai

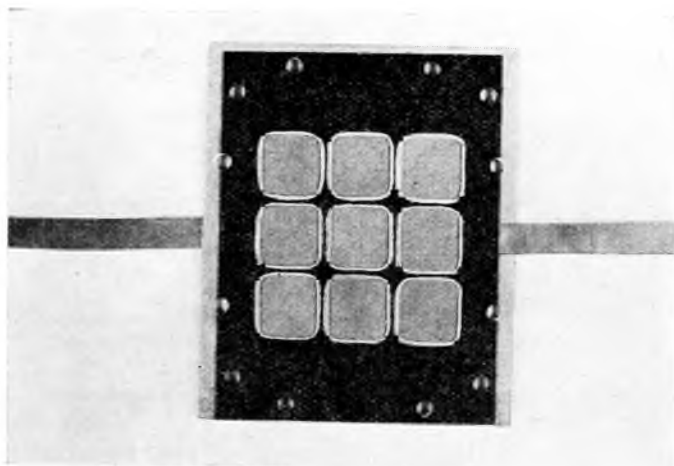
Előkísérletek után 1966-ban először ún. nyitott levegőterű, 18 cm^2 felületű működő elemet állítottunk elő. Az elem kivezetései és az áramszedő gyűrűk betétei ezüstből, a szigetelések csillám alapú (a VKI-ben kifejlesztett) különleges szigetelőanyagokból készültek. A szerkezet üzemanyag-ellátásához külön program során szénhidrogén-

bontó berendezést hoztunk létre. A kísérletek alapanyagául n-butánt választottunk. A termikus reformálás során nyert 65% H₂-t és 27% CO-t (CH₄=1,5; CO₂=6; egyéb=0,5%) tartalmazó gázelegy alkalmasnak bizonyult a kísérleti tüzelőanyag-elemek táplálására [6].

A Vasipari Kutató Intézetben kidolgozott korrózióálló ötvözet mint befoglaló szerkezeti elem segítségével további kísérleti változatok születtek. Elkészült a mindkét oldalon zárt rendszerű kivitel is (17-1. ábra). A nagyhőmérsékletű, karbonát-



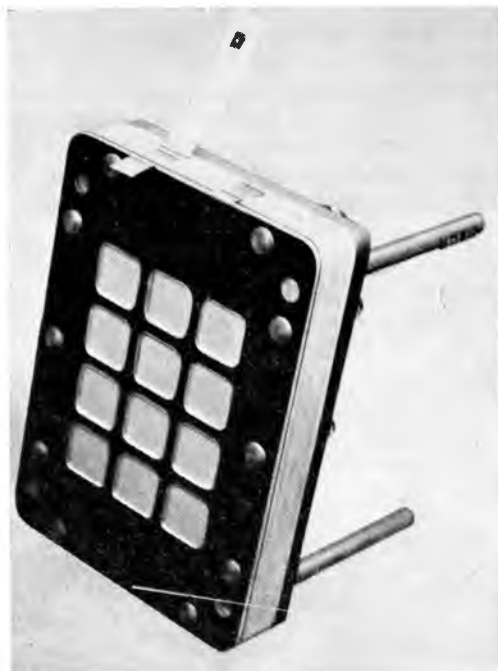
17-1. ábra. Mindkét oldalán zárt rendszerű elemi egység



17-2. ábra. Síkban multiplifikált 3×3-as modul

olvadékos cellaegység a katódoldalon levegő- és széndioxid táplálást kapott; a be- és kimeneti gázösszetételeket konverziómeghatározás céljából alkalmas berendezéssel szabályoztuk, ill. detektáltuk.

1969-től kezdve a 18 cm²-es alapegység különféle multiplifikált változatait vizsgáltuk. A 18 cm²-es, egymással párhuzamosan elhelyezett, soros gázbeömlésű, kör keresztmetszetű elemcsoport vizsgálatai kielégítő eredményeket adtak, mind terhelhetőségi, mind élettartam-jellemzők szempontjából (150 mW/cm², 300 h fölötti élettartamokra vonatkozóan). A multiplifikálási szempontból előnyösebbnek mondható elrendezések vizsgálata során először 3×3-s (17-2. ábra), majd többsoros 3×4-es modulokat építettünk (17-3. ábra) négyzetelemekből.



17-3. ábra. Síkban multiplikált 3×4 -es modul



17-4. ábra. Kiállításon bemutatott tüzelőanyagelem

Celláinkat a fejlesztés során több alkalommal nyilvános fórumokon is bemutattuk, egyes esetekben működés közben is (17-4. és 17-5. ábrák).

Az ötsíkos modul villamosan soros üzemben kb. 3,7 V kapcsolófeszültség mellett mintegy 40 W-ot teljesít. Az üzemanyag városi gáz, vagy F gáz (40% H₂ tartalmú gáz, Egyesült Izzó Rt. terméke), a levegőoldalon levegő-CO₂ betáplálással. Az üzemanyag-elosztás 1 modulon belül a szigetelőlemezek (17-1. és 17-6. ábra), ill. az elektrodkivezetések helyzete szerint soros vagy párhuzamos lehet. Az elrendezés ilyen formájú kombinációs lehetősége optimális hatásfokú elemcsoport kikísérletezésére ad lehetőséget.

Mintegy 40 db modul segítségével vegyes villamos kapcsolással 48 V kapcsolófeszültségű, 1 kW névleges teljesítményű, túlterhelhető rendszert építettünk 1971 folyamán. Az egység hőegyensúlyát szénhidrogénfűtésű kályharendszer biztosítja. Ez a változat elvileg a termékgázok még éghető részének hasznosítására is lehetőséget nyújt. Mindez értelemszerűen jelentős hatásfoknövekedést jelent a korábbi típusokhoz képest (17-7. ábra).

6. Speciális villamos vizsgálatok a kutatás során

A tüzelőanyagelem-kutatás megfelelő szintű művelése nagyszámú speciális elektrokémiai vizsgálatot tesz szükségessé. A VKI-ban folyó munkálatok során ezt a szempontot a legelső időktől kezdve figyelemmel kísértük. A legfontosabb vizsgálóberendezéseket folyamatosan megterveztük, ill. kivitelezteztük.

Az adott villamos terheléseknél fennálló rezisztív (ohmos) és polarizációs jellegű feszültségesések elkülönített vizsgálatára egyedi mérőberendezést fejlesztettünk ki. A berendezés továbbfejlesztésével lehetségessé vált az elektrodokon külön-külön lejátszódó tranzienis folyamatok tanulmányozása is [7].

Az elektródtérfelek elkülönített potenciál- és áramviszonyainak felderítésére alkalmas az ún. tüzelőanyag-elem félcellavizsgáló [8]. A berendezés kivonatos blokkvázlata látható a 17-8. és 17-9. ábrán.

Más berendezések, mint pl. az élettartammérő, konverziós hatásfokmérő, a multiplifikált egység feszültségszabályozója stb. szintén elmaradhatatlan láncszemei a sikeres kutatásnak.

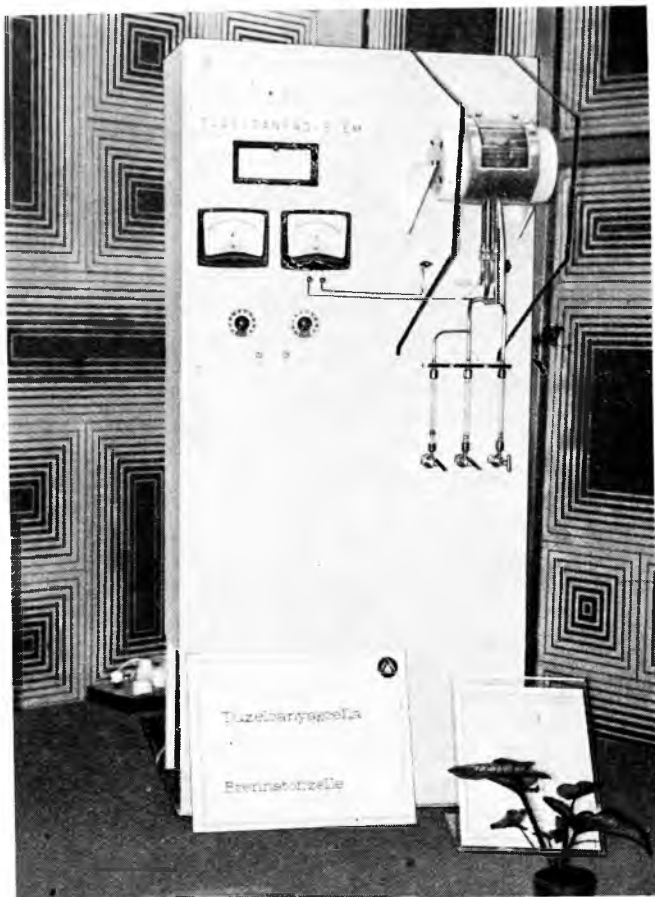
7. Összefoglalás

A nagyhőmérsékletű tüzelőanyagelem-rendszer kutatása világszerte jelentős erővel folyik. Az elemfajta az alkalmazási jellegtől függően igen széles teljesítménytartományban (kW—MW) alkalmasnak látszik különféle áramigények kielégítésére.

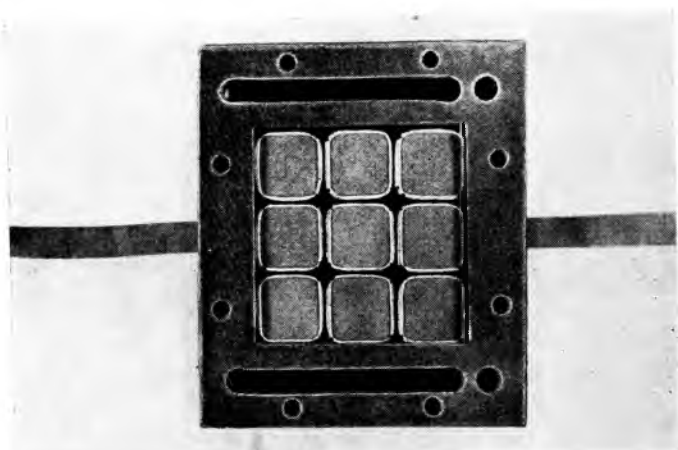
Felhasználását egyrészt a hagyományos villamosenergia-előállítási módhoz képest várható hatásfoktöbblet (kb. 20%), másrészt a légszennyezés csökkentett mértéke indokolja. A költségtényezők összesítése 10 kW nagyságrendben mobilis üzemben is megtakarításokat mutathat a hagyományos, folyékony szénhidrogénes, robbanómotoros üzem költségeihez viszonyítva.

Stabil üzemben a helyhez kötött, telepített (hálózattal nem rendelkező) kisebb teljesítményű áramigények, valamint a nagyteljesítményű (MW) egységek gazdaságossága jobb lehet a jelenlegi energiaelőállítási módokhoz képest.

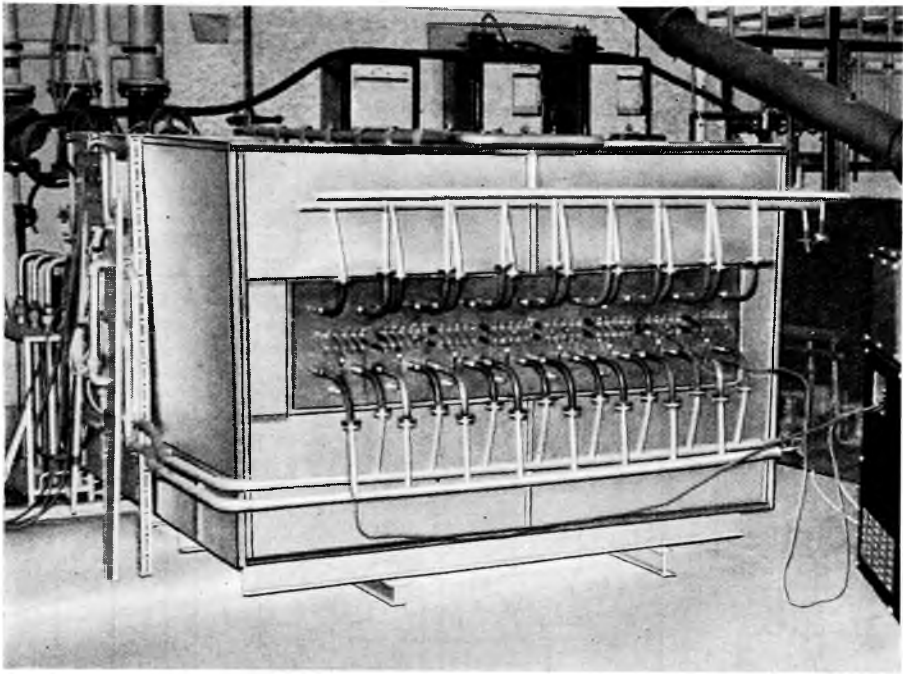
A nagyhőmérsékletű elemrendszer kevésbé nemes katalizátoranyag-igénye jelenleg alapvető gazdaságossági előnyt jelent a kis hőmérsékletű rendszerekkel szemben.



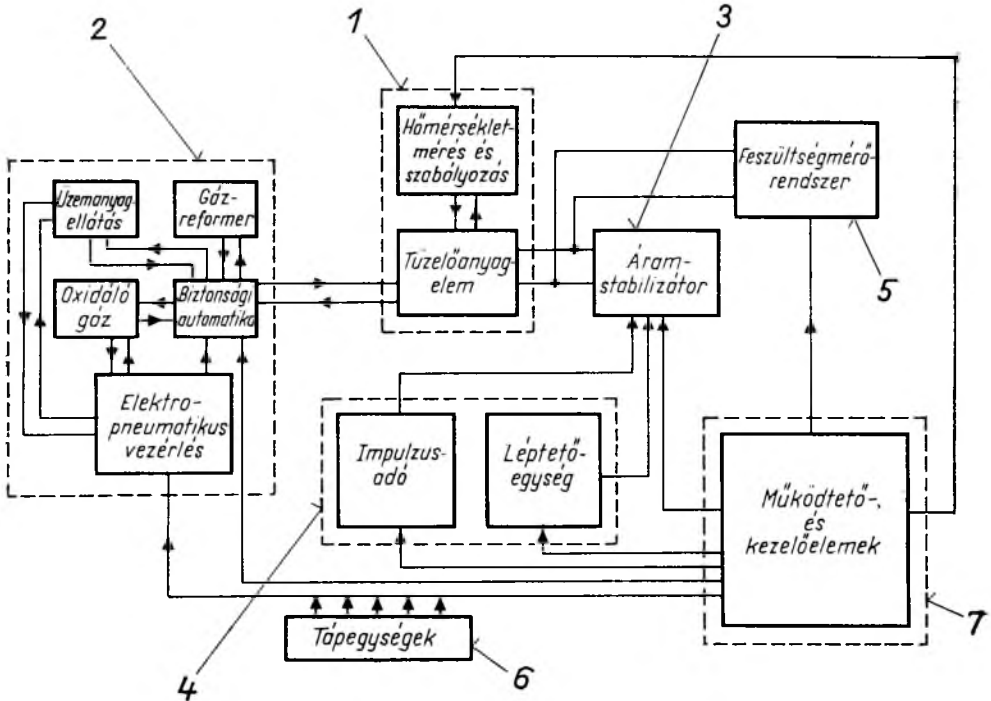
17-5. ábra. Kiállításon bemutatott tüzelőanyagelem



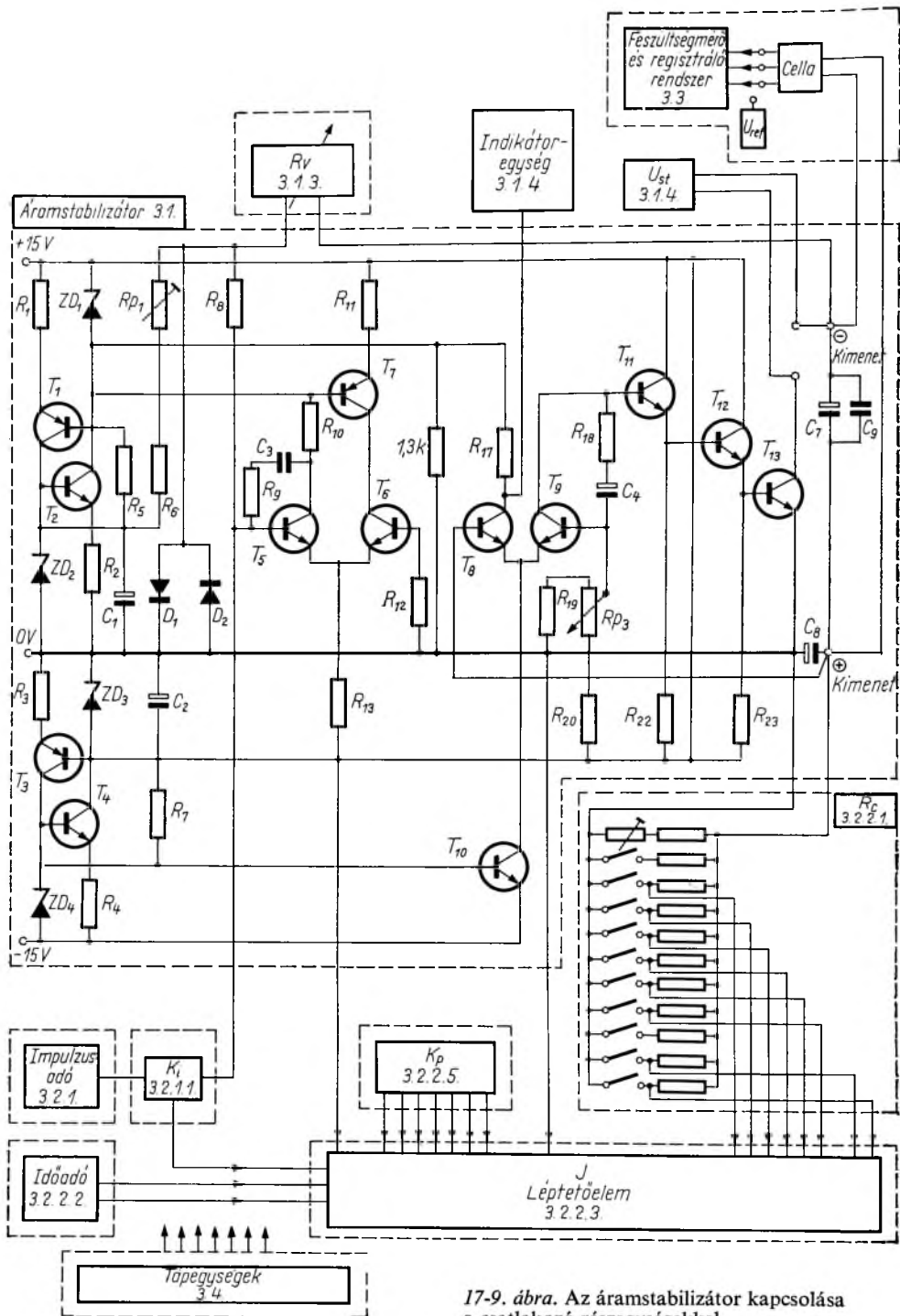
17-6. ábra. Multiplikált egység



17-7. ábra. 1 kW-os működő elemrendszer



17-8. ábra. A tüzelőanyag-elem félcellavizsgáló blokkvázlata



17-9. ábra. Az áramstabilizátor kapcsolása a csatlakozó részegységekkel

Hazai viszonylatban a kutatás és fejlesztés — lehetőségeinkhez képest — jelentős erővel folyik; szervezett, központi program keretében. A program megvalósítója a Villamosipari Kutató Intézet, a kapcsolódó feladatok végrehajtásában nagyszámú vállalat és intézmény kooperáció keretében vesz részt. Az 1971. évben 1 kW-os, karbonátolvadékos, H₂-CO-üzemű, 720 °C-os üzemhőmérsékletű elemrendszert valósítottunk meg.

Irodalom

- [1] *Schulze, K. H.—Rhoda, R. K.*: Direct Energy Conversion. Energy International (1970. jan.).
- [2] *Liebhaftsky—Cairns*: Fuel Cells and fuel batteries. John Wiley and Sons, Inc. New-York (1968).
- [3] *Krajcsovics F.*: A tüzelőanyagelem-kutatás helyzete és egyes műszaki-gazdaság kérdései. Magyar Kémikusok Lapja 7 (1970).
- [4] *Clow, C. G.*: 20 Journées intern. D'Etude des Piles à Combustible. Bruxelles 89 (1967).
- [5] *Dr. Rédey L.*: Tüzelőanyag-elemek. Műszaki Kiadó. Bp. 1970.
- [6] *Dr. Simó T.*: A villamos energia közvetlen előállítás. VKI Közlemények 3. (1969) 437—445. old.
- [7] *Hun F.*: Tüzelőanyagcellák polarizációs tranzienseinek vizsgálata. Diplomaterv. Bp. 1970.
- [8] *Gerzsenyi Gy.*: Célműszer tüzelőanyag-elemek állandó áramok melletti időbeli feszültségváltozásainak mérésére. (Tüzelőanyagelem félcellavizsgáló). Diplomaterv. Bp. 1970.

18.

Az alumínium-levegő féltüzelőanyag-elem fejlesztése és alkalmazási vizsgálatai

FÉZLER GYULA—MOLNÁR ANIKÓ

ÖSSZEFOGLALÁS

Az alumínium mint a cink helyettesítésére alkalmas galván elem elektróda. Az alumínium spontán (meddő) oldódása, ennek mérvadó tényezői, a spontán oldódás visszaszorításának lehetőségei és ezek értékelése. Az alumínium-elem gyakorlati megvalósítása. Felhasználási lehetőségek, kísérletek az alkalmazás céljára.

РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПРИМЕНИМОСТИ ПОЛУТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА АЛЮМИНИЙ-ВОЗДУХ

Д. Фезлер—А. Молнар

Резюме

Алюминий, как электрод гальванического элемента пригоден для того, чтобы заменить цинк. Спонтанное (паразитное) растворение алюминия, нормативные факторы растворения, возможности ослабления растворения и их оценка. Практическое осуществление алюминиевого элемента. Возможности применения, опыты проводимые с целью подтверждения применимости на практике.

ENTWICKLUNG UND ANWENDUNGSTECHNISCHE PRÜFUNGEN DER „ALUMINIUM-LUFT“ HALBBRENNSTOFFZELLE

Gy. Fézler—A. Molnár

Zusammenfassung

Das Aluminium, als eine zur Substitution des Zinkes geeignete Elektrode in Primärzellen. Spontane (blinde) Lösung des Aluminiums, Möglichkeiten der Beschränkung der spontanen Lösung und deren Auswertung. Praktische Ausführung des Aluminium-Elementes. Anwendungsmöglichkeiten, Versuche für die Anwendung.

DEVELOPMENT AND APPLICATION TESTS OF ALUMINIUM-AIR SEMI-FUEL CELLS

Gy. Fézler—Miss A. Molnár

Summary

Aluminium as a primary-cell electrode as a substitute for zinc. Spontaneous dissolution of aluminium, factors influencing this process, possibilities of limiting spontaneous dissolution and evaluation of the various methods used for this purpose. Practical implementation of the principle of aluminium cells. Possible applications and experiments performed for their introduction.

1. Bevezetés

A kémiai energia villamos energiává való átalakításának megoldása az elektrokémia fontos gyakorlati területe, amely magába foglalja egyrészt a galvánelemek, másrészt a tüzelőanyag-elemek problematikáját. A probléma nem újkeletű, azonban a gyakorlati követelmények miatt a műszaki, technológiai változások szükségessége révén ismételten felvetődik.

A kémiai áramforrások közül a legelterjedtebbek azok a galván- (primer) elemek, amelyek negatív elektródja cink, tekintve, hogy ez a fém rendelkezik mindazon tulajdonságokkal, amelyek elsődlegesen biztosítják alkalmazásának feltételeit:

- a) nagy hidrogénleválási túlfeszültség,
- b) negatív egyensúlyi potenciál,
- c) nagy kémiai ellenállás,
- d) anódpasszivitásra való csekély hajlam.

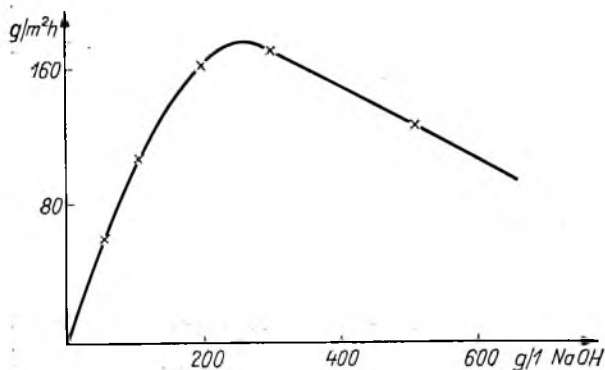
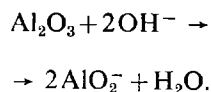
A cink más fémmel való helyettesítésére számos publikáció utal, és itt az alumínium is számításba jön. Egyensúlyi potenciálja negatívabb, mint a cinké ($Zn/Zn^{++} E_{25^\circ}^0 = -0,763$ V, $Al/Al^{3+} E_{25^\circ}^0 = -1,66$ V), egyenértékűsülya pedig kb. 3,5-szer kisebb a cinkénél. (Egyenértékűsúly Zn 32,65; Al 9.)

Az alumínium galvánanódként való alkalmazása azonban még máig is megoldatlan kérdés, ami az anódpasszivitásra és az önkisülésre való hajlamával magyarázható. Mivel a gyakorlati alkalmazásban fontos működési élettartam egyik legfontosabb meghatározója az alumínium elektróda spontán (meddő) oldódása, a következőkben ezt a kérdést vesszük először figyelembe. A részleges megoldás olyan külső paraméterek befolyásolásával érhető el, mint az elektrolitösszetétel, adalékanyagok, anódösszetétel, áramsűrűség. A továbbiakban — bár nem a teljesség igényével — e paraméterekkel foglalkozunk.

2. Az alumínium spontán oldódása. Az elektrolit hatása

Az alumínium anódos oldódásakor negatív differenciáleffektus lép fel, amely a fém hidrogéndepolarizációval történő spontán oldódására utal. Ennek a spontán oldódásnak a meggátlása rendkívül fontos az alumínium anód gyakorlati alkalmazása tekintetében.

Lúgos elektrolitok esetén a fémen kialakuló védőfilm — oxidréteg — nem mutat korrózióval szembeni ellenállást, hanem a következő reakcióegyenlet szerint oldódik:



18-1. ábra. Alumíniumon kialakuló védőfilm oldódása a lúgkoncentráció függvényében

A folyamat sebessége az oldat lúgkoncentrációjától függ. Ahogy az a 18-1. ábrából kitűnik, a görbe maximumon halad át, amely NaOH esetében 200...300 g/l lúgkoncentrációnál van [1].

Az alumínium potenciáljának változását vizsgálva a lúgkoncentráció függvényében (l. 18-1. táblázat), híg oldatokban a Nernst-törvény érvényes. Olyan lúg-oldatokban, amelyekben az alumínium oldódása gyors, a potenciál negatív irányban eltolódik, ami viszont további oldódási sebesség növekedést idéz elő, és a Nernst-törvény korlátozott érvényessége is megszűnik.

18-1. táblázat

Alumínium potenciálváltozása a légkoncentráció függvényében

NaOH koncentráció, %	E_{Al} , V
2,5	-1,73
5	-1,80
10	-1,92
15	-1,94

A spontán oldódás meggátlásának egyik módja az elektrolit Al_2O_3 -dal való telítése. A következő, 18-2. táblázatból kitűnik, hogy az oldódási sebesség az Al_2O_3 koncentráció növelésével arányosan csökken [2]. Ugyancsak oldódáscsökkentő hatása van lúgos elektrolitban a $K_2Cr_2O_7$, $(NH_4)_2CrO_4$ -nak.

18-2. táblázat

Alumínium oldódási sebességének változása az Al_2O_3 koncentráció függvényében

NaOH, g/l	Al_2O_3 , g/l	Oldódási sebesség, g/m ² h
565	100	125
	200	90
	300	35
406	100	90
	200	60
	300	30

Nem elhanyagolható kérdés azonban, hogy ilyen adalékok alkalmazásával az elektród polarizációs sajátosságai hogyan változnak. 10 mA/cm² áramsűrűségeknél az alumínium potenciáljának eltolódása 0,1...0,2 V 10 mólos KOH-ban 16% Al_2O_3 tartalomnál, és a polarizáció meredeken megugrik már 4...5 mA/cm²-nél 24% Al_2O_3 tartalmú 10 mólos KOH-ban.

2.1 Korróziós inhibitorok hatása

Organikus inhibitorok alkalmazása a spontán oldódás visszaszorításában rendkívül effektívnek bizonyul, azonban az általuk kialakított védőréteg a belső ellenállás növelésével hátrányos lehet. Nem ionos felületaktív vegyületek, mint a parahidroxii-

difenil-polietilénoxid olyan módon fejt ki inhibíciós hatást a hidrogén-túlfeszültség növelésével, hogy emellett a cella hatásfokát nem rontja. Egyes szerzők a Hyamin inhibitor javasolják a spontán oldódás visszaszorítására, amelynek hatására nem következik be jelentős mértékű anódos polarizáció és áramsűrűség-csökkenés [3].

2.2 Az anód összetételének hatása

További megoldás lehet az alumínium alapú ötvözetek alkalmazása elektródként. Ötvözés folytán tulajdonképpen egy keverékelektrodát hozunk létre. Az ötvözőanyag és az alapfém aránya azonban oly kicsi (Sn esetében pl. 0,02...0,5% Sn), hogy az a standardpotenciál eltolódását pozitív irányban gyakorlati szempontból kismértékben befolyásolja, ugyanakkor a spontán oldódás sebességét jelentősen csökkenti [4].

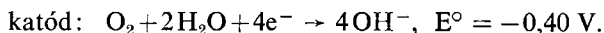
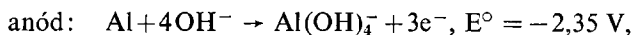
Hasonló eredményről számolhatunk be, ha galvanikusan Sn^{2+} ionokat juttatunk az elektrolitoldatba. Az alumínium elektródra az ón kicementálódik, jól definiált réteget alkot és az alapfém oldódási sebessége ez esetben kb. ötödére csökken. Ismeretes az a tény, hogy a spontán oldódás a fém tisztaságával csökken. Alumínium esetében pl. a 4×9 -es és az 5×9 tisztaságú fém spontán oldódási sebességei 6n KOH-ban 25°C hőmérsékleten $5,4 \text{ mg/cm}^2 \text{ h}$, ill. $3,4 \text{ mg/cm}^2 \text{ h}$.

2.3 Az áramsűrűség hatása

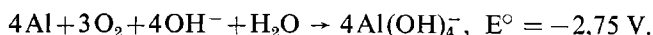
Az áramsűrűség növelése ugyancsak nem egyértelmű eredményt ad, bár a spontán oldódás csökkenése bekövetkezik, de a polarizációs viszonyok változása a működő elem szempontjából hátrányos lehet.

3. Az alumínium—levegő elem működési elve

Az alumínium—levegő primer elemek működése a következő reakciókon alapul, ha lúgos elektrolitot használnak:



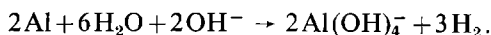
Bruttó reakció:



Elektrolitregeneráció:



továbbá az áramtermelés szempontjából meddő reakció:



A közvetlen elektródreakciókat vizsgálva az elem felfogható úgy is, mint fél tüzelőanyag-elem, amelyben a tüzelőanyag maga az elektródfém.

A katód folyamatot biztosító elektródok nagyfelületű, porózus szénelektrodok (ún. légzőelektrodok), amelyek egyik oldalon a levegővel, másik oldalon az elektrolitoldattal érintkeznek. Működésüket két alapvető folyamat határozza meg — a transzportjelenségek a gázoldalon és folyadékoldalon, valamint a kinetikus folyamatok. Ezek eredője adja az elektród hatékonyságát. A kinetikus folyamatok javítása céljá-

ból az elektródot aktiválási procedúrának vetik alá (pl.: katalizátorral impregnálják). A transzportfolyamatok intenzifikálása az elektród struktúrájával, porozitásával befolyásolható.

A porozitás növelése bizonyos határig az aktivitás növekedésével jár, az optimum kb. 50%-os porozitásnál van.

A pórusméretek hatását vizsgálva megállapítható, hogy a szokásos esetben, ha az elektród fajlagos felülete fordítottan arányos a pórusátmérővel, az elektrokémiai aktivitás a pórusátmérő négyzetgyökével arányos, amikor a pórusmérettel a gáznyomás változik.

Az elektród működését vizsgálva három zóna különböztethető meg. A gázoldali zóna, ahol a gázáramlás és diffúzió a jellemző, az aktív zóna, ahol a szilárd—folyadék—gáz fázis van jelen — ez a tulajdonképpeni elektrokémiai reakció zónája — és az inaktív, de a reakciótermék transzportja szempontjából lényeges zóna.

Az elektród működése tekintetében káros jelenség az elárasztódás, a pórusok elektrolittal való feltöltődése, amely szélső esetben teljes keresztmetszetben létrejöhet. Ennek a jelenségnek meggátlását célozza az elektród hidrofóbizálása. Az eljárás másik pozitívuma, hogy ezáltal az elektród vastagsága csökkenthető.

Az elmondottakat összegezve tehát, ahhoz, hogy az oxigén redukciója megfelelő sebességgel menjen végbe, a légzőelektróddal szemben felállított követelmények: nagy felület, hidrofóbítás, optimális porozitás, elektrokémiai aktivitás, mechanikai szilárdság.

Az alumínium elektróddal szemben felmerülő követelmények: biztosítani kell a fém oldódásának elektrokémiai folyamat révén történő lejátszódását, és az önkisülés visszaszorítását. Az erre vonatkozó lehetőségeket az előző fejezetben részletesen ismertettük.

4. Az elektrolit jellege, minősége

Az alumínium—levegő elemekben gyakorlatban KOH elektrolitot használnak. Ennek oka abban keresendő, hogy az oxigén katódos redukciója nagyságrendekkel nagyobb lúgos közegben, mint savasban vagy semlegesben. Az elektród katalizátorigénye kisebb, és nincs szükség nemesfém katalizátorokra. Savas elektrolithoz majdnem kizárólagosan platina katalizátort használnak, míg lúgos elektrolithoz az ezüst is kiváló.

Ami a lúgdodat koncentrációját illeti, a vezetőképesség szempontjából optimális értéket célszerű kiválasztani a cella belső ellenállásának minimalizálása érdekében. Azonkívül nem elhanyagolható a szerkezeti anyaggal szemben támasztott igények kielégítésének problémája, amely lúgos elektrolitnál nem jelent nehézséget.

5. Az alumínium elemek gyakorlati megvalósítása

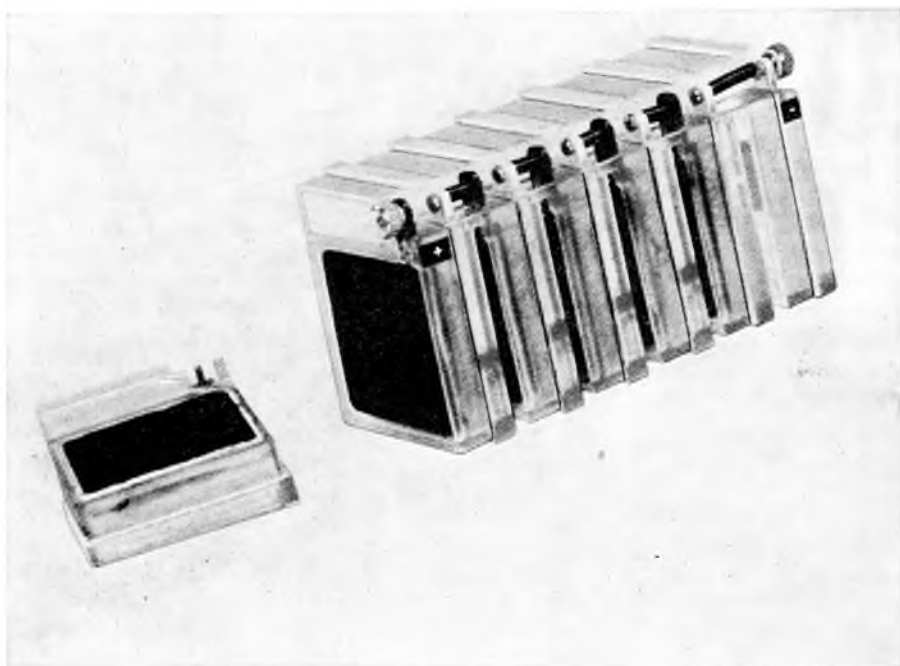
Miután körvonalaztuk az elem összetevőinek jellemzőit, az elektródok működési sajátosságait, nézzük meg egy működő cella paramétereit. Az elem elméleti elektromotoros ereje a nyugalmi elektródpotenciálok különbsége

$$EME = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \rightarrow 2,75 \text{ V,}$$

amely a gyakorlatban 1,8 V-ra csökken az irreverzibilis folyamatok miatt.

Egy kísérleti cella felépítése a 18-2. ábrán látható. Ugyanitt mutatunk be egy telepet, 5 db sorba kapcsolt cellából. Az elektród—elektrolit tartó szerkezeti anyaga: plexiüveg. Jellemzői:

az elektrolit térfogata (egyedi cella)	30 cm ³ ,
az anód látszólagos felülete	10 cm ² ,
a katód látszólagos felülete	20 cm ² ,
az elektródok távolsága	11 mm,
az anód vastagsága	2,5 mm.



18-2. ábra. Kísérleti Al—levegő cella

A cellából kapott villamos energia 18 Wh. Működésének stabil szakaszában 300 mA-es terhelés mellett 1,2...1,3 V kapcsolófeszültséget képes produkálni. Üzemen kívüli helyzetében elektrolitot nem tartalmaz, így nagy előnye, hogy károsodás nélkül bármeddig tárolható. Elvileg folyamatosan vagy szakaszosan üzemeltethető, ez konstrukciótól függő tényező. A biztonságos működés hőmérséklet-tartománya 10...40 °C.

6. Felhasználás

Ami az elem alkalmazási lehetőségeit illeti, alapvető tulajdonságaiból kell kiindulni. Ezek a sajátságok: gyors üzembehelyezhetőség, viszonylag rövid élettartam, korlátlan idejű tárolhatóság, nélkülözhető vagy minimális karbantartás, biztonságos üzemelés, és nem utolsósorban a hordozhatóság, mobil alkalmazás. Ennek alapján

alkalmazható a lakosság körében, a távközlés, a vasútbiztosítás, egyéb biztonsági és jelzőberendezések, valamint a honvédelem területén.

Ha kialakul olyan gyártástechnológia, amellyel a jelenlegi kialakítású elemek előállításának költségei kisebbek lesznek a helyettesítendő energiaforrások költségeinél, akkor versenyképességük kétségtelenné válik.

A lakosság számára elsősorban a hordozható háztartási eszközök energiaellátása terén jön számításba, mint pl. hűtőszekrény, kávédaráló üzemeltetése, camping-világítás energiabázisa, hordozható magnetofon, lemezjátszó működtetése stb.

Nem illuzórikus gondolat a nagyobb teljesítményű egységek létrehozása, amelyek energiatermelése kW-os nagyságrendű, hiszen ezen az úton a kezdeti lépéseket megtettük már 1971 folyamán. E feladat sikeres megoldásával alkalmazása a járműhajtás területén is számításba jöhet.

Irodalom

- [1] *Kuzmina, A. V.—Kuzmin L. L.*: Zsurn. Prikl. Khim. 2 (1963) 356. old.
- [2] *Kerti J.*: Magyar Kémiai Folyóirat 70 (1964) 305. old.
- [3] *Zaromb, S.*: Journal of Electrochemical Soc. 109 (1962) 1125. old.
- [4] *Jasinski, R.*: High-Energy Batteries. New York. 56 (1967).

VILLAMOS KÉSZÜLÉK FŐOSZTÁLY

19.

Kombinált kioldadási jelleggörbéjű áramkorlátozó olvadóbiztosítók

DR. MOCSÁRY JÓZSEF

ÖSSZEFOGLALÁS

Az Intézet Villamos Készülék Főosztályán 500 V névleges feszültségre, 10...1250 A névleges áramerősségre kidolgozott ún. kombinált (lomha—gyors) kioldadási jelleggörbéjű biztosítók egyesítik magukban a gyors és késleltetett kioldadási jelleggörbéjű biztosítók összes előnyét. A biztosítók megfelelnek a legújabb nemzetközi és hazai szabványelőírásoknak; megszakítóképesességük a nemzetközi szintnek megfelelően: 100 kA_{err}.

A 630 A-nél nagyobb névleges áramerősségű biztosítók a védelmi technikában a biztosítás védelem további kiterjesztését és gazdaságos megoldások létrehozását teszik lehetővé.

ПЛАВКИЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛИ С КОМБИНИРОВАННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ СРАБАТЫВАНИЯ

Д-р. Й. Мочари

Резюме

В главном отделе электрических устройств Института были разработаны предохранители с так называемой комбинированной кривой срабатывания (ускоренного-замедленного действия) на номинальное напряжение 500 вт и номинальные токи 10...1250 а. Эти предохранители объединяют в себе все выгоды предохранителей замедленного и ускоренного действия и таким образом их применением могут быть использованы все выгоды, которыми обладают предохранители быстросрабатывающие и предохранители с замедленной характеристикой срабатывания в отдельности. Предохранители соответствуют новейшим международным и отечественным стандартам, их способность размыкания соответственно международному уровню не ниже 100 ка действ.

Предохранители с рабочим током превышающим 630 а в области техники защиты дают возможность расширения защиты предохранителями на новые области, а также дают возможность создания экономически выгодных речений.

NH — SICHERUNGSEINSÄTZE MIT TRÄGFLINKEN (KOMBINIERTEN) STROM—ZEIT-KENNLINIEN

Dr. J. Mocsáry

Zusammenfassung

Die im Forschungsinstitut der Elektroindustrie, Budapest ausgearbeiteten Niederspannungs-Hochleistungs (NH)-Sicherungen Type NOLG (Nennspannung: 500 V; Nennströme: 10...1250 A) mit trägflinken (kombinierten) Strom—Zeit-Kennlinien vereinigen in sich alle Vorteile der trägen und flinken NH-Sicherungen. Durch ihre Anwendung können sämtliche Vorteile ausgenutzt werden, die die trägen bzw. flinken Sicherungen einzeln besitzen.

Die Sicherungen entsprechen den internationalen (IEC)-Empfehlungen, den VDE und ungarischen MSz-Normvorschriften, besitzen ein grosses Strombegrenzungs- und Abschaltvermögen; ihr Abschaltvermögen — dem internationalen Niveau entsprechend — $100 \text{ kA}_{\text{eff}}$, bei 500 V, bzw. 550 V.

Die Sicherungen von Nennströmen über 630 A ermöglichen die Erweiterung der Verwendung von NH-Sicherungen in der Schutztechnik und bieten auch im Nennstrombereich von 630 bis 1250 A eine billige und wirtschaftliche Lösung.

CURRENT — LIMITING FUSES WITH COMBINED TIME-CURRENT CHARACTERISTICS

Dr. J. Mocsáry

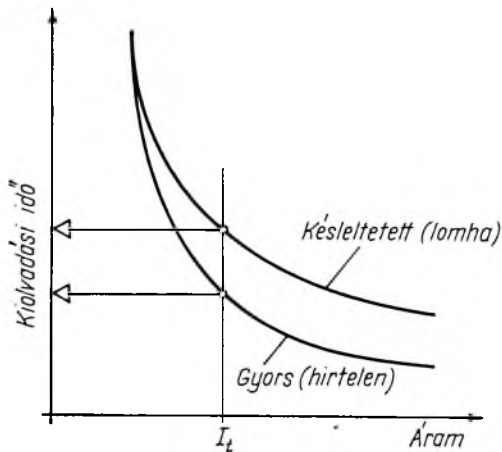
Summary

By the fuses of combined (delayed/quick-action) melting characteristics, developed at the Switchgear-Department of the Institute, for rated current 10 to 1250 amp. all the favourable features of delayed and quick-acting fuses are combined, i. e. the advantages provided separately by fuses having delayed and quick-action melting characteristics can be realized. These fuses comply with the specifications of the latest International, German and Hungarian Standards; their rupturing capacity, in correspondance with the international level, is 100 kA r. m. s.

Fuse ratings above 630 amp permit further extension of the applicability of fused protections with consequent economy.

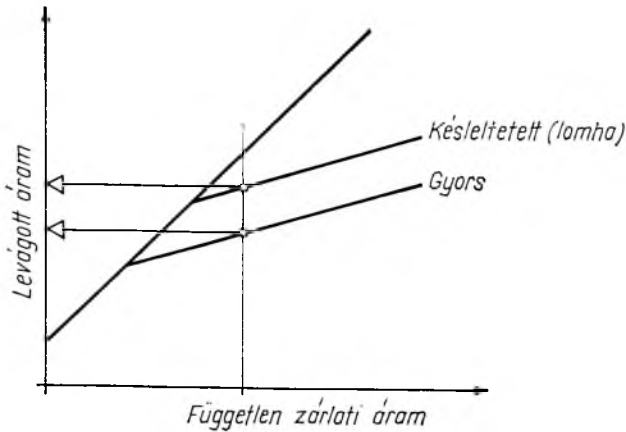
1. Gyors és késleltetett (lomha) működésű biztosítók összehasonlítása

Az áramkorlátozó olvadóbiztosítókat kioldadási jelleg szempontjából két fő csoportra szokás osztani: a gyors (*hirtelen*) és késleltetett (*lomha*) kioldadási idő—áram jelleggörbéjű biztosítókra. A két jelleggörbe közötti lényeges különbség az, hogy az azonos névleges áramerősségű késleltetett kioldadási jelleggörbéjű olvadóbetét azonos értékű túlterhelési áram (I_t) hatására a gyors jelleggörbéjűhöz viszonyítva lényegesen hosszabb idő alatt olvad ki (19-1. ábra).



19-1. ábra. Gyors (hirtelen) és késleltetett (lomha) működésű olvadóbiztosítók kioldadási idő—áram jelleggörbéi

Ismeretes, hogy a késleltetett olvadóbetétek esetében a lomhább (késleltetettebb) működést a gyors betétekéhez képest nagymértékben *túlméretezett olvadóelem*, az olvadóelem anyagára helyezett agresszív rátét (pl. fém vagy fémtövezet) teszi lehetővé. A lomha biztosítók olvadóelemei tehát a gyorsakéhoz képest nagyobb keresztmetszetűek, azokhoz képest lényegében túlméretezettek, azért a kis túlárámok tartományában úgy viselkednek, mintha nagyobb névleges áramerősségű olvadóbetétek lennének. Ezek a biztosítók azonban nemcsak a kis értékű túlárámok tartományában működnek „lomhábban”, hanem a nagyobb

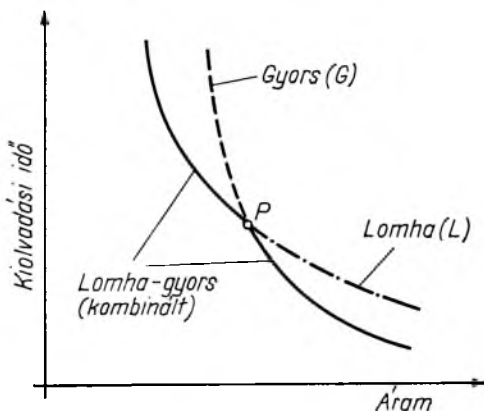


19-2. ábra. Gyors és késleltetett működésű olvadóbiztosítók áramkorlátozó képessége

értékű túláramoknál és zárlatoknál is, és ezért az utóbbi esetben a független zárlati áramból is lényegesen nagyobb áramot (levágott áram vagy tényleges megszakítási áram) engednek kifejlődni, mint az azonos névleges áramerősségű gyors betétek (19-2. ábra). Ez utóbbi azt jelenti, hogy a lomha betétek áramkorlátozó képessége a gyorsakénál lényegesen kisebb és ily módon az általuk védett berendezések *termikus és dinamikus igénybevétele* nagyobb.

2. Lomha—gyors (kombinált) kioldási jelleggörbéjű biztosítók kidolgozásának indokai

Bizonyos esetekben a fogyasztók jellege olyan, hogy a bekapcsolás nagy áramlökéssel jár (pl. villamos motorok indításakor a névleges áramerősség többszöröse) és üzemszerűen is előfordulnak túlterhelések. A villamos berendezések, ill. berendezési tárgyak nagy részénél ezért a védelmet úgy kell kialakítani, hogy a bekapcsolási áramlökések hatására ne működjön és üzemszerű túlterhelés esetén is csak akkor szakítsa meg az áramkört, ha a túlterhelés következtében a berendezésben fellépő melegedés megközelíti vagy eléri a megengedett hőmérsékletet.



19-3. ábra. Lomha—gyors (kombinált) működésű olvadóbiztosító kioldási idő—áram jelleggörbéje

Minthogy a védett berendezésekben a túlterheléseken kívül zárlatok is felléphetnek, ezért a védőszköznek egyben zárlat esetén olyan gyorsan kell működnie, hogy a zárlati áram okozta hő- és dinamikus igénybevételek, ill. az ezek következtében létrejövő sérülések minél kisebbek legyenek.

A korszerű kisfeszültségű, nagy megszakítóképeségű áramkorlátozó olvadó biztosítókkal szemben támasztott követelmények tökéletes kielégítése újfajta olvadóelem-konstrukció kidolgozását tette szükségessé. Ez az olvadóelem-konstrukció tette lehetővé a teljes áramtartományban biztos működést eredményező ún. „általános célú biztosító” (general purpose fuse) létrehozását [1], amely mind a késleltetett, mind a gyors kioldású olvadóbiztosítókkal szemben támasztott követelményeket kielégíti, azaz amelynek

gozását tette szükségessé. Ez az olvadóelem-konstrukció tette lehetővé a teljes áramtartományban biztos működést eredményező ún. „általános célú biztosító” (general purpose fuse) létrehozását [1], amely mind a késleltetett, mind a gyors kioldású olvadóbiztosítókkal szemben támasztott követelményeket kielégíti, azaz amelynek

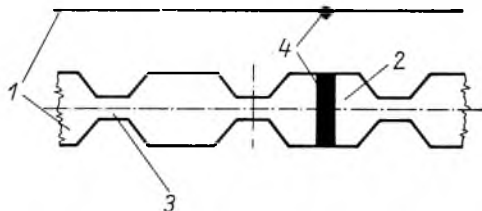
kiolvadási idő—áram jelleggörbéje a kis túlterhelések tartományában a késleltetett kiolvadási jellegű biztosító, a zárlati áramok tartományában pedig a gyors kiolvadási jellegű biztosító jelleggörbéjének felel meg (*lomha—gyors* vagy más néven *kombinált jelleggörbe*), amint azt a 19-3. ábra szemlélteti,

3. Lomha—gyors (kombinált) kiolvadási jelleggörbéjű biztosítók szerkezeti kialakítása; idő—áram jelleggörbe

Kutatási munkáink során már a korábbiakban felismertük azt a tényt, hogy az *általános célú biztosítónak* az egymással ellentmondó követelményeket kompromiszumos módon kielégítő, többszörös megszakítást megvalósító olvadóelem-konstrukcióval kell rendelkeznie [1]. Ez az olvadószál-szerkezet — a korábbi, ismert olvadóelem-konstrukciókkal szemben — módot ad az olvadóelem olyan mértékű lerövidítésére (olvadószál-hossz csökkenés), amely biztosítja, hogy a megszakítási folyamat során keletkező túlfeszültség a szabványokban megengedett érték alatt maradjon, ugyanakkor a *többszörös megszakítás* következtében, az ívöltési viszonyok nagymértékű megjavulása folytán, igen *nagy megszakítóképeség* elérését is lehetővé teszi. A csökkentett keresztmetszetű és változatlan olvadóelemrészek hosszának megfelelő kialakításával, az osztás sűrűségének és a keresztmetszetarányok helyes megválasztásával a túláramok tartományában is biztosítani tudjuk a rövid ívidejű megszakítást, ami egyenértékű azzal, hogy a csökkentett keresztmetszetű részek helyén — a rövid ívidő következtében — az ív helyén keletkezett olvadékcatorna túlhevülését megakadályozzuk.

A biztosítók működésének részleteit illetően utalunk a külföldi szakirodalomban megjelent néhány alapvető munkára [2], [3], [4], [5], továbbá korábbi tanulmányainkra [1], [6], [7], [8], [9].

Az 19-4. ábrán az Intézetben kidolgozott lomha—gyors kiolvadási jelleggörbéjű, általános célú olvadóbiztosító vörösréz- vagy ezüstből 2 legnagyobb és 3 csökkentett (legkisebb) keresztmetszetű részekkel készült, 1 lapos olvadóelemét tüntettük fel, amely a 2 legnagyobb és 3 legkisebb keresztmetszetű szakasza közötti részén folyamatosan változó kialakítású. Az általános célú biztosító kombinált jelleggörbéje lomha szakaszának megvalósítására az olvadóelem legnagyobb keresztmetszetű részeinek egyikére erősen agresszív, meghatározott százalékos mennyiségben indiumot is tartalmazó 4 diffúziós rátétfém-ötvözetet helyezünk.



19-4. ábra. Lomha—gyors kiolvadási jelleggörbéjű olvadóbiztosító olvadóeleme

A lomha—gyors (kombinált) kiolvadási idő—áram jelleggörbét a lomha és a gyors jelleggörbéjű biztosítók jelleggörbéinek kombinációja adja (innen az elnevezés: kombinált jelleggörbe). A kombinált jelleggörbe lomha szakaszának megvalósítását (a 19-3. ábra L görbéjének P pontig terjedő felső része) a 19-4. ábrán bemutatott olvadóelem legalább egy nagyobb keresztmetszetű 2 részére felhelyezett erősen agresszív, indiumot is tartalmazó 4 diffúziós rátétfém-ötvözet hatása biztosítja. Kis túlterhelések esetén az indiumtartalom miatt megnövelt agresszivitású diffúziós rátétfém az olvadószálba diffundál, vele nagy villamos ellenállású ötvözetet

képez, ami — a diffúziót tovább gyorsító hőképződéssel — végül is ezen a helyen az olvadóelem kiolvadásához vezet. A 4 rátétfém indiumtartalma nagymértékben befolyásolja az azonos keresztmetszetű, azonos árammal terhelt olvadóelemrész kiolvadási idejét, ami másképpen kifejezve azt is jelenti, hogy adott keresztmetszetű olvadóelem névleges áramerőssége a rátétfém-ötvözet indiumtartalmával változtatható. Ilyen módon a kombinált jelleggörbéjű biztosító lomha szakaszának kiképzésére, ill. annak bizonyos határok közötti szabályozására van lehetőség.

A kombinált jelleggörbe gyors szakaszt (a 19-3. ábra G jelleggörbéjének a P ponttól lefelé eső része) az I olvadóelem csökkentett keresztmetszetű 3 részei határozzák meg. Vizsgálati eredményeink tanúsága szerint a jelleggörbe gyors szakasza a lomha szakaszhoz képest akkor kellőképpen gyors, ha az olvadóelem nagyobb és kisebb (csökkentett) keresztmetszetű részeinek keresztmetszet-aránya legalább 2,5, továbbá a csökkentett (kisebb) keresztmetszetű részek összes hossza az olvadóelem teljes hosszának legalább 15%-a [10].

Kísérleteink bizonyítják azt is, hogy a kombinált jelleggörbéjű biztosító lomha szakaszt létrehozó olvadóelemrész keresztmetszetének változatlanul tartása mellett, a keresztmetszatarány, továbbá a nagyobb és a csökkentett keresztmetszetű olvadóelem-szakaszok hosszának a megfelelő határok közötti változtatásával a gyors jelleggörberész a lomha szakaszhoz képest bizonyos mértékben eltolható. Ugyanigy a lomha szakasz az adott gyors jelleggörberészt eredményező olvadóelem-kiképzés változatlanul hagyása mellett, a rátétfém-ötvözet indiumtartalmának változtatásával, a gyors jelleggörberészhez képest bizonyos mértékben eltolható. Ily módon pl. adott gyors jelleggörberészű különböző névleges áramerősségű, kombinált kiolvadási jelleggörbéjű biztosítókhöz, ill. a másik esetben adott névleges áramerősségű, azonos lomha és különböző gyors kiolvadási jelleggörbéjű szakasszal rendelkező kombinált kiolvadási jelleggörbéjű biztosítókhöz jutunk.

4. Kutatási eredmények

A kutatási feladat megoldását jelentette a lomha—gyors kiolvadási jelleggörbéjű olvadóbiztosítók *olvadóelem-konstrukciójának*, a speciális összetételű diffúziós rátétfémötvözetnek és — a kutatási eredmények felhasználásával — a *NOLG-típusú kombinált kiolvadási jelleggörbéjű olvadóbiztosítók* igen széles skálájának kidolgozása.

4.1 Kidolgozott típusok

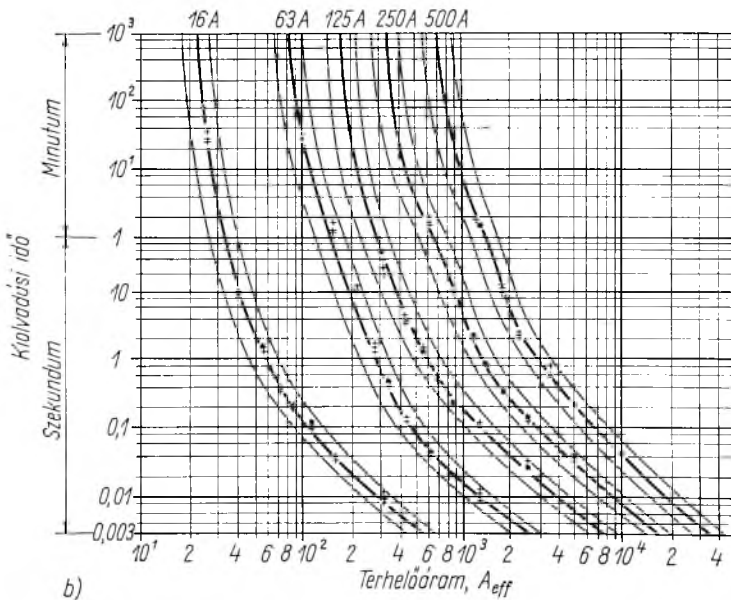
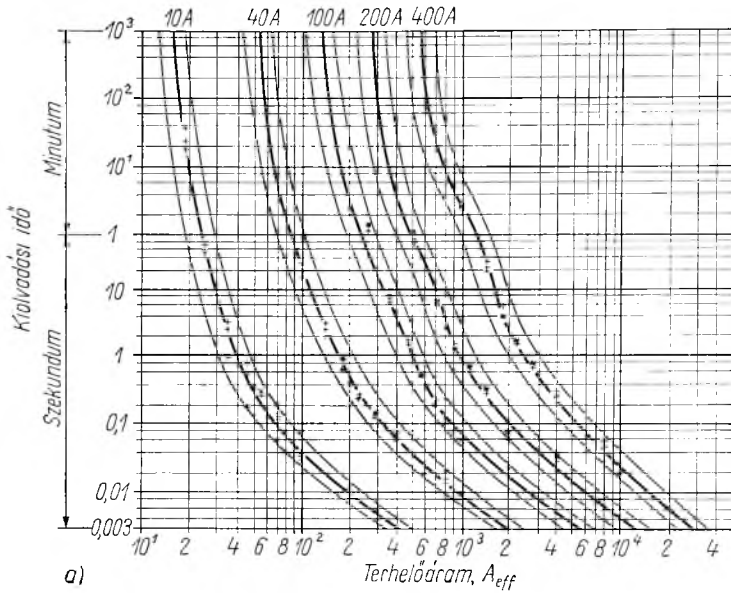
Intézetünk az alábbi típusokat dolgozta ki:

Típus	Áramerősség, A
4.11 NOLG I...III	10...630
4.12 NOLG IV	800—1000—1250
4.13 NOLG 0	10...160
4.14 NOLG 00	10...125.

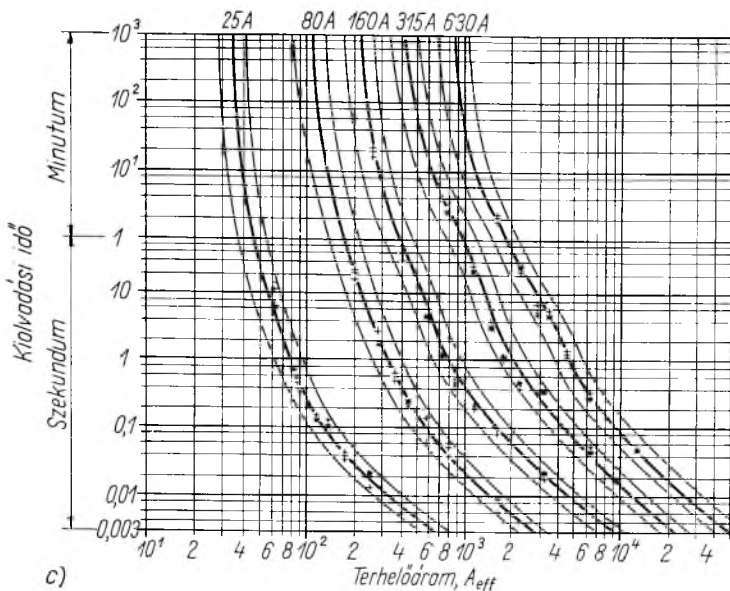
Folyamatban van a „veszteségszegény” VNOLG 0 és VNOLG 00 típusú olvadóbetétek kidolgozása. E típusok wattvesztesége — a tervek szerint — névleges árammal terhelve, állandósult állapotban a normál NOLG-típusok veszteségének csupán kb. 60...70%-át teszi majd ki.

4.2 Kiolvadási idő—áram jelleggörbék

A NOLG típusú 10...630 A névleges áramerősségű olvadóbetétek kiolvadási idő—áram jelleggörbéit és szórási sávjait a 19-5. ábra tartalmazza. A jelleggörbékben a kb. 10...50 ms-nál hosszabb kiolvadási idők a *valóságos (tényleges) kiolvadási időt*, az ennél rövidebb idők pedig az ún. *virtuális kiolvadási időt* jelentik.



19-5a és b ábra



19-5. ábra. NOLG-típusú, 10...630 A névleges áramerősségű olvadóbetétek kiolvadási idő—áram jelleggörbéi és szórási sávjai

Virtuális kiolvadási időn a biztosítóbetét *kiolvadási Joule-integrálja* és a *független szimmetrikus megszakítási áram* négyzetének hányadosát értjük. Az egészen rövid (néhány ms nagyságú) kiolvadási idők esetén azért nem a tényleges (valóságos) kiolvadási időt adják meg, mert annak nagysága nagymértékben függ a bekapcsolási pillanattól (szimmetrikus zárlati áram esetén a kiolvadási idő lényegesen rövidebb, mint aszimmetrikus zárlati áram esetében).

4.3 Megszakítóképesség

A megszakítóképességre vonatkozó vizsgálatokat részben az Intézet zárlati laboratóriumában, részben a csehszlovákiai bechovicei zárlati laboratóriumban a biztosítók névleges feszültsége 110%-ának megfelelő feszültséggel (550 V), egyfázisú kapcsolásban hajtottuk végre. A vizsgálatok során az MSZ 1584/1—69 [11], az IEC Publication 269—1/1968 [12] és a VDE 0660 Teil 4/12.70 [13] előírásait vettük figyelembe. A biztosítók *névleges megszakítóképességének* vizsgálatát (1. vizsgálati feladat) — a vonatkozó szabványok előírásainak figyelembevételével — úgy végeztük el, hogy minden egyes biztosítófajta vizsgálata során az ívelés egy kapcsolásnál 40...65, két kapcsolásnál pedig 65...90 villamos fokkal a feszültség természetes nullaátmenete után kezdődött. Minden egyes sikeres vizsgálat során az áram megszakítása után a visszatérő feszültséget a biztosítóbetétek sarkain a szabványokban előírt ideig (az 1. vizsgálati feladat esetében pl. 15 s-ig) fenntartottuk.

Az elvégzett zárlati megszakítóképesség-vizsgálatok tanúsága szerint a 4.11, 4.12 és 4.13 alatti NOLG típusú betétek megszakítóképessége — a nemzetközi szín-

vonálnak megfelelően — $100 \text{ kA}_{\text{eff}}$. A 4.14 alatti NOLG 00 típusú betétek zárlati megszakítóképességét a saját zárlati laboratóriumunkban rendelkezésre álló $45 \text{ kA}_{\text{eff}}$ független zárlati áramú körben vizsgáltuk. A betétek megszakítóképessége — a vizsgálatok tanúsága szerint — feltehetően a vizsgálati értéknél jóval nagyobb, de már ez az érték is kielégíti mind a bel-, mind a külföldi felhasználói igényeket, így egyelőre ennél nagyobb teljesítményű vizsgálatok elvégzésére nincs szükség. A VNOLG 0 és 00 típusú betétek megszakítóképesség-vizsgálatainak elvégzésére, a kutatási munka befejező fázisaként, előreláthatólag 1972. év utolsó negyedében, ill. 1973. első felében kerül sor.

A NOLG típusú biztosítók kedvező megszakítási tulajdonságait bizonyítja a 19-6. ábrán bemutatott összeállítás, amelyben a NOLG típusú, lomha—gyors és

Névleges áramerősség A	S-NOL 0	NOLG 0	S-NOL I.	NOLG I.	S-NOL II.	NOLG II.	S-NOL III.	NOLG III.	NOLG IV.
10									
16									
20	50		100						
25									
40									
50									
63		100		100	100				
80									
100									
125									
160									
200									
250						100	100		
315									
400								100	
500							80		
630									
800									
1000									100
1250									

19-6. ábra. NOLG-típusú, lomha—gyors és S-NOL típusú késleltetett kiolvadási jelleggörbéjű biztosítók megszakítóképességének összehasonlítása

a korábban kidolgozott és jelenleg is gyártásban levő S—NOL típusú, késleltetett kiolvadási jelleggörbéjű biztosítóbetétek megszakítóképességeit hasonlítottuk össze. Az ábrából látható, hogy míg pl. a S—NOL 0 típusú biztosítók csak 100 A névleges áramerősséig készülnek a 0 méretű tokozatban és megszakítóképességük csak $50 \text{ kA}_{\text{eff}}$, ugyanakkor a NOLG 0 típusú betétek 10...160 A névleges áramtartományban készülnek és megszakítóképességük $100 \text{ kA}_{\text{eff}}$. Az eredmény mind a névleges áramerősség felső határát, mind a megszakítóképességet illetően szembetűnő. A kontraszt különösen akkor nagy, ha az összehasonlítást tovább folytatva megállapítjuk, hogy az S—NOL I-típusú biztosítóbetéteknek az eggyel nagyobb méret-nagyságú tokozatban is csupán 40 A névleges áramerősséig bezárólag van $100 \text{ kA}_{\text{eff}}$

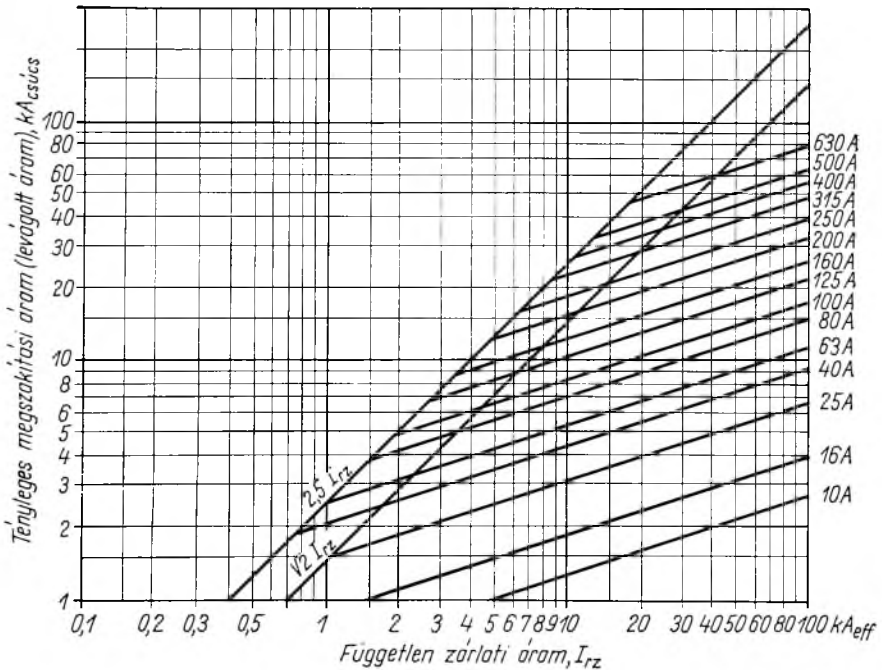
megszakítóképessége. Az eredmény további alátámasztására az egyes típusok szembeállítását tovább folytathatnók, de ez az ábrából egyértelműen kitűnik.

A NOLG IV típusú 800, 1000, 1250 A névleges áramerősségű biztosítótételek kidolgozása és 100 kA_{eff} megszakítóképessége nemzetközi viszonylatban is jelentős eredmény, különösen annak ismeretében, hogy a legjobb ismert külföldi cégek is legfeljebb 1000 A névleges áramerősségig bezárólag készítik a hasonló típusokat.

4.4 Áramkorlátozó képesség

Az áramkorlátozó biztosítók egyik leglényegesebb tulajdonsága — amint a nevében is benne van — az áram korlátozása, amely azért nagyon fontos, mert az ilyen biztosítókkal védett villamos berendezések termikus és dinamikus szilárdsága a megszakítóval védettekéhez viszonyítva lényegesen kisebb lehet, ami a műszaki előnyökön kívül számottevő gazdasági előnyt is jelent. A villamos berendezések termikus igénybevételre való méretezésekor az áramkorlátozó hatáson túlmenően figyelembe kell venni a biztosító működési Joule-integrálját is (l. 4.5. pont).

Az áramkorlátozó olvadóbiztosítók *áramkorlátozó-képességét* jellemző jelleggörbéket nevezik *áramkorlátozási vagy védelmi jelleggörbéknek*, amelyek a *levágott áramok*, vagy másképpen *tényleges megszakítási áramok* legnagyobb értékeit ábrázolják a biztosítók beépítése helyén fellépő *független zárlati áram* függvényében. A 19-7. ábra a NOLG típusú, 10...630 A névleges áramerősségű biztosítók túl-áram- és zárlatbiztosági vizsgálatai eredményeinek felhasználásával készült áramkorlátozási jelleggörbéket tartalmazza.



19-7. ábra. NOLG-típusú, 10...630 A névleges áramerősségű, kombinált kioldási jelleggörbéjű olvadótételek áramkorlátozó képessége (áramkorlátozási jelleggörbék)

4.5 Joule-integrál (I^2t)

A *Joule-integrál* vagy *termikus hatásintegrál* a villamos berendezésen és annak egyes elemein, így a biztosítón is átfolyó áram négyzetének idő szerinti integrálja egy bizonyos időtartamra.

A Joule-integrál értékét a biztosító kiolvadási és működési idejére szokták megadni. A kiolvadási időre vonatkozó I^2t érték a *kiolvadási Joule-integrál*, a működési időre számított I^2t érték pedig a *működési Joule-integrál*.

A működési Joule-integrál értéke az előbbiek szerint:

$$I^2t = \int_0^t i^2 dt,$$

ahol I^2t a működési Joule-integrál szimboluma (az elektrotechnikai gyakorlatban általában I_{th} -val szokás jelölni);

i a biztosítón átfolyó áram pillanatértéke;

t a biztosító működési ideje (kiolvadási idő + ívidő).

A biztosítók működési Joule-integrálja a biztosítókkal védett berendezésekben a működési idő alatt keletkezett *hőenergiára* jellemző, ezért annak ismerete a védett berendezések *termikus igénybevétele* szempontjából fontos. A működési Joule-integrált a legáltalánosabban a biztosítók zárlati áramok hatására való működése esetére szokták megadni.

A szabványok az I^2t értékek megadását egyelőre még kötelezően nem írják elő, de minthogy a törekvés világszerte az, hogy a védelem helyes kialakításához és a berendezések méretezéséhez a felhasználók számára minél több műszaki jellemző adat álljon rendelkezésre, az elkövetkezendő időkbén a vizsgálatoknak arra kell irányulniuk, hogy a lehetőségekhez mérten az I^2t értékek is ugyanúgy megadhatók legyenek, mint pl. a kiolvadási vagy az áramkorlátozási jelleggörbék.

19-1. táblázat

Működési I^2t értékek
($10^6 A^2s$)

Névleges áramerősség, A	NOLG			S-NOL	
	I	II	III	II	III
125	0,32			0,58	
160	0,42			0,84	
200	0,71			1,20	
315		2,3			5,3
400			6,4		7,7
500			7,04		

A 19-1. táblázatban összehasonlításképpen a S—NOL és NOLG biztosítók néhány típusára adtuk meg a működési I^2t értékeket, a bechovicei próbaállomáson 550 V feszültségen, 100 kA_{eff} független zárlati áramkörben elvégzett vizsgálatok eredményei alapján. (A megadott számadatok a mért legnagyobb I^2t értéket jelentik.) A táblázatból látható, hogy az azonos névleges áramerősségű NOLG típusú biztosítóbetétek működési I^2t értékei lényegesen kisebbek a S—NOL betétekénél, ami azt jelenti, hogy a NOLG típusú betétekkel védett berendezések termikus igénybevétele is lényegesen kisebb.

5. Lomha—gyors biztosítók felhasználási területe

— A NOLG típusú biztosítóbetétek mindenütt felhasználhatók, ahol a berendezések védelme gyors, ill. késleltetett kiolvadási jelleggörbéjű és nagy áramkorlátozó képességű, nagy megszakítóképeségű olvadóbiztosítók felhasználását követeli meg.

— A lomha—gyors biztosítók áramkorlátozó képessége lényegesen nagyobb, működési Joule-integrálja pedig lényegesen kisebb, mint a késleltetett jelleggörbéjű olvadóbetéteké. Így a velük védett berendezések termikus és dinamikus igénybevétele kisebb, ami a berendezések kisebb igénybevételre való méretezését, a megvalósításnál pedig jelentős anyagi megtakarítást tesz lehetővé.

— A 800, 1000, 1250 A névleges áramerősségű biztosítók a védelmi technikában a biztosítás védelem további kiterjesztését és gazdaságos megoldások létrehozását teszik lehetővé.

— Előnyösen alkalmazhatók a NOLG típusú biztosítók kis megszakítóképeségű kapcsolókészülékekkel (pl. terheléskapcsolók, megszakítók stb.) kombinálva, a kapcsolókészülék megszakítóképeségének növelése érdekében. A lomha—gyors kiolvadási idő—áram jelleggörbéjű biztosítók ebben az esetben a kapcsolókészülék megszakítóképeségénél kisebb áramok tartományában kiolvadás nélkül megengedik a kapcsolókészülék működését és annak kihasználását. A kapcsolókészülék megszakítóképeségénél nagyobb zárlati áramok tartományában viszont a helyesen megválasztott biztosítók a kapcsolókészüléknel (pl. megszakítónál) lényegesen gyorsabban működnek és így a nagy zárlati áramokat is képesek megszakítani. Így az ilyen kombinált megoldással az egyébként kis megszakítóképeségű kapcsolókészülék megszakítóképesége nagymértékben megnövelhető. Az ilyen kombinált megoldás az igen költséges nagy megszakítóképeségű megszakítók helyettesítését és olcsó védelmi megoldás alkalmazását teszi lehetővé.

— A jelenleg kidolgozás alatt levő VNOLG 0 és VNOLG 00 típusú, ún. *vesztésszegény biztosítóbetétek* sorozatgyártásának megindulása után elterjedésük, az egyéb biztosítóbetétek wattvesztéséhez képest jelentős mértékben csökkent veszteségük következtében, a felhasználóknál jelentős villamosenergia-megtakarítást eredményez majd, amely országos szinten több tízmillió Ft-ra becsülhető.

A NOLG típusú biztosítóbetéteket a *Villamos Berendezés és Készülék Művek (VBKM) Világítástechnikai Gyára* évi több száz ezres darabot kitevő mennyiségben gyártja. A biztosítóbetétek kb. 50%-a belföldi felhasználásra, további 50%-a pedig exportra; az exporthányad nagyobbik fele tőkés exportra kerül.

6. Összefoglalás

Az 500 V névleges feszültségre kidolgozott, NOLG-típusú biztosítók kiolvadási idő—áram jelleggörbéje a túláramok tartományában lomha, a zárlati áramok tartományában gyors; így a biztosítóbetétek egyesítik magukban a gyors és késleltetett kiolvadási jelleggörbéjű olvadóbiztosítók összes előnyös tulajdonságát. Erre való tekintettel a lomha—gyors (kombinált) kiolvadási jelleggörbéjű biztosítók mindenütt használhatók, ahol a villamos berendezések védelme lomha, ill. gyors olvadóbetétek alkalmazását követeli meg.

A biztosítók külföldi zárlati laboratóriumban (Bechovice — Csehszlovákia) elvégzett vizsgálatokkal bizonyított $100 \text{ kA}_{\text{eff}}$ megszakítóképesége megfelel a nemzetközi színvonalnak. A teljes biztosítósorozat minden tekintetben kielégíti a korszerű nemzetközi és hazai szabványelőírásokat.

A 800, 1000, 1250 A névleges áramerősségű biztosítók kidolgozása nemzetközi viszonylatban is jelentős eredmény, mert a legjobb ismert külföldi cégek is csak 1000 A névleges áramerősségig bezárólag készítik a hasonló típusokat. A 630 A-nél nagyobb névleges áramerősségű biztosítók a védelmi technikában a biztosítós védelem további kiterjesztését és gazdaságos megoldások létrehozását teszik lehetővé.

A biztosítókat a Villamos Berendezés és Készülék Művek (VBKM) Világítás-technikai Gyára többszázszoros nagyságú sorozatban gyártja.

Irodalom

- [1] *Dr. Mocsáry J.*: Áramkorlátozó olvadóbiztosítók olvadószál-konstrukcióinak összehasonlítása. Villamosipari Kutató Intézet Közleményei **3** (1969), 341—348. old.
- [2] *Baxter, H. W.*: Electric Fuses. Edward Arnold and Co. London, 1950.
- [3] *Baxter, H. W.*: The effect of opening a circuit by a fuse (Factors disclosed by fundamental research). The BEAMA Journal, August 1955, p. 135—138.
- [4] *Gibson, J. W.*: The high-rupturing-capacity cartridge fuse, with special reference to short circuit performance. Journal of the IEE, Vol. 88., Part II. (1941), p. 2—40.
- [5] *Lohausen, K. A.*: Überstromunterbrechung mit strombegrenzenden Hochspannungssicherungen für Gleich- und Wechselstrom. Elektrie, **18** (1964), p. 24—29.
- [6] *Mocsáry J.*: Középfeszültségű, nagy megszakítóképeségű áramkorlátozó olvadóbiztosítók elméleti és gyakorlati kérdései. Kandidátusi értekezés. Budapest, 1961.
- [7] *Mocsáry J.—Szél Gy.*: New type low-voltage high-rupturing-capacity current-limiting fuses. Transelektro News. Autumn 1962, Number 39, p. 28—34.
- [8] *Dr. Mocsáry J.*: Schmelzleiterkonstruktionen strombegrenzender Sicherungen und ihr Verhalten bei Unterbrechung kleiner Ströme. Elektrie **19** (1965), p. 310—312.
- [9] *Dr. Mocsáry J.*: Kombinált ivoltási mód alkalmazása kiefeszültségű áramkorlátozó olvadóbiztosítóknál. Villamosipari Kutató Intézet Közleményei **1** (1966), 269—276. old.
- [10] 157.614 sz. magyar szabadalom: Kombinált kiolvadási jelleggörbéjű olvadóbiztosító (Szabadalomtulajdonos: Villamosipari Kutató Intézet; feltalálók: Dr. Mocsáry József, Szél György, Dr. Néveri István).
- [11] MSZ 1584/1-69: Késes olvadóbiztosító — Műszaki követelmények és vizsgálatok.
- [12] IEC Publication 269-1/1968: Low-voltage fuses with high breaking capacity for industrial and similar purposes. Part 1. General requirements.
- [13] VDE 0660 Teil 4/12.70: Bestimmungen für Niederspannungsschaltgeräte; Teil 4 Bestimmungen für Niederspannungs-Hochleistungs- (NH-) Sicherungen mit Nennspannungen bis 1000 V Wechselfspannung und 3000 V Gleichspannung.

20.

A kifesztültségű kontaktorok villamos élettartamát befolyásoló paraméterek helyes megválasztása

DR. NÉVERI ISTVÁN

ÖSSZEFOGLALÁS

A kontaktorok villamos élettartamának meghatározásakor általában azzal számolhatunk, hogy az érintkezők anyagfogyása a névleges áramerősséggel négyzetesen változik. Figyelembe kell azonban vennünk, hogy anyagminőségtől függően, 50...100 A között ugrásszerű változás következhet be.

Az élettartam növelése érdekében célszerű a kikapcsolási sebességet 200...500 mm/s közötti értékre választani. A kisebb sebességértékek a 4...60 A névleges áramerősségű kontaktorokra, a nagyobb sebességértékek pedig 60 A-nél nagyobb névleges áramerősségű kontaktorokra vonatkoznak. Az utóbbi készülékek számára biztosítani kell az ívtalppont hatásos mozgatását.

Az ív hatására eltávozó érintkezőanyag-mennyiség minél nagyobb mértékű visszanyerése (takarékhatas) érdekében a különféle áramerősségű érintkezők átmérőjének megválasztására optimális értékeket határoztunk meg. A takarékhatas mérésére és az okok tisztázására alkalmazott radioizotópos vizsgálatok eddigi eredményei.

ПРАВИЛЬНЫЙ ПОДБОР ПАРАМЕТРОВ ВЛИЯЮЩИХ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СРОК СЛУЖБЫ КОНТАКТОРОВ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Др. И. Невери

Резюме

При определении электрического срока службы контакторов обычно нужно считаться с тем, что расход материалов контактов изменяется пропорционально квадрату номинального тока. Однако, необходимо учесть, что соответственно качеству материала между 50 и 100 а может возникнуть скачкообразное изменение.

С целью увеличения срока службы целесообразно подобрать скорость выключения так, чтобы его величина находилась в пределах 200...500 мм/сек. Более низкие скорости относятся к контакторам с номинальными токами 4...60 а, а более высокие скорости относятся к контакторам с рабочим током превышающим 60 а. В устройствах относящихся к последней группе, необходимо обеспечить эффективное движение основной точки дуги, для чего в целью определения индукции нами предлагается метод.

С целью по возможности более эффективного «спасения» (возвращения) удаляющегося материала контактов под действием дуги были нами определены оптимальные величины для подбора диаметра контактов при различных номинальных токах. Полученные до настоящего дня результаты радиоизотопных исследований применяемых для измерения эффективности возврата и выяснения причин (удаления и возврата).

RICHTIGE AUSWAHL DER DIE ELEKTRISCHE LEBENSDAUER DER SCHÜTZE BEEINFLUSSENDEN PARAMETER

Dr. I. Néveri

Zusammenfassung

Bei der Bestimmung der elektrischen Lebensdauer der Schütze können wir im allgemeinen damit rechnen, dass sich die Materialabnahme der Kontakte mit dem Nennstrom quadratisch ändert. Aber es muss berücksichtigt werden, dass — von der Materialqualität abhängig — zwischen 50...1000 A eine sprunghafte Änderung auftreten kann.

Um die Lebensdauer zu erhöhen ist es zweckmässig, die Ausschaltgeschwindigkeit auf den Wert zwischen 200...500 mm/s zu wählen. Die kleineren Geschwindigkeitswerte beziehen sich auf die Nennstromschütze von 4...60 A, die grösseren Geschwindigkeitswerte aber auf die Nennstromschütze, die grösser als 60 A sind. Für die letzteren Geräte muss man die wirksame Bewegung des Lichtbogenfusspunktes sichern, zu der wir zu der Bestimmung der erforderlichen Induktion ein Verfahren vorschlagen.

Um die unter dem Einfluss des Lichtbogens austretende Kontaktwerkstoff-Quantität in grösserem Masse zurückzugewinnen (Sparwirkung), haben wir zur Auswahl des Durchmessers verschiedener Nennstrom-Kontakte optimale Werte bestimmt. Um die Sparwirkung zu messen und die Gründe zu klären haben wir radioisotope Prüfungen angewendet.

PROPER SELECTION OF PARAMETERS INFLUENCING THE ELECTRICAL LIFE SPAN OF LOW-VOLTAGE CONTACTORS

Dr. I. Néveri

Summary

When predicting the electrical life span of contactors the decay of contact material may generally be expected to be proportional with the square of current. It should be considered, however, that a sudden change may take place in the range of 50 to 100 amperes depending on the material of the contact.

In order to increase contact life the speed of contact separation should be selected to lie between 200 and 500 mm/s, where the lower limit is valid for contactors of 4 to 60 amp ratings and the higher speeds for contactors of ratings exceeding 60 amp. In the latter range, efficient displacement of the arc root is to be ensured, for which a method of determining the required induction is proposed.

In order to recover as much as possible from the contact material detached under the effect of the arc, optimum values for selecting the contact diameters for the various ratings have been determined. The results obtained so far by radio-isotopic tests for measuring the recovery rate and for explaining the causes of the recovery effect are discussed.

1. Bevezetés

A kisműködésű váltakozóáramú kontaktoroktól megkívánt több millió kapcsolási szám eléréséhez nagy élettartamú érintkezők alkalmazására van szükség. A jelenleg rendelkezésre álló érintkezőanyagok: színezüst és különféle összetételű ezüst alapú kompozíciók (pl. AgCdO és AgNi) általában megteremtik a kívánt nagy élettartam biztosításának elvi lehetőségét. Ahhoz azonban, hogy a gyakorlat számára is kielégítő megoldás szülessen, az élettartamot befolyásoló paraméterek ismerete és helyes megválasztásuk elengedhetetlen.

A kontaktorok villamos élettartama szempontjából a 4...600 A közé eső áramtartomány az érdekes. Ha még azt is tekintetbe vesszük, hogy a kontaktorok üzemeltetése szempontjából a leggyakoribb feladat az indukciós motorok kapcsolása (l. IEC Publ. 158—1 szabvány AC₃ jelű üzemmódra vonatkozó előírások; kikapcsolandó áramkör: $I_e; 0,17U_e, 0,35 \cos \varphi$), bizonyos mértékig csökkenthetjük a vizsgálandó paraméterek számát. Azokat a tényezőket kell vizsgálnunk, amelyek — a fentiek szerinti áramköri adatok mellett — az erősáramú ív eróziós hatásait befolyásolják. Előljáróban megjegyezzük, hogy az érintkezők pattogásával e helyen nem foglalkozunk, csak megjegyezzük, hogy tapasztalataink szerint a 2—3 ms-nál rövidebb pattogási idő biztosítása esetén a pattogásnak az élettartamra gyakorolt hatása elhanyagolható.

2. Az íváram hatása

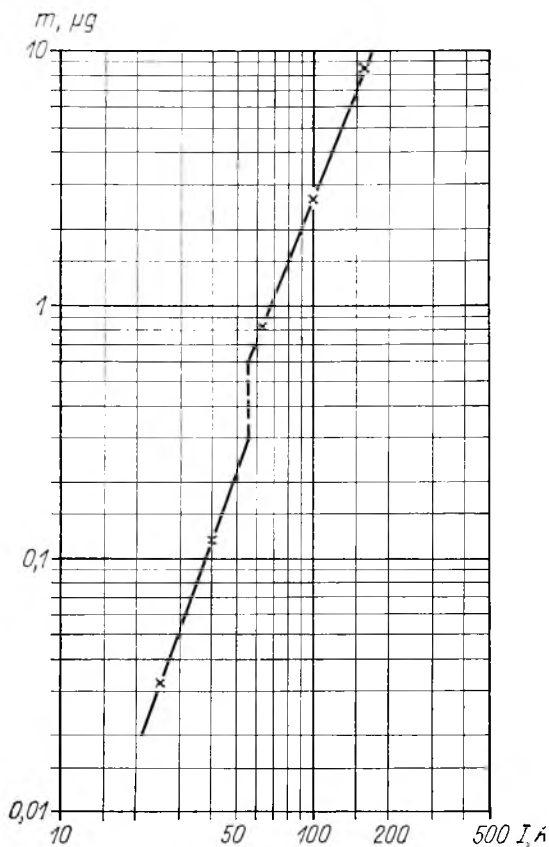
Az erősáramú érintkezők anyagfogyásának döntő részét az érintkezők között fellépő villamos ív hőhatása okozza. Az anyagfogyás fizikai folyamatainak megismeréséhez tehát az ívenergia és az ív katódján és anódján kialakuló energiaviszonyok ismerete szükséges. A számos elméleti munka és kísérleti eredmény [1], [2], [3], [4] alapján ma már — legalább minőségileg — követni tudjuk az érintkezők felületén lejátszódó folyamatok fontosabb mozzanatait. Az általunk vizsgált áramtartományokra vonatkozó ívenergia-számítások alapján megállapítottuk, hogy kis ívenergia érdekében lehetőleg kis ívfeszültségre kell törekednünk [5].

A számítási és kísérleti eredmények azt mutatják, hogy az ívenergia egyik része az érintkezőanyag elpárologtatására, másik része pedig a hőelvezetésre fordítódik. Minél nagyobb áramerősségű az ív, az ívenergiának annál nagyobb hányada jut az érintkező elpárologtatására és 1000 A felett gyakorlatilag a teljes betáplált energia az anyagfogyást segíti. Mivel a fizikai jelenségeket minden szempontból figyelembe vevő egyenletek közvetlen gyakorlati számításra ma még nem alkalmasak, számos empirikus megoldás született. Az általunk vizsgált területre vonatkozóan úgy találtuk, hogy a következő függvény a gyakorlat számára helyesen írja le a viszonyokat:

$$m = KI^n,$$

ahol m egy érintkezőpár anyagfogyásának egy kapcsolásra számított értéke, μg ;
 K a különféle hatásokat figyelembe vevő állandó, $\mu\text{g} \cdot \text{A}^{-n}$;
 I az íváram effektív értéke, A;
 n az áramerősség kitevője.

Ag és AgCdO érintkezőanyagokkal végzett igen nagyszámú vizsgálat alapján megállapítottuk, hogy az érintkezők anyagfogyása közelítőleg az áram négyzetével arányos, tehát $n=2$. A K tényező alakulását számos tényező befolyásolja: az ívenergia és az érintkezők anyaga mellett a kapcsolási sebesség, az érintkezők nyitási távolsága, az ívtalppont mozgási viszonyai és az érintkezők átmérője. Természetesen az egyes tényezők hatása összetett és egymásra is kölcsönhatást fejtenek ki. A K tényező meghatározásánál azt is figyelembe kell venni, hogy — feltehetően a párolgási és hőelvezetési veszteségek arányának különböző alakulására tekintettel — bizonyos áramerősségeknél ugrások tapasztalhatók. *Franken* [6] és *Turner* [7] ezzel kapcsolatos vizsgálatait a mi mérési eredményeink is alátámasztják. A 20-1. ábrán egy kapcsolásra vonatkoztatott anyagfogyás látható az áramerősség függvényében, színezüst érintkező esetén. Az anyagfogyás értéke 50 A környékén mutat



20-1. ábra. Ag-érintkező egy kikapcsolásra vonatkozott anyagfogyása az áramerősség függvényében

hajtott számos érintkezőélettartam-vizsgálat azonban azt mutatja, hogy a különféle sebességértékeknél nagyobb mértékű az anyagfogyás változása, mint ami az ívenergia-változással magyarázható lenne. Az eltérés mértéke függ az érintkezőanyagok minőségétől is.

A kikapcsolási sebesség hatásával kapcsolatos korábbi tanulmányaink [8, 9] összefoglalásaként a 20-2. ábrán példaként bemutatjuk a színezüst és a 90/10% összetételű ezüstkadmiumoxid érintkezők anyagfogyásának alakulását a kapcsolási sebesség függvényében. Az egyes mérési pontok 20...25 mérés átlagértékét jelentik, és az anyagfogyást egy kikapcsolásra vonatkoztatva tüntettük fel. Megfigyelhető, hogy bizonyos kapcsolási sebességnél kisebb érték esetén az anyagfogyás hirtelen megnő, különösen ezüstkadmiumoxid érintkező esetén. A görbék ilyen alakulása nem magyarázható kizárólag az ívenergia változásával, itt feltétlenül szerepet játszik az érintkezők közötti térben kialakuló nyomás és az anyagvándorlás jelensége is.

A viszonyok a 20-3. ábra alapján a következők. Ha igen kis sebességgel távolodnak az érintkezők egymástól, a 20-3a ábra szerinti kis elektródaközben nagy nyomás alakulhat ki, ami lehetővé teszi, hogy a megolvadt fémrészcskék sugár-

ugrásszerű növekedést (kb. megfelelő *Franken* mérési eredményeinek). A szakadási hely után a függvény a korábbihoz hasonló jelleggel folytatódik. Tapasztalataink szerint a szakadási helyhez tartozó áramerősség értéke gyakorlatilag független az érintkezők méretétől és a kikapcsolási sebességtől, függ azonban az érintkezők anyagától. Ezüstkadmiumoxid érintkezők esetén pl. 100 A körül lép fel ugrás. Nagyobb áramerősség-tartományokban újabb ugrásszerű változás várható. *Turner* szerint 800...1000 A táján kb. egy nagyságrendű anyagfogyásnövekedés is bekövetkezhet.

A következőkben a K értékét befolyásoló paraméterek, nevezetesen a kapcsolási sebesség, az ívtalppont mozgás és az érintkezők átmérőjének hatásait vizsgáljuk.

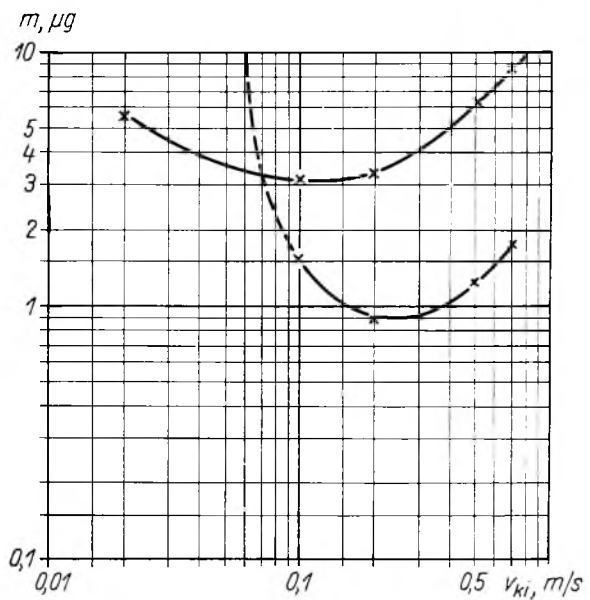
3. A kikapcsolási sebesség szerepe

Az ívenergiával kapcsolatos vizsgálatok egyértelműen mutatják, hogy a nyitási sebesség függvényében változik az ívenergia értéke is. Általában nagyobb kikapcsolási sebességhez nagyobb ívenergia tartozik. A kikapcsolási sebesség függvényében végre-

irányban eltávozzanak. Ha kicsi az érintkezők átmérője, a fémrészecskék eltávoznak az elektródaközéből, nagyobb átmérők esetén azonban lerakódhatnak az érintkezők peremén. Mivel az ezüstkadmiumoxid érintkezőkben levő kadmiumoxid szemcsék ív hatására létrejövő disszociációja során a szemcsetérfogatnál kb. 10-szer nagyobb térfogatú gáznemű anyag keletkezik, a viharos gázkiválással még fokozottabb az anyageltávozás. Ez magyarázza a 20-2. ábra 2 görbéjének kis kapcsolási sebességeknél mutatkozó hirtelen emelkedését. A 20-3b ábra szerinti érintkezőtávolságnál viszonylag kisebb nyomás alakulhat ki, és így nagyobb lehetőség van a megolvadt érintkezőrészek visszanyerésére. Ez az eset jellemző a 20-2. ábra szerinti ún. V-görbék alsó pontjaira, vagyis ez adja az optimális kikapcsolási sebességet. A 20-3c ábra már az igen nagy kikapcsolási sebességekre jellemző esetet tünteti fel, amikor az érintkezőanyagok visszanyerésére kevésbé van lehetőség, mivel a megolvadt fémrészecskék javarésze eltávozhat az elektródaközéből.

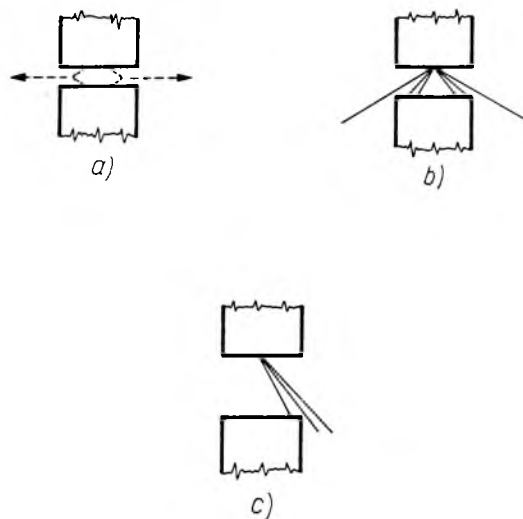
Megállapíthatjuk tehát, hogy az érintkezőanyagokra vonatkozó optimális kikapcsolási sebesség 200 mm/s körüli érték, amely azonban anyagminőségként változhat. Általában nem követünk el nagy hibát, ha a gyakorlat számára is megvalósítható 200...500 mm/s kikapcsolási sebességtartományban működtetjük a kontaktorokat.

A kapcsolási sebesség meghatározásakor figyelemmel kell lenni a választott érintkezőanyagok méretére is, amellyel kapcsolatban a következőkben teszünk javaslatot.



20-2. ábra. Ag és AgCdO 90/10% érintkezők egy kikapcsolásra vonatkoztatott anyagfogyása a kikapcsolási sebesség függvényében

Vizsgálati paraméterek: $U=65$ V; $I=160$ A; $\cos \varphi=0,35$; 1800 kapcsolás/h; $F_{\phi}=1,2$ kp; érintkezőátmérő: $d=10$ mm



20-3. ábra. Az érintkezők közötti távolság hatása az anyagfogyásra, ill. az anyagvisszanyerésre

4. Az ívtalppont mozgásának befolyása

Eddigi vizsgálataink az egy helyben maradó ún. rövid ívek esetére vonatkoztak. A kis ívenergia biztosítása is azt kívánja, hogy lehetőleg minél kisebb ívfeszültség mellett történjék a kikapcsolás. Másrészről viszont feltétlenül segíti az ívtalppontok hűtése, amit legegyszerűbben az ívtalppontoknak az érintkezők felületén történő mozgásával oldhatunk meg. Az érintkezők felületének jó kihasználása szempontjából is előnyös, ha az ívtalppont nem mindig ugyanazt a helyet veszi igénybe. Ha azonban túl gyors az ívtalppont mozgása, az érintkezőfelületek hűtőhatása nincs kellően kihasználva. Létezik tehát egy optimális sebesség, amellyel a legkedvezőbb érintkező-élettartam biztosítható. Az ívtalppont optimális mozgásához szükséges erő, ill. mágneses térerősség meghatározására a Budapesti Műszaki Egyetemen végeztek vizsgálatokat [10], [11]. Eredményeikre támaszkodva folytattuk a kutatási munkát, a különféle érintkezőanyagok hatásait is figyelembe véve [12], [13].* Legújabb eredményeinket jelen kötet 22. cikke részletesen ismerteti, *Polgár Tibor* tollából.

5. Az optimális érintkezőméret meghatározása

Az érintkezőanyagok nagy forráspontja és jó hővezető képessége csökkenti az íverózió okozta anyagfogyást. Adott érintkezőanyag esetében kiszámítható az az ívtalppont közepétől mérhető r sugár, melynél az érintkező hőmérséklete adott ívenergia esetén eléri az anyag T_0 olvadáspontját. r értékét a következő egyenletből határozzuk meg [4]:

$$T_{\text{olv}} \frac{0,5N_{\text{átl}}}{2\pi\lambda r} \operatorname{erfc} \frac{r}{2\sqrt{kt_{\text{ív}}}},$$

ahol λ az anyag hővezetési tényezője, $\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot ^\circ\text{K}^{-1}$;

k az anyag hőmérséklet-vezetési együtthatója, $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; $\left(k = \frac{\lambda}{cy}\right)$,

c az anyag hőkapacitása, $\text{Ws} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^\circ\text{K}^{-1}$;

γ az anyag fajsúlya, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$;

$t_{\text{ív}}$ az ív fennállási ideje, s;

$N_{\text{átl}}$ az ívteljesítmény átlagos értéke; fiktív érték, amely helyettesíti a váltakozóáramú ívteljesítményt, W .

A most közölt egyenlet a hővezetési differenciálegyenlet és az érintkezőanyagok párolgási sebességének egyenletei alapján vezethető le. A számítás során feltételeztük, hogy az ívtalppont mérete végtelenül kicsi az érintkező méretéhez képest, vagyis az ívtalppont pontszerű hőforrás és az érintkező egyik irányban végtelen kiterjedésűnek tekinthető test. Feltételeztük továbbá, hogy az érintkezőanyag termikus jellemzői nem változnak a hőmérséklettel, és elhanyagoltuk az ívenergiából a környező levegőbe távozó hőmennyiség értékét.

A levezetett egyenletből kiszámítható r sugár értékének tízszeresét kell venni

* *Helyreigazítás*, a szerzőnek a VKI Közlemények 2. kötetben megjelent cikkében [14] szereplő hiányosságra vonatkozóan. Az idézett Közlemények 194., 195., 196. oldalain található 15-5., 15-6. és 15-7. ábrákról sajnálatos módon elmaradt a hivatkozás, nevezetesen, hogy azok a VKI megrendelésére a BME Nagyfeszültségű Technika és Készülékek Tanszékén végzett kutatási munka [10] eredményeiként jöttek létre. A szerző a BME kutatói és az Olvasó szíves elnézését kéri.

ahhoz, hogy az érintkező teljes felületének hőmérséklete — a hővezetést is figyelembe véve — elfogadható értéket adjon; ez az érintkező elméletileg szükséges minimális sugara. Figyelembe kell azonban venni, hogy az ívtalppont nem mindig az érintkező felületének középpontjában alakul ki, továbbá, hogy az átmérő növelése — mint láttuk — hatásosan növeli a visszakondenzálódott anyag mennyiségét, vagyis a *takarékhatást*. Mindezek alapján a gyakorlat számára az optimális érintkezőátmérő:

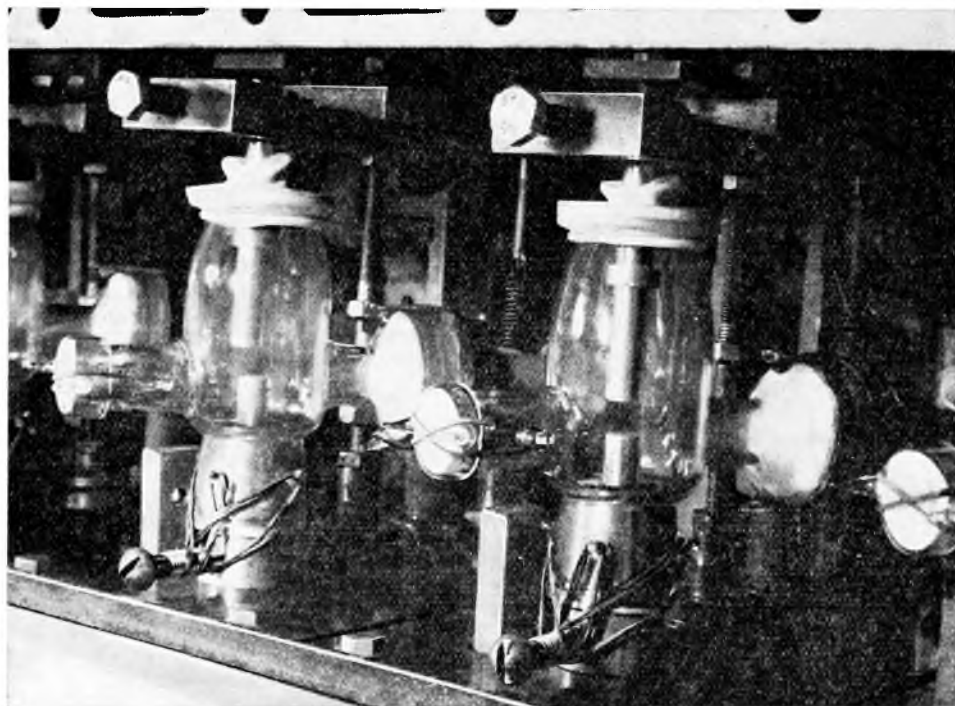
$$d_{\text{opt}} = (40 \dots 60)r.$$

Az egyes áramerősségekhez tartozó érték tehát a konstrukciós lehetőségeket is figyelembe véve:

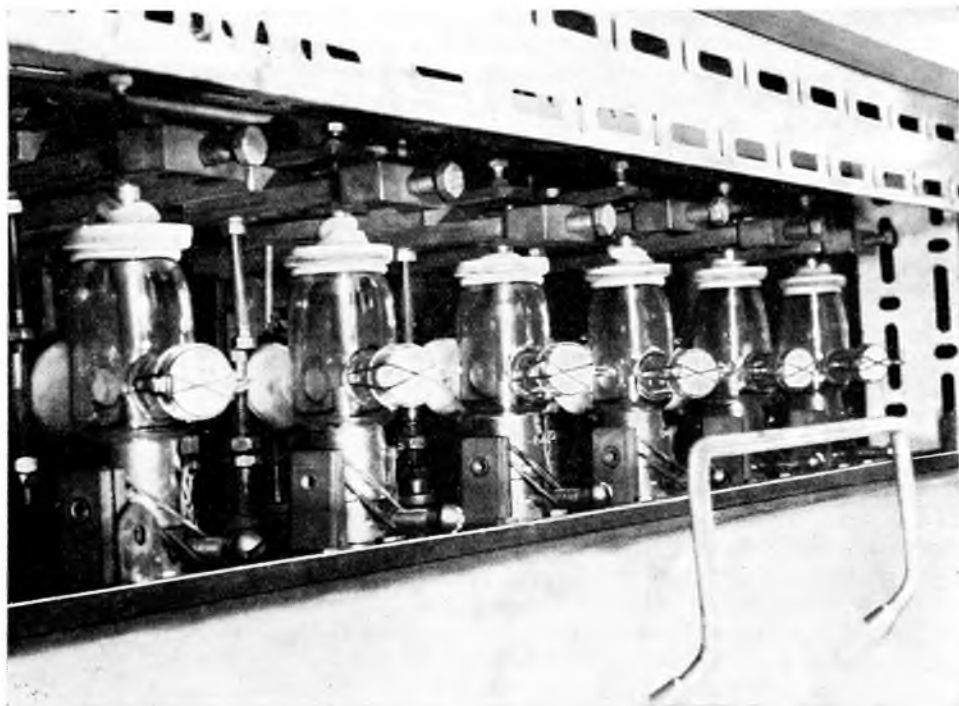
Névleges áramerősség, A	d_{opt} , mm
4... 40	6...8
63...100	10...14
160...200	16...18.

Ezek az értékek színezüst érintkezőanyagra vonatkoznak.

Az anyagvisszanyerés, ill. a takarékhatalm mértékének kísérleti meghatározására izotópos vizsgálatokat végeztünk az MTA Izotóp Intézetének bevonásával [15], a 20-4. és 20-5. ábrán bemutatott kísérleti berendezéssel. A vizsgálatok során az egyik érintkezőt aktiváltuk és vizsgáltuk egyrészt az eltávozott anyag mennyiségét és eloszlását, másrészt az inaktív érintkezőn visszanyert anyag mennyiségét.



20-4. ábra. Vizsgálóberendezés az érintkezőanyag vándorlására vonatkozó izotópos vizsgálatokhoz



20-5. ábra. Az izotópos vizsgálatokra használt berendezés, 6 pár kapcsolóérintkezővel

20-1. táblázat

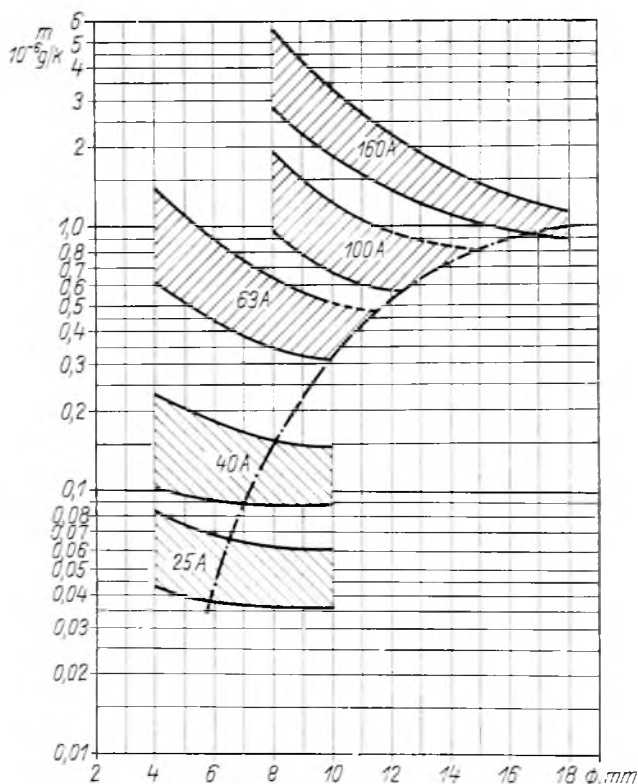
Ag és AgCdO érintkezők összehasonlítása takarékhatas szempontjából

Érintkezőanyag-fajta	Ag	AgCdO 90/10%
	µg/kapcsolás	
Fajlagos anyagfogyás (izotópos vizsgálat)	0,81	0,2
Fajlagos anyagfogyás (súlymérés)	0,76	0,18
Anyagvisszanyerés mennyisége	0,55	0,24
Az összes eltávozott anyagból visszanyert anyagmennyiség %-a, egy kapcsolásra vonatkoztatva	40,5 %	54,6 %

Vizsgálati paraméterek: $U = 65 \text{ V}$; $I = 100 \text{ A}$;
 $\cos \varphi = 0,35$; $v_{ki} = 0,5 \text{ m/s}$;
 $d = 10 \text{ mm}$; $F_e = 1,2 \text{ kp}$;
óránkénti kapcsolások száma: 1800;
összes kapcsolás: $120 \cdot 10^3$

Az üvegburával körülvett érintkezőrendszerben végrehajtott kapcsolások alapján módunk volt azt is meghatározni, hogy az eltávozott anyag hol rakódott le és pl. AgCdO érintkezőanyag esetén milyen az érintkező egyes alkotóinak százalékos megoszlása a kondenzálódott anyagban. A 20-1. táblázat adataiból megállapítható, hogy az eltávozott anyagmennyiségnek ezüstérintkező esetén kb. 40%-a, ezüstkadmiumoxid esetén pedig kb. 55%-a nyerhető vissza az inaktív érintkezőn, vagyis ilyen arányú takarékhattással számolhatunk. Vizsgálataink alapján az is megállapítható, hogy az AgCdO érintkező takarékhataás szempontjából is előnyösebb, mint az ezüst.

Az érintkező optimális méretének meghatározására végzett kísérleteink eredményei a 20-6. ábrán láthatók. Az ábrából, az eredményvonallal jelölt görbe segít-



20-6. ábra. Ag-érintkezők egy kikapcsolásra vonatkoztatott anyagfogyása az érintkező átmérőjének függvényében.

Vizsgálati paraméterek: AC₃ üzemmód, $v_{ki} = 0,1 \dots 0,5$ m/s

ségével az egyes áramerősségekhez kiválasztható a szükséges érintkezőméret, amely-nél nagyobb átmérő alkalmazása sem műszaki, sem gazdasági szempontból nem indokolt.

Izotópos vizsgálatainkat tovább folytatjuk annak érdekében, hogy alaposabban elemezhessük a különféle érintkezőanyagok takarékhataásának szerepét és tisztábban láthassuk a jelenség okait is.

Irodalom

- [1] *Holm, R.*: Electric Contacts Handbook, Springer Verlag, Berlin (1958).
- [2] *Wilson, W. R.*: High-Current Arc Erosion of Electric Contact Material. Trans. AIEE Part. III. 1965.
- [3] *Cobine—Burger*: Analysis of Electrode Phenomena in the High-Current Arc. J. App. Phys. (1955) 26. 7.
- [4] *Ho Xuan Thanh*: Kiszézuítésű mágneskapcsolók korszerű méretezésének néhány kérdése. Kandidátusi értekezés. 1970.
- [5] *Polgár T.*: Ívöltási viszonyok váltakozóáramú kontaktorokban. VKI Közlemények 3. Bp. 1969.
- [6] *Franken, H.*: Untersuchung über Schaltstückverschleiss. E und M 59 (1941).
- [7] *Turner—Turner*: The Erosion of Heavy Current Contacts. 4th IRS Swansea (Anglia) 1968.
- [8] *Néveri—Csermely*: Kiszézuítésű kapcsolókészülékek érintkezőanyagainak vizsgálata. Elektrotechnika, 58 (1965).
- [9] *Néveri I.*: Kontaktuntersuchungen an Niederspannungsschaltgeräten. Kontaktwerkstoff in der Elektrotechnik. Akademie-Verlag, Berlin 1965.
- [10] BME Nagyfeszültségű Technika és Készülékek Tanszéke: Rövid ívek mozgásának vizsgálata a kiszézuítésű kontaktorok áramútjának kialakításához. Kutatási jelentés a VKI megrendelésére 1965. dec. 29.
- [11] *Domonkos S.*: Rövid ívek mozgása a deionlemezek közelében. Kandidátusi értekezés. Bp. 1966.
- [12] *Polgár T.*: Vas deionlemezek váltakozóáramú villamos ívre gyakorolt erőhatásának vizsgálata. VKI Közlemények 2. Bp. 1967.
- [13] *Néveri I.*: Fragen der optimalen Bemessung von Schützen. Elektrik 8 (1971).
- [14] *Néveri I.*: Kutatási feladatok a kiszézuítésű váltakozóáramú mágneskapcsolók korszerű kialakításához. VKI Közlemények 2. Bp. 1967.
- [15] MTA Izotóp Intézet: Erősáramú érintkezők anyagfogyás vizsgálata radioizotópos módszerrel. Kutatási jelentés a VKI megrendelésére 1971. december.

21.

Rövid ideig tartó nemszinuszos áramok effektív értékének mérése

CSÁTHY KÁROLY—LUSPAY ÖDÖN

ÖSSZEFOGLALÁS

Az elektrotechnika számos területén szükséges nemszinuszos áramok effektív értékének meghatározása. Az itt kidolgozott mérési módszer e feladatot oszcillografikus úton, teljesítményhurok és hozzá illesztett teljesítményerősítő segítségével oldja meg. A módszer akkor is használható, ha a mérendő nemszinuszos áram csak néhány tized s-ig áll fenn. Áttekintjük azokat a tranziens jelenségeket, amelyek a mérést zavarják, majd ismertetjük, hogy hogyan lehet ezt a mérési módszert áramváltók nemszinuszos hibaáramának mérésére használni.

ИЗМЕРЕНИЕ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ КРАТКОВРЕМЕННЫХ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ ТОКОВ

К. Чату—Э. Лушпау

Резюме

Многие области электротехники нуждаются в измерении действующего значения несинусоидальных токов. Разработанный метод измерения решает задачу осциллографическим методом путем применения петли мощности и подключенного к ней усилителя мощности. Метод применим и в том случае, если измеряемый ток несинусоидальный и действует всего лишь в течении нескольких десятых долей секунды. Рассматриваются переходные процессы, препятствующие выполнению измерений, затем приводится метод пригодный для измерения несинусоидальной токовой погрешности трансформаторов тока.

MESSUNG DES EFFEKTIVWERTES DER KURZE ZEIT DAUERNDEN NICHTSINUSFÖRMIGEN STRÖME

K. Csáthy—Ö. Luspáy

Zusammenfassung

Auf vielen Gebieten der Elektrotechnik ist es notwendig, den Effektivwert nichtsinusförmiger Ströme zu bestimmen. Die ausgearbeitete Messmethode löst diese Aufgabe auf oszillographischem Weg durch Anwendung von Leistungsschleifen und des dazu gefügten Leistungsverstärkers. Diese Methode kann auch dann angewendet werden wenn der zu messende nichtsinusförmige Strom nur einige Sekunden-lang besteht. Es werden die transienten Erscheinungen, die die Messung stören, überblickt. Schliesslich wird ein Beispiel gegeben, wie diese Messmethode zur Messung des nichtsinusförmigen Fehlerstromes eines Stromwandlers angewendet werden kann.

MEASUREMENT OF R. M. S. VALUES OF NON-SINUSOIDAL CURRENTS OF SHORT DURATION

K. Csáthy—Ö. Luspay

Summary

The task of measuring r. m. s. value of non-sinusoidal currents is often encountered in electrical engineering. An oscillographic method using a Watt type vibrator and a power amplifier matched thereto has been developed. The method lends itself to measuring non-sinusoidal currents of durations as short as a few tenths of a second. The transient phenomena affecting the measurement are surveyed, and the method of measuring non-sinusoidal current errors of current transformers by the setup proposed is described.

1. Bevezetés

Nemszinuszos áramok effektív értékét az elektrotechnika számos területén kell meghatározni. Erre a célra effektív értéket mutató egyszerű ampermérők használhatók, de csak az esetben, ha az áram legalább a mutatók leolvasásához minimálisan szükséges 3—4 s-ig folyik és ez idő alatt az értéke nem változik. Mivel a nemszinuszos áramalak általában túlterhelésből vagy túlgerjesztésből adódik, effektív értékének mérésére néha csak rövid idő, esetleg néhány periódus áll rendelkezésre. Ilyen körülmények között az effektív értéket mutató ampermérők nem használhatók. A hurkos oszcillográf ilyen rövid idő alatt is jól rögzíti az áramgörbét, ez viszont csak a pillanatértékeket érzékeli. A hullámrajzból az effektív értékeket grafikus módszerekkel meg lehet ugyan határozni, de ez a művelet rendkívül nehézkes és pontatlan. Kézenfekvő a gondolat, hogy a feladat megoldására olyan oszcillografikus módszert dolgozzunk ki, amely szerint a hurok — segédberendezés használatával — közvetlenül a mérendő áram effektív értékét rajzolja fel.

2. Teljesítményhurok alkalmazása árammérésre

Mint ismeretes, a közönséges oszcillográfhurok működését illetően fénymutató galvanométerhez hasonlítható, amelyben permanens mágnes erőterében kifeszített áramhurkon levő tükör végez mozgást az áram hatására. Ha a lengőszerkezet tömegét úgy választják meg, hogy a mérendő áram változásait követni tudja, ez a hurokszerkezet a bevezetett váltakozóáram pillanatértékét rajzolja fel. Nem valószínű, hogy a hurok — még a lengőtömegek változtatásával sem — az, hogy az áramhurok kitérése a benne folyó váltakozóáram effektív értékével legyen arányos.

Más a helyzet az ún. teljesítményhurok esetében, ui. ilyen típusú hurokban a lengőszerkezet nem permanens, hanem gerjesztett mágnes erőterében fordul el, így a hurok kitérése a két tekercsrendszeren átfolyó áramok pillanatértékének szorzatával arányos (ezért lehet teljesítménymérésre használni). Ha a két tekercsrendszerben ugyanaz az i áram folyik, a hurok i^2 értékét rajzolja fel. Ebben az esetben már mód van arra, hogy a hurok lengőtömegeinek más és más megválasztásával ezek az i^2 értékek pillanatnyi, ill. effektív értékeket jelentsenek. Ha a lengő tömegek tehetetlenségi nyomatéka kicsi, a kitérés a pillanatértékekkel, ha nagy, akkor az effektív értékekkel arányos, mert a nagy tömegű hurok nem tudja a pillanatértéket követni. (Elegendő nagynak lehet tekinteni a lengőtömeget, ha a hurok önfrekvenciája legalább 10...12-szer kisebb, mint a mérendő áram frekvenciája).

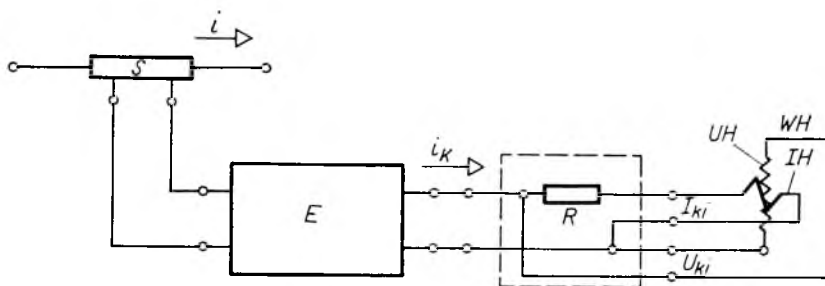
A felsorolt kívánalmaknak megfelelő teljesítményhurkokat kétféle kivételben gyártanak:

a) kis tehetetlenségű lengőrendszerrel, amelynek önrezgésszáma néhány 100 Hz;

b) nagy tehetetlenségű lengőrendszerrel, amelynek önrezgésszáma néhány Hz. Céljainknak ez utóbbi felel meg.

A gyakorlatban azonban mégsem lehet minden kis önrezgésszámú teljesítményhurkot áramok effektív értékének mérésére közvetlenül felhasználni. A teljesítményhurkok tekercsrendszereinek terhelhetősége szűk határok között változik és értéke a legkritább esetben egyezik meg azzal az áramértékkel, amit mérni akarunk. A hurok és a mérendő áram közé egy közbülső elemet, célszerűen teljesítményerősítőt kell beiktatni.

Intézetünkben kidolgozott és alkalmazott mérési eljárást a következőkben foglaljuk össze [1], [2].



21-1. ábra. Mérési kapcsolás nem-szinuszos áram (i) effektív értékének teljesítményhurokkal való meghatározásához

A 21-1. ábrán a mérendő i áram az S indukciómentes söntön halad át. A söntön keletkező feszültség az árammal arányos, ez kerül az E erősítő bemeneti oldalára. A kimeneti oldalon az i_k áram nagysága arányos, alakja pedig megegyezik a mérendő i áram alakjával. Az erősítő kimenetére csatlakozik R ellenálláson át a teljesítményhurok IH áramtekercse. Az erősítő paramétereit úgy választjuk meg, hogy i_k áram értéke erre az áramtekercsre megengedett áram (pl. 5 A) legyen. Az $i_k R$ feszültség-ésés értéke viszont a teljesítményhurok másik, UH feszültségtekercsére előírt adattal egyezik. A WH teljesítményhurok kitérése i , ill. i_k effektív értékének négyzetével arányos: n -szeres i , ill. i_k -hoz n^2 -szeres kitérés tartozik.

Az erősítő kapcsolási vázlatát a 21-2. ábra tartalmazza. Tervezésével és részletes ismertetésével e cikkben nem foglalkozunk, csak azokat az adatokat adjuk meg, amelyek a felhasználás szempontjából jelentősek.

Az erősítő műszaki adatai:

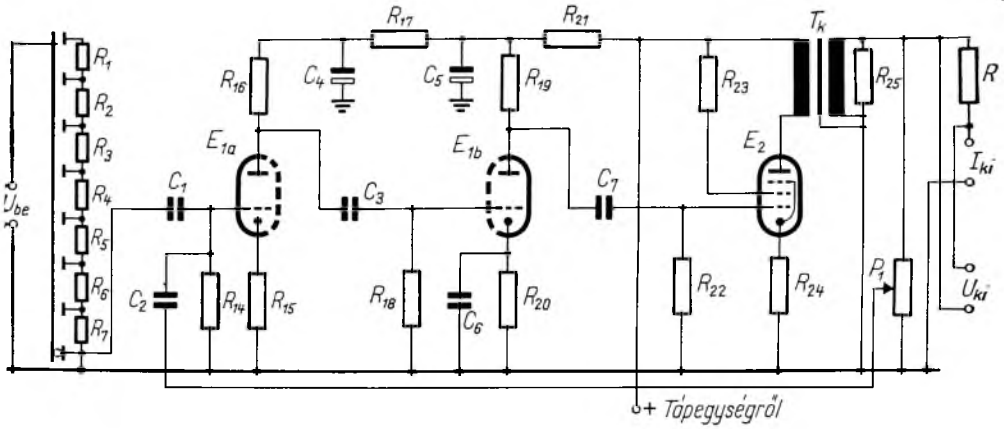
— bemeneti osztó: 0,015...4 V;

— kétsöves erősítő;

— a bemenet és közbülső fokozat RC csatolású; a kimenet induktív csatolású, kimeneti transzformátorral.

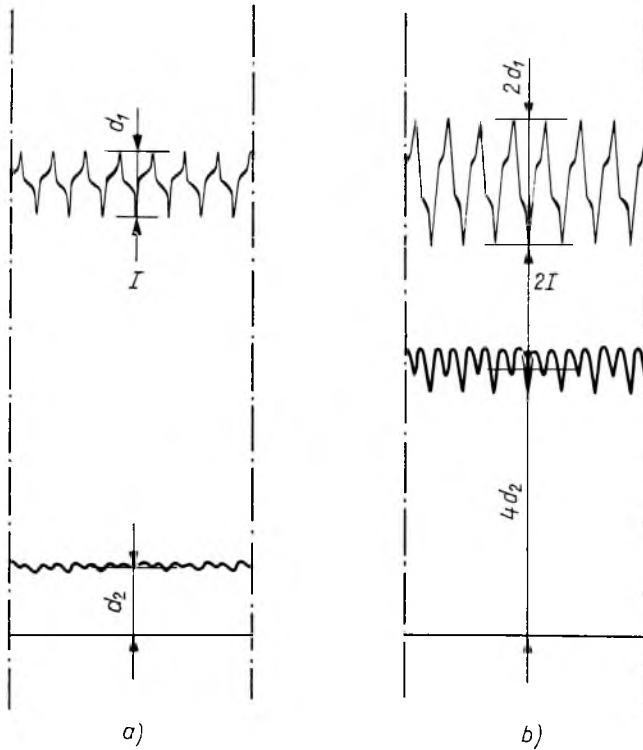
A bemeneti osztó lehetővé teszi a bemeneti feszültség céljaira 0,015...4 V közötti feszültség alkalmazását és ezáltal a gyakorlatilag szóba jöhető söntök használhatóak és a söntök alkalmas megválasztásával a mérendő áramok tartománya gyakorlatilag tetszőlegesen bővíthető.

A 21-3. ábrán két oszcillogram felvételt mutatunk be, amelyeket közönséges áramhurokkal, ill. erősítővel és teljesítményhurokkal vettünk fel. Látható, hogy



21-2. ábra. Teljesítményerősítő kapcsolási vázlata

S sönt; i mérendő áram; E_{1a} , E_{1b} , E_2 elektroncső; R , $R_1 \dots R_{25}$ ellenállás; $C_1 \dots C_7$ kondenzátor; T_k kimeneti transzformátor; I_{ki} csatlakozás a teljesítményhurok áramtekercséhez; U_{ki} csatlakozás a teljesítményhurok feszültségtekercséhez



21-3. ábra. Oscillogramfelvételek nemszinuszos áramokról
 I mérendő áram; d_1 áramhurok kitérése; d_2 teljesítményhurok kitérése

egyrészt a közönséges áramhurokkal felvett görbe effektív értéke közvetlenül nem határozható meg, ezzel szemben a teljesítményhurok hullámrajzából jól kiértékelhető az effektív érték; másrészt hogy az áram kétszeres értékre való növelésével a teljesítményhurok kitérése négyszeres értékre növekszik.

3. Átmeneti jelenségek

Az előzőekben hallgatólágyosan feltételeztük, a továbbiakban pedig (elő)feltételnek tekintjük, hogy a nemszinuszos áram effektív értéke állandó, más szóval a mérendő áramnak csak olyan szakaszát vesszük tekintetbe, amelynél bármely két szomszédos periódusban az áram egyetlen periódusra számított effektív értéke (I) azonos értékű.

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}, \quad (1)$$

ahol i az áram pillanatértéke;
 t az idő;
 T egy periódus időtartama;
 I az áram effektív értéke.

Mivel a valóságban ez a feltétel az áram bekapcsolása után általában csak meghatározott idő után következik be, ezen idő előtt tranziensekkel kell számolnunk. Vizsgáljuk tehát meg, hogy egy áramkörben, ahol az áram effektív értékét kívánjuk megmérni, az áramkör bekapcsolása után milyen tranziens jelenségek lépnek fel és hogyan kell ezek hatását a mérésben figyelembe venni.

Teljesítményhurokokkal való mérés folyamán tranziens jelenség általában két-féle ok miatt következik be:

- a vizsgálandó áramban lezajló átmeneti jelenségek, ill.
 - a hurokban lezajló átmeneti jelenségek miatt.
- Vizsgáljuk meg mindkét okot kissé részletesebben.

3.1 Tranziens jelenségek a vizsgálandó áramban

Valamely váltakozóáramú áramkör bekapcsolásakor az áram időbeli lefolyása közismerten:

$$i = I \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{t}{T}} \right], \quad (2)$$

ahol α a feszültségvektor helyzetét jellemző szög a zárlat pillanatában;
 φ az áram- és feszültségvektor közti szög;
 T az áramkör időállandója.

Az összefüggésből látható, hogy az áram két összetevőből áll: a stacioner értékű váltakozóáramú összetevőből — amelynek a mérése a feladatunk —, valamint az időben exponenciálisan csökkenő értékű egyenáramú összetevőből — amely tranziens tag a mérésünket zavarja. Feladatunk tehát ez utóbbi tag nagyságának, ill. időtartamának lehetőség szerinti csökkentése.

Az egyenáramú tag *nagysága* ($\alpha - \varphi$) szögtől, tehát a bekapcsolás fázishelyzetétől, ill. a teljesítménytényezőtől függ. Ha az áram bekapcsolása pl.

— gyakorlatilag induktív áramkörben ($\varphi = \frac{\pi}{2}$), a feszültség-hullám maximumában ($\alpha = \frac{\pi}{2}$, vagy $\alpha = \frac{3\pi}{2}$) következik be; ill.

— gyakorlatilag induktivitást nem tartalmazó áramkörben ($\varphi = 0$) a feszültség-hullám nullaátmenetekor ($\alpha = 0$, vagy $\alpha = \pi$), akkor

— az áram nem tartalmaz tranziens egyenáramú tagot. Ha tehát rendelkezésre áll szinkron vezérlésű rákapcsoló, akkor az áramkör teljesítménytényezőjének ismeretében meghatározható a feszültség-görbén az a fázishelyzet, ahol az áramkörre rákapcsolva tranziens áram nem lép fel.

Az egyenáramú tag *időtartama* az áramkör T időállandójától függ. Az időállandó, mint ismeretes

$$T = \frac{L}{R},$$

ahol L az áramkör induktivitása;

R az áramkör rezisztenciája.

A (2) összefüggésből látható, hogy minél kisebb az áramkör időállandója, annál gyorsabban lezajlik a tranziens jelenség. Ha tehát mód van rá, célszerű az áramkört konduktív ellenállásokból összeállítani, ezáltal csökkentve a tranziens jelenség időtartamát.

Meg kell jegyeznünk, hogy általános esetben egy áramkör bekapcsolásakor a (2)-ben fel nem tüntetett, egyéb tranziensek is felléphetnek (pl. generátorok szub-tranziens reaktanciája következtében), ezektől azonban most eltekintünk, mivel legtöbb esetben hatásuk elhanyagolható értékű.

A tranziens folyamatok következtében az áramok kezdeti értékei meghaladhatják az állandósult értéket. Ha a hurok kitérését e nagy értékre állítjuk be, akkor — figyelembe véve a már említett négyzetes arányú kitérés — a stacioner állapotban nehezen kiértékelhető, kis kitéréseket kapunk; ha pedig az állandósult értéket állítjuk be, akkor tranziens állapotban veszélyeztetjük a hurok épségét. Ilyen esetekben legcélszerűbb az áram bekapcsolása előtt — az előbbieken meghatározott időállandók figyelembevételével meghatározott időtartamig — a hurkot kikapcsolni, ill. az erősítőn — ugyancsak az előbbieken meghatározott érték figyelembevételével — kisebb erősítést alkalmazni erre az időtartamra. A vezérlés célszerűen programkapcsolóval oldható meg.

3.2 Tranziens jelenségek az oszcillográf-hurokban

Az áramkörbe való bekapcsoláskor a hurok mechanikai tulajdonságai következtében is fellépnek tranziensek, vagyis a hurok még állandósult áram esetén sem éri el azonnal állandósult kitérésének megfelelő értékét. A mechanikai tranziensek matematikai kifejezése és zavaró hatásai elméleti meghatározása meglehetősen nehéz. Elvben a következő út vezet célhoz:

A huroknak, mint egyszabadságfokú mechanikai rendszernek a mozgását másodfokú inhomogén differenciálegyenlet írja le [3]:

$$M = \Theta \frac{d^2\beta}{dt^2} + k \frac{d\beta}{dt} + c\beta, \quad (3)$$

ahol Θ a lengőrész tehetetlenségi nyomatéka;
 β elfordulási szöge;
 k csillapításra jellemző állandó;
 c rugóállandó;
 M kitérő nyomaték.

A (3) egyenletnek periodikus vagy aperiodikus megoldása van, amely elvileg megadja azt az időfüggvényt, ahogyan a hurok kitérése M nyomaték hatására lefolyik. A matematikai megoldás azonban két szempontból is nehézséget okoz. Egyrészt M kitérítő nyomaték nem állandó, matematikai alakja — mivel nemszinuszos mennyiségekről van szó — rendkívül bonyolult időfüggvény; másrészt a hurok különféle mechanikai állandói (Θ, k, c) nem ismeretesek.

A differenciálegyenlet megoldásától a gyakorlatban sok esetben eltekinthetünk, mert a hurok kitérésének teljes időfüggvényére nincs mindig szükség, a hurok mechanikai időállandója pedig kísérleti úton is meghatározható. A végrehajtott vizsgálataink eredménye alapján megállapítható, hogy egy, a céljainkra megfelelő hurok kitérése állandó értékű áram hatására, a szokásos mérőköri elrendezésben mintegy 40...50 ms alatt éri el állandósult értékét. Amennyiben tehát a 3.1. pontban vázolt, a vizsgálandó áramkör által okozott tranziens jelenségek miatt a hurok bekapcsolása az áramkör bekapcsolását követő meghatározott idő múlva következik be, akkor a tényleges kiértékelés csak az ezt követő, kb. 50 ms után végezhető el.

4. Áramváltók hibaárama effektív értékének mérése oszcillografikus úton

A rövid ideig tartó nemszinuszos áramok effektív értékének teljesítményhurkok segítségével történő mérésének egyik legcélszerűbb alkalmazási területe az áramváltók nemszinusz alakú hibaáramának mérése a túláramtartományban. A vizsgálatok célja általában az állandósult viszonyok meghatározása, először tehát ezzel foglalkozunk, majd azt követően megemlítjük az átmeneti jelenségek zavaróhatását is.

4.1 Vizsgálatok stacioner állapotban

Az áramváltók vasmagja a túláramtartományban telítődik, ennek következtében az áramok a szinuszról eltérő alakúak, ami különösen az áramváltó gerjesztőáramára érvényes. A későbbiekben ismertetendő kapcsolat alapján az áramváltó e nemszinuszos gerjesztőárama (hibaárama) meghatározható, ill. módszerünkkel mérhető. Az áramváltó gerjesztőárama az áramváltó pontosságával szoros összefüggésben van, így tehát annak vizsgálata az áramváltó pontossági vizsgálata szempontjából szükséges.

Az MSZ 1577/3. lap-67 „Áramváltó általános védelmi célra” a védelmi áramváltók pontossági előírásaira a túláramtartományban az *összetett hiba* fogalmát vezeti be. Az összetett hiba állandósult állapotban: a névleges áttétellel szorzott szekunder áram pillanatértéke, valamint a primer áram pillanatértéke különbségéből képzett áram effektív értékének százalékos viszonya a tényleges primer áram effektív értékéhez. Az összetett hibára a következő meghatározás írható fel:

$$H = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (v_n i_2 - i_1)^2 dt} \% \quad (4)$$

ahol H az összetett hiba százalékos értéke;

I_1 a primer áram effektív értéke;

i_1 a primer áram pillanatnyi értéke;

i_2 a szekunder áram pillanatnyi értéke;

v_n az áramváltó névleges áttétele;

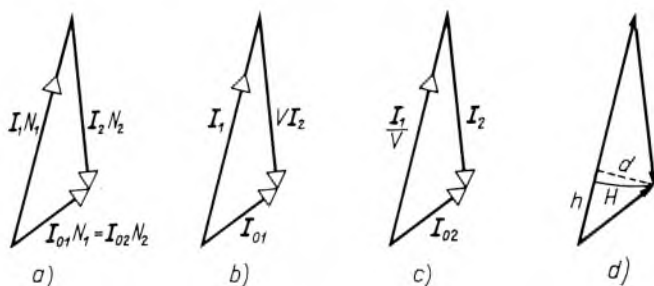
T egy periódus időtartama.

Az összetett hiba az áramváltó fizikai működésével közvetlenül kapcsolatban levő fogalom. Az összetett hiba — mint erre neve is utal — lényegében három hiba összeállításából adódik: tartalmazza az áramhibát, a szöghibát, valamint az áram görbealakjának torzulásából eredő hibát.

Az MSZ 1577/3. lap a védelmi áramváltók pontossági követelményeit a túláramok tartományában a pontossági határárammal jellemzi. Pontossági határáram a primer áramnak az a legnagyobb effektív értéke, amelynél az áramváltó még megfelel az összetett hibákra vonatkozó pontossági követelményeknek, tehát amely esetében az összetett hiba 2,5; 5; 10% értékű, a szekunder kör névleges terheléssel való terhelése esetén.

A névleges áramok tartományában a pontossági követelményeket váltakozó-áramú mérőhidakkal ellenőrizhetjük. A névlegest meghaladó áramok azonban — mivel a hőhatás az áramerősség négyzetével arányos — elsősorban a mérőhidat, másodsorban magát a vizsgálandó áramváltót veszélyeztetnék az aránylag hosszú ideig tartó mérés következtében. A túláramok területén tehát más mérési módszerekhez kell folyamodnunk a pontossági követelmények ellenőrzése tekintetében.

Az áramváltók túláramtartományának vizsgálatához az egyszerűsített vektorábrából kell kiindulni (21-4. ábra).



21-4. ábra. Az áramváltó egyszerűsített vektorábrája

I_1 primer áram; I_2 szekunder áram; I_{01} gerjesztőáram primer oldalra vonatkoztatott értéke; I_{02} gerjesztőáram szekunder oldalra vonatkoztatott értéke; V áttétel; N_1 primer menetszám; N_2 szekunder menetszám; h áramhiba; d szöghiba; H összetett hiba

Az áramváltó vektorábráját négyféle alakban tüntettük fel; a 21-4a ábra az ampermenet-háromszöget, a 21-4b ábra a primer oldalra, a 21-4c ábra a szekunder oldalra vonatkoztatott áramháromszöget tünteti fel; a 21-4d pedig a különböző hibák értelmezését. Látható, hogy (a 21-4a vektorábra szerint) a primer és szekunder ampermenetek vektorális különbsége a gerjesztő ampermenetekkel egyenlő, más szóval (a 21-4b és c vektorábra szerint) — a primer, ill. a szekunder oldalra vonatkoztatva — a primer és szekunder áramok vektorális különbsége a gerjesztőárammal egyenlő. Végül pedig a 21-4d vektorábrából látható, hogy az összetett hiba az áramváltó gerjesztőáramával arányos, ez tehát az áramváltó hibaáramának nevezhető.

A hibaáram a vektorábra szerint a „vonatkoztatott” primer, ill. szekunder áramok vektorális különbsége. A mérés tehát azon alapul, hogy kapcsolástechnikai úton létre kell hozni a primer és szekunder áramok „vonatkoztatott” értékeinek vektorális különbségét.

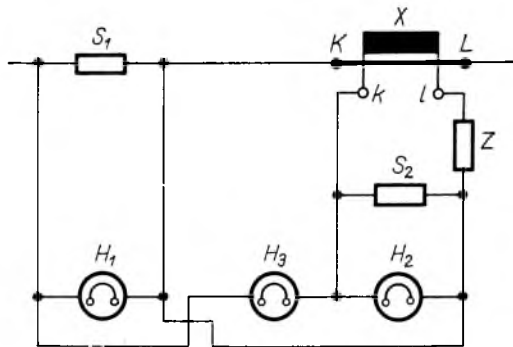
A 21-5. ábra a vizsgálat kapcsolását mutatja be. Az X vizsgálandó áramváltó primer körében az S_1 sönt, szekunder körében pedig S_2 sönt és Z (névleges) terhelés van. Az S_1 és S_2 söntök A/mV „áttétele” egymáshoz való v_{s1}/v_{s2} viszonyának az X áramváltó áttételi v_x viszonyával kell egyenlőnek lenni. A söntökre a rajz szerint csatlakoztatott oszcillográfhurkok közül

H_1 a vizsgálandó áramváltó I_1 primer áramával arányos;

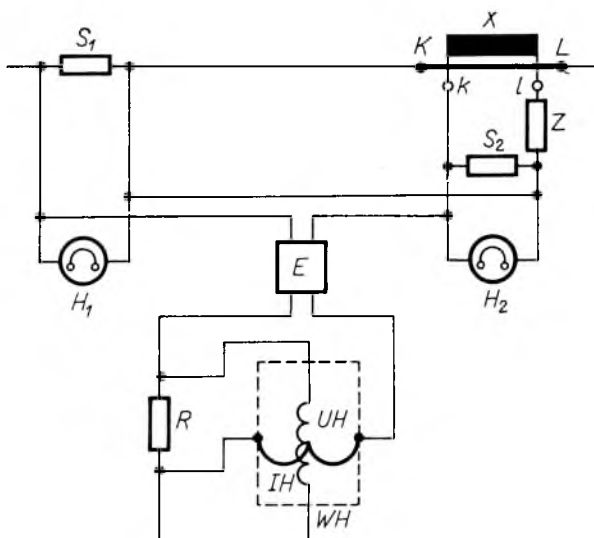
H_2 a vizsgálandó áramváltó I_2 szekunder áramával arányos;

H_3 a vizsgálandó áramváltó összetett hibáját eredményező, I_3 hibaáramával arányos kitérést ad.

Az X áramváltó primer tekercse és az S_1 sönt által meghatározott áramkörre különböző, az áramváltó névleges árama többszörösének megfelelő, gyakorlatilag szinuszos formájú áramot kapcsolunk, és oszcillogramfelvételt készítünk I_1 , I_2 , ill. I_3 értékéről. I_1 áram szinuszos alakú, I_2 kismértékben, I_3 pedig nagymértékben eltér a



21-5. ábra. Kapcsolási vázlat az áramváltó hibaáramának oszcillografikus úton történő vizsgálatára túláramtartományban



21-6. ábra. Kapcsolási vázlat az áramváltó hibaáramának effektív értékének erősítővel és teljesítményhurokkal történő vizsgálatára túláramtartományban

szinusz alaktól. Az áramváltó összetett hibája:

$$H = \frac{I_3}{I_1} 100\%. \quad (5)$$

I_3 effektív értékét csak a görbe analízisével határozhatjuk meg, ami az előzőkben kifejtettek szerint meglehetősen nehézkes. Ezen nehézség kerülhető el a módszerünk segítségével, ha a 21-6. ábra szerinti kapcsolását alkalmazzuk.

Az összetett hibával, tehát az I_3 árammal arányos feszültség az E erősítőn keresztül a WH hurokra kerül, amelynek IH gerjesztőtekerccsével sorba van kötve az R ellenállás, amelynek sarkain fellépő feszültség kerül a hurok UH feszültség-szálára. A WH teljesítményhurok kitérése pedig az I_3 áram effektív értékét mutatja.

4.2 Tranziens jelenségek

A 3.1. szakaszban már utaltunk arra, hogy a méréseket a tranziens jelenségek nagy mértékben zavarhatják. Különösen érvényes ez áramváltók hibaáramának mérésére, amikor tranziens állapotban az állandósult érték többszöröse is fellép.

Mint láttuk, a túláram-jelleggörbe mérése lényegében az áramváltó primer és szekunder „vonatkoztatott” áramai vektoriális különbségének meghatározásán alapul. A primer áram időbeli lefolyásával a 3.1. alatt részletesen foglalkoztunk; a szekunder áram lefolyását legdöntőbb mértékben a primer áram egyenáramú összetevője befolyásolja.

Ha a primer áramnak nincs egyenáramú összetevője (szimmetrikus zárlat), akkor a szekunder áram is gyakorlatilag rögtön állandósult értékű (feltéve, hogy eltekintünk az első félperiódus jelenségeitől); ha azonban a primer áram lényeges nagyságú egyenáramú összetevőt is tartalmaz (aszimmetrikus zárlat), akkor a vizsgált „különbözeti”, ill. hibaáramban igen lényeges tranziens értékek lépnek fel. Az áramváltó szekunder áramának egyenáramú összetevőjére a következő összefüggés írható fel [4], [5]:

$$i_2 = I_2 \frac{T_2 e^{-\frac{t}{T_1}} - T_1 e^{-\frac{t}{T_2}}}{T_2 - T_1}, \quad (\text{ha } T_1 \neq T_2) \quad (6)$$

ill.

$$i_2 = I_2 \left(1 - \frac{t}{T_1} \right) e^{-\frac{t}{T_1}}, \quad (\text{ha } T_1 = T_2) \quad (7)$$

ahol i_2 a szekunder áram pillanatértéke;

I_2 a szekunder áram állandósult effektív értéke;

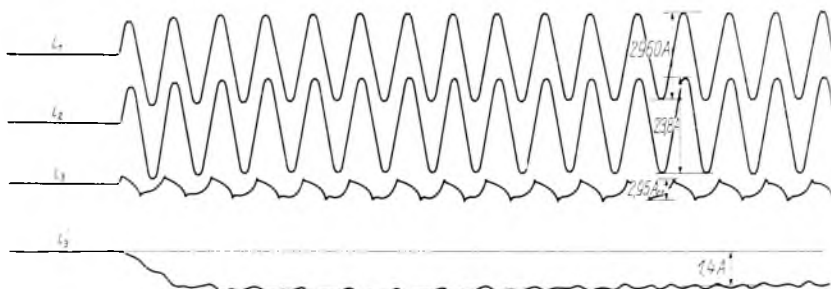
T_1 a primer áramkör időállandója;

T_2 a szekunder áramkör időállandója.

Látható az összefüggésekből, hogy aszimmetrikus viszonyok közt a tranziensek nagyságát és időtartamát a primer és szekunder áramkör időállandója határozza meg. A jelenségek részleteire vonatkozóan utalunk a szakirodalomra [4], [5], e helyen csupán annyit említünk meg, hogy a hibaáram tranziens értéke aszimmetrikus zárlat esetén az állandósult értéknek több tízszeresét is elérheti; ilyen jellegű vizsgálatoknál tehát vagy szimmetrikus rákapcsolást kell biztosítani, vagy — a 3.1. alatt említett módszer szerint — a bekapcsolás után várni kell bizonyos ideig, amíg a tranziensek lecsengenek.

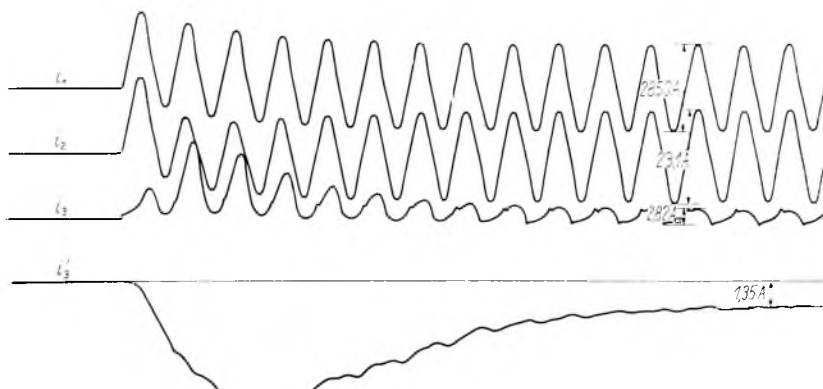
5. Példák az ismertett módszerrel végrehajtott vizsgálatok eredményeire

A 21-7...21-10. ábrákon példaképpen bemutatunk néhány oszcillogramot, amelyek egy AOF 120 b2 típ. 120 kV névleges feszültségű 600/5 A áttételű áramváltó hibaáram-vizsgálatáról készültek.

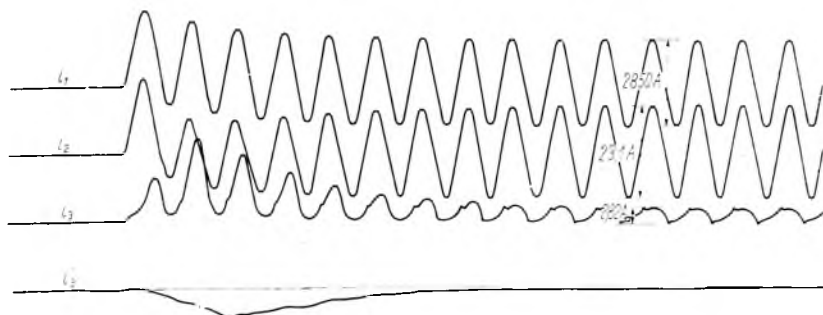


21-7. ábra. Áramváltó hibaáram-vizsgálatáról készült oszcillogram szimmetrikus zárlat esetén

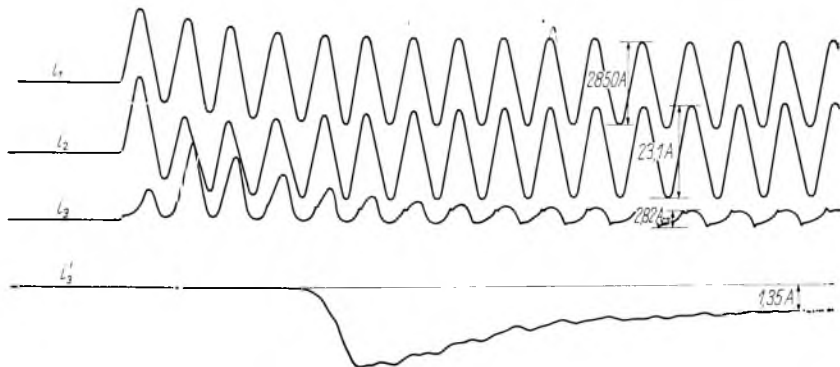
i_1 primer áram; i_2 szekunder áram; i_3 hibaáram; i_3' hibaáram teljesímenyhurokkal felvéve



21-8. ábra. Áramváltó hibaáram-vizsgálatáról készült oszcillogram aszimmetrikus zárlat esetén (jelölések magyarázatát l. a 21-7. ábránál)



21-9. ábra. Áramváltó hibaáram-vizsgálatáról készült oszcillogram aszimmetrikus zárlat esetén (jelölések magyarázatát l. a 21-7. ábránál)



21-10. ábra. Áramváltó hibaáram-vizsgálatáról készült oszcillogram aszimmetrikus zárlat esetén. A teljesítményhurok bekapcsolása későbbi időpontban történt (jelölések magyarázatát l. a 21-7. ábránál)

A 21-7. ábrán szimmetrikus zárlat volt, tehát nincs tranziens jelenség.

A 21-8 ...21-10. ábrák aszimmetrikus zárlatról készült oszcillogramokat mutatnak be, amelyeknél jelentős értékű tranziensek léptek fel a hibaáramban. A 21-8. ábra esetében a hurok épsége volt veszélyeztetve a nagy kitérés miatt, míg a 21-9. ábrán — amelynél az érzékenység a tranziens értékre volt beállítva — az állandósult érték kiértékelhetetlenül kicsi. A 21-10. ábra esetében a zárlat kezdeti időszakában a teljesítményhurokot nem kapcsoltuk be és ily módon optimális kitéréseket kaptunk.

Irodalom

- [1] Csáthy K.: Méréstechnikai védő- és célberendezések kifejlesztése nagyteljesítményű vizsgálatokhoz. Kutatási jelentés. VKI 68-42/4. sz. 1969. november 26.
- [2] Luspay Ö.: Áramváltók túláramviszonyainak vizsgálata III. Áramváltók túláramviszonyainak közvetlen módszerrel, oszcillografikus úton történő meghatározása a hibaáram effektív értéke által. Budapesti Elektromos Művek tanulmány. 1968.
- [3] Tóth E.: Elektromechanikus műszerek. Tankönyvkiadó, Budapest. 1969.
- [4] Luspay Ö.: Áramváltók túláramviszonyainak vizsgálata II. Áramváltók tranziens jelenségei túláramtartományban. Budapesti Elektromos Művek tanulmány. 1968.
- [5] Csizy T.—Luspay Ö.—Török B.: Mérőtranszformátorok. Műszaki Könyvkiadó, Budapest. 1971.

22.

Az ívталppont mozgatasának hatása az érintkezők villamos élettartamára

POLGÁR TIBOR

ÖSSZEFOGLALÁS

A kapcsolóérintkezők között égő villamos ív az érintkezők anyagán termikus igénybevételt okoz. Az igénybevétel nagyságát az ívталppontok mozgási sebessége jelentősen befolyásolja. Mérési eredményeink szerint — adott körülmények között — ha az ívталppont mozgási sebessége 3,5 m/s-nál nagyobb, az érintkezőfelületek termikus igénybevétele ugrásszerűen lecsökken. Cu, Ag és AgCdO érintkezőanyagokra meghatároztuk, hogy mekkora transzverzális erő szükséges ilyen mozgási sebesség eléréséhez.

Váltakozóáramú kontaktorokban az ívталppont gyors mozgatása elsősorban ferromágneses anyagú deion lemezekkel, kisebb mértékben pedig a megfelelően kialakított áramutak erőhatásai révén érhető el.

Ellenőrző vizsgálataink eredményei szerint az ívталppont gyors mozgatása statisztikusan megnöveli az érintkezők — és ezáltal a kontaktorok — villamos élettartamát.

ВЛИЯНИЕ ДВИЖЕНИЯ ОСНОВНОЙ ТОЧКИ ДУГИ НА СРОК СЛУЖБЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ

T. Polgár

Резюме

Электрическая дуга возникающая между контактами создает термическую нагрузку для материала контактов. На степень нагрузки существенно влияет скорость движения основных точек дуги. По результатам выполняемых нами измерений при данных условиях в случае скоростей движения основной точки дуги превышающих 3,5 м/сек скачкообразно сокращается термическая нагрузка, действующая на поверхности контактов. Для материалов электродов Cu, Ag и AgCdO была определена величина поперечной силы, необходимой для достижения таких скоростей движения.

В контакторах переменного тока быстрое движение основной точки дуги может быть осуществлено благодаря силовому действию деионизирующих пластин из ферромагнитных материалов и в меньшей мере соответственно оформленных токопроводящих частей. По нашим контрольным испытаниям быстрое движение основной точки дуги статистически увеличивает электрический срок службы контактов тем самым и контакторов.

WIRKUNG DER LICHTBOGENFUSSPUNKT-BEWEGUNG AUF DIE ELEKTRISCHE LEBENSDAUER DER KONTAKTE

T. Polgár

Zusammenfassung

Der zwischen den Schaltkontakten brennende elektrische Lichtbogen verursacht thermische Beanspruchung auf dem Material der Kontakte. Die Grösse der Beanspruchung wird durch die Bewegungsgeschwindigkeit der Lichtbogenfusspunkte

bedeutend beeinflusst. Unseren Messergebnissen gemäss nimmt die thermische Beanspruchung der Kontaktflächen — unter gegebenen Umständen — bei grösseren Lichtbogenfusspunkt-Bewegungsgeschwindigkeiten als 3,5 m/s springhaft ab. Wir haben für die Kontaktwerkstoffe Cu, Ag, AgCdO bestimmt, wie grosse transversale Kraft zur Erzielung solcher Bewegungsgeschwindigkeiten erforderlich ist.

In Wechselstromschützen kann die schnelle Lichtbogenfusspunkt-Bewegung vor allem durch die aus ferromagnetischem Material hergestellten Deionblächen, in kleinerem Mass aber durch die Kraftwirkungen der entsprechend ausgebildeten Stromwege erzielt werden.

Gemäss den Ergebnissen unserer Kontrollprüfungen erhöht die schnelle Lichtbogenfusspunkt-Bewegung statistisch die elektrische Lebensdauer der Kontakte und dadurch die der Schütze.

THE EFFECT OF ARC-ROOT DISPLACEMENT ON CONTACT LIFE

T. Polgár

Summary

An arc formed between switch contacts imposes thermal stresses on the material of contacts. The magnitude of stresses considerably depends on the displacement speed of the arc root. As verified by our tests, — under given conditions — the thermal stresses imposed on contact surfaces decrease rapidly beyond a displacement speed of 3.5 meters per second. For Cu, Ag and AgCdO contact materials, the magnitude of transverse forces required for producing such displacement speeds has been determined.

In a. c. contactors this high-speed arc root displacement is obtainable mainly by the electromagnetic forces produced by deion plates made of a ferromagnetic material and, to a lesser extent, by suitably arranged current paths.

According to the results of our checking tests, the rapid displacement of arc roots statistically increases the electrical life span of contacts and, therewith, that of the contactors.

1. Bevezetés

Az erőáramú kapcsolókészülékek érintkezőinek kopását lényegében a villamos ív eróziós hatása okozza, ezért a villamos ív talppontjainak az érintkezők felületén való tartózkodási ideje az érintkezők élettartamának alakulása szempontjából igen fontos. A váltakozóáramú kontaktorokban fennálló ívtöltési viszonyokat szem előtt tartva, e kérdés beható tanulmányozása különösen jelentős. A korszerű váltakozóáramú kontaktorokban már megoldottnak tekinthető az, hogy a kikapcsolási ív az áram első, de legkésőbb második nullaátmeneténél kialudjon, így az ív égési idejét — eltekintve a pillanatnyi kikapcsolási fázishelyzet okozta ingadozásoktól — az ívtöltő szerkezetek esetleges tökéletesítésével sem lehet tovább csökkenteni.

Az érintkezők villamos élettartamának további növelése úgy képzelhető el, ha csökkentjük az ívtalppontok tartózkodási idejét az érintkezők felületén. Ezért szükséges annak ismerete, hogy az adott körülmények között — jelen esetben a váltakozóáramú kontaktorok működési tartományában — milyen tényezők milyen mértékben befolyásolják az ívtalppontok mozgásviszonyait, ezek hogyan hatnak az érintkezők élettartamára, ill. hogyan kell a kontaktorokat kialakítani az optimális élettartam elérésére.

2. Az ívtalppont mozgását befolyásoló tényezők vizsgálata

Korábbi kutatási eredményekből [1], [2], [3], [4], [6] ismeretes, hogy az elektródok között égő ív megindulása meghatározott feltételekhez van kötve. Lényegében arról van szó, hogy az ívre ható mozgatóerőnek az elektródok anyagától, felületi minőségétől, formájától függő meghatározott értéket kell elérnie ahhoz, hogy az ívmozgás meginduljon. Kimutatták [5], hogy az ívtalppont és az elektróda között egy súrlódáshoz hasonlóan értelmezhető, ún. talpponti erő működik, ennek leküzdésével lehet az ívet megindítani. Megállapították továbbá azt is, hogy az elektródok anyagának termikus igénybevétele, ezáltal elhasználódása is az ív mozgási sebességétől nagymértékben függ.

Ezekre az eredményekre alapozva — a vizsgálati módszereket tovább fejlesztve — vörösréz, ezüst és 10% CdO tartalmú ezüstkadmiumoxid elektródokon vizsgáltuk az ívtalppontok mozgásviszonyait.

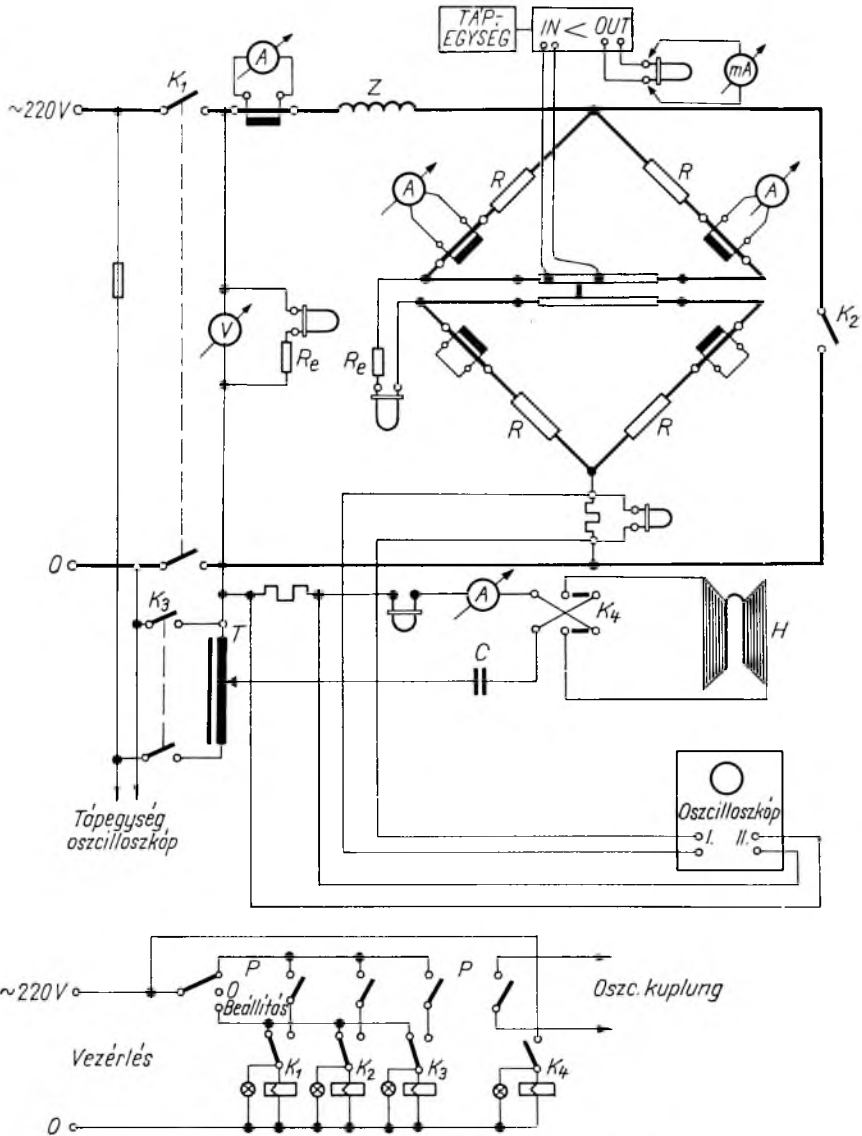
2.1 Vizsgálati módszer

A méréseket a 22-1. ábrán látható áramkörben végeztük. Az íváramot a Z jelű impedancia segítségével állítottuk be. A vizsgálóelektródok — amelyek a H jelű *Helmholz*-tekercs $\pm 3\%$ -on belül állandó mágneses indukciót biztosító belső terében helyezkedtek el — szimmetrikus kétoldalú árambetáplálást kaptak az elektródok és áramhozzávetések saját fűvóterének kiküszöbölése céljából. Az egyes ágáramokat az R jelű ellenállásokkal $\pm 1,5\%$ pontossággal megegyezőre állítottuk. Ugyanezekkel az ellenállásokkal biztosítottuk az íváram és *Helmholz*-tekercs indukciójának fázisegyenlőségét, ami az ívre ható erő egyértelmű meghatározása céljából fontos. A főáramkört a K_1 kapcsoló kapcsolta be. A K_2 söntkapcsoló a bekapcsolási áramtransziens lezajlásáig zárva volt. Nyitásakor, a termikus felhajtóerő kiküszöbölése céljából vízszintesen elhelyezett vizsgálóelektródokba fűzött vékony ezüsthuzallal gyűjtöttük az ívet. A K_3 kapcsoló a *Helmholz*-tekercs áramkörét, a K_4 kapcsoló pedig annak áramirányát kapcsolta. Az ábra alján a P jelű programkapcsolóval működtetett vezérlőáramkör kapcsolása látható.

A vizsgálati elektródok mérete egységesen $3 \times 20 \times 120$ mm volt. A mérések szabotosságának biztosítására felületüket 12-es finomságú csiszolóvászonnal tisztítottuk meg. A csiszolás és az ívfuttatás közötti idő minden esetben 30 percnél kisebb volt. Minden egyes ívfuttatást külön-külön elektródanyagon végeztünk.

Az ívtalppontok mozgási sebességét a következőképpen regisztráltuk: Az elektródok oldalán definíciós kapcsokat alakítottunk ki. E kapcsok között az ívtalppont helyétől függő nagyságú feszültség mérhető. Ha az ívtalppont valamelyik definíciós kapocs közelében van, akkor ez a feszültség maximális, a két kapocs közötti felezőpontban tartózkodó ívtalppont esetén pedig 0. A kapcsok között mérhető mV nagyságú váltakozófeszültséget mérőerősítőn keresztül vezettük egy oszcillografhurokhoz. Az elektródokon visszamaradt ívnyomok helyzetéből, valamint az oszcillogramokból meghatározható ívmozgási időkből számítottuk ki az ív v_a átlagos mozgási sebességét. A 22-2a ábrán egy vizsgálati elektródot, a 22-2b ábrán pedig a hozzá tartozó oszcillogram-felvételeket mutatjuk be.

Mivel a mérés geometriai elrendezése folytán az ív árama és a *Helmholz*-tekercs által előállított indukció egymásra merőleges volt, továbbá ezek fázisa is megegye-

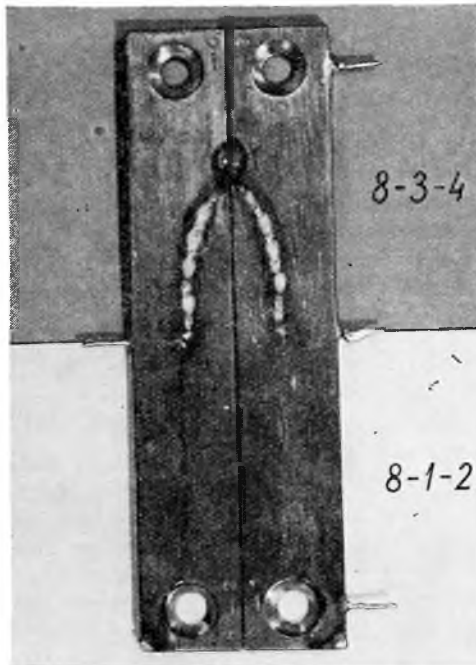


22-1. ábra. Vizsgálati áramkör az ívtalppont mozgásviszonyainak méréséhez

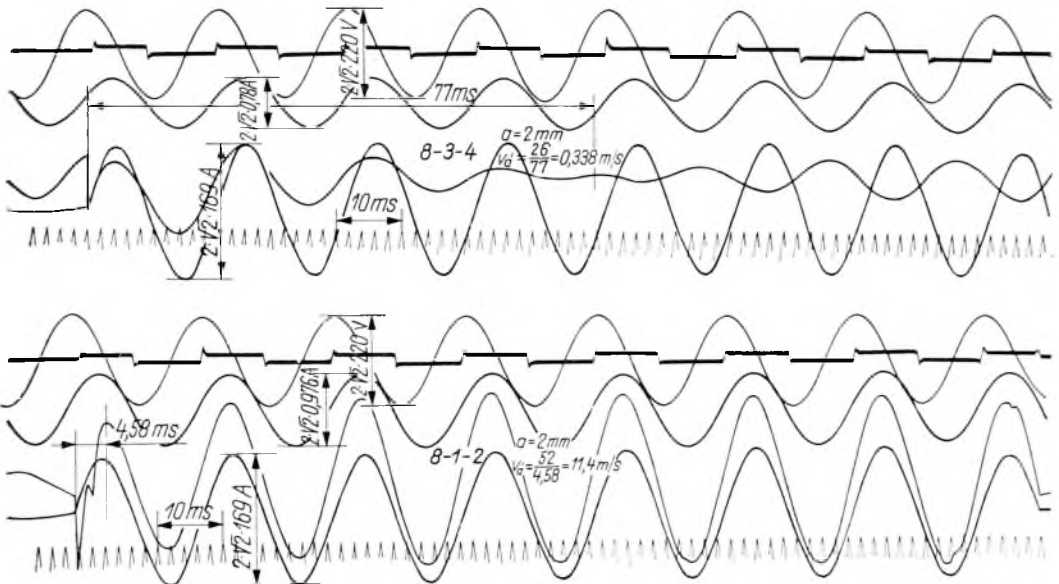
zett, az ívre ható transzverzális erő nagysága az

$$F = B I a$$

összefüggéssel számítható, ahol F az erő középértéke, B az indukció, I az íváram effektív értéke és a az elektródok közötti távolság (ez közelítőleg az ívhosszúsággal egyező).



22-2a ábra Vörösréz vizsgálati elektród fényképe



22-2b ábra. Az a ábrához tartozó oszcillogram-felvételek

8-1-2 jelű elektródfél $I = 169 A_{eff}$,
 $a = 2 mm$,
 $F = 0,19 p$,
 $v_a = 11,4 m/s$;

8-3-4 jelű elektródfél $I = 169 A_{eff}$,
 $a = 2 mm$,
 $F = 0,15 p$,
 $v_a = 0,338 m/s$.

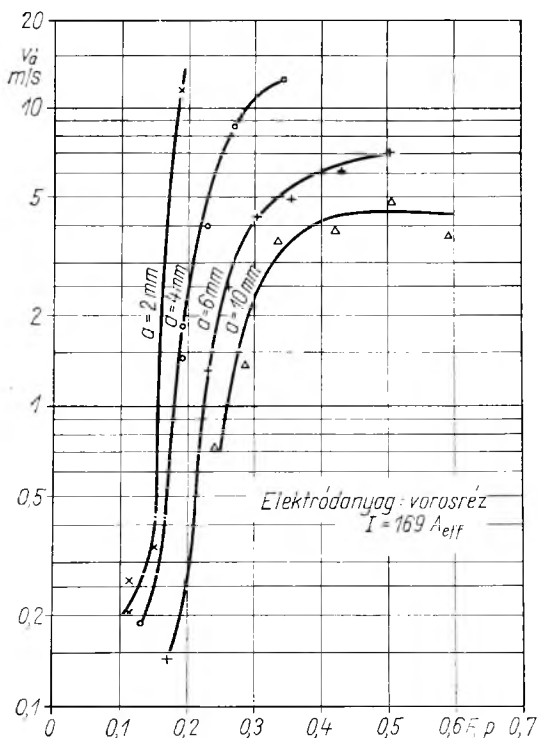
A mérési módszer reprodukálhatóságát lassú ívmozgási sebességeknél ellenőriztük, mivel ilyenkor várhatóan nagyobb az eredmények szórása. A vörösréz elektródokkal, 169 A áramerősséggel végzett mérések a következő eredményeket mutatták:

$$a=4 \text{ mm}; \quad F=0,134p; \quad v_{\dot{a}1}=0,193 \text{ m/s}, \\ v_{\dot{a}2}=0,128 \text{ m/s}, \\ v_{\dot{a}3}=0,149 \text{ m/s};$$

$$a=4 \text{ mm}; \quad F=0,19p; \quad v_{\dot{a}1}=1,84 \text{ m/s}, \\ v_{\dot{a}2}=1,44 \text{ m/s};$$

$$a=2 \text{ mm}; \quad F=0,115p; \quad v_{\dot{a}1}=0,258 \text{ m/s}, \\ v_{\dot{a}2}=0,21 \text{ m/s}.$$

Az azonos körülmények között mért sebesséértékek egyezése igen jónak ítélnélhető, ha figyelembe vesszünk más szerzők hasonló célú mérésénél mutatkozó szórások nagyságát.



22-3. ábra. Az ívtalppont átlagos sebességének változása a transzverzális erő függvényében, vörösréz elektródokon, 169 A_{eff} áramerősség esetén (paraméter az elektródtávolság)

az ívre ható erő további növekedésekor a sebesség átmeneti állandósulása után ismét növekedne.

A különféle ívmozgási sebességekhez az elektródanyag minőségileg különböző igénybevétele tartozik. A 22-2a ábrában bemutatott vizsgálati elektródokon lát-

2.2 Az ívmozgás jellege és az elektródanyag igénybevétele közötti összefüggés vizsgálata

Első lépésként megvizsgáltuk, hogyan függ az ív mozgási sebessége az ívre ható erő nagyságától és az elektródokon visszamaradt ívtalppont nyomok milyen kvalitatív felületi igénybevételt okoztak az egyes esetekben.

A méréseket vörösréz elektródokkal, 169 A áramerősség mellett, 2...10 mm közötti elektródtávolságokkal végeztük el. Az eredményeket a 22-3. ábra mutatja. Az ábrából kitűnik, hogy kis elektródtávolság esetén már igen csekély erőnövekedés hatására ugrásszerűen megnő az ívtalppont mozgási sebessége. Az elektródtávolság növelésekor a sebességnövekedés meredeksége egyre csökken, sőt 10 mm elérésekor a sebesség állandósul. Ezt a jelleget nyilvánvalóan az idezi elő, hogy az ívhosszúság növekedésekor egyre inkább megnő az ívoszlop légellenállása, amely csökkenti a talppont mozgássebességét. Valószínű, hogy

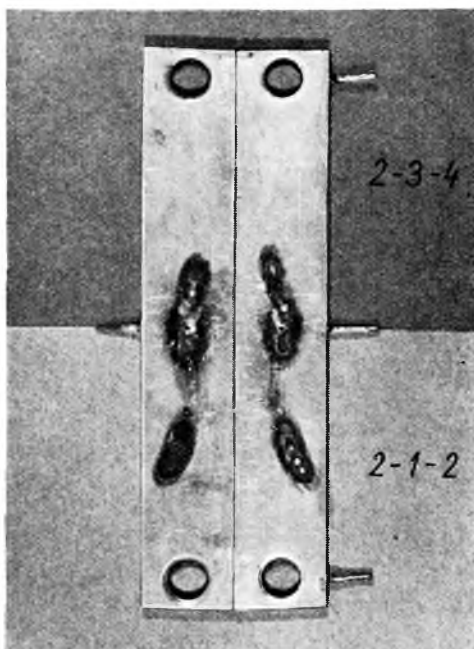
ható, hogy 0,338 m/s mozgási sebességhez rendkívül erős, mély ívtalppont-nyomok, 11,4 m/s mozgási sebességhez pedig egészen enyhe felületi igénybevétel tartozik. Ugyancsak erős igénybevétel mutatkozik a 22-4. ábrán látható AgCdO 90/10 összetételű vizsgálati elektród 2—3—4 jelű részén, amelynél az ívtalppontok mozgási sebessége 0,72 m/s értékű volt. Ugyanezen elektródpár 2—1—2 jelű részén az ív mozgási sebessége 3,38 m/s értékről ugrásszerűen 0,22 m/s-ra lassult. A képen jól látható az ívnyomok jellegében bekövetkező éles változás. Utóbbi esetben az ívtalppontok a kis felületi igénybevételt jelentő gyors és a nagy beégéseket okozó lassú mozgás közötti átmeneti mozgás állapotban vannak. Erre jellemző, hogy az ívre ható mozgatóerő még nem elegendően nagy a biztosan gyors ívtalppontmozgás eléréséhez, és az elektród felületének helyi fizikai viszonyai (helyi oxidhártyák, felületi egyenetlenségek stb.) még észrevehető hatást gyakorolnak a mozgási sebességre.

Számos ilyen jellegű mérés és értékelés alapján megállapítottuk, hogy a szóban forgó elektródok anyagától függetlenül lassú ívtalppont mozgásra utaló erős elektródigénybevétel adódik 1 m/s-nál kisebb sebességek esetén, és biztosan gyors ívtalppont mozgásra utaló kis elektródigénybevétel tapasztalható 3,5 m/s-ot meghaladó sebesség esetén. E két sebességérték közötti tartományban egy átmeneti, bizonytalan-sági zóna van, amelyben az ívtalppontok mozgási sebessége — és ezáltal az elektródok felületi igénybevétele — a két szélső érték között ingadozik. A két mozgási típus közötti átmenet nem folytonos, hanem ugrásszerű. E jelen-

ség lehetséges magyarázata, hogy az ívtalppontoknak emissziós helyükhöz való „ragaszkodását” egy meghatározott nagyságú külső erővel lehet csak legyőzni, amely főleg a helyi emissziós tulajdonságoktól, valamint az ív-áramerősségtől függ.

2.3 Gyors ívtalppontmozgáshoz szükséges erők meghatározása

A vázolt mérési és kiértékelési módszer segítségével meghatároztuk, hogy vörösréz, ezüst és 10% CdO tartalmú ezüstkadmiumoxid elektródokon mekkora az ívtalppont gyors mozgatásának minimális erőszükséglete. Több száz mérés eredményéből a fajlagos erőszükségletek értékét a 22-5. ábrában foglaltuk össze. Ebben feltüntettük az eredmények érvényességi tartományát is. Ha az ívre ható erő a görbékkel feltüntetett értékeket meghaladja, akkor biztosan gyors ívtalppontmozgás jön létre.



22-4. ábra. AgCdO 90/10 vizsgálati elektród

2-1-2 jelű elektródfél $I = 216 \text{ A}_{\text{eff}}$,

$a = 2 \text{ mm}$,

$F = 0,12 \text{ p}$,

$v_{\text{á1}} = 3,38 \text{ m/s}$;

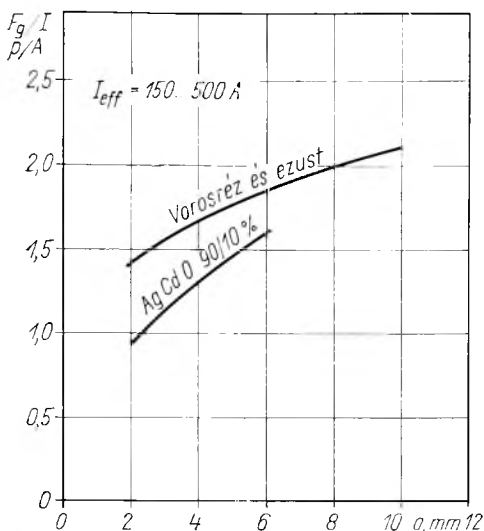
$v_{\text{á2}} = 0,22 \text{ m/s}$;

2-3-4 jelű elektródfél $I = 216 \text{ A}_{\text{eff}}$,

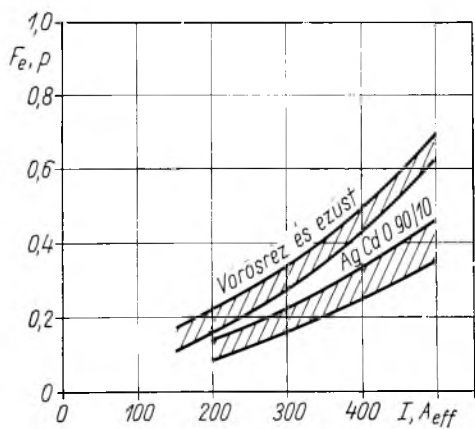
$a = 2 \text{ mm}$,

$F = 0,15 \text{ p}$,

$v_{\text{á}} = 0,72 \text{ m/s}$.



22-5. ábra. A gyors ívtalppont-mozgatás fajlagos erőszükséglete az elektródtávolság függvényében vörösréz, ezüst és AgCdO 90/10% elektródanyagra, 150...500 A_{eff} közötti áramerősségtartományban



22-6. ábra. Az emissziós hely elmozdításának F_e erőszükséglete az áramerősség függvényében

A diagramban a mérési bizonytalanságokat magában foglaló görbesávokat tüntetjük fel. Az eredmények azt mutatják, hogy az emissziós hely elmozdításához szükséges erő az áramerősség növekedésekor nő, és függ az elektród anyagától is. Ez utóbbi tény magyarázza azt, hogy miért kedvezőbbek az ívtalppontmozgatás feltételei AgCdO elektródokon (l. a 22-5. ábrát).

Látható, hogy azonos áramerősség és elektródtávolság esetén az AgCdO elektródok között égő ív elmozdításához kisebb erő elegendő, mint vörösréz, ill. ezüst elektródanyag esetén. Utóbbiakra a gyors ívtalppontmozgás feltételei gyakorlatilag azonosak. Az AgCdO és az ötvözetlen anyagú elektródfémek esetén mutakozó eltérés az emissziós sajátságok közötti különbségekből következhet.

2.4 Az emissziós hely elmozdításához szükséges erő vizsgálata

Ha az ívtalppontok csak néhány tized m/s sebességgel mozognak, a 22-2a és 22-4. ábrákon is látható módon az emissziós helyek viszonylag hosszán — mintegy fél periódusideig — állva maradnak és csak az áramirány megváltozása teszi lehetővé, hogy újabb emissziós hely alakuljon ki az előzőtől néhány mm távolságban. Ha az elmozdulás ilyen lassú, az ívoszlop légellenállásától gyakorlatilag eltekinthetünk, különösen 4 mm, vagy annál kisebb elektródtávolságok esetén (l. még a 22-3. ábrát). Ekkor az ívre ható mozgatóerő gyakorlatilag teljes egészében az új emissziós hely kialakulásával szemben tanúsított ellenállással tart egyensúlyt. Az ilyen körülmények között mérhető külső transzverzális erő tehát gyakorlatilag megegyezik az emisszióshely elmozdításának erőszükségletével.

Méréseink során ezeket az erőértékeket is meghatároztuk. Az eredményeket a 22-6. ábrában mutatjuk be.

3. Az ívtalppontok elmozdítása kontaktorok érintkezőin

A kontaktorok ívöltő szerkezetei általában tartalmaznak olyan elemeket, amelyek a hatásos ívöltés biztosításán túl, helyes méretezés esetén alkalmasak az érintkezők szétválásakor keletkező villamos ív talppontjainak elmozdítására. Ilyenek lehetnek a megfelelően kialakított áramutak, a deion lemezek (amennyiben ferromágneses anyagból készülnek), valamint az ívfúvó tekercsek, esetleg célszerűen elhelyezett állandómágnesek. Utóbbiakat főleg egysarkú, ill. egyenáramú kontaktorokban szokták alkalmazni. A korszerű, nagy mechanikai élettartamot biztosító, fázisonként két megszakítási hellyel rendelkező váltakozóáramú kontaktorokban az első kettőként említett szerkezeti elemek erőhatásai használhatók ki az ívtalppontok mozgathatóságához.

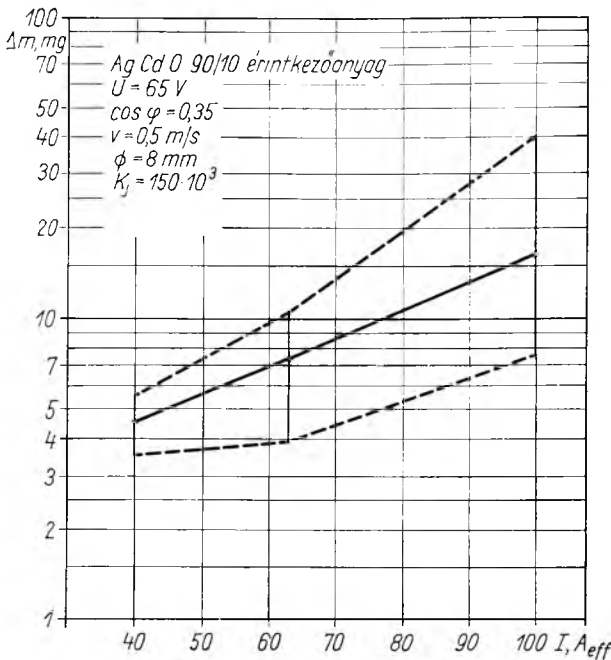
Különösen a megfelelően méretezett vas *deion lemezek* erőhatása alkalmas erre a célra. Ennek nagysága korábban ismertetett eredményeink alapján [7], [8] kielégítő pontossággal meghatározható. A szokásos méretek és konstrukciós elrendezések esetén az áramutak ívre gyakorolt erőhatása — itt nem részletezett mérési eredményeink alapján — a deion lemezek okozta erőhatás 10%-a alatt marad, ezért nagyságát csak különleges esetekben érdemes figyelembe venni. Ennek az aránynak a növelése általában csak a célszerűségi igények rovására történhetne.

Minden egyes kontaktorra nézve meghatározható egy, az ívöltő szerkezettől függő *határáramerősség*, amely felett az ívöltő szerkezet már biztosítja az ívtalppont gyors mozgathatóságát, vagyis azt, hogy az ívtalppontok igen gyorsan eltávoznak az érintkezőpogácsák felületéről anélkül, hogy azok erősen beégnének. Ez a határáramerősség azonban — különösen váltakozóáramú kontaktoroknál — nem egyértelmű, mivel a szétváló érintkezők pillanatnyi nyitási távolságához más és más, fázishelyzettől és pillanatértéktől függő áramerősség tartozik az egyes kikapcsolások folyamán. Az áramerősség növelésekor azonban mindinkább túlsúlyba kerülnek az olyan kikapcsolások, amelyeknél már gyors ívtalppontmozgatás lép fel, ezért várható, hogy ennek élettartamnövelő hatása statisztikusan érvényesül.

Elérhető tehát, hogy az ívtalppont az érintkezők felületéről gyorsan eltávozzék. Mivel azonban legalább egy félperiódusnyi (10 ms) idővel kell általában számolnunk, gondoskodni kell olyan szerkezeti kialakításról, amely az ívtalppont továbbmozgatásának feltételeit úgy biztosítja, hogy ezeknek az elemeknek az igénybevétele egyensúlyban legyen az érintkezők igénybevételével, a hosszabb élettartam érdekében. Várható, hogy túlnyomóan ezeknek a részeknek kell a kikapcsolási ívenergiát felemészteni. Ha ezt nem vesszük figyelembe az ilyen alkatrészek (deion lemezek, oltókamrák falai, áramútrészek stb.) méretezésekor, a kontaktor villamos élettartama csökkenni fog még akkor is, ha az érintkezőpogácsák élettartamát sikerült megnövelni.

4. Élettartamvizsgálási eredmények

Az ismertetett kutatási eredmények és elvi megállapítások ellenőrzése céljából élettartamvizsgálatokat végeztünk gyári kivitelű, 63 A névleges áramerősségű, háromfázisú, fázisonként két megszakítóhelyű kontaktorokban. Az áramerősség változtatása mellett elvégzett mérések eredményeit — 12 pár érintkező anyagfogyásának átlagát és szórási sávját — a 22-7. ábra tartalmazza. Ebből kitűnik, hogy a 100 A és 40 A névleges áramerősség esetén mért átlagos anyagfogyások aránya 3,6. Hasonló jellegű, gyorsított módszerrel [9], ívöltő szerkezet nélkül, egyébként azonos paraméterek mellett végzett vizsgálatok eredményeként ez az arány 22. Ezt a jelentős



22-7. ábra. Egy érintkezőlapka anyagfogyásának változása az áramerősség függvényében $150 \cdot 10^3$ kapcsolási játék után

eltérést az ívöltő szerkezet hatása, ill. a gyors ívtalppontmozgásnak az áramerősség növekedésével bekövetkező mind gyakoribb előfordulása okozhatja.

Összefoglalóul megállapítható, hogy különösen a nehézüzemű kontaktorok érintkezőinek villamos élettartama megnövelhető, ha biztosítjuk, hogy az ívtalppontok mintegy 3,5 m/s-ot meghaladó sebességgel elhagyják az érintkezők felületét. Ebben az esetben az ívtalppontok eróziós hatása jelentősen lecsökken. Ugyanakkor az ívöltő szerkezet egyéb részeinek megfelelő méretezésével biztosítani kell a kapcsolási ívenergia optimális eloszlását és felemésztését.

Irodalom

- [1] Gönci, I.: Lichtbogenwanderung an runden Stäben ETZ-A 81. évf. 1960. 132. old.
- [2] Hesse, D.: Über den Einfluss des Laufschieneffelds auf die Ausbildung und Bewegung von Lichtbogenfusspunkten. Dissertation T. H. Darmstadt, 1959.
- [3] Eidinger, A.—Rieder, W.: Das Verhalten des Lichtbogens in transversalen Magnetfeld. Arch. für Elektrotechnik 43. évf. 1957. 94. old.
- [4] Müller, L.: Wanderungsvorgänge von kurzen Lichtbögen hoher Stromstärke in eigenerregten Magnetfeld. Elektrizitätswirtschaft, 57. évf. 1958. 196. old.
- [5] Domokos S.: Rövid ívek mozgása deionlemez közelében. Kandidátusi értekezés, Budapest, 1966.
- [6] Dr. Eislér J.—Dr. Domokos S.: Villamos kapcsolókészülékek néhány problémája. B. M. E. Tudományos ülészek III. kötet, Budapest, 1967. 21. old.
- [7] Polgár T.: Vas deionlemez váltakozóáramú villamos ívre gyakorolt erőhatásának vizsgálata. VKI Közleményei, Budapest, 1967. 215. old.
- [8] Polgár T.: Néhány szempont váltakozóáramú kontaktorok ívöltő szerkezeteinek kialakításához. Villamosság, 17. évf. 1969. 243. old.
- [9] Dr. Néveri I.: Kontaktwerkstoffprüfungen für Niederspannungsschaltgeräte. Elektrie H. 1. 1966. 11. old.
- [10] Néveri I.: Fragen der optimalen Bemessung von Schützen. Elektrie H. 8. 1971. 295. old.

FÉLVEZETŐ ELEMENK
TECHNOLÓGIA
ÖNÁLLÓ OSZTÁLY

23.

Tömbjelenségek félvezetőkben

ZSIGMOND BALASSA

ÖSSZEFOGLALÁS

Az utóbbi tíz évben felfedeztek néhány olyan jelenséget félvezetőkben, amely pn átmenet nélküli, aktív félvezetőelemek megvalósítását tette lehetővé. Cikkem ezeket az ún. tömbjelenségeket tárgyalja kvalitatív módon, utalva a rajtuk alapuló tömbelemekre. Részletesen ismertetem az elektronátmeneti tömbjelenségeket.

БЛОЧНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Б. Жигмонд

Резюме

За последних 10 лет было открыто несколько таких явлений, которые дали возможность реализовать активные полупроводниковые элементы без *p-n* переходов. Статья занимается этими т. н. блочными явлениями с количественной точки зрения, ссылаясь на блочные элементы основанные на этих явлениях. Статья подробно описывает блочные явления перехода электронов.

BULKEFFEKTE IN DEN HALBLEITERN

B. Zsigmond

Zusammenfassung

In den letzten 10 Jahren hat man einige solche Effekte entdeckt in den Halbleitern, welche die Herstellung ohne *pn*-Übergang der aktiven Halbleiterbauelemente ermöglichen. Der Aufsatz behandelt qualitative diese sogenannten Bulkeffekte, hinweisend auf die Bulkeffekt-Elemente. Er legt ausführlich die Elektronentransfereffekte dar.

BULK EFFECTS IN SEMICONDUCTORS

B. Zsigmond

Summary

In the past decade some new phenomena inherent with semiconductors have been discovered, which have permitted the development of active semiconductor devices having no *p-n* junctions. These phenomena termed bulk effects are qualitatively dealt with, reference being made to the bulk devices based on these effects. The transferred-electron effects are described in detail.

1. Bevezetés

A tömbjelenség fogalom az egyenirányító-, ill. tranzisztorhatás ellentétéként jelenik meg a félvezetők elméletében. A tranzisztorhatást atomi vastagságú rétegben, a pn átmenetben lejátszódó folyamatok határozzák meg, ezzel szemben a tömbjelenség térfogati jelenség. Tömbjelenségeken (bulk effect) a félvezetőknek azokat a térfogati elektromos jelenségeit értjük, amelyek alapján aktív áramköri elem készíthető. Ez az aktív áramköri elem a tömbelem. A tömbelem a hagyományos félvezetőelemekkel szemben általában nem tartalmaz pn átmenetet. Felfedezése (60-as évek) alapvető fordulatot jelent a félvezetők elméletében és a félvezetőelemek fejlődésében egyaránt.

2. A tömbjelenségek fajtái

Fizikai alapjukat tekintve, jelenleg négy különböző tömbjelenségekört ismertetünk. Mindegyikükre az jellemző, hogy akkor lépnek fel, ha az egyenáramú táplálás hatására a térerősség valamely küszöbértéket meghalad. A jelenség egyik következménye általában negatív differenciális ellenállás a működő tömbelemben. A négy jelenségekörből háromban felléphet megfelelő körülmények között a Gunn-effektus. Ez olyan oszcilláció, amely elektromos domének mozgásának az eredménye. Az elektromos domén olyan tartomány, amelyen belül nagy az elektromos tér a környező tartományokhoz képest. A tömbjelenségekkel kapcsolatban előtérbe kerültek az összetett félvezetők. A GaAs pl. a következőkben felsorolt mind a négy jelenségekörben szerepel.

Elektronátmeneti tömbjelenségek

(transferred electron effects = TE jelenségek)

Néhány n típusú összetett félvezetőben (GaAs, GaP stb.) az elektronok egy bizonyos E_k küszöbértéknél nagyobb elektromos térben a vezetési sáv fővölgyéből zömmel a magasabban fekvő mellékvölgyekbe szóródnak, így lecsökken az effektív mozgékonyosság. Ez a csökkenés negatív differenciális mozgékonyosságban jelentkezik, amely a belső és külső feltételektől függően igen változatos megjelenési formákat eredményez. (A TE jelenségek részletes tárgyalását l. később.)

Rekombinációs tömbjelenségek vagy térfüggő csapdajelenségek

(field-dependent trapping = FDT jelenség)

Az n típusú félvezetőkben lehetnek olyan elektronbefogási centrumok, amelyek elektromos tér és fény különböző kombinációinak hatására válnak aktívvá, vagyis a csapdák elektronbefogási hatáskeresztmetszete térfüggő. Adott fényintenzitáshoz tartozik egy E_k térerősségküszöb, amelyet egyenáramú táplálással elérve a csapdák hirtelen befogják az elektronokat, tehát lecsökken az áram. Ez negatív differenciális ellenállást jelent az I—U jelleggörbe megfelelő szakaszán, amely — a 3. pontban leírt módon — elektromos domének kialakulásához és Gunn-oszcillációhoz vezet. A különbség az, hogy itt a domének sebessége és így a frekvencia sokkal kisebb (kHz—MHz), mint a TE jelenségek esetén (GHz). A jellemző anyag itt is a GaAs.

Piezoelektromos vagy akusztoelektromos tömbjelenségek

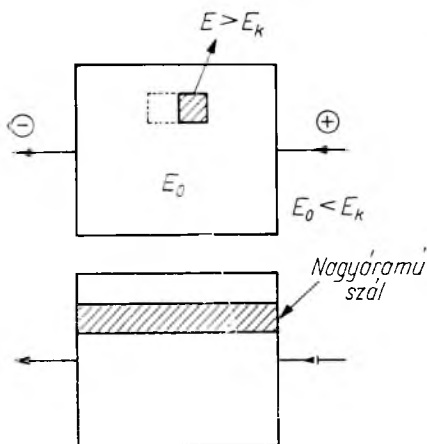
(Acusto-electric effects = AKEL jelenségek)

Mint ismeretes, a piezoelektromos félvezetőkben az elektromos tér változása mechanikai hullámokat kelt. A mechanikai rezgések és az elektromos tér között az ún. akusztoelektromos kölcsönhatás teremt kapcsolatot. Ha az egyenáramú táplálás következtében a kristály elektronjainak a driftsebessége nagyobb, mint a hang sebessége, akkor a fonon—elektron-kölcsönhatás következtében negatív differenciális ellenállás lép fel. Ennek eredményeként a haladó hullámú elektroncsövel analóg haladó hullámú erősítés vagy a 3. pontban tárgyalandó elektromos domének jöhetnek létre. A jellemző anyag a GaAs-en kívül elsősorban a CdS.

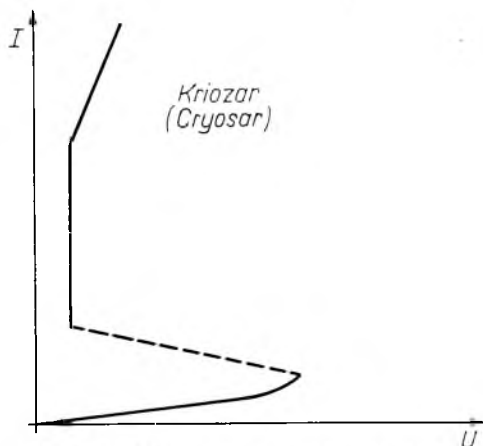
Lavina-tömbjelenségek

Ez két jelenségcsoportot foglal magába:

a) alacsony hőmérsékleten lejátszódó lavinajelenség. Először 4,2 °K körüli kompenzált Ge-on tapasztalták a jelenséget. Ilyen hőmérsékleten kis térerősség esetén igen nagy a félvezető ellenállása, mert a töltéshordozók gyakorlatilag mind „befagytak” a szennyezési centrumokba. Ha a félvezető belsejében egy helyen egy bizonyos E_k küszöbertéknél nagyobb a térerősség, akkor itt az ütközési ionizáció felülmúlhatja a rekombinációs sebességet, lavinasokszorozódás és reverzibilis le-törés következik be (E_k tulajdonképpen a lavinafeszültséghez tartozó térerősség). A szennyezések ezen a helyen aktiválódnak, az ellenállás pedig néhány nagyság-renddel csökken. A tömb belsejében a két kivezetés között nagyáramú szál alakul ki. (l. 23-1. ábra). Ennek keresztmetszete állandó feszültség mellett az árammal nő.



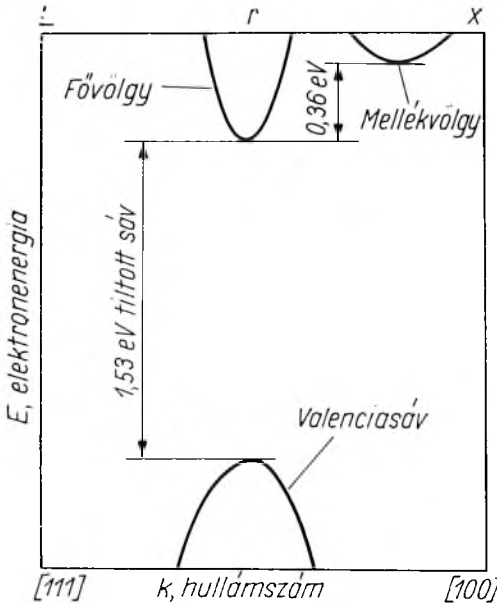
23-1. ábra. A nagyáramú szál képződése



23-2. ábra. A kriozar (cryosar) karakterisztikája

A feszültség egészen addig állandó marad, ameddig a nagyáramú szál be nem tölti a tömbelem egész térfogatát. Az áram—feszültség karakterisztika és így az alacsony hőmérsékletű tömbelem (cryosar) működése a négyrétegű diódaéhoz hasonlít (23-2. ábra). Hogy az analógia teljes legyen, vezérlőelektródát is szoktak vinni az ilyen tömbelemre. Ez már a tirisztor analógja, elnevezése: kriozisztor (cryosistor).

b) A lavina-futásidő jelenségek (Impatt Avalanche Transit-time Effects = impatt jelenségek). Adjunk nagy zárófeszültséget egy pn átmenetre. Ha az így elért térerősség elég nagy, akkor a felgyorsult töltéshordozók az átmeneten áthaladva ütközési ionizációval lyuk—elektron párokat keltenek. Ha a lavinaküszöböt elértük, akkor ez a folyamat az ún. lavinasokszorozódáshoz vezet. Az áram az idővel exponenciálisan nő, de az adott feszültséghez tartozó bizonyos tértöltés elérése azután meghatározott szintre korlátozza az áramot. A töltéshordozó sebessége ilyen nagy térerősség esetén a térerősségtől független szóráskorlátolt érték. Ha nagyfrekvenciás jelet adunk az egyenfeszültséghez, ezt az áram csak késve tudja követni, mert a tértöltés további felépülése bizonyos időbe kerül. A lavinaáramban nagyfrekvenciás összetevő jelenik meg, amelyet nem korlátoz a tértöltés. Ennek az áramnak a növekedése a kisjelű váltakozófeszültség minden periódusában még akkor is folytatódik, amikor az már áthalad a maximumán, ideális esetben addig, ameddig a jelfeszültség pozitív. Ez tulajdonképpen annyit jelent, hogy a lavinaáram 90° -os induktív fáziskésést mutat az őt létrehozó váltakozófeszültséghez képest. Az áramkörü elemek megfelelő illesztése esetén a lavinasokszorozódásból és a futási időből származó fáziskésés 90° és 270° között lesz. Az áram és feszültség között fellépő fáziskésés negatív differenciális ellenállást jelent. Ha az áramkör kapacitása és induktivitása olyan rezonanciafrekvenciát határoz meg, amely abba a tartományba esik, amelyben a dióda negatív ellenállást mutat, akkor ezen az értéken oszcilláció jön létre. Az első ilyen diódát elméletileg *Read* [1] dolgozta ki. Konstrukcióját *Read*-diódnak nevezik. A lavinadióda egyszerűbb válfaja az impatt dióda, újabb, nagyteljesítményű változata a trapatt dióda.



23-3. ábra. A GaAs sávszerkezete

Itt kell megjegyezni, hogy csak ebben a tömbelem-csoportban jogosult a dióda elnevezés a pn átmenet miatt, a többi tömbelemnek elvben szimmetrikus az áram—feszültség-jelleggörbéje. Helytelen elnevezés pl. a Gunn-dióda.

A felsorolt négy témakörből Intézetünkben konkrétan az elsővel foglalkoztunk, ezért ezt részletesebben ismertetem.

3. Az elektronátmeneti tömbjelenség

3.1 A jelenségek fizikai alapja

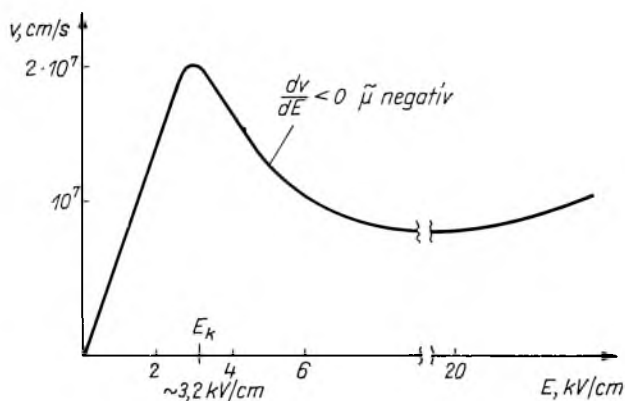
Már kísérleti megvalósításuk előtt *Ridley* és *Watkins* [2], majd tőlük függetlenül *Hilsum* [3] elméletileg kimutatta, hogy n típusú direktcsávú (direct-gap) félvezetőtömbben egy E_k küszöbértéknél nagyobb térerősség hatására negatív differenciális moz-

gékonyág, ill. ellenállás léphet fel. Ennek áraminstabilitás lehet a következménye. A GaAs, GaP, InP stb. ilyen sávszerkezettel rendelkeznek. A TE jelenségeket a GaAs mutatja a legvilágosabban, ezért konkrétan ezt tárgyalom. A 23-3. ábrán láthatjuk vázlatosan a GaAs vezetési sávszerkezetét. A Brillouin-zóna közepén

helyezkedik el az energia főminimuma, ezenkívül még hat mellékvölgy (satellite valley) található szimmetrikus elrendezésben. Ezeknek energiáminimuma 0,36 eV-tal van a főminimum felett. A főminimumban az m^* effektív tömeg igen kicsi, a szabad elektron m_0 tömegének a 7%-e, így ott nagy a mozgékonyág. A mellékvölgyben viszont $m^* \approx m_0$, tehát a mozgékonyág kicsi. Szobahőmérsékleten és kis elektromos térben az elektronok zöme a fővölgyben helyezkedik el, mert a mellékvölgyek energiája kT -hez képest nagy, ennek eredményeképpen az eredő effektív mozgékonyág is nagy. Egy bizonyos E_k térerősség elérésével az elektronok energiája eléri a mellékvölgyek szintjét, ekkor jórészt a mellékvölgyekbe szóródik. Ebben az esetben μ_{eff} lecsökken. Ha az elektron driftsebességét ábrázoljuk a térerősség függvényében, akkor E_k után egy negatív meredekségű szakaszt kapunk (23-4. ábra). Ez azt jelenti, hogy negatív a differenciális mozgékonyág, mert annak definíciója $\tilde{\mu} = \frac{dv}{dE}$.

A 23-4. ábra *Butcher* és *Fawcett* [4] számításaiból adódott. Ezzel nagyon jól egyezik *Ruch* és *Kino* [5] mérési eredménye, amelyet egy évvel utána végeztek.

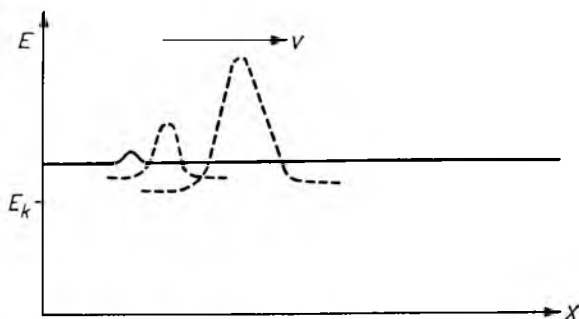
A $v-E$ görbén látható negatív differenciális mozgékonyág alapján már könnyen elképzelhetjük a legegyszerűbb tömbjelenséget. Nyilvánvalónak látszik, hogy



23-4. ábra. Az elektron sebessége a térerősség függvényében GaAs-ben

egy homogén GaAs tömbelem áram—feszültség jelleggörbéje a $v-E$ görbével azonos lefutású, hiszen az áram adott mennyiségű töltéshordozó esetén azok v sebességével, a feszültség pedig az E elektromos térerősséggel arányos. A negatív differenciális mozgékonyágnak negatív differenciális ellenállás felel meg. Ha akkora egyenfeszültséget adunk a tömbelemre, hogy a negatív meredekségű szakaszra kerüljön a munkapontja, akkor rezgőkörbe helyezve a kör rezonanciafrekvenciáján oszcilláció lép fel, miközben a hordozóeloszlás a félvezetőtömbben egyenletes marad. Ez a jelenség valósul meg az LSA és a dielektromos LSA oszcilláció során. Elvben ezek a legegyszerűbb tömbjelenségek, a gyakorlatban viszont igen nehéz a megvalósításuk. Mi okoz itt problémát?

Hallgatólagosan feltételeztük, hogy a tömbelembelemben nem lép fel jelentős tér-töltés. A szokásos körülmények között ez igaz is, mert ha valamilyen oknál fogva kis tér-töltés lép fel, az τ_a időállandóval lecseng a félvezetőben. Ebben az esetben



23-5. ábra. Doménképződés

τ_d előjelet vált, mert azonos előjelű a differenciális mozgékonyssággal. Negatív differenciális mozgékonyosság esetén viszont τ_d már nem lecsengési, hanem felépülési időállandó. A kezdetben kis helyi zavar — a 23-5. ábrán látható módon — haladás közben növekedni fog, és tértöltésréteg, ún. elektromos domén alakulhat ki.

3.2 Az elektronátmeneti tömbjelenségek fajtái

A Gunn-oszcilláció

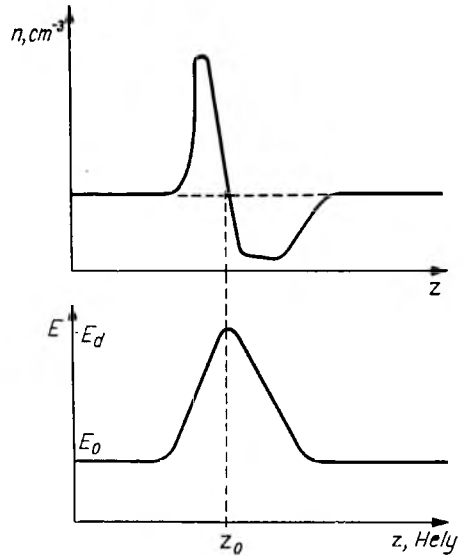
Az első TE jelenségről Gunn [6] számolt be 1963-ban; n típusú GaAs-en egy bizonyos térerősség felett áraminstabilitást, ill. oszcillációt tapasztalt. Az előző gondolatmenet folytatásaképpen ez könnyen megmagyarázható.

Adjunk egyenfeszültséget egy kontaktusokkal ellátott n típusú GaAs-tömbre. Mikroszkopikusan tekintve a tömb belsejében kialakuló térerősség sohasem egyenletes, szennyezési inhomogenitás vagy statisztikus ingadozás miatt mindig van benne valamilyen kis helyi zavar. Ha a térerősség a 23-4. ábra negatív differenciális mozgékonyosságú tartományában van, akkor ez a zavar τ_d időállandóval növekszik. Tekintsük a 23-5. ábrát. A térerősség egy helyen kicsivel nagyobb, mint másutt (folytonos vonal). Az elektronok a térerősség által meghatározott v sebességgel haladnak a katódtól az anód felé x irányban. Azon a helyen, ahol a térerősség nagyobb, az elektronok sebessége a 23-4. ábráról leolvashatóan kisebb ($E > E_k$), így az elektronok itt összesűrűsödve kicsit visszamaradnak, előző helyükön pedig ritkulás következik be. Ez tértöltésréteget jelent, amely az elektronárammal együtt sodródik az anód felé. Ez a töltéssűrűsödés azonban még jobban megnöveli ezen a helyen a teret, így az elektronok lassulva továbbnövelik a bal oldali réteg töltéssűrűségét, elől pedig a töltésritkulást. A folyamat eredményeképpen a dipólrétegben levő térerősség a 23-5. ábrán látható módon tovább növekedik, a kristály többi részén viszont lecsökken. Végül egyensúlyi állapot alakul ki, amelyben a nagyterű dipólréteg, az ún. domén már változatlanul halad az anód felé. A kristály doménon kívüli részében a térerő leesik a $v-E$ görbe pozitív meredekségű tartománya által meghatározott értékre (23-4. ábra). A két térerősség által meghatározott driftsebesség kb. azonos. Hasonló jelenség játszódik le, ha a zavar a térerősség helyi csökkenésében jelentkezik.

A domén általában rendkívül gyorsan felépül. Gunn-oszcilláció esetén egyszerre csak egy domén lehet jelen a mintában, mert a doménon kívüli térerősség leesése nem teszi lehetővé több domén felépülését. A térerősség azért csökken itt le,

mert a feszültség jórésze magán a doménen esik. A 23-6. ábrán láthatjuk a kialakult domén elektron- és téreloszlását. Itt n_0 a donorsűrűség, E_d a domén maximális térerőssége, E_0 pedig a doménen kívüli térerősség. Ezek után a Gunn-oszcillációt a következőképpen értelmezhetjük:

A tömbelemben a küszöbérték feletti feszültség hatására áram alakul ki, amelyet az E értéknek megfelelő v driftsebesség és az n elektronsűrűség határoz meg. Az utóbbi kb. az n_0 donorsűrűséggel egyenlő, ahogy azonban a domén kialakul, az áram a kivezetőknél lecsökken. Amint a domén átfut az elemen, az anódhoz érve eltűnik — az áram felemelkedik eredeti értékére, de csak annyi ideig, amíg egy következő domén létre nem jön. Az áramváltozás egy periódusa addig tart, amíg a domén áthalad a félvezető hosszán. Teljes hosszal azért számolhatunk, mert a domén általában a katódnál jön létre és az anódnál tűnik el homogen félvezetőben. Ezt képlet-



23-6. ábra. A domén elektron- és téreloszlása

szerűen kifejezve a periódusidő $T = \frac{l}{v_d}$, tehát a Gunn-oszcilláció frekvenciája

$f_1 = \frac{v_d}{l}$. Itt l a tömbelem hossza, v_d pedig a domén sebessége. Ez utóbbi általában a doménen kívüli elektronok v_0 sebességével egyezik a GaAs-ben: $v_d \approx v_0$. A domének sebessége itt kb. 10^7 cm/s és a rezgés frekvenciája 1...100 GHz a gyakorlatban.

A domén felépüléséhez az l hosszúságon megfelelő mennyiségű töltéshordozónak kell jelen lennie. A számítások szerint, ha a tömbelem donorkoncentrációjának és hosszának szorzata nem nagyobb 10^{12} cm⁻²-nél, akkor nem alakulhat ki a domén. A lavinaletörés veszélye nélkül az $n_0 l$ szorzat viszont 10^3 cm⁻²-nél nagyobb nem lehet. A leírtak alapján a Gunn-elemre vonatkozó két technikai alapkövetelmény a következő (GaAs esetén):

1. Az elemre adott feszültséggel el kell érniük az E_k küszöbtérerősséget.

$$E_k \approx 3,3 \text{ kV/cm.}$$

2. A donorkoncentráció és az elemhossz szorzatára a következő egyenlőtlenségnek kell fennállnia: $10^{12} \text{ cm}^{-2} < n_0 l < 10^{13} \text{ cm}^{-2}$.

A Gunn-elemek elméletével a hazai szakirodalomban *Pataki Gy.* [7], *Székely V.* és *Tarnay K.* [8] foglalkozik.

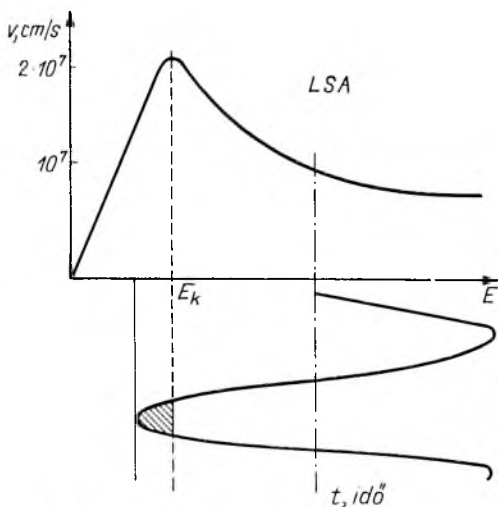
A hibrid oszcilláció

Helyezzünk egy Gunn-elemet olyan rezgőkörbe, amelynek f_0 önfrekvenciája különbözik a működési tartomány l hossza által meghatározott f_1 értéktől. Ha a különbség nem számottevő, akkor a Gunn-oszcilláció ezen az f_0 frekvencián megy végbe. Ha viszont f_0 már eléri f_1 kétszeresét, akkor új jelenség következhet be. Egyik ilyen

jelenség a hibrid oszcilláció, amely akkor léphet fel, ha f_0 2...5-szöröse f_1 -nek. A jelenség a következőképpen játszódik le: A térerősség növekedésekor E_k felett megindul a tértöltés-sűrűsödés, kialakul egy domén. Az áramköri feltételek miatt nem tud változatlanul áthaladni a tömbelemen, mert közben leesik a térerősség, a domén elfojtódik. A tértöltés jórészt szétszóródik, de a maradék réteg a következő periódusban egy újabb sűrűsödés forrása lesz, megint felépül a domén. Közben a katódról is elindul egy sűrűsödési réteg. Ily módon a tömbelem hosszán 2...5 domén is haladhat egyidőben az aktív tartományban periodikusan felépülve és szóródva. Megfelelő impedancia és áramköri feltételek mellett kialakul egy rezgés a kör f_0 frekvenciáján. A hibrid nevet azért kapta a jelenség, mert ez az átmenet a Gunn és az LSA oszcilláció között.

Az LSA oszcilláció

Az elnevezés az angol „Limited Space-charge Accumulation” rövidítése, magyarra korlátozott tértöltés-növekedésnek fordíthatjuk. Akkor lép fel, ha a rezgőkör önfrekvenciája legalább ötszöröse f_1 -nek, az impedanciát pedig úgy méretezik, hogy



23-7. ábra. Az LSA oszcilláció

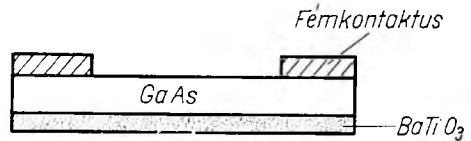
a térerősség a rezgés minden periódusának kis részén a szóródási tartományba süllyedjen. A kristály szennyezésszintjét úgy kell megválasztani, hogy a rezgés egy periódusában ne épülhessen fel a domén, ezért korlátozott a tértöltés-növekedés. Cope-land [9] fedezte fel ezt a jelenséget 1966-ban. A 23-7. ábra mutatja az LSA oszcillációt. Amíg a térerősség a küszöbérték felett van, megindul a tértöltésréteg képződése. Ha elég nagy a frekvencia, akkor még a domén kialakulása előtt a pozitív meredekségű tartományba kerül a tér, így a tértöltés szétszóródik. Ebben az esetben a sűrűsödési réteg és az anód között negatív soros ellenállás jelenik meg, amely energiát szolgáltat a rezgőkörnek (kivéve azt a rövid időt, amíg a szóródás végbemegy). Elég nagy frekvencián a tértöltés szerepét elhanyagolhatjuk, a tömbelem tere egyenletesnek tekinthető és úgy működik, mint a 23-4. ábrán látható $v-E$ görbéhez hasonló $I-U$ jelleggörbéjű kétpólus. Hogy a rezgés egy periódusában ne történjék jelentős tértöltéssűrűsödés, ahhoz a periódusidő és a donorkoncentráció szorzatának a következő egyenlőtlenséget kell teljesítenie:

$$2 \cdot 10^4 < n_0 T = n_0 / f < 2 \cdot 10^5 \text{ s/cm}^3.$$

A tömbelem méretének alsó korlátját a katódnál lezajló téreltorzulás szabja meg. A téreltorzulás a v/f távolságon belül történik, tehát ennél feltétlenül hosszabbra kell készíteni a tömbelemet. Felső korlátot az állóhullámok kialakulása szab az elem-

hossznak. Copeland [10] számításai szerint ez $10^9 \text{ cm} \frac{\text{Hz}}{f}$. Összefoglalva, l a következő egyenlőtlenségnek tesz eleget: $5 \frac{v}{f} < l < 10^9 \text{ cm Hz/f}$.

A homogén GaAs elem energiaátalakítási hatásfoka a számítások szerint E_0 -tól és μ -tól függően 18...25%, de a tapasztalatok szerint eddig még 10%-nál nagyobb hatásfokot csak néhányszor sikerült megvalósítani. Copeland [10] számítása mutattott rá, hogy a hatásfok leromlását a szennyezés ingadozásai okozhatják. A jelenlegi kísérleti adatok alapján azt jósolják, hogy homogén kristállyal 10 GHz-en 400 kW kimenőteljesítmény érhető el. Eddig maximálisan 6 kW csúcsteljesítményről hallottunk.



23-8. ábra. Dielektromos LSA tömbelem

Az LSA oszcillációnak született egy új válfaja, a dielektromos LSA oszcilláció. Kataoka és társai [11] számolnak be egy újabb tömbelemről, amelyben a tértöltés-sűrűsödést az elem felületére vitt dielektromos réteg korlátozza. 10...15 ezres dielektromos állandójú BaTiO_3 -at alkalmaznak és erre esetleg még fémfilmeket is párologtatnak. A 23-8. ábrán látható egy konstrukció. Az ilyen tömbelem egyszerűen negatív differenciális ellenállásnak tekinthető, és a beállítástól függően elég széles frekvenciatartományban erősítőként és oszcillátorként használható. Az egyszerű LSA tömbelem ettől abban különbözik, hogy a tértöltés-sűrűsödést az áramkörü (és egyben) frekvenciafeltételek korlátozzák, nem pedig a dielektrikum.

Erősítési jelenségek

A tömbelemekben két alapvetően különböző erősítési jelenséget lehet megvalósítani. Mindkét felfedezés Thim [12, 13] nevéhez fűződik. Az elsőt általában Thim-erősítőnek is nevezik. A kétfajta erősítő közti különbség az, hogy az elsőnek a tömbelemre jellemző $n_0 l$ szorzata jóval kisebb, mint a 10^{12} cm^{-2} kritikus érték, tehát domének kialakulásáról nem lehet szó. A második esetben $n_0 l > 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, az erősítési jelenség tehát domének haladásával jár együtt. Az utóbbit ezért haladódomén-erősítőnek nevezik, rövidítése TDA (Travelling Domain Amplifier).

A Thim-erősítőben $n_0 l < 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Adjunk a küszöbértéknél nagyobb feszültséget egy ilyen tömbelemre. A $v-E$ (23-4. ábra) görbéről tudjuk, hogy ekkor az elektronok driftsebessége lecsökken, domének pedig nem alakulnak ki. Azonos határfeltételek mellett a töltéshordozók és a térerősség eloszlása időben nem változik a tömbelemben. Azt gondolnánk, hogy a feszültség további emelésekor az áram lecsökken, a tapasztalat szerint viszont tovább növekszik, a tömbelem egyenáramú szempontból pozitív ellenállást mutat. Az előfeszültség hatására sűrűsödési folyamat indul meg a katódnál. Tekintettel arra, hogy az alacsony adalékolás miatt kevés a szabad töltéshordozó, csak az elsődleges sűrűsödési réteg épül fel ritkulási réteg nélkül és ez a katódtól egészen az anódig tart. Az elektromos tér folyamatosan emelkedik az anódtól a katódig, közben valahol eléri az E_k küszöbszintet. Ha a feszültséget emeljük, akkor az elektromos tér görbéje meredekebb lesz, így a töltéshordozók sűrűsége emelkedik, az áram pedig nő. Thim [12] számításai szerint az ilyen kristály nagyfrekvencián negatív differenciális ellenállást mutat, ami különösen a futási idő reciprokához közeli frekvenciaértéknél és harmonikusainál jelentős.

Ennek alapján a tömbelem kisjelű erősítőnek használható, amit mikrohullámú stabil erősítőnek is hívnak. A Thim-féle stabil erősítőnek nagy hátránya, hogy a kis n_0l szorzat miatt csak kis teljesítményt tud leadni. A TDA erősítő sokat javít ezen a hátrányon.

A haladódomén-erősítőben az n_0l szorzat a kritikus értéknél jóval nagyobb, így megfelelően nagy feszültség hatására megindul a doménmozgás. Ha közben a tömbelemre adott feszültség folyamatosan növekszik, akkor az áram csökken, amíg a domén tere telítési értéket nem ér el. Ha az oszcilláló tömbelemre nagyfrekvenciás jelet adunk, akkor a tömbelem ezt erősíteni fogja, ameddig a frekvenciát a domén tértöltése követi. Ez az erősítési működésre vonatkozóan frekvenciakorlátot határoz meg. A határfrekvencia alatt az erősítő impedanciájának reális része negatív. Az erősítés akkor szűnik meg, ha az impedancia reális része nulla. Az n típusú GaAs szokásos értékeivel:

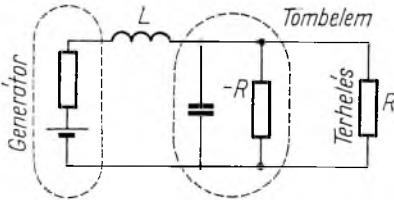
$$f_{\max} l = 10^8 \text{ cm/s,}$$

ahol f_{\max} a felső frekvenciahatár.

Ezen újabb típusú erősítőnek a stabil erősítőhöz viszonyítva a fő előnye az n_0l szorzat nagyságából következik. Sokkal nagyobb teljesítményt tud leadni, mintegy 20 dB-lel nagyobbat. Másik előnye, hogy széles sávú erősítő lévén nemcsak a futási időnek megfelelő frekvenciához közel erősít, mint a stabil erősítő, hanem ennek kb. tízszereséig. A működési frekvencia 100 GHz-ig is kiterjeszthető az n_0l szorzat növelésével. Ebben az esetben a hőelvezetés jelenti a fő problémát. Az első kísérletekben néhány watt kimenőteljesítmény érték el 6 GHz-en.

Rezonanciaköri oszcilláció

Rezonanciaköri oszcilláció akkor jöhet létre, ha egy Gunn-elemet induktivitással sorbakötünk egy feszültséggenerátorra nagy jósági tényezőjű rezonanciakörben (23-9. ábra). A generátor feszültségét úgy kell választani, hogy csak kicsivel legyen nagyobb a küszöbértéknél. A doménmozgás ebben az esetben megindul, a tömbelem árama leesik, de csak rövid időre, mert a doménen kívüli térerősség hamar a kritikus érték alá süllyed.



23-9. ábra. Tömbelem rezonanciakörben

A megfelelő impedancia és áramköri beállítás esetén a tömbelemen levő feszültség minden periódusában mélyen a kritikus érték alá esik. Amint csökken a feszültség, csökken a domén vastagsága, végül egy bizonyos értéknél a sűrűsödési és ritkulási rétegek semlegesítik egymást, a domén megsemmisül.

A tömbelem árama megnő, és az áramkör LC szorzatától függően egy bizonyos idő alatt a térerősség eléri a küszöbértéket. Ekkor megint kialakul a domén és a folyamat megismétlődik. Ily módon a rezgőkörtől függően 1 kHz és 0,5 GHz közötti oszcillációt lehet beállítani. A feszültség hullámformájának felfutó éle kb. $\pi\sqrt{LC}$ ideig tart.

Módosított doménjelenségek

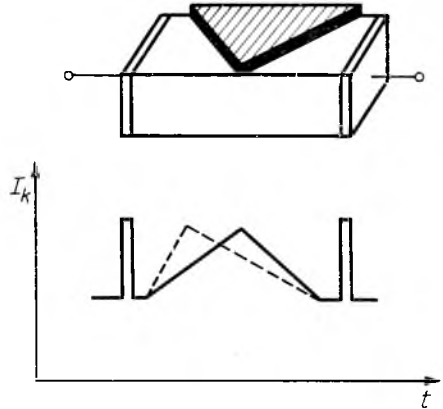
Az eddigi tárgyalásunkban a félvezető tömbnek csak egy méretéről, az l hosszúságról beszéltünk, a keresztmetszetét hallgatólagosan azonosnak vettük az egész tartományban. Az adalékolást egyenletesnek tekintettük, és egy n_0 koncentrációval jellemeztük az adott tömbelemre. Az anódon és a katódon kívül más kontaktust nem alkalmaztunk. A három felsorolt feltétel módosításával szinte végtelen változatosság nyílik meg a tömbelemek működésében.

Shoji [14] és Sandbank [15] írnak le néhány geometriával, adalékolással vagy felületi kontaktussal módosított doménjelenséget. Ahogy a domén útja mentén változik a tömbelem keresztmetszete, ill. adalékkoncentrációja, aszerint változik időben az árama is. Így tetszés szerinti áram alakú oszcillátort kapunk. Másrészt viszont a térerősség keresztmetszefüggése miatt a feszültséggel változtatható frekvenciájú tömbelemet is készíthetünk.

Rendkívül változatos működésformákat kapunk, ha egyenletes keresztmetszetű és adalékolású tömbelemre még további kontaktusokat viszünk fel pontszerűen vagy elosztott formában; ez rendszerint nagy ellenállású rétegen keresztül történik, hogy a tömb feszültségeloszlása ne változzék meg ezen a helyen jelentősen. Az új kontaktust vagy kontaktusokat lebegő potenciálon hagyhatjuk, leföldelhetjük, összeköthetjük ellenálláson keresztül vagy anélkül az anóddal vagy a katóddal, esetleg egymással.

A 23-10. ábrán látható egy tömbelem felületen elosztott kontaktussal. Ha a kontaktus ohmos, akkor a folyamatos vonallal ábrázolt hullámformát kapjuk. Ha a kontaktus egyenirányító hatást mutat, akkor a szaggatott vonalhoz hasonló módon, eltolódik a hullámalak csúcsa.

A harmadik kontaktus változó potenciálon is lehet. Ebben az esetben vezérelhetjük a tömbelem áramát. Atalla és Moll [16] olyan hárompólusú GaAs tömbelemet dolgoztak ki, amelyben két elektróda Gunn-oszcillátort alkot, a harmadik elektróda pedig vagy elektromos úton, vagy pedig fénybesugárzás hatására vezérli a tömbelem áramát.



23-10. ábra. Elosztott kontaktussal módosított tömbelem

3.3. A jelenségek alkalmazása

A tömbjelenségek elsősorban a mikrohullámú technikát forradalmasítják, ahogy a tranzisztorok a rádiótechnikát. Mindegyik jelenség nagyfrekvenciás oszcillációval kapcsolatos. Az eddigi félvezetőelemekhez viszonyítva egyrészt nagyobb frekvencián működnek, másrészt pedig nagyobb teljesítményt tudnak leadni. A legnagyobb teljesítményt GHz-es tartományban LSA tömbelemmel sikerült elérni (6 kW teljesítmény 8 GHz-en). Már a hibrid tömbelemmel is elérték a kW-os tartományt. Az eddigi kísérletek alapján Kennedy [17] 400 kW impulzusteljesítményt tart lehetségesnek 10 GHz-nél. Hatásfok szempontjából az LSA tömbelemmel elméletileg 24% érhető el, de csak nagyon homogén alapanyag esetén.

A tömbelemek mikrohullámú generátoronként való felhasználása hasonló lehet, mint a hagyományos generátoroké, azonban a tömbelemek sajátos jellegüknél fogva még rengeteg, eddig nem is sejthető új alkalmazási formát is teremtettek.

A GaAs tömbelem nagyfrekvenciás jelerősítőként való felhasználásra is kiválóan alkalmas, mert a TDA erősítő szélessávú és nagyfrekvencián is jelentős teljesítménnyel működik.

A tömbelemek logikai, impulzusteknikai és integrált áramköri felhasználásáról számtalan közlemény jelent már meg. Ezek tárgyalására a cikk korlátozott terjedelme nem ad lehetőséget. A gyakorlati alkalmazás még „gyermekcipőben jár”, hiszen csak néhány cég foglalkozik a tömbelemek gyártásával (Plessey, Varian, Mullard stb.). Az első típusok pedig kisteljesítményűek, és horribilis az áruk (néhány száz dollártól több ezer dollárig). Eleinte a tranzisztorral is ez volt a helyzet és lám, 20 év alatt mennyit fejlődött. Biztosra vehető, hogy a tömbelemek előtt is éppen ilyen szédítő iramú fejlődés áll.

Irodalom

- [1] *Read*: Bell Syst. Techn. J., V. 37. March (1958) p. 401.
- [2] *Ridley—Watkins*: Proc. Phys. Soc. V. 78. (1961) 293.
- [3] *Hilsum*: Proc. IRE V. 50. (1962) 185.
- [4] *Butcher—Fawcett*: Phys. Lett., V. 21 (1966) 489.
- [5] *Ruch, Kino*: Appl. Phys. Lett., V. 10 (1967) 40.
- [6] *Gunn*: Solid State Commun., V. 1 (1963) 88.
- [7] *Pataki*: Acta Phys. Ac. Hung. V. 25 (1968) 377.
- [8] *Székely—Tarnay*: Híradástechn. V. 20 (1969) 65.
- [9] *Copeland*: Proc. IEEE, V. 54 (1966) 1479.
- [10] *Copeland*: IEEE Trans. El. Dev., V. 14 (1967) 492.
- [11] *Kataoka*: Nachr. Techn. Fachb. V. 35 (1968) 454.
- [12] *Thim*: Appl. Phys. Lett., V. 7 (1965) 167.
- [13] *Thim*: IEEE Trans. El. Dev., V. 14 (1967) 517.
- [14] *Shoji*: IEEE Trans. El. Dev., V. 14 (1967) 535.
- [15] *Sanbdank*: 1967. Intern. Solid State Circ. Conf. Digest Techn. Paps., V. 10 (1967) 96.
- [16] *Atalla—Moll*: Solid State El. V. 12 (1969) 617.
- [17] *Kennedy—Eastman—Gilbert*: IEEE Trans. El. Dev. V. 13 (1966) 22.

Tartalomjegyzék

†Dr. Urbanek János (1905—1971)	5
--------------------------------------	---

Szigeteléstechnikai Főosztály

1. Villamos szigetelőréteg előállítása elektroforézissel (Z. dr. Windisch K.)	9
2. Hazai szigetelőlakkok hőállósága (H. dr. Magyar L.)	17
3. Korszerű technológia áramköri elemek tokozására kis nyomású sajtolóanyagokkal (Dr. Mislivetz J.)	29
4. Papírbakelit rétegelt termékek vízgőzdiffúziójának függése az alaktényezőtől (Sulyok J.) ...	49

Villamos Berendezés Főosztály

5. Nemlineáris híd termikus viselkedése (Dr. Gábor L.)	59
6. Nagyáramú tirisztoros egyenirányító berendezések hidrogén elektrolízis táplálására (Kafka N.—Dr. Nagy L.)	67
7. Időosztásos (TDM) négynegyedes szorzóáramkör (Bohus A.—Ivánszky B.)	81
8. Nagyteljesítményű háromfázisú inverterek szükségáramforrás céljára (Füzesi E.—Lencsés J.)	113
9. Váltakozóáramú szaggatón át táplált aszinkron motor alkalmazásának korlátai (Martí S.)	121
10. Analóg modellezés a hajtásszabályozások területén (Ballók I.—Weiner Gy.)	131
11. Tirisztoros áramirányítók rövidzárlat védelme, a kommutációs fojtótekerces méretezése (Mlinkó T.)	145
12. Áramirányítós kaszkád hajtások (Mészáros B.)	157

Félvezető Főosztály

13. Termovillamos generátorok fejlesztésének jelenlegi helyzete (Molnár I.—Török T.—Renner G.—Szónyi L.)	169
14. A plazma- és ionimplantációs technika felhasználási perspektívái speciális erősáramú félvezető eszközök számára (Pálffy M.—Böhönyei F.—Orosz Gy.—Palotai G.)	185
15. Nagy átmérőjű szilícium előállítására irányuló kutatások. I. Mikrokristályok (Horváth P.—Jedlovsky P.—né—Gadányi P.)	193
16. Nagy energiájú fémalakítási technológiák kutatása (Denk R.—Balogh I.)	203
17. A nagy hőmérsékletű tüzelőanyag-elem-kutatás helyzete (Krajcsovics F.—Gerzsenyi Gy.—Dávid P.)	213
18. Az alumínium—levegő féltüzelőanyag-elem fejlesztése és alkalmazási vizsgálatai (Fézler Gy.—Molnár A.)	227

Villamos Készülék Főosztály

19. Kombinált kiolvadási jelleggörbéjű áramkorlátozó olvadóbiztosítók (Dr. Mecsáry J.) ..	237
20. A kisfeszültségű kontaktorok villamos élettartamát befolyásoló paraméterek helyes megválasztása (Dr. Néveri I.)	249
21. Rövid ideig tartó, nemszinuszos áramok effektív értékének mérése (Csáthy K.—Luspay Ö.)	259
22. Az ívtalppont mozgatásának hatása az érintkezők villamos élettartamára (Polgár T.)	271

Félvezető Elemek Technológia Önálló Osztály

23. Tömbjelenségek félvezetőekben (Zsigmond B.)	283
---	-----

Содержание

†Д-р Янош. Урбанек (1905—1971)	5
--------------------------------------	---

Главотдел Изоляционной Техники

1. Изготовление электрического изоляционного слоя методом электрофореза (З. д-р К. Виндиш)	9
2. Теплостойкость отечественных изолирующих лаков (Х. д-р Л. Мадьяр)	17
3. Современная технология для изготовления корпуса схемных элементов из пресс-материалов низкого давления (д-р И. Мисливец)	29
4. Зависимость диффузии водяных паров в изделия, изготовленные из слоистого гетинакса от коэффициента формы (И. Шуйок)	49

Главотдел Электрических Оборудований

5. Поведение нелинейных мостов при воздействии температуры (д-р Л. Гадор)	59
6. 5000 А гидрализер на тиристорах (Н. Кафка—д-р Л. Надь)	67
7. Четырех—четветная схема умножения с распределением во времени (А. Бохуш—Б. Ивански)	81
8. Мощные трехфазные инверторы, применяемые в источниках аварийного питания (Э. Фюзеш—И. Ленчеш)	113
9. Пределы применения асинхронного двигателя питаемого через прерыватель переменного тока (Ш. Марти)	121
10. Применение аналогового моделирования в области регулирования привода (Ш. Баллок—А. Вейнер)	131
11. Защита от короткого замыкания конвертеров на тиристорах расчет коммутационного дросселя (Т. Минко)	145
12. Конвертерные каскадные приводы (Б. Месарош)	157

Главотдел Полупроводников

13. Положение термоэлектрических генераторов в настоящее время (И. Молнар—Т. Тэрк—Г. Реннер—Л. Сени)	169
14. Перспективы применения плазменной и ионимплантационной техники для цепей создания специальных полупроводниковых проборов (М. Палфи—Ф. Бехенеи—Д. Орос—Г. Палотаи)	185
15. Технологические исследования провидимые с целью соиздания большого диаметра. I. Микрокристаллы (П. Хорват—П. Йедловски—П. Гадани)	193
16. Исследования проводимые в области технологии обработки металлов большими энергиями (Р. Денк—И. Балог)	203
17. Положение исследований в области топливных элементов высокой температуры (Ф. Крайчович—Д. Гержени—П. Давид)	213
18. Разработка и испытания с точки зрения применимости полутопливного элемента алюминий-воздух (Д. Фэзлер—А. Молнар)	227

Главотдел Электрических Аппаратов

19. Плавкие предохранители с комбинированной характеристикой срабатывания (д-р Й. Мочари)	237
20. Правильный подбор параметров влияющих на электрический срок службы контактов низкого напряжения (д-р И. Невери)	249
21. Измерение действующего значения кратковременных несинусоидальных токов (К. Чати—Э. Лупшай)	259
22. Влияние движения основной точки дуги на срок службы электрических контакторов (Т. Полгар)	271

Технологический Отдел Полупроводниковых Элементов

23. Блогные явления в полупроводниках (Б. Жигмонд)	283
--	-----

Inhalt

†Dr. J. Urbaneek (1905—1971)	5
------------------------------------	---

Hauptabteilung für elektrische Isolationsmaterialien

1. Herstellung elektrischer Isolierschicht durch Elektrophorese (Z. dr. K. Windisch)	9
2. Wärmebeständigkeit der in Ungarn hergestellten Isolierlacke (H. dr. L. Magyar)	17
3. Neuzeitliche Technologie zur Einbettung von Stromkreisen mit Niederdruck-Pressmassen (Dr. J. Miszlivetz)	29
4. Abhängigkeit der Wasserdampfdiffusion vom Formfaktor in Hartpapier (J. Sulyok)	49

Hauptabteilung für elektrische Einrichtungen

5. Thermisches Verhalten nichtlinearer Brücken (Dr. L. Gádor)	59
6. Thyristorierter Hydrolyseur von 5000 A (N. Kafka—dr. L. Nagy)	67
7. Timedivision — Vierquadrant — Multiplizierer (A. Bohus—B. Ivánszky)	81
8. Dreiphasige Hochleistungs-Wechselrichter für Notstromanlage (E. Fűzesi—K. Lencsés)	113
9. Anwendungsgrenzen des durch Drehstromsteller gespeisten Asynchronmotors (S. Marti) ..	121
10. Anwendung der analogen Modellierung auf dem Gebiete der Antriebsregelung (I. Ballók —Gy. Weiner)	131
11. Kurzschlußschutz thyristorierter Stromrichter, Bemessung der Kommutationsdrossel (T. Mlinkó)	145
12. Stromrichter-Kaskadenantriebe (B. Mészáros)	157

Hauptabteilung für Halbleiter

13. Gegenwärtige Lage der thermoelektrischen Generatoren (I. Molnár—T. Török—G. Renner —L. Szőnyi)	169
14. Anwendungsaussichten der Plasma- und Ionimplantationstechnik für spezielle Halbleiterbauelemente (M. Pálffy—F. Böhönyei—Gy. Orosz—G. Palotai)	185
15. Technologische Forschungen zur Herstellung von Silizium mit Grossdurchmesser (P. Horváth—Frau V. Jedlovszky—P. Gadányi)	193
16. Forschung der Technologie Hochenergie-Metallumformung (R. Denk—I. Balogh)	203
17. Zustand der Hochtemperatur-Brennstoffzellen-Forschung (F. Krajcsovcics—Gy. Gerzsenyi—P. Dávid)	213
18. Entwicklung und anwendungstechnische Prüfungen der „Aluminium-Luft“ Brennstoffzelle (Gy. Fézler—A. Molnár)	227

Hauptabteilung für Schaltgeräte

19. NH — Sicherungseinsätze mit trägfliken (kombinierten) Strom—Zeit-Kennlinien (Dr. J. Mocsáry)	237
20. Richtige Auswahl der die elektrische Lebensdauer der Schütze beeinflussenden Parameter (Dr. I. Néveri)	249
21. Messung des Effektivwertes der kurze Zeit dauernden nichtsinusförmigen Ströme (K. Csáthy —Ö. Luspay)	259
22. Wirkung der Lichtbogenfusspunkt-Bewegung für die elektrische Lebensdauer der Kontakte (T. Polgár)	271

Halbleiterbauelemente Technologische Abteilung

23. Bulkeffekte in den Halbleitern (B. Zsigmond)	283
--	-----

Contents

†Dr. J. Urbanek (1905—1971)	5
-----------------------------------	---

Department of Insulation Materials

1. Electrical Insulating Coatings Produced by Electrophoretic Deposition (Z. dr. K. Windisch)	9
2. Thermal endurance of insulating Varnishes (H. dr. L. Magyar)	17
3. Up-to-date Techniques for Producing Circuit Element Enclosures by Low Pressure Injection Moulding (Dr. J. Miszlivetz)	29
4. Dependence of Water-Vapour Diffusion of Laminated Paper-Bakelit Products on the Shape Factor (J. Sulyok)	49

Department of Electrical Equipment

5. Thermal Behaviour of Non-Linear Bridges (Dr. L. Gádor)	59
6. 5000 A Hydrolyser (N. Kafka—dr. L. Nagy)	62
7. Time-Division Four-Quadrant Multiplier Circuit (A. Bohus—B. Ivánszky)	81
8. High-Power Three-Phase Inverters for Emergency Supply Purposes (E. Füzesi—J. Lencsés)	113
9. Limitations Imposed on the Application of Asynchronous Induction Motors Fed through A. C. Chopper (S. Marti)	121
10. Application of Analogue Simulation in the Field of Drive Control (I. Ballók—Gy. Weiner)	131
11. Short Circuit Protection of Thyristor Rectifiers, Dimensioning of Commutation Choke-Coils (T. Mlinkó)	145
12. Rectifier Cascade Drives (B. Mészáros)	157

Semiconductor Department

13. Present State of Thermo-Electric Generators (I. Molnár—T. Török—G. Renner—L. Szőnyi)	169
14. Prospects of the Application of Plasma and Ion Implantation Techniques for Special Semiconductor Devices (M. Pálffy—F. Böhönye—Gy. Orosz—G. Palotai)	185
15. Technological Research of Large-Diameter Silicon Production. I. Microcrystals (P. Horváth—Mrs. P. Jedlovsky—P. Gadányi)	193
16. Research of High Power Metal Forming Techniques (R. Denk—I. Balogh)	203
17. The Present State of High Temperature Fuel-Cell Research (F. Krajcsovics—Gy. Gerzsenyi—P. Dávid)	213
18. Development and Application Tests of Aluminium-Air Fuel-Cells (Gy. Fézler—Miss A. Molnár)	227

Switchgear Department

19. Fuses with Combined Time-Current Characteristics (Dr. J. Mocsáry)	237
20. Proper Selection of Parameters Influencing the Electrical Life Span of Low-Voltage Contactors (Dr. I. Néveri)	249
21. Measurement of R. M. S. values of Non-Sinusoidal Currents of Short Duration (K. Csáthy—Ö. Luspay)	259
22. The Effect of Arc-Root Displacement on Contact Life (T. Polgár)	271

Semiconductors Technology Department

23. Bulk Effects in Semiconductors (B. Zsigmond)	283
--	-----

