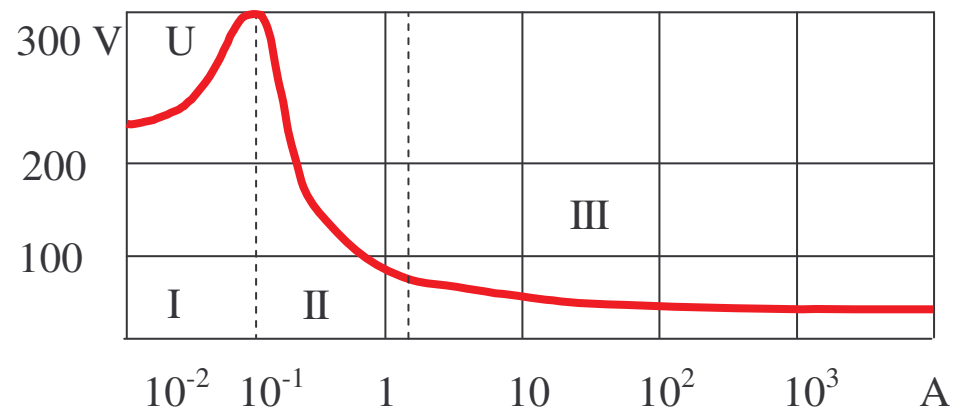


## 4. ELEKTRIKAAR

### 4.1. Protsessid kaaravahemikus

Kui vooluahel välja lülitada, tekib elektriaparaadi kontaktide vahel elektrilahendus, mis on kas huumlahendus või elektrikaar (joonis 4.1).



Joonis 4.1. Elektrilahenduse voltampertunnusjoon

Piirkond I – huumlahendus, piirkond II – üleminek huumlahenduselt kaarlahendusele, piirkond III – kaarlahendus

**Huumlahendus** esineb vooludel alla 0,1 A, kui pingelangud kontaktide vahel on 250...300 volti. Kui vool kasvab üle 0,5 A, toimub üleminek kaarlahendusele, kusjuures pingelang kaarevahemikus langeb 20...30 voldini.

**Elektrikaart** iseloomustab suhteliselt madal kontaktide vaheline pingelang 10 – 20 volti ja suur voolutihedus 100...1000 A/mm<sup>2</sup> Elektriakaare temperatuur tõuseb 6000...25000 K. Voolu kasvades pingelang kaarevahemikul algul väheneb, seejärel aga praktiliselt enam ei muutu.

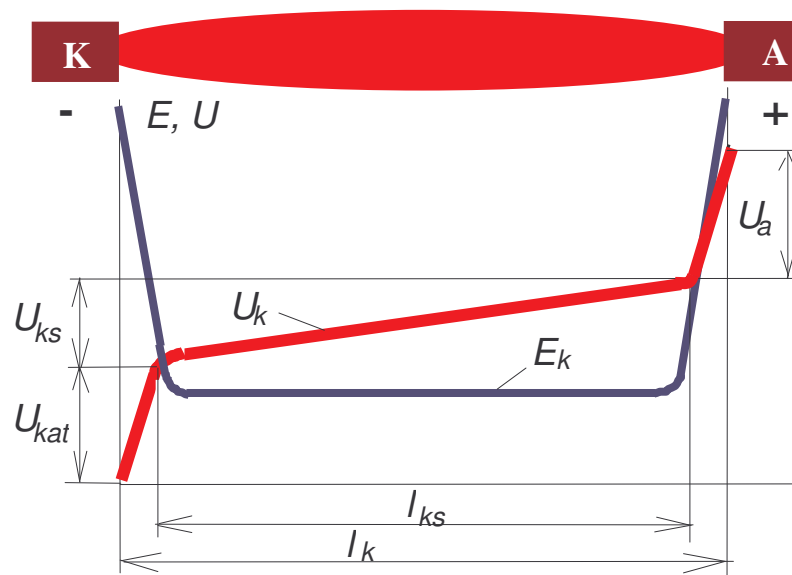
Tavaolukorras on õhuvahemik aparadi klemmide vahel hea isolaaator: 1 cm õhuvahemiku läbilöögiks on vaja pinget vähemalt 30 kV! Elektriakaare põlemise eelduseks on kaarevahemiku *ioniseerumine* ja voolujuhiks muutumine. Õhu ioniseerumine võib toimuda kõrge temperatuuri, tugeva elektrivälja, röntgenikiirte ja rea muude faktorite mõjul.

Elektriaparaatide elektriakaare põlemise juures mängivad ioniseerimisel olulisemat rolli protsessid, mis toimuvad elektrootide juures – termoelektronne ja autoemissioon ning protsessid, mis toimuvad vahetult elektriakaare sees – termiline ja pörkeionisatsioon. Elektriakaare kustutamiseks on vaja, et deionisatsioon toimuks intensiivsemalt kui ionisatsioon.

Elektrikaar kuumendab ning kulutab kontakte, vähendades aparadi töökindlust ja -iga. Rikke- või avariitalitluse tekkel tuleb vooluahel võimalikult kiiresti katkestada, s.o. elektrikaar kustutada. See on keeruline ülesanne. Protsessi paremaks mõistmiseks tutvugem elektriakaare omadustega.

## 4.2. Alalisvoolu elektrikaar

Staatilisel alalisvoolu elektrikaarel, milles vool  $I_k$  ei muutu või muutub väga aeglaselt, jagunevad kaare pingelang  $U_k$  ja elektrivälja tugevus  $E_k$  (pinge gradient) piki kaart väga ebahühtlaselt (joonis 4.2). Elektroodide (kontaktide) pinnast kuni  $10^{-6}$  m kaugusele ulatub nn. *elektroodidelähedane* ala. Pingelang katoodilähedases alas  $U_{kat} = 10...20$  V, anoodilähedases alas  $U_a = 5...10$  V. Elektrivälja tugevus elektroodidelähedases alas  $E_e = 10^7...10^8$  V/m. Ülejäänud osas, nn. kaare sambas, on elektrivälja tugevus muutumatu  $E_{ks} = (2...3) 10^3$  V/m.



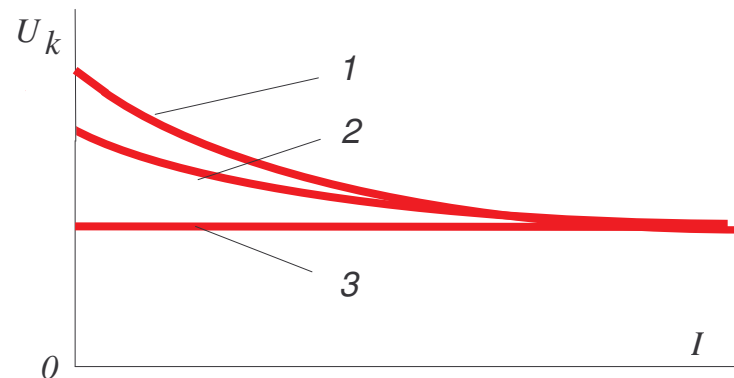
Joonis 4.2. Pingelangu ja elektrivälja tugevuse jaotus alalisvoolu elektrikaares

Kogu pingelang kaarevahemikus

$$U_k = U_a + U_{kat} + E_{ks} l_{ks} , \quad (4.1)$$

kus  $l_{ks}$  - kaaresamba pikkus.

Elektrikaare oluline parameeter on **voltampertunnusjoon**, mis näitab kaare pingelangu sõltuvust voolust (joonis 4.3). Staatilises elektrikaare voltampertunnusjoonel vastab igale voolu väärtusele kindel pingelang (kõver 1). Dünaamilises olekus võib ühele voolu väärtusele vastata mitu pingelangu väärtust olenevalt voolu muutumise kiirusest (kõver 2). Hetkelisel voolu muutusel pingelang voolust ei sõltu (sirge 3).

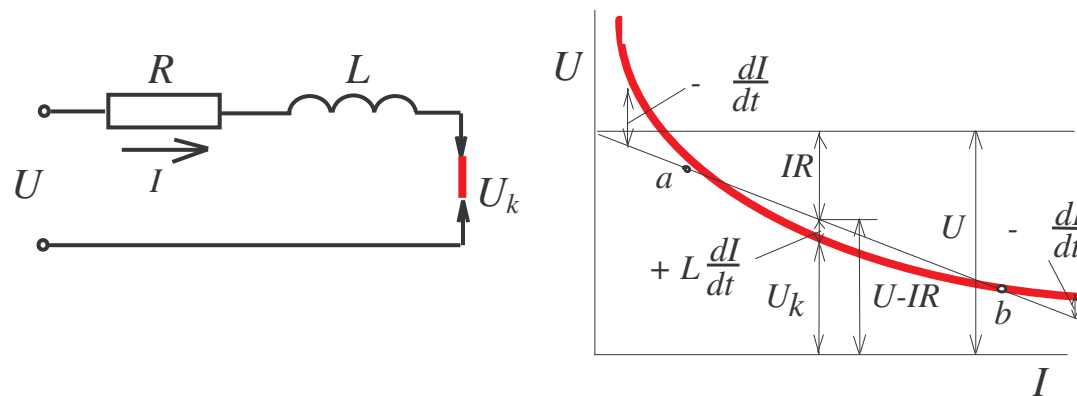


Joonis 4.3. Alalisvoolu elektrikaare voltampertunnusjooned

Dünaamiliste voltamper- tunnusjoonte erinevus staatilistest on tingitud elektrikaare *termilisest inertsist* ja selle mõjust ionisatsioonile. Kui vool kasvab kiiresti, ei jõua ionisatsiooni muutumise kiirus järele voolu muutumisele ning kaare takistus osutub suuremaks kui staatilisel kaarel samas punktis. Seetõttu kulgeb elektrikaare tunnusjoon voolu kiirel kasvamisel staatilisest tunnusjoonest ülalpool, voolu kiirel langemisel allpool.

Elektrikaart sisaldava vooluahela (joonis 4.4) pingete tasakaalu iseloomustab võrrand

$$U = IR + L \frac{dI}{dt} + U_k . \quad (4.2)$$



#### Joonis 4.4. Alalisvoolu elektrikaare põlemistingimused

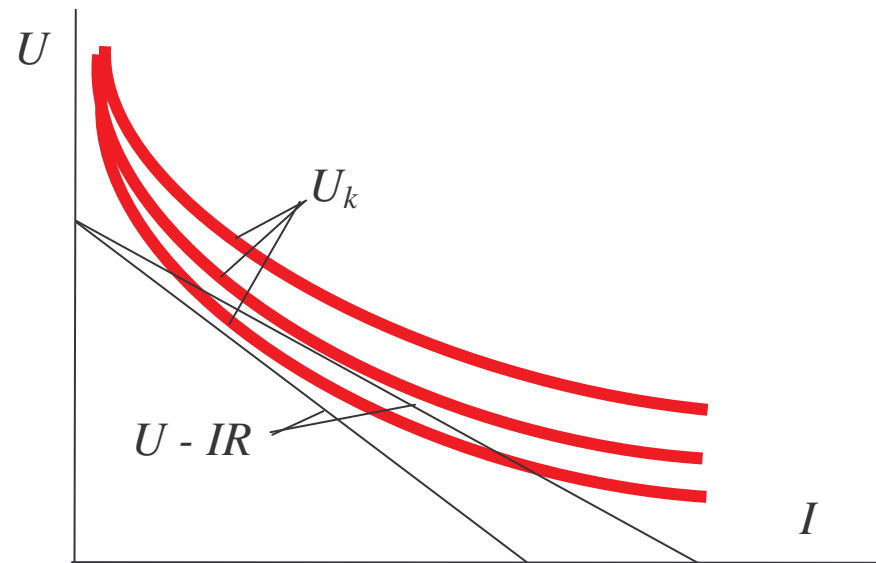
Staatilise elektrikaare pingelangu sõltuvust voolust kujutab sirge  $U - IR$ .

$$U_k = U - IR \quad (4.3)$$

Kaare põlemine on võimalik punktides  $a$  ja  $b$ , kus Punktis  $a$  toimub ebastabiilne, punktis  $b$  stabiilne põlemine. Elektriikaare kustutamiseks on vajalik  $dI/dt < 0$  ehk

$$U_k > U - IR \quad (4.4)$$

Järeldus: elektrikaare kustumiseks peab tema dünaamiline voltampertunnusjoon kogu ulatuses paiknema kõrgemal kaldjoonest  $U-IR$  sellega kokku puutumata. Seega on kaks võimalust, kas tõsta kaare tunnusjoont või suurendada sirge  $U - IR$  kallet, lisades vooluahelasse takistuse. Tavaliselt kasutatakse esimest meetodit.



Joonis 4.5 Alalisvoolu elektriikaare kustutamisevõimalused kaare tõstmisega või lisatakistusega vooluahelas  
 Elektriikaare pinget, mille puhul vool katkeb, nimetatakse kaare **kustumispingeks**  $U_{kk}$ . Valemist (4.2.) nähtub, et

$$U_{kk} = U - L \frac{dI}{dt} \quad (4.5)$$

Kuna kaare kustumisel  $dI/dt < 0$ , siis

$$U_{kk} = U + \left| L \frac{dI}{dt} \right|_{I=0} \quad (4.6)$$

Kui aktiivkoormus ( $L = 0$ ) välja lülitada, kustub kaar kiiresti ja kontaktidevaheline pinge tõuseb toitepingeni. Induktiivahelate lahutamisel tõuseb pinge kaare kustumise hetkel väärtuseni, mis oluliselt ületab võrgupinge. Kaare kustumispinge ja toitepinge vahet  $U_{kk} - U$  nimetatakse **liigpingeks** ning seda iseloomustab liigpingetegur

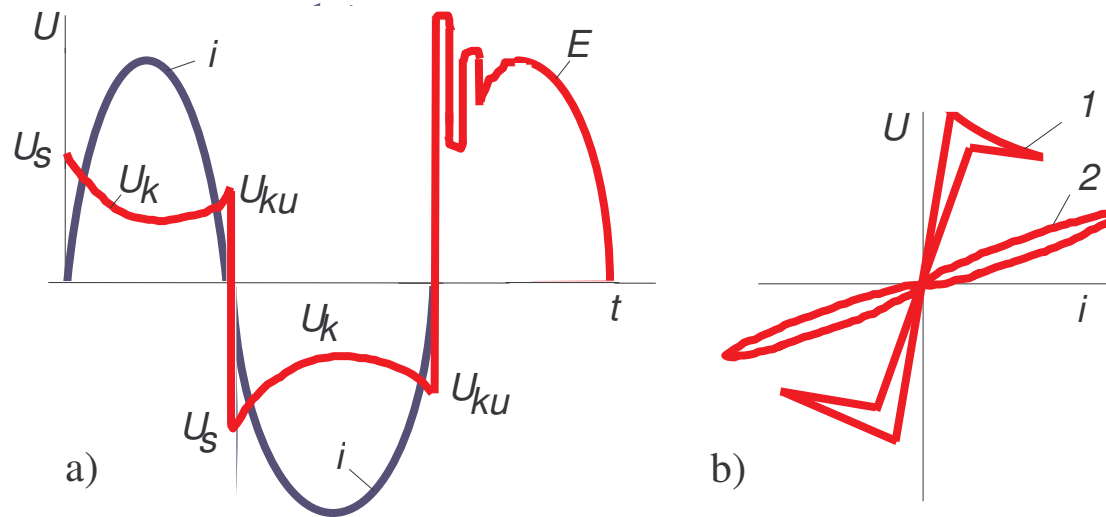
$$k_{lp} = \frac{U_{kk}}{U} = 1 + \frac{\left| L \frac{dI}{dt} \right|_{I=0}}{U}. \quad (4.7)$$

Mida suurem on koormuse induktiivsus ja voolu vähenemise kiirus, seda kõrgem on liigpinge. Seetõttu võivad kiiretoimelised kommutatsiooniseadmed tekitada väga kõrgeid, isolatsioonile ohtlikke pingeid.

### 4.3. Vahelduvvoolu elektrikaar

**Vahelduvvoolu elektrikaares** läbib vool nulli igas poolperioodis, mil kaar kustub ja süttib uuesti. See kergendab kaare kustutamist. Vaja on luua tingimused, et vool pärast nulli läbimist ei taastuks. Vool kaarevahemikus tekib, kui pinge klemmidel on tõusnud süttimispingeni  $U_S$  (joonis 4.6,a).

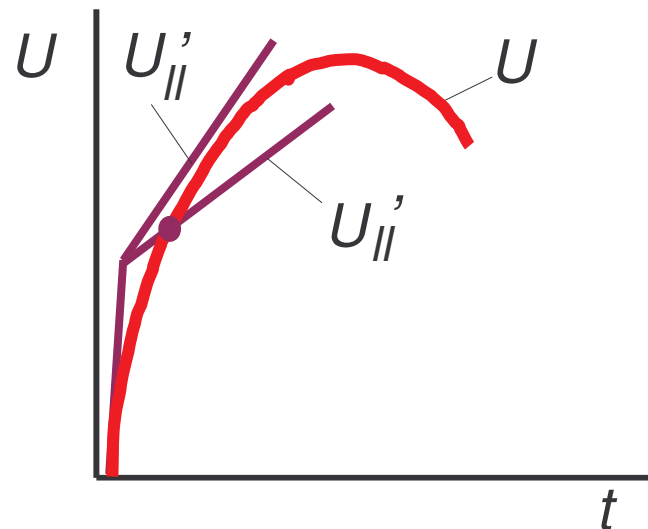




Joonis 4.6. Vahelduvvoolu elektrikaare tunnusjooned

Voolu kasvades pingelang kaarel  $U_k$  väheneb ja saavutab miinimumi voolu amplituudiväärtuse ajal. Voolu vähenedes pingelang tõuseb kustumispingeni  $U_{ku}$ , mil vool katkeb. Vahelduvvoolu elektriakaare voltampertunnusjoon on toodud joonisel 4.6b, kusjuures sagedusele 50 Hz vastab kõver 1, kõrgsagedusele kõver 2. Vahelduvvoolu elektriakaarele on iseloomulik nn. vooluvaba paus, mil toimub kaarevahemiku intensiivne deionisatsioon. Mida enam kaarevahemik deioniseerub, seda kõrgemat pinget on vaja uueks läbilöögiks ja kaare süttimiseks.

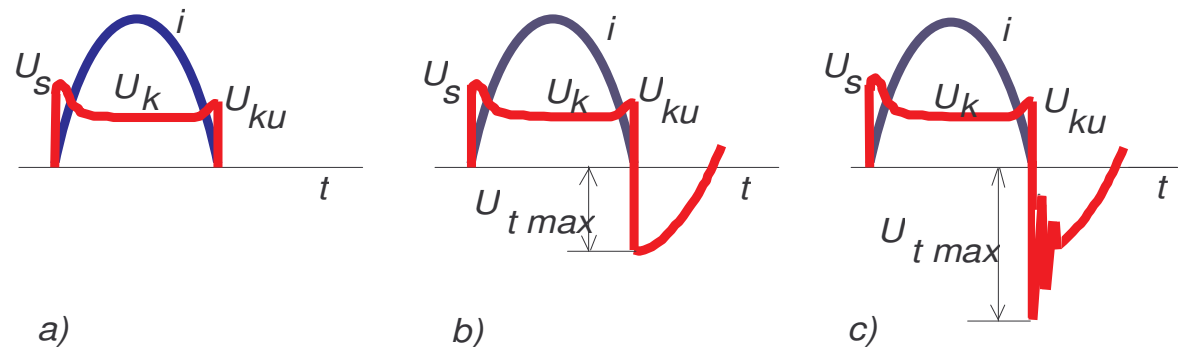
**Vahelduvvoolu elektriakaare kustumistingimused** võib sõnastada järgmiselt: **kaare kustumiseks on vaja, et kaarevahemiku läbilöögipinge  $U_{ll}$  kasv ennetaks pinge tõusu kontaktide vahel** (joonis 4.7). Vastasel juhul toimub kaare taassüttimine hetkel, mil kontaktidevaheline pinge ületab läbilöögipinge.



Joonis 4.7. Vahelduvvoolu elektriakaare kustumistingimused

Kui vahelduvvoolu elektrihaar kustub, muutub pingeline kaarevahemikus kaare kustumispingest võrgupingeline hetkväärtuseni. Seda protsessi nimetatakse **pingeline taastumiseks**, tekkivat pingeline aga **taastuvpingeline**.

**Aktiivahela väljalülitamisel** taastuvpingeline ei teki, sest faasinihe voolu ja pingeline kõvera vahel puudub (joonis 4.8,a). Induktiivahelate puhul võib tekkida aperioidiline või võnkuv pingeline taastumisprotsess (joonis 4.8,b,c). Esimesel juhul ei saa taastuvpingeline maksimum  $U_{t\ max}$  olla suurem toiteallika elektromotoorjõust  $E_m$ , teisel juhul võib see teoreetiliselt olla kui tahes suur, praktiliselt aga ei ületa väärtust  $2E_m$ .



Joonis 4.8. Taastuvpingeline tekkimine kaarevahemikus

Taastuvpinge siirdeprotsessi sagedus ja amplituud sõltuvad vooluahela induktiivsusest  $L$ , mahtuvusest  $C$  ja takistusest  $R$ . Taastuvpinge hetkväärtus

$$U_t = E \left( 1 - e^{-pt} \cos \varpi_0 t \right), \quad (4.8)$$

kus  $E$  - toiteallika elektromotoorjõud hetkel  $t = 0$ ,

$$p = \frac{R}{2L} - \text{sumbuvustegur,}$$

$$\varpi_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} - \text{vooluahela omavõnkenurksagedus.}$$

Taastuvpinge kasvu kiirus

$$v_t = 4U_t f_0, \quad (4.9)$$

kus  $U_t$  - taastuvpinge hetkväärtus hetkel  $t = 0$ ,

$$f_0 = \frac{\varpi_0}{2\pi}.$$

**Kaare kustutamiseks peavad läbilöögipinge kasvu kiirus ja hetkväärtus ennetama taastuvpinge vastavaid parameetreid.**

#### 4.4. Elektriikaare kustutusviisid

Elektriaparaadid varustatakse vajaduse korral **kaarekustutusseadmetega**, mille ülesanne on kustutada elektrikaar

- a) võimalikult lühikese ajavahemiku jooksul,
- b) lubatud liigpingete juures,
- c) aparaadi detaile vähe kulutades,
- d) minimaalse kuumade gaaside kogusega,
- e) võimalikult väikeste valgus- ja heliefektidega.

Elektriikaare mõjutamise võimalused kustutamiseks selguvad võrrandist (4.2), mille järgi

$$U_k = l_{ks} E_{ks} + U_e .$$

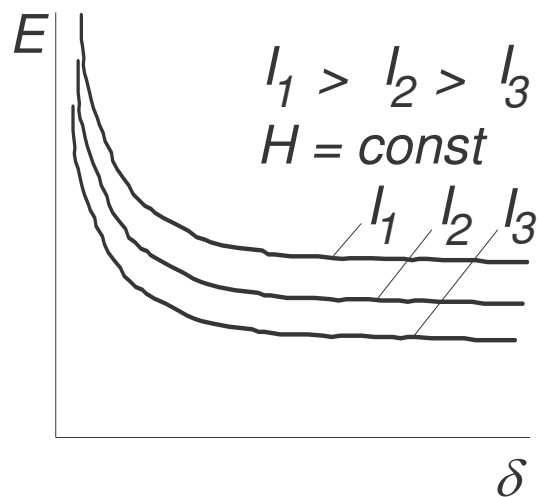
Kustumistingimuse  $U_k > U - IR$  täitmiseks on kolm põhivõimalust:

- a) suurendada elektriikaare pikkust  $l_{ks}$
- b) suurendada väljatugevust  $E_{ks}$  elektriikaare põlemistingimusi mõjutades,
- c) ära kasutada elektroodidelähedasi pingelange  $U_e$ .

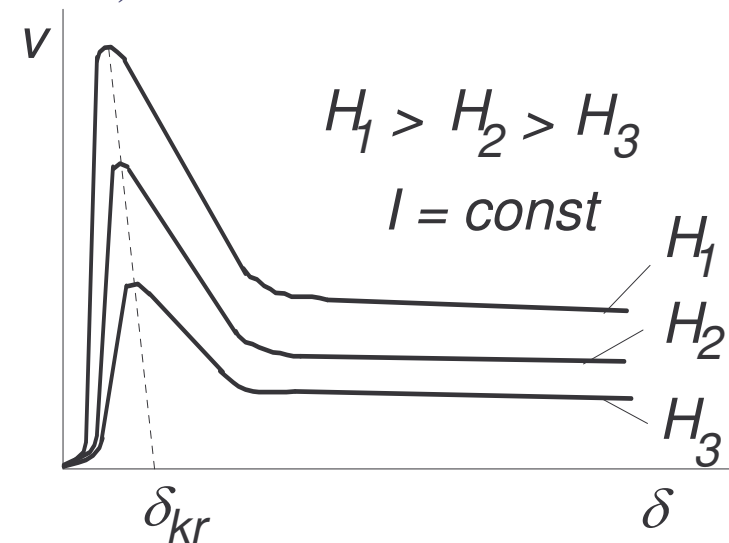
Elektriikaare voltampertunnusjoone tõstmine, suurendades **kaare pikkust**, on lihtne, kuid väheefektiivne moodus, kuna väljatugevus liikumatus, vabalt põlevas elektriikaares on ainult 12...15 V/cm. Üle 100 A voolu katkestamiseks 220 V juures tuleks kaar venitada 25...30 cm pikkuseks. Aparaadi mõõtmete seisukohalt pole see vastuvõetav.

**Väljatugevust** saab suurendada kaare intensiivse jahutamisega ja põlemiskeskonnas rõhu tõstmisega, mis oluliselt aeglustab ionisatsiooniprotsessi. Madalpinge elektriaparaatides jahutatakse elektrikaart algul sundliikumisega õhu suhtes ning alles seejärel suunatakse kaar kaarekustutuskambrisse.

Alalisvoolu elektriakare kustutamiseks kasutatakse *kitsaste pikipiludega kaarekustutuskambreid*, mille seinad on valmistatud kõrge soojusjuhtivusega kuumuskindlast materjalist. Jahtumise intensiivistamiseks tehakse pilud kaare läbimõõdust kitsamad. Sellistele kaarekustutuskambritele on iseloomulik, et elektrivälja tugevus sõltub pilu laiusest (joonis 4.9). Väga kitsad pilud on küll tõhusad, kuid suure aerodünaamilise takistuse tõttu võib elektrikaar seal peatuda ja põhjustada tõsise avarii (joonis 4.10).

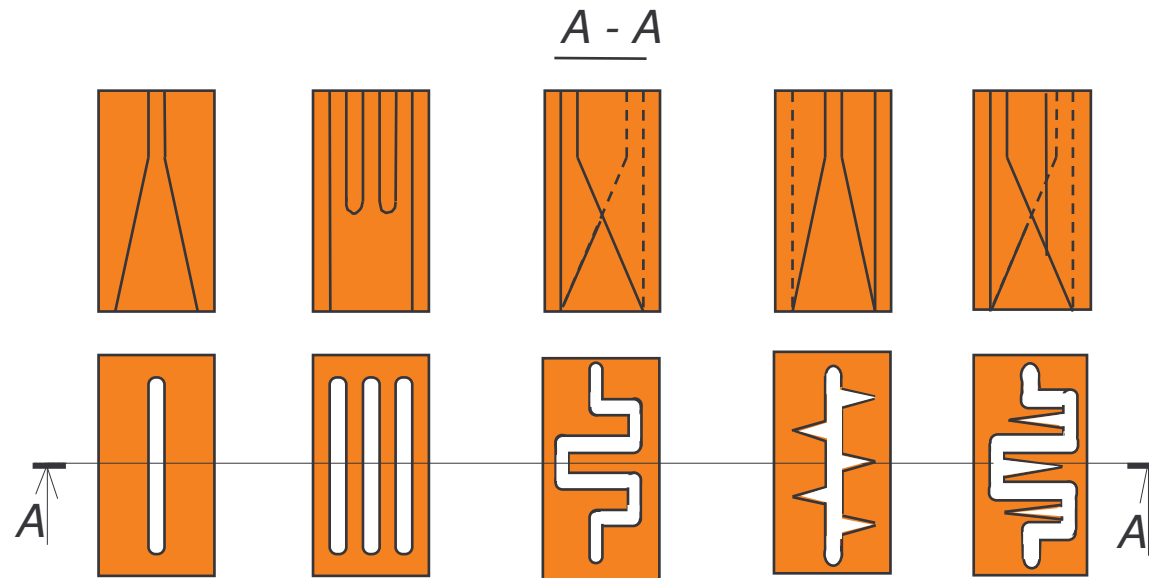


Joonis 4.9. Elektrivälja tugevuse sõltuvus kaarekustutuspilu laiusest



Joonis 4.10. Elektriakare liikumiskiiruse sõltuvus kaarekustutuspilu laiusest

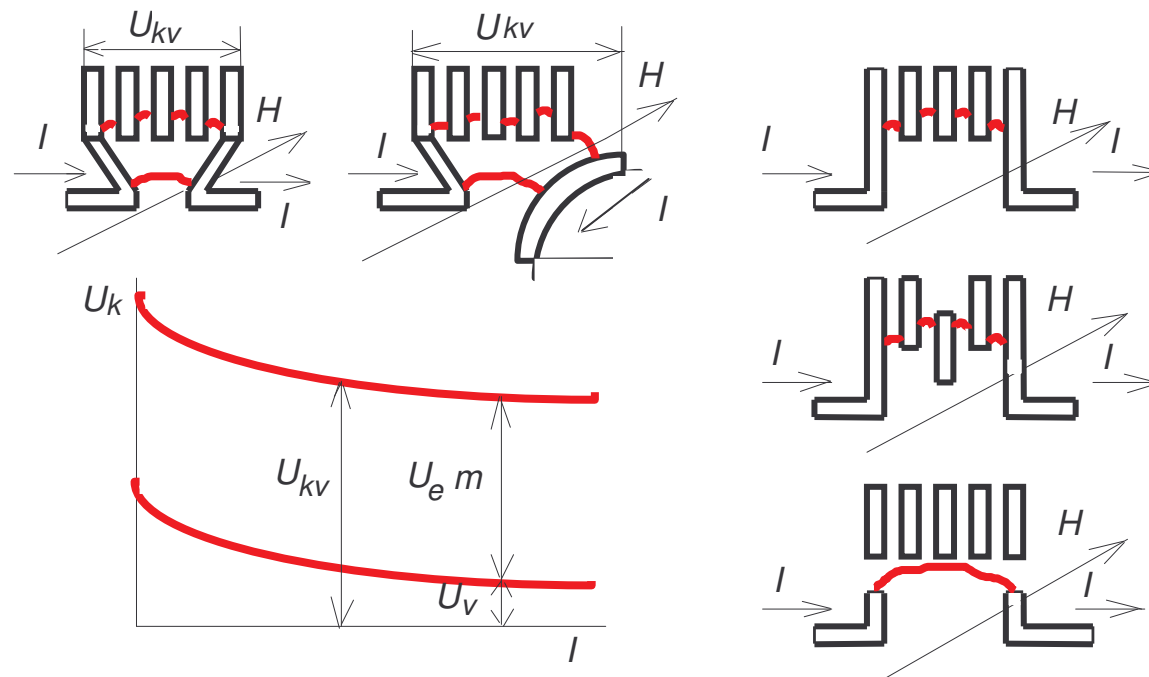
Kaarekustutusvõrkade pikipilude enamlevinud kujud on joonisel 4.11. Tõhusaim neist on siksakikujuline kohalike laiendustega pilu.



Joonis 4.11. Kaarekustutusvõrkade pikipilude tüüpikujud

Kaare liikumisel kitsas pilus soodustab selle kustumist lisaks jahtumisele veel väga kõrge rõhk kaaresambas. Peetagu aga silmas, et kõrge rõhu all olevad ioniseerunud gaasid, mis paiskuvad pärast kaare kustumist kaarekustutusvõrkast välja, võivad elektriseadme volujuhtivatele osadele sattudes tekitada lühise. Vältimaks seda ohtlikku nähtust, paigutatakse gaaside väljalaskeava ette metallvõre, mis gaase deioniseerib ja jahutab.

Kaarekustutusvõredest kasutatakse ära elektroodidelähedasi pingelange. Kontaktide lahutumisel tekkinud elektriikar suunatakse kaarekustutusvõresse, mis koosneb elektriikare pikitelje suhtes risti olevatest üksteisest isoleeritud ning kindlal kaugusel paiknevatest metallplaatidest. Sellega moodustub kaarekustutusvõres mitu järjestikust elektriikart (joonis 4.12).



Joonis 4.12. Elektriikare staatilised voltampertunnusjooned kaarekustutusvõres ja kaarekustutusvõrede kujusid



**Alalisvoolu elektriikare kustutamisel** tekib iga plaadipaari vahel nii anoodilähedane pingelang  $U_a$  kui ka katoodilähedane pingelang  $U_{kat}$  .

Pingelang kaarekustutusvõres

$$U_{kv} = U_e (m + 1) + E_{ks} l_{ks} , \quad (4.10)$$

kus  $m$  - kaarekustutusvõre plaatide arv,

$$U_e = U_a + U_{kat} .$$

Pingelang vabalt põleval niisama pikal elektriikaarel

$$U_v = U_e + E_{ks} l_{ks} .$$

Seega

$$U_{kv} = U_v + U_e m , \quad (4.11)$$

s.t. elektriikare sisenemisel kaarekustutusvõresse nihkub selle voltampertunnusjoon suuruse  $U_e m$  võrra kõrgemate pingete poole. Kui plaate on suur arv, siis  $U_{kv} \approx U_e m$  . Kaarekustumistingimusest  $U_k > U - IR$  järeldeb alalisvoolu kaarekustutusvõre plaatide vajalik arv

$$m_{=} > \frac{U - IR}{U_e} . \quad (4.12)$$

**Vahelduvvoolu elektriikare kustutamine** kaarekustutusvõres põhineb katoodilähedase läbilöögipingel hetkelisel tõusul 250...300 V pärast seda, kui voolu null on läbitud.

Kaar kustub, kui

$$U_{ll} m > U_{t \max} , \quad (4.13)$$

kus  $U_{ll}$  - katoodilähedane läbilöögipinge,

$U_{t \max}$  - taastuvpinge maksimaalväärtus pärast kaare kustumist.

Vajalik plaatide arv vahelduvvoolu kaarekustutusvõres

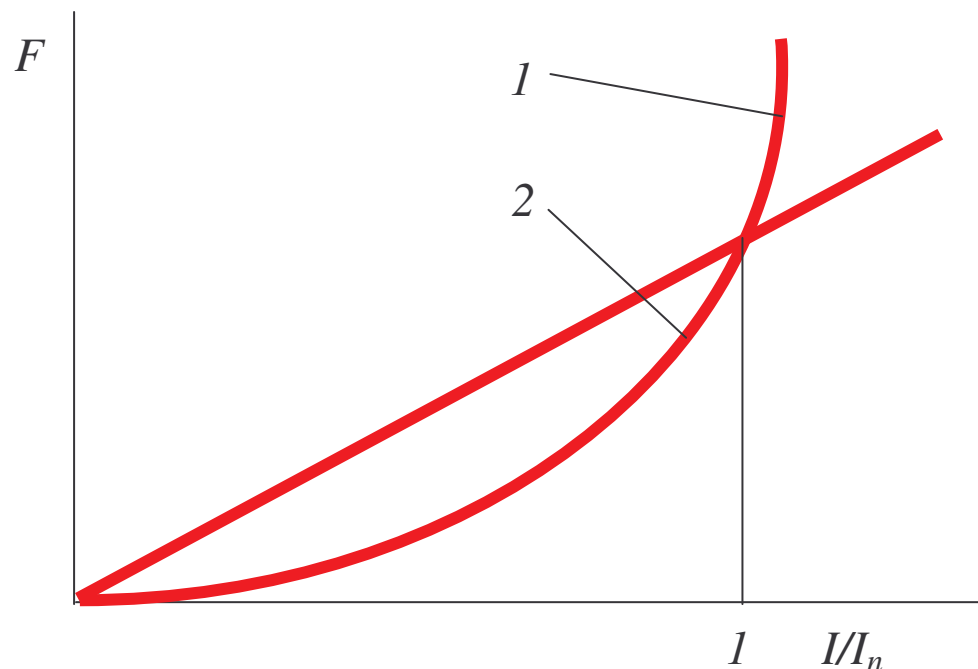
$$m_{\approx} > \frac{U_{t \max}}{U_{ll}} . \quad (4.14)$$

Kaarekustutusvõrede efektiivsus vahelduvvoolu korral on 7...8 korda suurem kui alalisvoolu puhul. See asjaolu võimaldab oluliselt vähendada vahelduvvoolu kommutatsiooni- ja kaitseaparaatide mõõtmeid. Alalisvoolu ja tööstusagedusega (50 Hz) vahelduvvoolu kaarekustutusvõre plaadid valmistatakse ferromagnetilisest materjalist, mis tekitab kaard võresse tõmbavaid lisajõude. Korrosiooni vältimiseks plaadid vasetatakse või tsingitakse. Elektriikare kiireks tõukamiseks kaarekustutusvõresse kasutatakse nn. **magnetilist puhumist**. Elektriikare voolu ja lisamagnetvälja vastastikusel toimel tekib tugev elektrodünaamiline jõud, mis "puhub" kaare lahutuvate kontaktide vahelt kustutusvõresse.

Lisamagnetvälja võib tekitada

- 1) kaarekustutuskontaktidega jadamisi vooluahelasse lülitatud pooliga,
- 2) toitevõrguga rööbiti ühendatud pooliga,
- 3) püsomagnetitega.

Peaaegu eranditult kasutatakse **jadakaarekustutuspooli**, mis on töökindel ja milles kaarele mõjuva jõu suund ei sõltu voolu suunast.



Joonis 4.13. Elektriakaarele mõjuva elektrodünaamilise jõu sõltuvus voolust.  
1 – jadakustutuspool, 2 - rööpkustutuspool