

5. Elektrivõrkude talitusviisid

5.1. Põhimõisted ja määratlused

Elektrivõrgu talitusviisi määravad:

- 1) liinide ja juhtide koormusvool,
- 2) voolu sagedus
- 3) pinge võrku lülitatud elektritarvititel ja toiteallikatel,
- 4) maa ja juhtide vaheline pinge,
- 5) võrgu neutraali ühendusviis maaga,
- 6) mitmefaasilise süsteemi sümmeetria,
- 7) pinge siinuselisus,
- 8) juhtide isolatsioonitakistus omavahel ja maa suhtes.

Täiendavalt võib võrgu talitusviisi iseloomustamiseks kasutada teisi elektrilisi ja mitteelektrilisi suurusid.

Eristatakse nelja elektrivõrgu talitusviisi:

1. **Normaaltalitus.** Selle talitluse korral ei ületa eelnimetatud parameetrite kõrvalekaldes kestvalt lubatud piirväärtusi.
2. **Lühiajaliselt lubatud talitlused,** mida iseloomustavad voolu ülekoormuse (liigvool), pinge kõikumised jm. näitajatega, mis on kas projektirvutustes arvestatud või on lubatud teatud ajavahemiku jooksul, kui nad ei põhjusta tõsist kahju võrgule ega tarbijatele.

3. **Avariitalitlused**, mida iseloomustatakse võrgu seadmetele ohtlike liigvooludega või teiste lubamatute nähtustega, mis tekivad tavaliselt võrgu elementide vigastuse tõttu (isolatsioonirike, juhtmete katkemine jt). Avariitalitlustel siirdeiseloorm, s.o nad on alaliselt mööduvad.
4. **Avariijärgsed talitlused**. Tekivad pinge käsitsi sisselülitamisel või automaatsel taastumisel, kui samaaegselt isekäivitub suur hulk elektritarviteid (tekib liigvool, pinge langeb jne). Ka see on mööduvtalitus.

Tavatalitlust vaadeldi eespool. Käesolevas peatükis käsitletakse sellised talitusviise, mille käigus esivad tõsised kõrvalekaldumised elektrienergia kvaliteedinäitajatest.

Avariitalitlused, vaatamata nende lühiajalisusele, tekitavad siiski voolujuhtide märgatavat kuumenemist ning suuri elektrodünaamilisi jõude nende vahel. See sunnib voolujuhte kontrollima nende vastupidavusele sellistele oludele. Avariitalitluste arvutustulemusi kasutatakse ka kaitseaparatuuri valikuks.

Kasutatakse ka teistsuguseid talitusviiside klassifikatsioone, näiteks järgmist

1. Normaalsiirde- ja talitlused
2. Normaalpüsitalitlused (käivitused, ümber-, sisse- ja väljalülitamised jm).
3. Avariilised siirderežiimid
4. Avariijärgsed püsitalitlused, mis võivad olla lähedased normaaltalitlusele või sellest tugevasti erineda.

5.2. Elektrienergia kvaliteedinäitajad

Elektritarvitite normaalse töö tagamise **tähtsaimaks tingimuseks** on nende toimine elektrienergiaga, mis vastab teatud **kvaliteedinõuetele**.

Elektri kvaliteedi all mõistetakse üldjuhul elektritarbijate elektrivarustuskindlust ja talitusparameetrite vastavust nimisuurustele. Kvaliteedinõuded võivad erineda sõltuvalt tarbijast. Elektrivõrk peab andma tarbijale kvaliteetset elektrit, kuid ka tarbija ei tohi oma seadmetega võrku saastata. Siinkohal pole liigne märkida, et tarbija on üks olulisemaid elektri halva kvaliteedi põhjustajaid.

Elektri kvaliteet mõjutab majanduslikult elektrisüsteemi, võrguettevõtte seadmete ja kõigi elektritarbijate tööd. Tänapäeval on tööstuses oluliselt tõusnudelektronika ja automaatika osakaal, samuti infotehnoloogia tähtsus. Enamik nendesse valdkondadesse kuuluvaid seadmeid on väga tundlikud toitepinge häiretele.

Elektrienergia kvaliteet on tihedalt seotud selliste mõistetega, nagu **töökindlus, eluiga, kasutegur, stabiilsus, valeoperatsioonid, rikked** jne. Liigpinged võivad rikkuda või täielikult nii tarbija kui ka võrguettevõtte elektriseadmed. Pikkadest elektrikatkestustest tingituna võib jääda andmata või saamata suur hulk elektrienergiat, mille maksumus võib olla suur või väga suur.

Vahelduvvoolu elektriseadmete normaalseks toimimiseks peabvõrgusagedus olema lähedane nimisagedusele, toitepinge nimipingele, pinge siinuseline ja kolmefaasilise tarbija puhul sümmeetriline. Olulist tähelepanu pööratakse viimasel ajal elektrimagnetilisele ühitudusele, mis lihtsustatult tähendab, et seade ei tohi tekitada elektromagnetiliseid häireid ühelt poolt ja ei tohi olla tundlik elektromagnetilistele häiretele teiselt poolt.

Eesti standard EVS-EN 50160:2000 **ELEKTRIJAOTUSVÕRKUDE PINGE TUNNUSSUURUSED** normib avalike võrkude pinge kvaliteedinäitajaid ja nende lubatud hälbeid alljärgnevalt.

❖ **Võrgusagedus** (toitepinge sagedus).

Toitepinge nimisagedus on 50 Hz. Normaaltalitlustingimustel peab põhiharmoonilise sageduse 10-sekundiline keskväärts jaotusvõrgus olema

- ühendenergiastemiga ühendatud võrkudes

50 Hz \pm 1 % (st 49,5 Hz kuni 50,5 Hz)	99,5% aastast,
50 Hz \pm 4 % / - 6 % (st 47 Hz kuni 52 Hz)	100 % ajast;

- ühendalektrisüsteemiga ühendamata võrkudes (nt saarte lokaalsetes elektrivarustusvõrkudes)

50 Hz \pm 2 % (st 49 hz kuni 51 Hz)	95 % nädalast,
50 Hz \pm 15 % ((st 42,5 Hz kuni 57,5 Hz)	100 % ajast.

❖ **Toitepinge suurus**

Madalpingevõrgu normitud nimipinge U_n on

- 230 V faasi- ja neutraaljuhi vahel neljajuhtmehises kolmefaasilises võrgus,
- 230 V faasijuhtide e faaside vahel kolmejuhtmehises kolmefaasilises võrgus.

Märkus. Madalpingevõrkudes on lepinguline pinge U_c ja nimipinge U_n võrdsed.

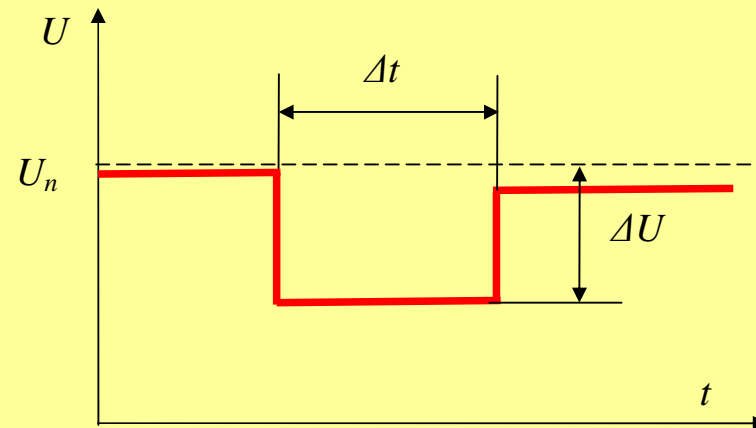
❖ Aeglased pingemuutused

Aeglased pingemuutused on pinge efektiivväärtuse U suurenemised või vähenemised nimipinge U_n suhtes, mis on tavaliselt tingitud jaotusvõrgu või selle osa kogukoormuse muutusest.

$$\Delta U = U - U_n$$

või

$$\Delta U = \frac{U - U_n}{U_n} 100\% .$$



Joonis 5.1. Pingemuutus

Normaaltingimustes, arvestamata rikkeid ja toitekatkestusi

- peab igas nädalases ajavahemikus toitepinge efektiivväärtuse 10-minutilisest keskvaartusest 95 % olema piirides $U_n = 10$ %;
- kõik toitepinge efektiivväärtuse 10-minutilised keskvaartused peavad jääma piiridesse $U_n = +10$ %/- 15 %.

Märkus. Kaugelasuvate piirkondade pikkade liinidega elektrivarustuse korral võib pinge väljuda piiridest $U_n = +10$ %/- 15 %. Tarbijaid tuleb sellest teavitada.

❖ Kiired pingemuutused

Kiired toitepinge muutused on põhjustatud peamiselt koormuse muutumisest tarbijapaigaldises või lülitustest toitevõrgus.

Normaaltingimustel ei ületa kiired pingemuutused tavaliselt 5 % nimipingest U_n , kuid teatud tingimustel võivad nad olla lühiajaliselt kuni 10 % nimipingest U_n .

❖ Pingelohk

Pingelohk on **toitepinge äkklangus** vahemikku 90 % kuni 1 % lepingulisest toitepingest U_c sellele järgneva pinge taastumisega lühikese ajavahemiku järel.

Pingelohud tekivad enamasti rikestest tarbijapaigaldistes või jaotusvõrgus ning on praktiliselt etnägematult ja juhusliku iseloomuga. Pingelohkude hulk ühe aasta jooksul võib normaaltalitlustingimustel ületada mõnekümnest kuni tuhandeni.

Pidesuurused.

- Enamike pingelohkude kestus on lühem kui 1 s ja nende suhteline sügavus alla 60 %, kuid võib esineda ka kestvamaid ja sügavamaid pingelohke.
- Mõnes paikkonnas võivad tarbijapaigaldistes koormuste sisselülitamisest põhjustatud pingelohud sügavusega 10 % kuni 15 % esineda vähe sageli.

❖ Värelustugevus / flikkeri tugevus

Värelus on nägemisaistingu muutlikkuse mulje, mis on tingitud elektrivalgustuse kõikuvast heledusest või ajas muutuvast spektraaljaotusest.

Värelust hinnatakse värelustugevusega. Eristatakse

- 10-minutilise ajavahemikus mõõdetud väreluse lühiajalist tugevust P_{st} ,
- väreluse kestvtugevust P_{lt} , mis arvutatakse 12st kahetunnilises ajavahemikus mõõdetud P_{st} väärtusest valemiga

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}}.$$

Normaaltalitustingimustel ei tohi pingemuutuse tagajärjel tekkiva valgusallikate väreelse kestevtugevus 95 % aja jooksul suvalisest nädalastületada väärtust $P_{lt} \leq 1$.

Märkus. Väreelse toime inimesele on subjektiivne ja võib muutuda olenevalt tajumistingimustest ja toimeajast.

❖ Toitekatkestused

Mõisted

Toitekatkestus on seisund, kui pinge tarnepunktis väiksem kui 1 % lepingulisest pingest U_c .

Toitekatkestus võib olla

- **plaaniline**, mis tuleb plaanilistest töödest jaotusvõrgus ja millest tarbijat eelnevalt informeeritakse,
- **ootamatu**, mille põhjuseks on enamasti välise mõjurite, seadmestike tõrgete või häiretega seotud püsiva või mööduva iseloomuga rikked.

Märkus 1. Tarbija võib plaaniliste toitekatkestuste mõju sobivate meetmetega minimiseerida.

Märkus 2. Ootamatud toitekatkestused kuuluvad ettenägematute, suurel määral juhuslike sündmuste hulka.

Ootamatud toitekatkestused jagunevad omakorda *lühiajalisteks* ja *pikaajalisteks*.

Lühiajalised toitekatkestused kestavad kuni 3 minutit ning on põhjustatud mööduvatest riketest. Lühiajalisi toitekatkestusi võib aastas esineda normaaltalitlustingimustel **mõnikümmend kuni mõnisada**, milledest ca 70 % võivad olla lühemad kui 1 s.

Pikaajalised toitekatkestused kestavad üle 3 minuti ning on põhjustatud püsirikkest. Eri riikide jaotusvõrkude struktuuride suurte erinevuste ja ilmastiku ning väliste mõjude ettearvamatus tõttu ei saa määratleda pikaajaliste toitekatkestuste ja esinemissageduse tüüpvärtust. Siiski võib öelda, et normaaltalitlustingimustel võib üle 3 min kestvate toitekatkestuste esinemissagedus aastas olenevalt paikkonnast olla alla 10 korra, mõnel pool kuni 50 korda.

❖ Liigpinged

Tööjuhtide ja maa vahelised ajutised võrgusageduslikud liigpinged

Ajutine võrgusageduslik liigpinge on suhteliselt pika kestusega liigpinge antud kohas ja see tekib tavaliselt rikke puhul võrgus või tarbijapaigaldises. Liigpinge kaob, kui rike kõrvaldub. Teatud tingimustel võib trafo ülempingepoolse rike põhjustada rikkevoolu voolamise ajaks liigpingetrafo alampingepoolel, mille efektiivväärtus ei ületa tavaliselt 1,5 kV.

Tööjuhtide ja maa vahelised transientliigpinged

Transientliigpinge on võnkuv või mittevõnkuv, tavaliselt kiiresti sumbuva liigpinge, mis tekib tavaliselt äikesest, lülitamistest või sulavkaitsmete läbipõlemisest. Transientliigpinge kestus on mõni millisekund või vähem, tipuväärtus ei ole üle seejuures tavaliselt üle 6 kV, kuid võib olla ka suurem.

Transientliigpinge **energiasaldus** sõltub märgatavalt allikast. Piksest indutseeritud liigpinge on tavaliselt suurema tipuväärtusega, kuid väiksema energiasaldusega kui pikema kestusega lülitusliigpinge. Elektripaigaldiste liigpingekaitsevahendid tuleks valida arvestades lülitusliigpingete karmimaid energeetilisi nõudeid, millega hõlmatakse nii indutseeritud pikseliigpingeid kui ka lülitusliigpingeid..

❖ Toitepinge asümmeetria

Toitepinge asümmeetria on kolmefaasilise võrgu seisund, milles faasipingete efektiivväärtused või faasipingete vahelised nihkenurgad pole võrdsed.

Asümmeetriat iseloomustavaks näitajaks on pinge vastujärgnevus- ja pärijärgnevuskomponentide suhe ehk **asümmeetriategur** k_a

$$k_a = \frac{U_2}{U_1} 100\%.$$

Normaalitalitusel ei tohi vastujärgnevuskomponendi efektiivväärtuse 10-minutiline keskvärtus madal- ja keskpingel ületada 2 % pärijärgnevuskomponendist igapäevaste mõõtmiste 95% juhtudel. Mõnes piirkonnas, kus tarbijapalgadised on ositi ühendatud ühe- või kahefaasiliselt, võib kolmefaasilises liitumispunktis asümmeetria olla kuni 3 %.

❖ Pinge mittesiinuselisus

Pinge mittesiinuselisus väljendub lainekuju häirituses ja seda põhjustavad

- alaliskomponendi sisaldus,
- kõrgemad harmoonilised,
- vahelharmoonilised,
- pealdatud signaalpinged.

Kõrgema harmoonilise pinge on siinuspinge, mille sagedus on täisarv korda suuremtoitepinge põhisagedusest. Kõrgema harmooniliste pingeid võib hinnata

- üksikult, harmoonilise amplituudi U_h ja põhiharmoonilise U_1 suhtega u_h

$$u_h = \frac{U_h}{U_1},$$

kus h on kõrgema harmoonilise järk;

- ühiselt, nt **harmooniliste moonutusteguriga THD** (ingl tital harmonic distortion factor), mis arvutatakse valemiga

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (u_h)^2}.$$

Üldreegel on, et harmooniliste tegur THD kuni 40nda järguni ei tohi ületada 8 %.

Märkus. Toitepinge kõrgemaid harmoonilisi põhjustavad peamiselt jaotusvõrgu kõigile pingestastele ühendatud tarbijate ebalineaarsed koormused. Selle tagajärjel tekkivad koormusvoolu kõrgemad harmoonilised põhjustavad võrgu takistustel kõrgemate harmooniliste pingelange ja võimsuskadusid.

Vaeharmooniliste pinge on kõrgemate harmooniliste vahel oleva sagedusega siinuspinge, mille sagedus pole põhiharmoonilise suhtes täisarvkordne. Lähedaste sagedustega vaeharmoonilised pinged võivad esineda samaaegselt, moodustades laiaribalise spektri. Vaeharmoonilised võivad tekitada värelost või häireid madalsageduslikes kaugjuhtimissüsteemides.

Pealdatud signaalipinge on toitepingele liidetud signaal teabe edastamiseks jaotusvõrgus ja tarbijapaigaldistes.

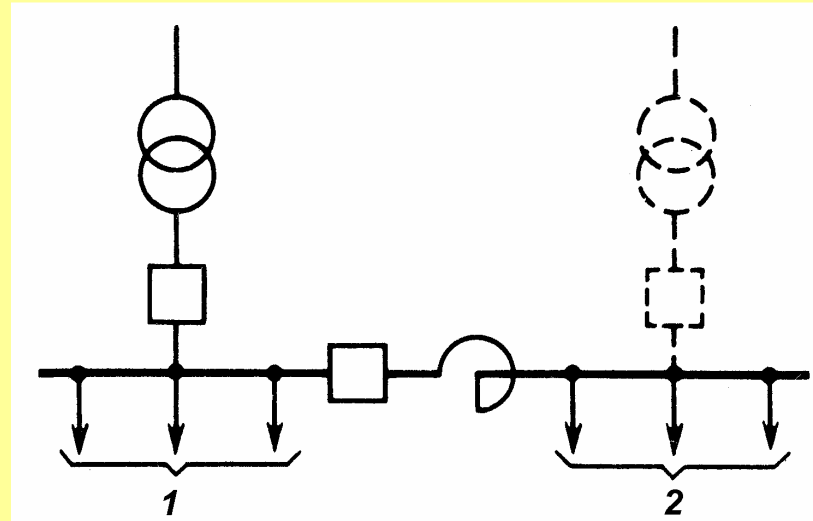
5.3. Elektrienergia kvaliteedi tagamise abinõud

Põhiline abinõu, mis parandab ühtlasi kõiki kvaliteedinäitajaid on **pingekadude vähendamine** elektrivarustussüsteemi elementides. Selleks on mitmed võimalused:

- 1) liinide lühendamine (alajaamade ja toiteallikate paigutamine võimalikult koormuskeskme lähedale, trasside lühima pikkuse valimine jms.);
- 2) väikese aktiiv- ja induktiivtakistusega liinide ehitamine (lattliinid, kaabelliinid),
- 3) suletud võrke kasutamine,
- 4) minimaalse suhtelise lühistakistusega trafode valik,
- 5) elektivõrgu elementide läbilaskevõime valik arvestusega piirata pinget kõrvalkaldeid ja kõikumist.



Pinge kõikumiste vähendamiseks tuleb trafo ülekandetegur valida selliselt, et kõrgepinge poolel oleks ümberlüüti **optimaalses asendis** (ümberlülitil on tavaliselt 5 asendit). Selle meetodiga saavutatakse pinget kõikumise muutmine $\pm 5\%$ võrreldes nimiülekandeteguri kasutamisega. Kui koormuse muutumisest tingitud ööpäevased pingemuutused siiski ületavad lubatud, tuleb kasutada koormuse all reguleeritavaid trafosid.

Pinge kuju parandamiseks kasutatakse **filtreid**, mis on häälestatud konkreetsetele voolu harmoonilistele. Need filtrid kuuluvad tavaliselt seadmete koosseisu, mis tekitavad kõrgemaid harmoonilisi (türistorajamid, kaarahjd jt) või nad lülitatakse selliste seadmete toiteklemmidele. Tihti kasutatakse filtrite asemel suure induktiivsusega elemente (reaktorid). Pinget kuju parandamist võimaldab ka võrgu sektsioneerimine (joonis 5.3.1), koondades kõrgemate harmooniliste suhtes tundlikud seadmed eraldi sektsiooni ja kaitstes neid filtri või reaktoriga.



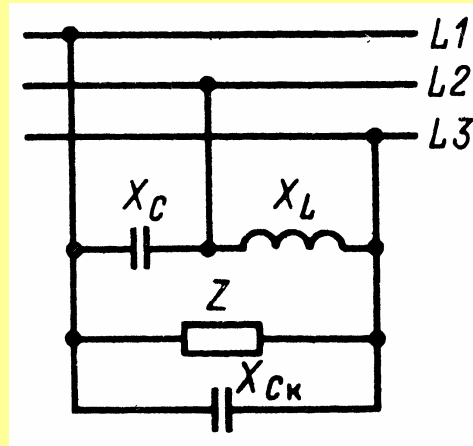
Joon. 5.2. Võrgu seksioneerimine

1- tarvititele, mis põhjustavad (tekitavad) kõrgemaid harmoonilisi ning tarbijatele, mis ei ole tundlikud kõrgemate harmooniliste suhtes, 2- tarvititele, mis on tundlikud kõrgemate harmooniliste suhtes.

 – reaktor;  – lüüti.

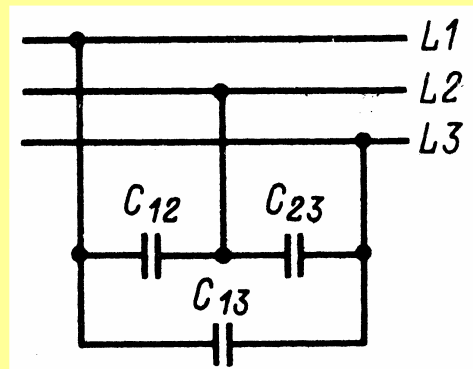
Pingete ebasümmeetria vähendamiseks kasutatakse:

- 1) ebasümmeetriliste tarbijate toitmist eriotstarbelistest trafodest, mähiste skeemiga nt Δ / Y või Δ /siksak,
- 2) reaktiivseid sümmetreerimisseadmeid, mis ühendatakse vähem koormatud faasi (joonis5.3),



Joon. 5.3. Reaktiivne sümmeerimiseseade

3) Sümmeerivate kondensaatorpatareide lülitamist faaside vahele, kui ebasümmeetria on põhjustatud ainult reaktiivkoormusest (joonis 5.3),



Joon. 5.4. Sümmeeriv kondensaatorpatareid

- 4) pooljuht- reaktiivvõimsuse kompensatoreid, mida kasutatakse nii reaktiivkoormuse kui ka kõrgemate harmooniliste kompenseerimiseks.

Kaitseks liigpingeimpulsside eest kasutatakse siluvaid kondensaatorplokke ja **liigpingepiirikuid**, mis lülitatakse tundlike elektritarvitite ette.

5.4. Lühised elektrivõrkudes

Lühiseks nimetatakse elektiahela erineva potentsiaaliga osade ühendust üle lõpmata väikese takistuse, mille tulemusena vool ahelas tõuseb järsult, ületades tunduvalt püsitalituse lubatud suurima väärtuse.

Lühised on elektrivarustussüsteemide **avariide põhiliigid** ning on oma olemuselt **juhuslikku laadi**.

Lühiseks loetakse ka ühefaasilist maahendust või ühendust maandatud korpusega jäigalt maandatud võrgu neutraali korral.

Lühised 3-faasilistes võrkudes ja seadmetes võivad olla **kolme-, kahe- või ühefaasilised**. Kolmefaasilist lühist nimetatakse ka **sümmeetriliseks** lühiseks.

Elektrivõrkude lühisvoolude arvutamisel on **kaks eesmärki**:

1. **Maksimaalselt võimalike lühisvoolude määramine**, et kontrollida juhtide ja aparaatide soojuslikku ja elektrodünaamilist vastupidavust lühisele, aga ka lühisvoolude piiramise ning lühise kestuse lühendamise abinõude valikuks.

2. **Minimaalselt võimalike lühisvoolude määramine**, et kontrollida kaitse tundlikkust ning õigesti valida kaitseaparatuuri parameetrid ning määrata kaitse rakendumise maksimaalne aeg.

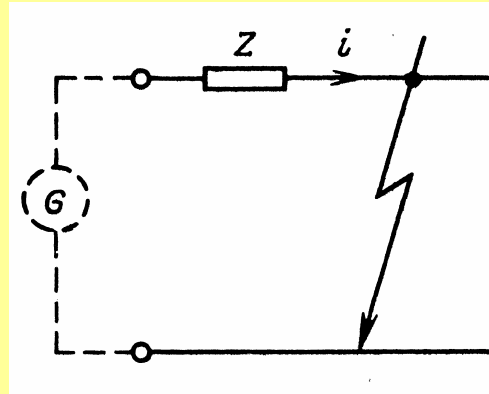
Esimesel juhul valitakse arvutuse aluseks tavaliselt 3-faasiline lühis, sest lühisvoolud sellise lühise puhul on suuremad kahe- või ühefaasilise lühise puhul tekkivatest. Arvutuslik lühise koht valitakse selliselt, et kontrollitavat aparaati või juhti läbiv vool oleks maksimaalselt võimalikult suur.

Teisel juhul valitakse arvutuse aluseks ühe- või kahefaasiline lühis kontrollitava lõigu lõpus sellise skeemi ja toiteallikate arvu korral, mis tagavad vähima lühisvoolu.

Mõlemal juhul teostatakse arvutused teatud **lihtsustustega**, millest olulisemad on alljärgnevad.

1. Kõik toiteallikad, mis osalevad lühispunkti toitmisel töötavad samaaegselt ning nimikoormusel.
2. Kõik sünkroongeneraatorid ja -kompensaatorid omavad pinget automaatregulaatoreid ja kiiretoimelist ergutuse forsseerimist.
3. Kõigi toiteallikate elektromotoorjõud on samas faasis s.t. nende vahel puudub faasinihe.
4. Maksimaalsete lühisvoolude arvutusel võetakse pinget 5 % kõrgem nimipingest, minimaalsetel arvutustel võrdseks nimipingega.
5. Lühis tekib ajahetkel, mil löökvool omaks maksimumi.
6. Asünkroonmootoreid vaadeldakse lühise korral kui lühisvooluallikaid ainult selles võrgus, kuhu nad on ühendatud.
7. Paralleelkompensatsiooni kondensaatorite mõju ei arvestata.
8. Arvestatakse ainult piki aktiiv- ja reaktiivtakistusi, põikijuhtivusi ei arvestata.
9. Lühispunkti takistus loetakse nulliks, so lühis on puhtalt metalliline.
10. Võrku lülitatud staatiliste tarbijate mõju lühisele ei arvestata.

Lühise aseskeem



Joon. 5.5. Lühise aseskeem

Sümmeetrilise (3-faasiline) lühisvoolu võib eelnevaid lihtsustusi arvesse võttes arvutada tuntud valemiga

$$i = \sqrt{2}I_p \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + \sqrt{2}I'' e^{\frac{-t}{\tau}} = i_p + i_a,$$

kus

i_p – lühisvoolu perioodilise komponendi hetkväärtus,

i_a – lühisvoolu aperioidilise komponendi hetkväärtus,

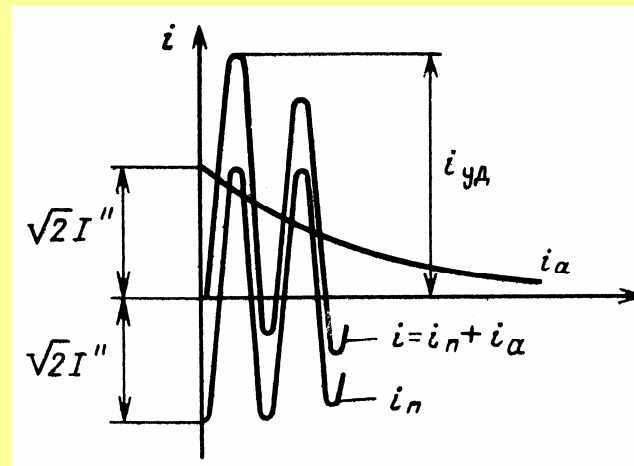
I_n – lühisvoolu perioodilise komponendi efektiivväärtus,

I'' – lühisvoolu perioodilise komponendi algefektiivväärtus,

τ – ahela elektromagnetiline ajakonstant $\left(\tau = \frac{L}{R}\right)$,

t – aeg.

Lühisvoolu sõltuvus ajast



Joon. 5.6. Lühisvoolu sõltuvus ajast

Lühisvoolu perioodilise komponendi iseloomu järgi eristatakse kahte juhust

1. **Lühisvool on suhteliselt väike** toiteallika nimivooluga võrreldes, mille tõttu tekkivad siirdeprotsessid on nõrgad ning ei põhjusta voolu perioodilise komponendi muutumist. Selline lühis leiab aset toiteallikast kaugel ja seepärast nimetatakse niisugust lühist nimetatakse **kauglühiseks**.
2. **Lühisvool on suur** ning põhjustab märgatavaid elektromagnetilisi siirdeprotsesse. Selline lühis leiab aset toiteallika lähedal ja seepärast nimetatakse sellist lühist **lähilühiseks**.

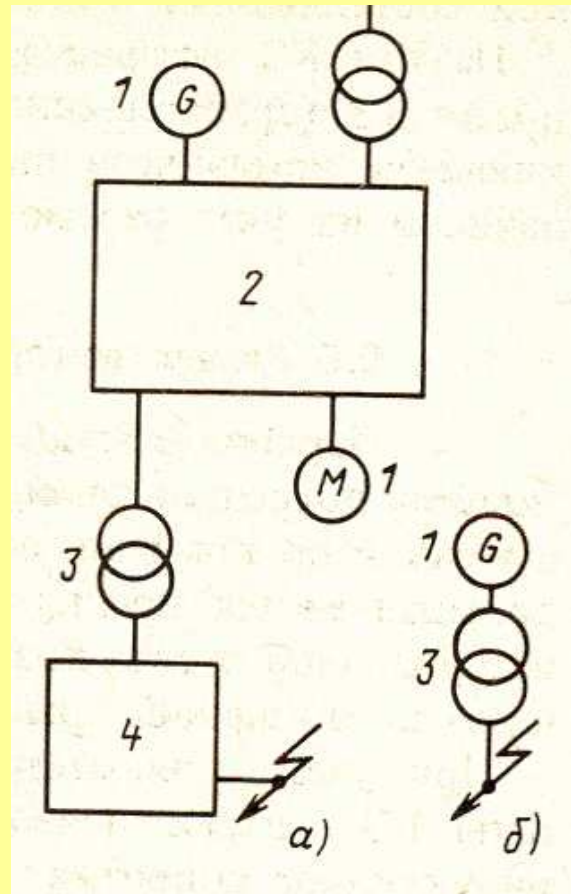
Kauglühisvoolude arvutamine

Lühisvoolu perioodilise komponendi väärtust loetakse praktiliselt muutumatuks, kui tema muutus **ei ületa 10 %**. Tööstusettevõtetes ongi lühisvooludel selline iseloom, kui lühisvool satub madalpinge poolele kõrgepingepoolelt läbi pinget madaldava trafo.

Arvesse võttes kõrgepingepoole generaatorite parameetreid, võib lühisvoolu perioodilise komponendi lugeda muutumatuks ja lühise kauglühiseks, kui lühisahela induktiivtakistus on vähemalt kolmekordne generaatori nimitakistus, s.o $X_* \geq 3$. Siit järgneb tingimus

$$u_k \frac{S_G}{S_T} \geq 3 - x'',$$

kus u_k – trafo suhteline lühispinge,
 S_G - toitegeneraatorite nimivõimsuste summa,
 S_T – trafo nimivõimsus,
 x'' – generaatori suhteline ülimööduv induktiivtakistus.



Joonis 5.7. Madalpingelise lühise toitmine kaugelasuvatest kõrgepingegeneraatoritest
a – väljaarendatud kõrgepingevõrgu korral, b – lühise puhul kohaliku elektrijaama generaatori toitel oleva trafo klemmidel, 1- lühise toiteallikas kõrgepingevõrgus, 2 – kõrgepinge võrk, 3 – madalpingevõrku toitev trafo, 4 – madalpingevõrk

Reaalsetel juhtudel, mil kõrgepingevõrku toidetakse energiasüsteemist trafode kaudu (joonis 5.7a), võib olla tegemist kahe tüüpilise olukorraga

a) lühis trafo sekundaarpinge klemmidel, mille puhul $\frac{S_{KP}}{S_T} \geq 20$,

b) lühis toidetava võrgu kaugemates punktides, mille puhul $\frac{S_{KP}}{S_T} \geq (5...15)$,

kus S_{KP} – kõrgepingevõrku toitvate trafode, sünkroongeneraatorite, mootorite ja kompensatorite nimivõimsuste summa.

Tsehhivõrkudes, aga ka ettevõtte kõrgepingejaotusvõrkudes on reeglina viimane tingimus täidetud ja seetõttu võib neis lugeda kõrgepinge poolelt tulnud lühisvoolu perioodilise komponendi lugeda konstantseks. Sel juhul võib lühisvoolu perioodilise komponendi arvutada valemiga

$$I'' = \frac{1,05U_n}{\sqrt{3} \cdot Z},$$

kus U_n - võrgu nimipinge,

Z – lühisahela ühe faasi kogutakistus, mis peab haarama selle ahela nii aktiiv- kui ka induktiivtakistused, nt toitealliad, trafod ja võrgu elemendid kuni lühise kohani.

Lühise arvutuse juures on **vaja silmas pidada** järgmist:

- 1) kõrgepingevõrkude koguaktiivtakistus ei ületa 1/3 reaktiivtakistuse väärtusest, mille tõttu selle mõju kogutakistusele Z ei ületa 5 % ja võib jätta arvutustes arvestamata (v.a. pikad väikese ristlõikega kaabelliinid);
- 2) kõrgepingeaparatuuride ja lühikeste voolulattide takistus võrreldes liinide, toiteallikate ja voolupiiravate reaktorite takistusega on tühiselt väikesed;
- 3) madalpingevõrkudes on aktiivtakistuse osakaal oluline ja seal ei tohi teda arvestamata jätta.

Ekvivalentse toiteallika takistus X_{TA} loetakse induktiivseks ja see arvutatakse valemiga

$$X_{TA} = \frac{(1,05U_n)^2}{S''},$$

kus S'' - antud võrku toitva trafo algvõimsus kõrgepingeklemmidel, mis omakorda on arvutatav valemiga

$$S'' = \sqrt{3} \cdot 1,05U_{1n} I_1'',$$

kus U_{1n} - kõrgepingevõrgu nimipinge,

I_1'' - lühisvoolu perioodilise komponendi algväärtus trafo kõrgepingeklemmidel.

Toiteallika takistuse X_{TA} **võib jätta arvestamata**, kui ta ei ületa 5 % trafo takistusest, s.o. $X_{TA} < 0,005 Z_T$.

Sellist ekvivalentset toiteallikat nimetatakse **lõpmatult võimsaks**, mis tähendab seda, et lühise tekkel madalpinge poolel tema kõrgepingepoole pinge ei muutu.

Lühisvoolu **aperioodilise komponendi** saab arvutada valemiga

$$i_a = \sqrt{2} I'' e^{\frac{-t}{\tau}},$$

kus τ – lühise elektromagnetiline ajakonstant.

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{X}{2\pi f R},$$

kus R, X – lühiseahela aktiiv- ja induktiivtakistus,
 L – lühiseahela induktiivsus.

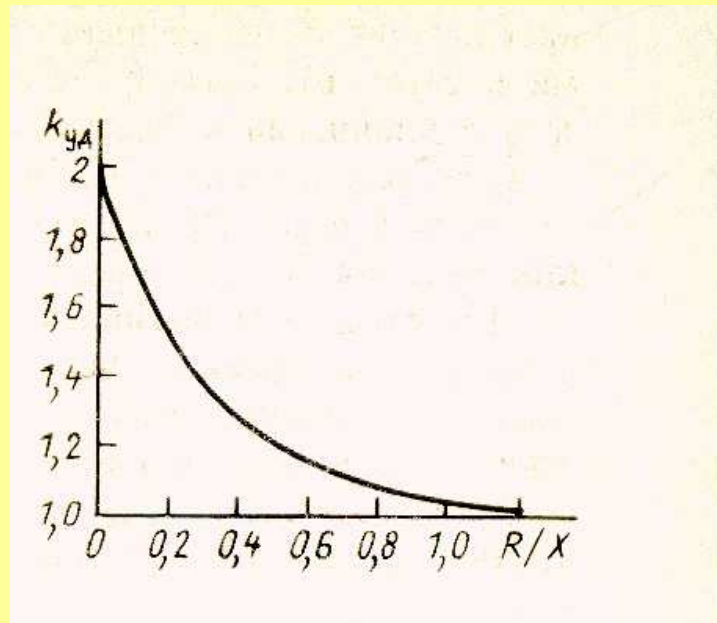
Lühisvoolu maksimumväärtus (löökvool) leiab aset ajahetkel $t = 1/(2f)$:

$$i_{löök} = (1 + e^{-\pi R / X}) \sqrt{2} \cdot I'' = k_{löök} \sqrt{2} \cdot I'',$$

kus $k_{löök}$ - lühisvoolu löögitegur

$$k_{löök} = (1 + e^{\frac{\pi R}{X}}).$$

Löögiteguri võib määrata ka kõveralt joonisel 5.8.



Joonis 5.8. Lühisvoolu löögiteguri sõltuvus lühisahela aktiiv- ja induktiivtakistuse suhtest

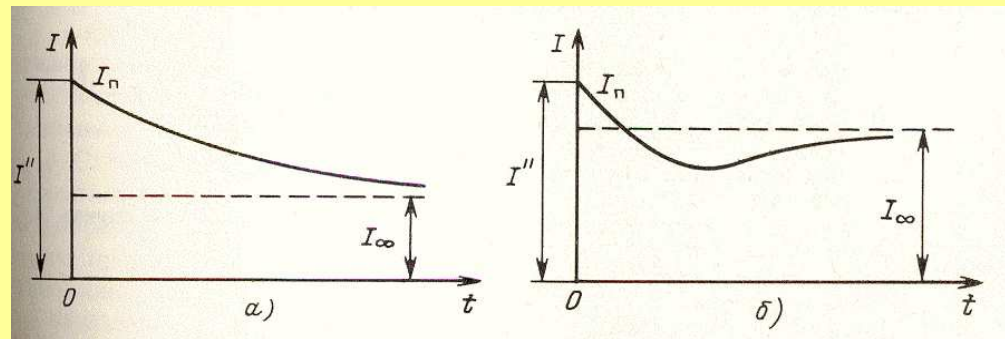
Kõrgepingevõrkudes, millede ei määrata aktiivtakistust, võib võtta $R/X \approx 0,07$, $\tau \approx 0,05$ s ja $k_{löö} \approx 1,8$.

Lühisvoolu perioodilise komponendi suurima väärtuse trafo taga, mis toidab kõrge- või madalpingevõrku, võib totva ja toidetava võrgu takistusi arvestamata kõige lihtsamalt arvutada valemiga

$$I'' = I_{2n} / u_l.$$

Lähilühisvoolude arvutamine

Lähilühisvoolude korral ületab lühisvoolu perioodiline komponent $1/3$ pöörleva generaatori nimivoolu ning see nõuab siirdeprotsesside arvestamist generaatoris. Lihtsustatult lähtutakse eeldusest, et need protsessid mõjutavad ainult lühisvoolu perioodilist komponenti, mille efektiivväärtus muutub algväärtusest I'' kuni püsiväärtuseni I_∞ . Kui generaatoril puudub ergutuse automaatregulaator, siis on see muutus monotoonselt vähenev (jooni 5.9a), selle olemasolu aga põhjustab lühisvoolu tõusu (joonis 5.9b).



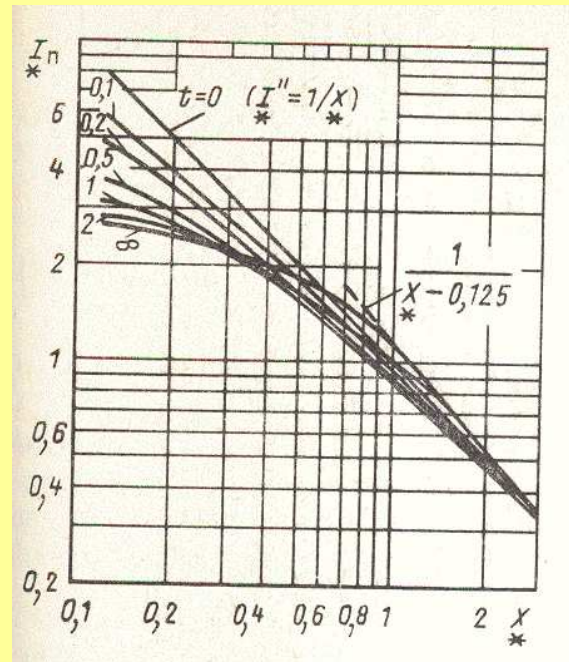
Joonis 5.9. Lähilühisvoolu perioodilise komponendi muutus

a – generaatori erutuse automaatregulaatori puudumisel, b - generaatori erutuse automaatregulaatori olemasolul

Lähilühisvoolude perioodiliste komponentide arvutamiseks võrkudes, mida toidetakse sünkroongeneraatoritest võimsusega kuni 100 MW, kasutatakse arvuskõveraid $I_{*p} = f(X_*, t)$, mis on toodud joonisel 5.10. Et kõverad oleks universaalsed, koostatakse graafikud suhtelistes ühikutes

$$I_{*p} = I_p / I_{nimi} \text{ ja } X_* = X / X_{nimi},$$

kus I_{nimi} - masina nimivool, $X_{nimi} = U_{nimi}^2 / S_{nimi}$ - masina nimiinduktiivtakistus, U_{nim} ja S_{nimi} - masina nimipinge ja nimivõimsus.



Joonis 5.10. Arvutuslikud kõverad ergutuse automatregulaatoriga tüüpturbogeneraatori lühisvoolu perioodilise komponendi arvutamiseks

Lühisvoolu perioodilise komponendi algväärtus graafikul

$$I_{*p}'' = 1 / X_*$$

Lõppväärtus pärast generaatori väljundpinge täielikku taastumist

$$I_{*\infty} = 1 / (X_* - x'''),$$

kus x''' – masina suhteline ülimööduv nimiinduktiivtakistus, tüüpturbogeneraatori puhul $x''' = 0,125$.

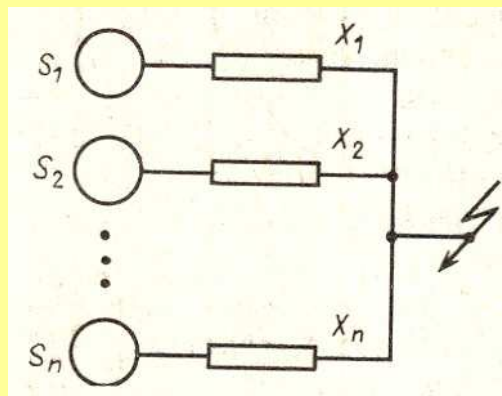
Lähilühisvoolude arvutuse käik.

1. Aseskeemi koostamine ja arvutusliku lühispunkti määramine.
2. Kõigi arvestatavate elementide arvutuslike takistuste määramine, soovitavalt suhtelistes ühikutes, võttes takistuse baasväärtuseks mingi vabal valitud takistuse, näiteks

$$Z_b = U_b^2 / S_b,$$

kus $U_b = 1,05 U_{nimi}$ ja S_b – generaatori, generaatorite grupi võimsus või mingi vabal valitud võimsus. Sünkroonmasinate takistus leitakse nende suhtelise ülimööduva nimiinduktiivtakistuse järgi.

3. Skeem esitatakse selliselt, et lähisvool igast ühesuguste lähisvoolu perioodilise komponendi sumbumisparameetritega masinategrupist saaks arvutada sõltumatult, nagu näiteks joonisel 5.11.



Joonis 5.11. Võrgu aseskeem lühisvoolu arvutamiseks erinevatest toiteallikatest toitmise puhul

4. Olgu näiteks kahes harus ühesuguste parameetritega generaatorid. Sel juhul võib need asendada ühe ekvivalentsega, kui on täidetud tingimus

$$0,4 \leq \frac{S_1 X_1}{S_2 X_2} \leq 2,5.$$

Uue ekvivalentse ahela võimsus $S = S_1 + S_2$ ja takistus $X = X_1 X_2 / (X_1 + X_2)$.

5. Iga ahela jaoks, mille toiteallikaks on teatav ekvivalentne sünkroonmasin võimsusega $S_{nimi\ i}$, määratakse arvutuslik takistus kas eeltoodud valemite alusel, kui on teada takistuste absoluutväärtused või alltoodud valemiga, kui lähtetakistus on esitatud suhtelistes ühikutes

$$X_* = X_b \frac{S_b}{S_{nimi\ i}},$$

kus X_b – suhteline takistus baasvõimsuse S_b suhtes.

6. Arvutuslike kõverate või valemite alusel määratakse lühisvoolu perioodilise komponendi alg- ja väljakujunenud väärtus I_*'' ja $I_{*\infty}$.

7. Suhteliste suuruste alusel määratakse voolude tegelikud väärtused

$$I_p = I_{*p} I_{nimi\ i},$$

kus $I_{nimi\ i}$ – i-nda haru ekvivalentse generaatori nimivool.

8. Kui harude ajakonstandid on erinevad, siis arvutatakse iga haru löökvool eraldi.

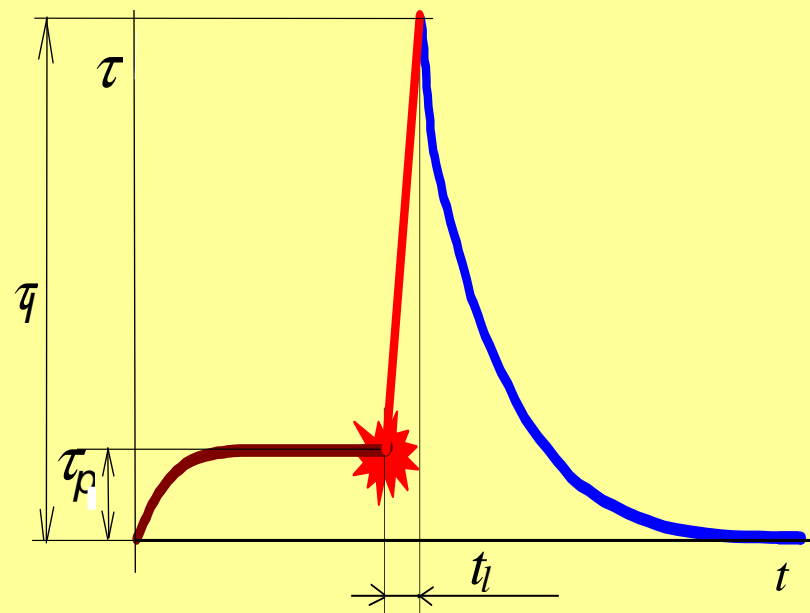
9. Üksikute harude voolude aritmeetilise liitmisega leitakse lühiskoha summaarsed lühisvoolu komponendid I'' , I_{∞} , $I(t)$ ja $i_{lööök}$.

Lühisvoolude arvutamisel madalpingevõrgus tuleb induktiivtakistuse X asemel kasutada näivtakistust Z .

Lühisvoolude termiline mõju

Kuumenemisel lühise korral on voolud väga suured, temperatuurid kõrged ja protsessi kestus lühike. See on **adiabaatiline** protsess, sest 97...99 % eralduvast soojusest akumulereb voolujuhis, mille temperatuur võib tõusta üle 300 kraadi. Kuumenemise siirdeprotsessi on lühise puhul keeruline arvutada, sest nii materjali aktiivtakistus R kui ka erisoojusmahtuvus c sõltuvad temperatuurist.

Kuumenemise siirdeprotsessi lühisel kujutab sirgjoon. Kuna lühiseid esineb harva ja nende kestus on väga lühiajaline, on voolujuhi lubatav temperatuur lühisel 2...4 korda kõrgem normaaltalitluses lubatust.



Joonis 5.12. Kuumenemisprotsess lühisel

Kuumenemisprotsessi lühisel võib kirjeldada võrrandiga, mille järgi kogu eraluv soojusenergia akumuleerub voolujuhis ja läheb voolujuhi temperatuuriks.

$$I^2 R dt = c m d v ,$$

kus v – juhtme temperatuur.

Arvestades voolujuhi tekistuse muutust temperatuuri tõustes saab eeltoodud võrrandi integreerimiseks mugaval kujul esitada järgmiselt

$$\int_0^{t_l} I^2 dt = s^2 \frac{c \gamma}{\rho_0} \int_{v_a}^{v_l} \frac{d v}{1 + \alpha v} ,$$

kus t_l – lühise kestus, v_a – voolujuhi algtemperatuur, v_l – voolujuhi temperatuur lühise lõpus.

Kasutades abitähiseid

$$B = \int_0^{t_l} I^2 dt$$

ja

$$\frac{1}{a^2} = s^2 \frac{c \gamma}{\rho_0} \int_{v_a}^{v_l} \frac{d v}{1 + \alpha v} = \frac{c \gamma}{\rho_0 \alpha} \ln \frac{1 + \alpha v_l}{1 + \alpha v_a}$$

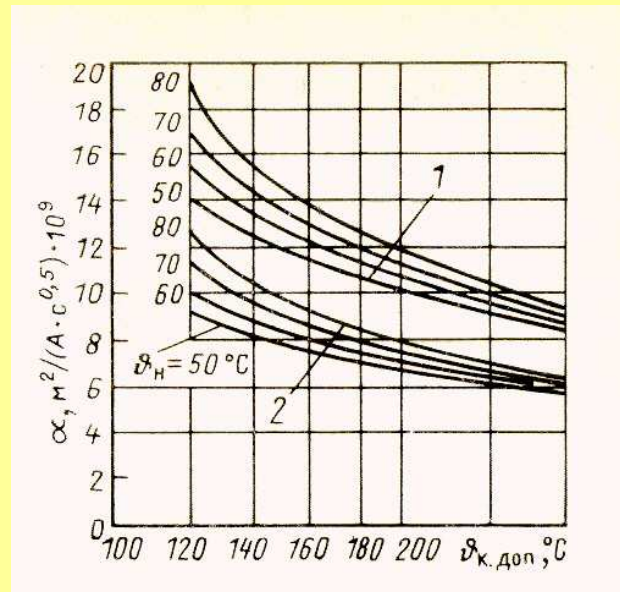
võime kuumenemisvõrrandi esitada kujul

$$B = s^2 / a^2 ,$$

kus B – nn Joule integraal, a – voolujuhi kuumenemist iseloomustav tegur.

Lubatud temperatuuride piirväärtuste v_a ja v_l alusel või joonisel 5.13 toodud kõverate järgi määratakse voolujuhi arvutuslik kuumenemistegur a_{arv} , mille järgi kontrollitakse voolujuhi ristlõike sobivust lühise seisukohalt

$$s \geq a_{arv} \sqrt{B} .$$



Joonis 5.13. Materjali kuumenemisteguri a sõltuvus lubatud kuumenemise alg- ja lõpptemperatuurist lühisel alumiiniumist (1) ja vasest (2) voolujuhi korral

Ligikaudselt võib voolujuhi ületemperatuur lühise lõpus arvutada valemiga

$$\tau_l = \frac{\rho_k}{\gamma \cdot c_k} k_t j^2 t_l + \tau_0,$$

kus ρ_k - kuuma voolujuhi eritakistus,

k_t - lisakadude tegur,

j - voolutihedus,

t_l - lühise kestus,

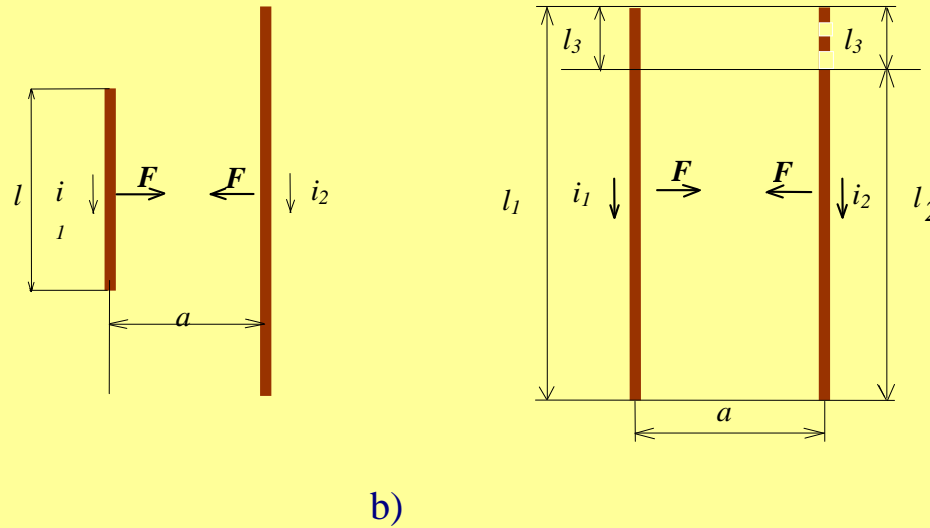
γ - voolujuhi materjali tihedus,

c_k - kuuma voolujuhi erisoojusmahtuvus,

τ_0 - voolujuhi ületemperatuur lühise tekkel.

Lühisvoolude elektrodünaamiline mõju

Kui paralleelvoolujuhte läbib vool, siis mõjub nende vahel elektrodünaamiline jõud (EDJ)



Joonis 5.14. Elektrodünaamilised jõud paralleelvoolujuhtide vahel

Kui üks voolujuht on lõpmata pikk (näiteks $l_1 = l, l_2 = \infty$, joonis 5.14a), siis

$$F = 10^{-7} i_1 i_2 \frac{2l}{a},$$

kus a - voolujuhtide vahekaugus.

Võrdse pikkusega paralleeljuhtide ($l_1 = l_2 = l$) puhul

$$F = 10^{-7} i_1 i_2 \frac{2l}{a} \sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2} - \frac{a}{l}$$

Jõud ebavõrdse pikkusega voolujuhtide puhul (joonis 5.14b):

$$F_{l_1 l_2} = \frac{1}{2} (F_{l_1 l_1} + F_{l_2 l_2} - F_{l_3 l_3}),$$

kus $F_{l_1 l_1}$ - jõud pikkusega l_1 voolujuhtide vahel ,

$F_{l_2 l_2}$ - jõud pikkusega l_2 voolujuhtide vahel ,

$F_{l_3 l_3}$ - jõud pikkusega l_3 voolujuhtide vahel .

Eeltoodud valemid kehtivad ümar- ja torujuhtide kohta.

Ristkülikukujulise ristlõikega voolujuhtide puhul

$$F = 10^{-7} i_1 i_2 C k_k ,$$

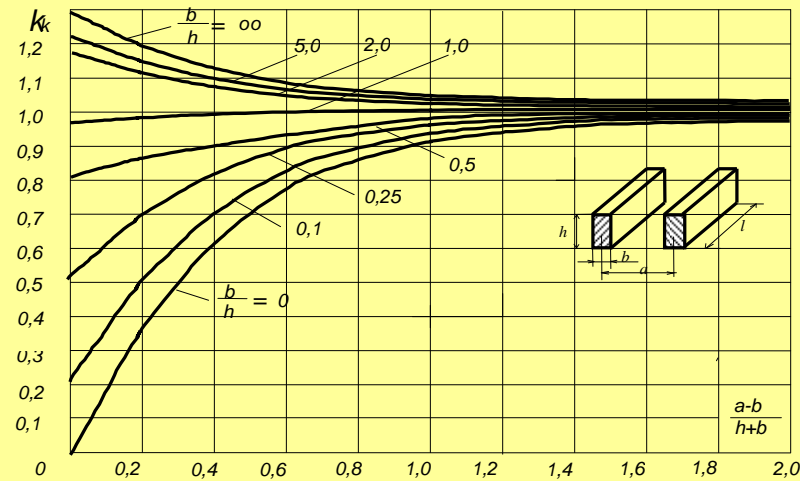
kus C – kontuuritegur, mis arvestab juhtide omavahelist paiknemist ruumis ning nende mõõtmeid,

k_k - kujutegur mille suurus sõltub voolujuhtide ristlõike mõõtmetest ja omavahelisest kaugusest,

s.o.

$$F_{\square} = F_{\circ} k_k .$$

Kujuteguri määramiseks on mugav kasutada vastavaid kõveraid (joonis 5.15).



Joonis 5.15. Kujuteguri k_k sõltuvus voolujuhtide ristlõike mõõtmetest ja vahekaugusest

Vahelduvoolu korral muutub vool i tuntud seaduspärasuse järgi

$$i = I_m \sin \omega t$$

Samasuunaliste voolude puhul tõmbuvad paralleeljuhid jõuga

$$F_{\approx} = 10^{-7} ci^2 = 10^{-7} c I_m^2 \sin^2 \omega t = 10^{-7} c \frac{I_m^2}{2} (1 - \cos 2\omega t)$$

Kui tähistada EDJ maksimaalväärtus
saab jõu valemi esitada kujul

$$F_m = 10^{-7} c I_m^2,$$

$$F_{\approx} = \frac{F_m}{2} - \frac{F_m}{2} \cos 2\omega t.$$

Järeldus. Vahelduvvoolu korral koosneb elektrodünaamiline jõud kahest komponendist:

- püsikomponendist $\frac{F_m}{2}$ ja
- vahelduvkomponendist $\frac{F_m}{2} \cos 2\omega t$, mis muutub koosinus-seaduspärasuse järgi, kuid kahekordse sagedusega.

Summaarne jõud muutub vahemikus $0 \dots F_m$ märki muutmata (joonis 5.16a).

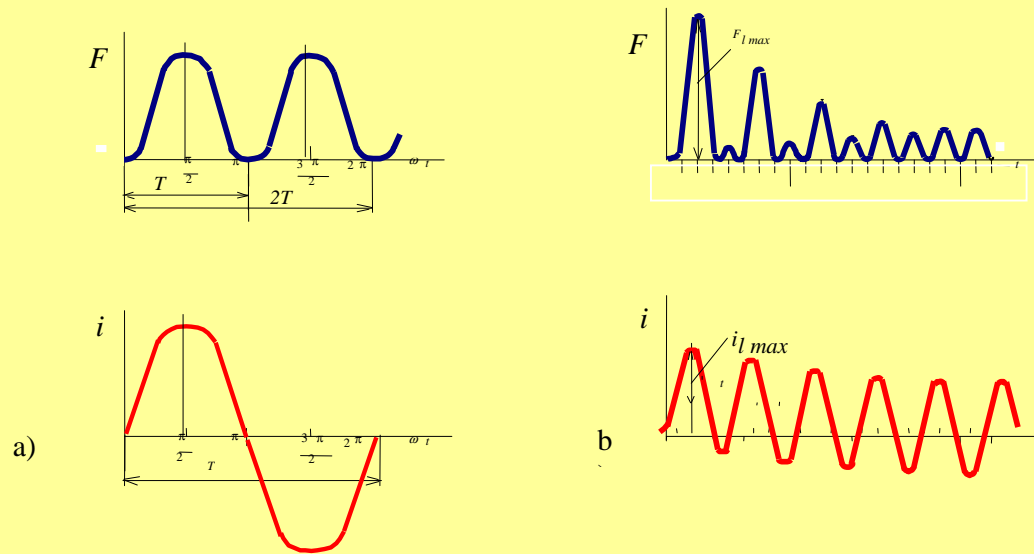
Jõu keskvärtus on võrdeline vahelduvvoolu efektiivväärtuse ruuduga

$$F_{\approx kesk} = 10^{-7} c I^2.$$

Arvutustes võetakse aluseks jõu maksimumväärtus kui ohtlikum

$$F_{\approx m} = 10^{-7} c I_m^2 = 2 \cdot 10^{-7} c I^2.$$

Valemist nähtub, et ühefaasilise vahelduvvoolu korral on elektrodünaamilise jõu väärtus sama voolu (efektiiv-) väärtuse korral **kaks korda suurem** kui alalisvoolu puhul.



Joonis 5.16. Elektrodünaamilised jõud ühefaasilise vahelduvvoolu korral
a) püsitalitluses, b) lühise tekkel

Lühisel võib vahelduvvoolu korral tekkida **löökvool**, mille esimene amplituud i_{lmax} võib ületada oluliselt väljakujunenud lühisvoolu amplituudiväärtust

$$i_{lmax} = k_l I_m = k_l \sqrt{2} I_m .$$

Löögiteguri k_l väärtus võetakse arvutustes tavaliselt $k_l = 1,8$.

Voolujuhtide dünaamiline vastupidavus on määratud tingimusega

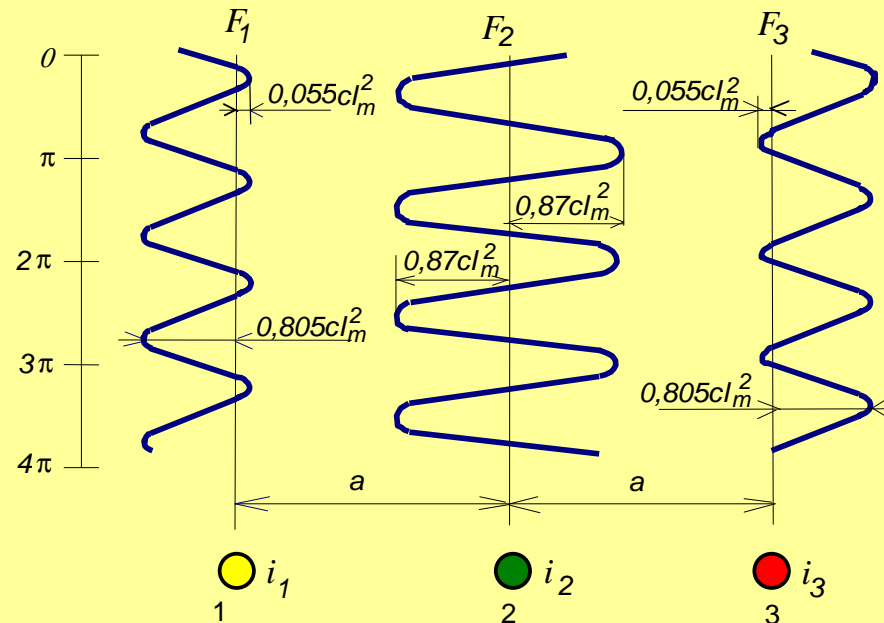
$$i_{lmax} \leq i_{l lub} .$$

Maksimaalne löögijõud, millele seade tuleb arvutada

$$F_{l_{\max}} = 10^{-7} c i_{l_{\max}} = 6,48 \cdot 10^{-7} c I^2 .$$

Seega võib lühisel tekkiv elektrodünaamiline jõud vahelduvvoolu korral olla kuni **6,48** korda suurem jõust, mis tekib sama suure alalisvoolu juures, sest alalisvoolu puhul löökvoolu ei teki.

Kolmefaasilistes elektriaparaatides paiknevad voolujuhid sageli ühes tasapinnas (joonis 5.18), kus iga voolujuht on kahe ülejäänud faasijuhtme voolude tekitatud jõudude mõju all.



Joonis 5.18. Elektrodünaamilised jõud kolmefaasilises süsteemis

Faasile 1 mõjuvad faaside 2 ja 3 voolude poolt tekitatud jõud

$$F_1 = F_{12} + F_{13} ,$$

kusjuures

$$F_{12} = 10^{-7} c I_m^2 \sin \varpi t \cdot \sin \left(\varpi t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

ja

$$F_{13} = 0,5 \cdot 10^{-7} c I_m^2 \sin \varpi t \cdot \sin \left(\varpi t - \frac{4\pi}{3} \right) .$$

Püsiolukorras faasile 1 mõjuv maksimaalne tõukejõud

$$F_{1tõuke \max} = 0,805 \cdot 10^{-7} c I_m^2$$

ja maksimaalne tõmbejõud

$$F_{1tõmbe \max} = 0,055 \cdot 10^{-7} c I_m^2 .$$

Analoogiliselt

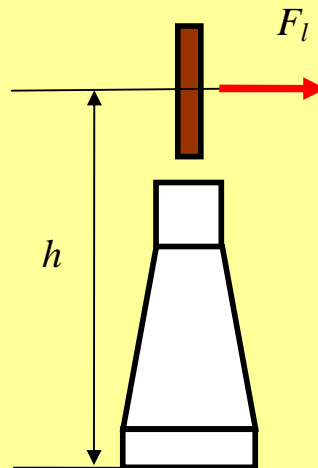
$$F_2 = F_{21} + F_{23} .$$

Uurimused näitavad, et faasijuhtmele 2 mõjuvad maksimaalsed tõmbe- ja tõukejõud on võrdsed

$$F_{2tõmb\max} = F_{2tõuk\max} = 0,87 \cdot 10^7 c I_m^2 .$$

See suurus võetaksegi tugevusarvutuste aluseks. **Suurimad löökvoolud tekivad kolmefaasilistel lühistel** ning seepärast tuleb arvutustes kasutada kontrollarvutustes just seda varianti.

Vooluladid paiknevad tihti tugiisolaatoritel. Sel juhul peab lühise tekkel olema tagatud, et EDJst tekitatud väändemoment M_v ei ületaks isolaatorile lubatavat: $M_v = F_l h \leq M_{vlub}$



Joonis 5.19. Vooluladi isolaatorile mõjuv väändemoment

Lühisvoolude piiramine

Võimsate toiteallikatega tööstuslikes elektrivõrkudes oleks vaja lühistel tekkivate suurte voolude termilisele ja dünaamilisele vastu pidavaid selliseid kommutatsiooniparaate ja voolujuhte, millede paigaldamine tõstaks oluliselt elektrivarustussüsteemi maksumust. Eeltoodud põhjusel on vaja piirata lühisvoole elektrivõrkudes.

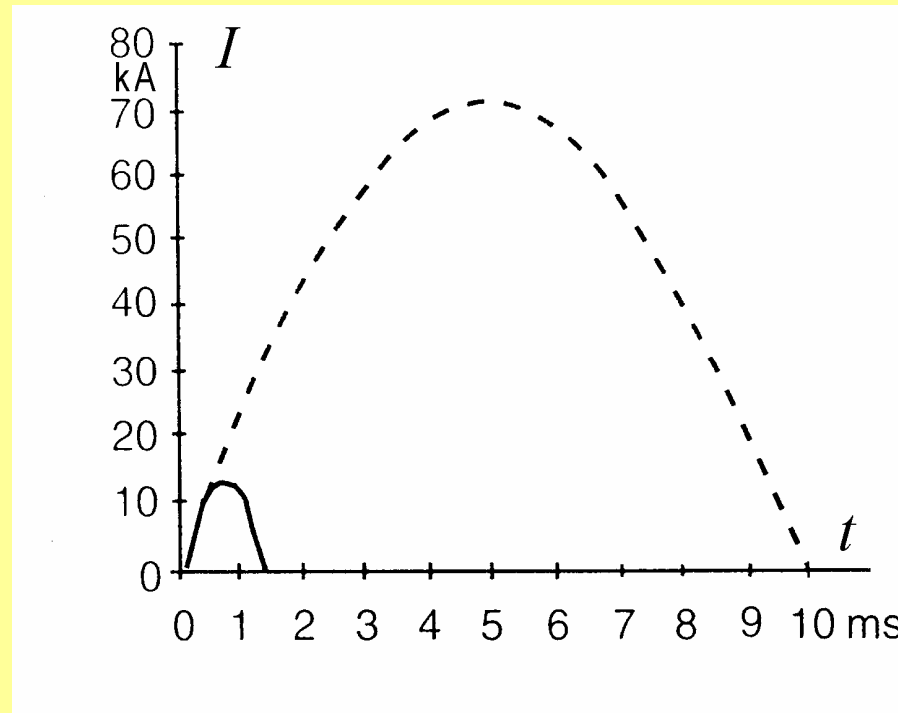
Piiratakse maksimaalselt lubatavat lühisvoolu või lühisvõimsust. Näiteks madalpingevõrkudes võetakse lühisvoolu perioodilise komponendi lubatavaks maksimaalväärtuseks 50 kA.

Põhilised lühisvoolude piiramise viisid on järgmised.

1. **Võrkude eraldamine üksteisest lahutatud sektsioonideks**, mis viib lühisvoolude kahe- ja enamkordse vähenemiseni vahetult toiteallikate lähedal. Sektsiooni tarvitite toitekindluse tagamiseks võidakse kasutada ühe sektsiooni toiteallika avariilisel väljalülitumisel automaatselt toimivat sektsioonidevahelist sidet.
2. **Üleminek kõrgemale toitepingele** toiteallikate sama võimsuse juures, mis nõuab toiteallikate ja elementide suuremat takistust ja seega vähenevad ka lühisvoolud.
3. **Voolupiiravate lülitusaparaatide kasutamine**, mis välistavad lühisvoolu kasvamist lülitusvoolu maksimaalväärtuseni (joonis 5.20). Selliste aparaatide hulka kuulub enamus madal- ja kõrgepingelisi sulavkaitsmeid, aga ka osa kaitselüliteid. Sellise voolu piirava aparaadi poolt läbilastava voolu soojuslik impulss on nii väike, et nõuta selle seadme taga asuvate voolujuhtide ja aparaatide kontrolli soojuslikule vastupidavusele. Sellist lühisvoolu piiramise viisi loetakse üheks efektiivsemaks ja ökonoomsemaks.

4. Kõrgendatud reaktiiv- või aktiivtakistusega toiteallikate kasutamine.

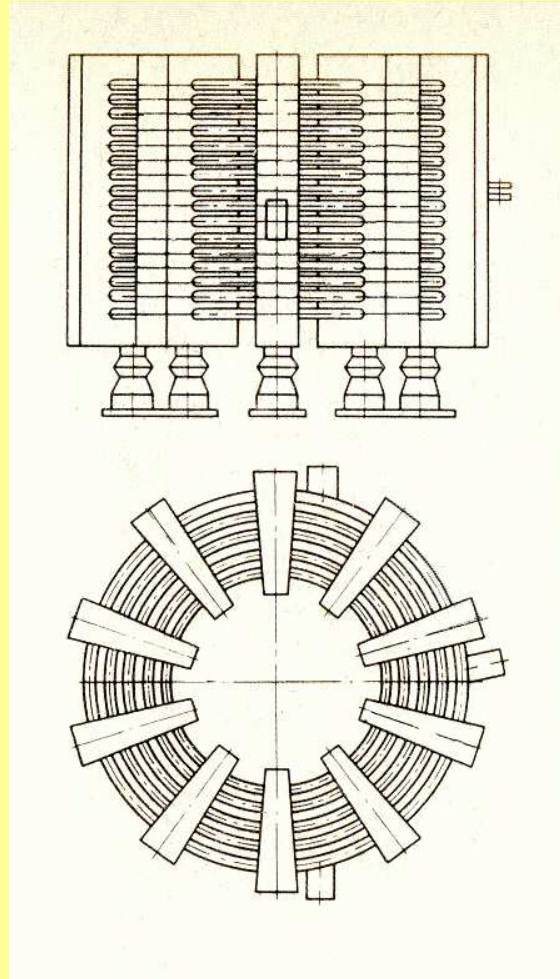
Sellisteks toiteallikateks on näiteks kõrgendatud lühispingega trafod, latt- ja õhuliinid, lattjuhtmed. See meetod on eriti efektiivne kõrgepingevõrkudes, kuna madalpingevõrkudes on lühisvoolu väärtus tihti määratud just aktiivtakistusega.



Joonis 5.20. 50 kA lühisvooluvoolu piiramine kolmefaasilises 100-amprises kaitselülitis

5. **Voolupiiravate reaktorite (piirikreaktorite) kasutamine.** Reaktor paigutatakse toitealajaama jaotusseadmesse. Selline meetod on kõige efektiivsem pingetel 6 ja 10 kV, kuid mõnikord kasutatakse neid ka pingetel 20 ja 35 kV ja madalpingevõrkudes. Piirikreaktorid kujutavad endast ühefaasilist terassüdamikuta induktiivpooli, mille monoliitsed

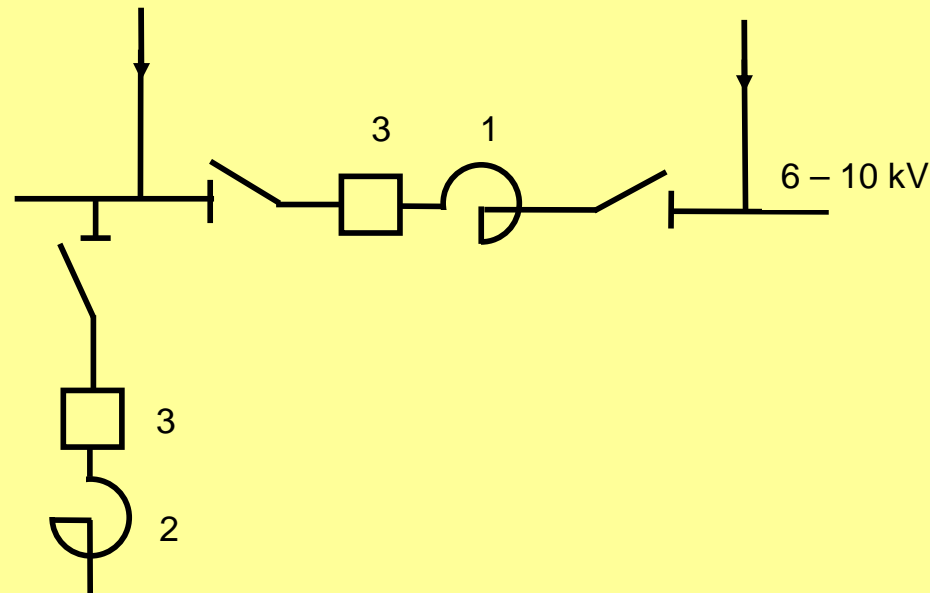
keerud on mehaalise tugevuse saavutamiseks paigutatud betoonribidele. Neid valmistatakse nimivooludele 200 kuni 4000 A suhtelise nimireaktiivtakistusega 3 kuni 12 %.



Joonis 5.21. Piirikreaktori üldvaade

Väljaviikude arvu ja ühendusviisi järgi jagunevad piirikreaktorid üksik- ja kaksikreaktoriteks.

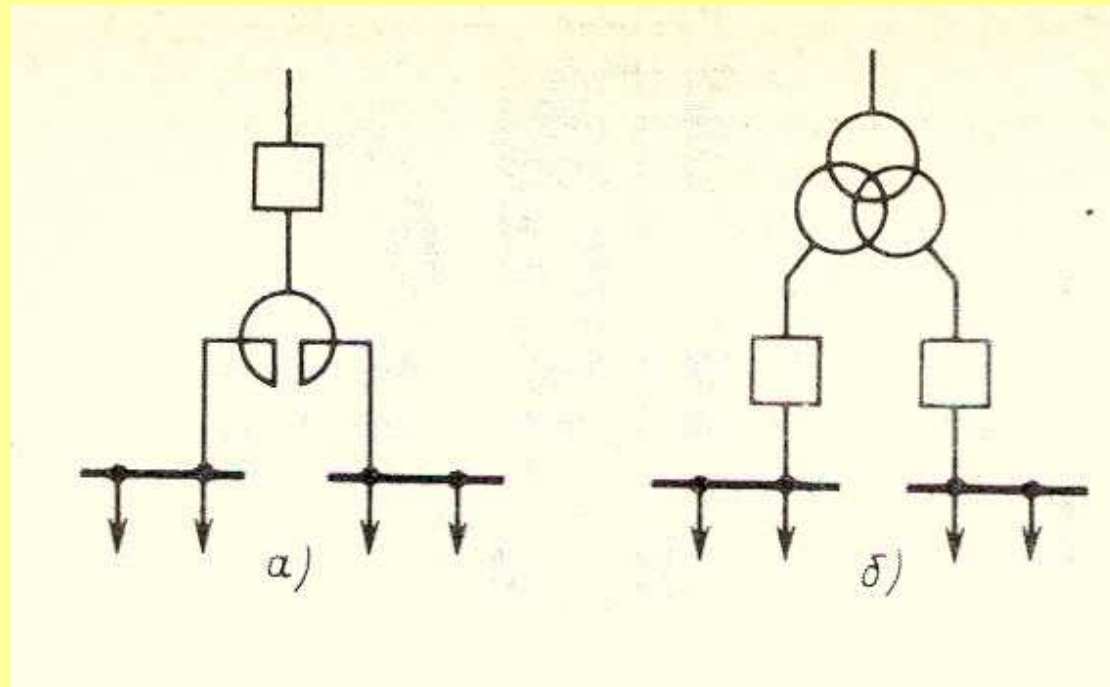
Üksikreaktorid paigaldatakse kas sektsioonide vahele (sektsioonireaktorid) või väljundliinidele (liinireaktorid).



Joonis 5.22. Piirikreaktorite kasutamine

1- sektsioonireaktor, 2 – liinireaktor, 3 - kõrgepingelüliti

Kaksikreaktorit kasutatakse üheaegselt nii sektsioonide vahel kui ka ühises toiteliinis (joonis 5.23a).



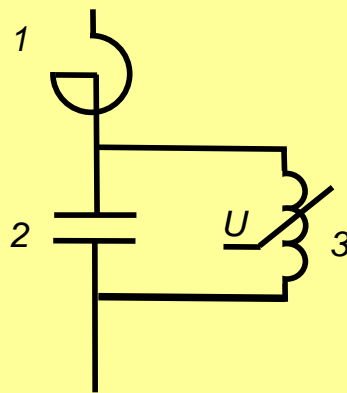
Joonis 5.23. Kaksikreaktori ja –transformaatori kasutamine lühisvoolu piiramiseks

Reaktorite **valiku aluseks** on nimipinge, nimivool ja lühisvoolu piiramiseks vajalik takistus. Reaktorite taga paiknevad aparaadid ja juhid valitakse reaktori poolt läbilastava lühisvoolu järgi. Reaktorite kasutamine tõstab tunduvalt jaotusseadmele vajalikku pindala, mahtu ja maksumust. Reaktorite kasutamise **puuduseks** on tarbitava reaktiivvõimsuse ja pingekadude kasv, võrku lülitatavate mootorite käivitustingimuste halvenemine ja elektrivarustussüsteemi stabiilsuse vähenemine.

6. **Võrgu sektsioneerimine** kahe identse sekundaarmähisega toitetrafo kasutamisega (joonis 5.23b).

Selline meetod võib koos piirikreaktoriga kombineerides osutada üheks efektiivsemaks suureteevõtete kõrgepingevõrgu toitmisele suure võimsusega toitetrafodest (alates 25 MVA).

7. **Resonantsvoolupiirikute kasutamine.** Selline seade koosneb reaktorist, kondensaatorpatareist ja kiiretoimelisest küllastusdrosselist.



Joonis 5.24. Resonantsvoolupiiriku skeem

1- reaktor, 2 – kondensaatorpatareid, 3 - küllastusdrossel

Tavatalitluses on kondensaatorpatareid ja küllastusdrossel häälestatud resonantsile ning seadme kogutakistus on lähedane nullile. Lühise puhul võrdub seadme takistus drosseli takistusega, mis piirabki voolu kasvu.

Ühefaasilise lühise puhul võib osutada vajalikuks jäigalt maandatud neutraaliga madalpingevõrkudes **suurendada lühisvoolu**, nt lühendada liinide pikkust, vähendada faas-neutraali ahela reaktiivtakistust, kasutada teiste juhitüüpide asemel kaabelliine.

Siirdeprotsessid elektrivarustussüsteemis lühiajalistel toitekatkestustel

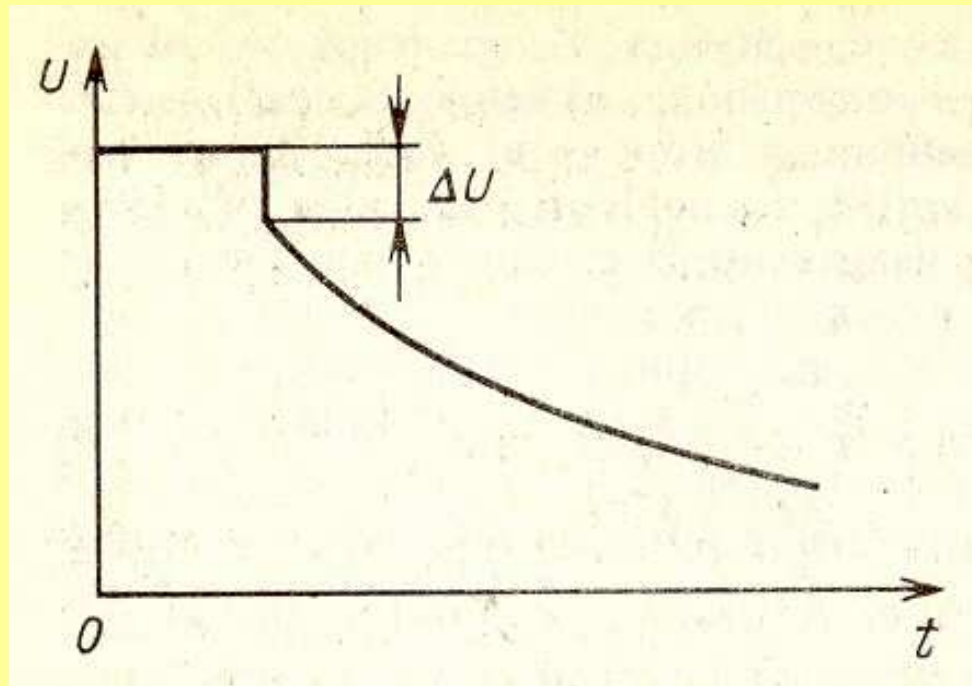
Tööstusettevõtete elektrivarustussüsteemides võivad tänu automaatsele toitetaastamise kasutamisel aset leida lühiajalised toitekatkestused kestusega 0,5 kuni 5 s. Tarvitite käitumine ja nende mõju süsteemile sõltub suuresti süsteemis sel ajal toimuvatest siirdeprotsessidest.

Suurima tarvitite grupi tööstusettevõttes moodustavad tavaliselt *vahelduvvoolumootorid*, mis toite katkemisel alustavad mahajooksu, mis 1 kuni 10^4 kW võimsuse ja püsiva staatilise nimimomendi juures võib kesta 0,2 kuni 10 sekundit. Väiksema koormusmomendi puhul võib see aeg ulatuda kümnete minutiteni.

Peale mehaaniliste siirdeprotsesside (mootori pöörlemiskiiruse vähenemine) leiavad vahelduvvoolumootorites aset elektromagnetilised siirdeprotsessid, mille koondväljundiks on klemmipinge ja mootoriga ühendatud toiteliini pinge aeglane sumbumine (joonis 5.25).

Kogu võrgupinge sumbumine sõltub võrgu jõutarbijate (elektrimootorid) osakaalust, mootorite mahajooksu kiirusest, aga ka mootoritega paralleelselt lülitatud kondensaatorseadmete ja muude tarvitite olemasolust. Protsess on seda keerulisem, mida erinevamad on mootorid oma võimsuse ja koormuse iseloomu poolest. Kõigele lisaks toimub erinevate mootorite vahel energiavahetus, mistõttu usaldatavate andmete saamine protsessist on võimalik ainult katselisel teel.

Eeltoodust tingituna võib jääkpinge kahanemine võrgus kesta mõnest osast sekundist kuni mõnekümne sekundini, mis võib raskendada alapingekaitse realiseerimist.



Joonis 5.25. Vahelduvvoolumootori klemmipinge sumbumine pärast toitepinge katkemist
 ΔU – hüppeline pingelangus mootori puistevälja ümberjagunemisest

Kui elektrivõrku on peale elektrimootorite ühendatud veel staatilised tarvitid (kuumutus-, elektrotehnoloogilised ja valgustusseadmed), kiireneb jääkpinge kahanemisprotsess oluliselt. Kondensaatorpatareid vastupidi aeglustavad protsessi tänu mootorite omaergutuse toitele nende poolt.

Toitepinge taastumisel võib aset leida võrku ühendatud tarvitite isekäivitumine, mille lubatuse järgi jaotatakse tarvitid kolme gruppi.

1. grupp.

Tarvitid, millede isekäivitumine on lubamatu õnnetusjuhtumite, mehhanismide purunemise või tehnoloogilise protsessi rikkumise tõttu (enamuse tööpinke, inimese poolt juhitavad tõste-transportiseadmed, vooluliinide mehhanismid, paljud keevitusseadmed jms).

2. grupp.

Tarvitid, millede kiire käivitumine ei ole nõutav nende teisejärgulise tähtsuse tõttu (mitmesugused abiseadmed ja -mehhanismid)

3. grupp.

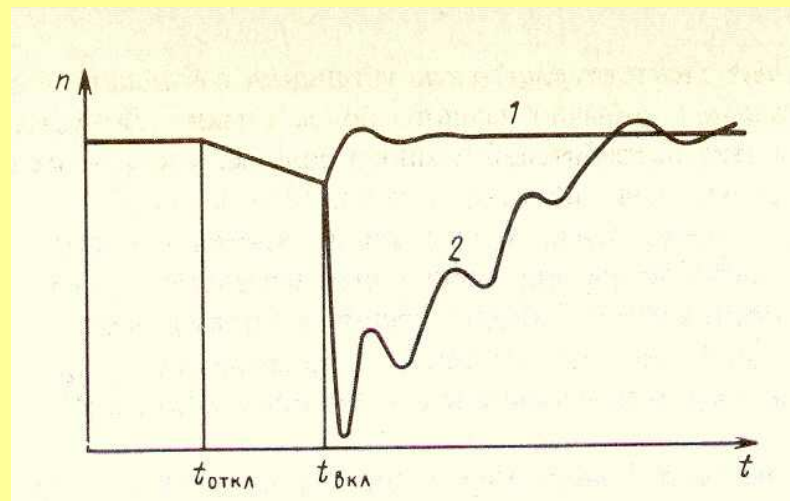
Vastutusrikkad tarvitid, millede puhul on lubatud lühiajaline toitekatkestus, kuid mis nõuavad kohest automaatset isekäivitumist toitepinge taastumisel (pumbad, ventilaatorid, kliimaseadmed, transportöörid, tehnoloogilised seadmed jms).

Isekäivituvad tarvitid võivad toitekatkestuse ajal jääda võrku lülitatuks või välja lülituda ning toite taastumisel automaatselt käivituda. Mõlemal juhul leiavad aset siiredeprotsessid, mis erinevad tavakäivitusest. Isekäivitumise siiredeprotsesside iseloomu järgi jagunevad tarbijad mitmesse gruppi.

Mittereguleeritavad madal- ja kõrgepingelised asünkroonmootorid käivituvad nimitoitepinge andmisel staatorimähisele. Protsesside iseloom sõltub sellest, millise määrani on pöörlemiskiirus langenud pinge taastumise hetkeks. Toitekatkestuse ajaks võib pöörlemiskiirus langeda *alla kriitilise või jääda sellest kõrgemale*.

Esimesel juhul võib käivitusvoolu lugeda võrdseks nimikäivitusvooluga, siirdeprotsessi kestus aga sõltub jääkpöörlemiskiirusest. Toitekatkestusel üle 1s loetakse elektromagnetilised siirdeprotsessid täielikult lõppenuks ja mootor käivitus naga tavalisel käivitamisel.

Teisel juhul, kui toitekatkestus kestab alla 1 s, võib keskmise ja suurema võimsusega mootorites (alates 50 kW) säiluda magnetväli olulisel määral. See võib viia löökvoolude ja momentide tekkeni, mis on harilikult pidurdava iseloomuga, kuna taastuv pinge ei ole faasis jääkpingega. Tulemuseks on suurem käivitusvool ja pikem käivitus (joonis 5.26).



Joonis 5.26 Asünkroonmootori isekäivitumise siirdeprotsess toitepinge taastumisel väikese taandatud inerts- ja koormusmomendi puhul

- 1 – mootori pinge on toite taastumise hetkel faasis võrgupingega,
2 - mootori pinge on toite taastumise hetkel vastasfaasis võrgupingega

Mittereguleeritavad madal- ja kõrgepingelised sünkroonmootorid.

Sünkroonajameid iseloomustab suur võimsus ja suur mehaaniline ajakonstant, mistõttu nende kiirus toitekatkestuse järel langeb aeglaselt ja võib aset leida kaks olukorda.

- 1) mootor *jääb sünkronismi*,
- 2) mootor *langeb sünkronismist välja*.

Esimesel juhul ei toimu pinge taastumisel voolutõuget ja mootor jätkab pöörlemist. Teisel juhul on vajalik mootori automaatne üleviimine sünkroniseerimise (käivituse) režiimi.

Vahelduv- ja alalisvoolu türistorajamid viiakse tavaliselt automaatselt üle käivitusrežiimi.

Suure soojusliku ajakonstandiga elektrotermilised seadmed.

Nende lubatav toitekatkestus on piisavalt pikk ja seepärast rakendatakse selliste seadmete elektrimootorite käivitamisel isekäivitumise kergemate tingimuste huvides ajalist viidet, mille jooksul teiste tarvitite siirdeprotsessid lõpevad.

Automaatelektrikeevitusseadmete käivitusvoolu tõuge on suhteliselt väike ja seda ei pea arvestama.

Hõõglampide elektromagnetilised siirdeprotsessid kulgevad nii kiiresti (alla 0,01 s), et nendega ei arvestata.

Luminoroorlampide süttimisaeg on tunduvalt pikem (0,5 – 5 s), kuid voolutõugetega taaskäivitumisel tuleb arvestada vaid valgustusseadme suure võimsuse puhul.

Kõrgrõhu gaaslahenduslambid süttivad toitekatkestuse järel alles pärast täielikku mahajahtumist, mistõttu nende käivitus algab olulise viitega teiste tarvititega võrreldes.

Kokkuvõtte võib öelda, et toitepinge taastumisel tekkivate voolutõugete *põhikomponendid on asünkroon- ja sünkroonmasinate käivitusvoolud*.

Elektrivarustuse töökindlus

Põhimõisted

Töökindlus on toote (antud juhul elektrivarustussüsteemi) omadus täita ettenähtud ülesandeid, säilitades kasutusajal oma parameetrid ettenähtud (nõutavates) piires.

Töökindlus on *kvaliteedi* põhikomponente ja teda iseloomustavad eelkõige *tõrketus, remonditavus ja säilivus*. Kvantitatiivselt iseloomustavad töökindlust tõenäosuslikud karakteristikud ja parameetrid nagu *tõrketu töö tõenäosus, ressurs, tõrkesagedus ja -intensiivsus*. Töökindlust iseloomustavate parameetrite ja nende väärtuste valik oleneb toote vastutusrikkusest, taastatavusest ja kasutusrežiimist (pidev, tsükliline).

Töövõimelisus — objekti võime täita ettenähtud ülesannet etteantud parameetritele vastavalt. Töövõimelisuse kao põhjustab *tõrge*.

Korrasolek — objekti seisund, mis rahuldab mitte ainult põhilisi, vaid ka teisejärgulisi nõudeid.

Rikkisolek — objekti seisund, mil ta ei vasta kas või ainult üheainsale tehnilises dokumentatsioonis toodud nõudele. Eristatakse tõrget põhjustavat ja mittepõhjustavat rikkisolekut; esimesel juhul räägitakse objekti **töövõimetus**est.

Piirseisund — objekti seisund, mille juures tema edasine käit tuleb katkestada seoses tõrketus- või efektiivsusnõuete rikkumisega ning vajadusega objekti remontida. Piirseisundi tunnused nähakse ette tehnilises dokumentatsioonis.

Tõrge — sündmus, mille tagajärjel objekti töövõimelisus täielikult või osaliselt kaob.

Tõrkeid liigitatakse

- **tekkepõhjuse järgi**
 - konstruktsiooniline (konstrueerimismäärde või -reeglite eiramine)
 - tehnoloogiline (valmistamis- või remondieeskirjade rikkumine)
 - eksploatatsiooniline (kasutuseeskirjadest kõrvalekaldumine)
- **tekkelaadi järgi**
 - järsk ehk äkktõrge (purunemise tagajärjel)
 - aeglane ehk progresseeruv (kulumise, korrosiooni, vananemise vms. tagajärjel)
- **ulatuse järgi**
 - täielik tõrge
 - osaline ehk mahetõrge
- **seose järgi teiste tõrgetega**
 - sõltumatu
 - sõltuv
- **kõrvaldatavuse järgi**
 - mitte kõrvaldatav ehk püsitõrge
 - kõrvaldatav
 - isekõrvalduv
- **kõrvaldatavuse keerukuse järgi**
 - kergelt kõrvaldatav
 - raskelt kõrvaldatav

Tõrketus — objekti omadus säilitada teatavas ajavahemikus töövõimelisus.

Remonditavus — objekti kohandatus tõrgete ja vigastuste ennetamiseks, leidmiseks ja kõrvaldamiseks remondi teel.

Säilivus — objekti omadus pidevalt säilitada korrasolekut säilituse (laosoleku) ajal, transpordil ning pärast seda.

Töömaht — objekti töötamise maht (aeg). Objekt võib töötada pidevalt või vaheaegadega; viimasel juhul võetakse arvesse summaarne töömaht. Töömahtu võib mõõta aja-, pikkus-, massi-, mahu-, pinna- jt. ühikutes (releedel lülituste arvus, autodel läbisõidukilomeetris, pastapliiatsil joone pikkuses). Ajaühikuis mõõdetud töömahtu nimetatakse töövältuseks.

(Tehniline) **ressurss** — objekti töömaht kasutuselevõtu algusest kuni piirseisundi saabumiseni.

(Kasutus)**iga** — objekti kasutamise kalendrijärgne kestus kuni piirseisundi saabumiseni.

Objektid võivad olla

- taastatavad (töövõime pärast tõrget taastatakse)
- mittetaastatavad (enamasti lihtsad elemendid nagu transistor või veerelaager).

Töökindluse põhivõrrand

Allugu katsetustele või jälgimisele eksploatatsioonis N objekti mingi aja t kestel. Tõrkunud on sel ajal n objekti.
Suhteline tõrgete arv

$$Q(t) = \frac{n}{N}$$

on tõrke tekkimise tõenäosuse statistiline hinnang (kus t võib olla nii töö aeg kui ka töö maht). Kui N on küllalt suur, siis $Q(t)$ iseloomustab tõrke tekkimise tõenäosust.

Tõrketu töö tõenäosus

$$P(t) = \frac{N_t}{N} = 1 - \frac{n}{N}.$$

Kuna tõrke tekkimine ja tõrketu töö on teineteist välistavad sündmused, siis nende tõenäosuste summa võrdub ühega:

$$P(t) + Q(t) = 1$$

Tõrke jaotumist ajas iseloomustab ***tõrkesagedus***, mille hinnang on

$$f(t) = \frac{\Delta n}{N \cdot \Delta t} = \frac{\Delta Q(t)}{\Delta t}$$

ja arvkarakteristik

$$f(t) = \frac{\Delta Q(t)}{\Delta t},$$

kus Δn ja $\Delta Q(t)$ on vastavalt tõrkunud elementide arvu kasv ja tõrke tekkimise tõenäosus ajavahemikul Δt .

Tõrke tekkimise tõenäosus

$$Q(t) = \int_0^t f(t) \cdot dt.$$

Kui $t = \infty$, siis $Q(t) = 1$.

Tõrketu töö tõenäosus

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \int_0^t f(t) \cdot dt = \int_t^{\infty} f(t) \cdot dt$$

Tõrkeintensiivsus $\lambda(t)$ on erinevalt tõrkesagedusest taandatud antud hetkel töökorras olevate elementide arvule:

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n}{N_t \cdot \Delta t}$$

$$\frac{N_t}{N} = P(t),$$

Et

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n \cdot N}{N_t \cdot N \cdot \Delta t} = \frac{f(t)}{P(t)}.$$

siis

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = - \frac{dP(t)}{dt},$$

Võttes arvesse, et

$$\lambda(t) = - \frac{dP(t)}{dt \cdot P(t)},$$

on

$$\frac{dP(t)}{P(t)} = - \lambda(t) \cdot dt.$$

kust

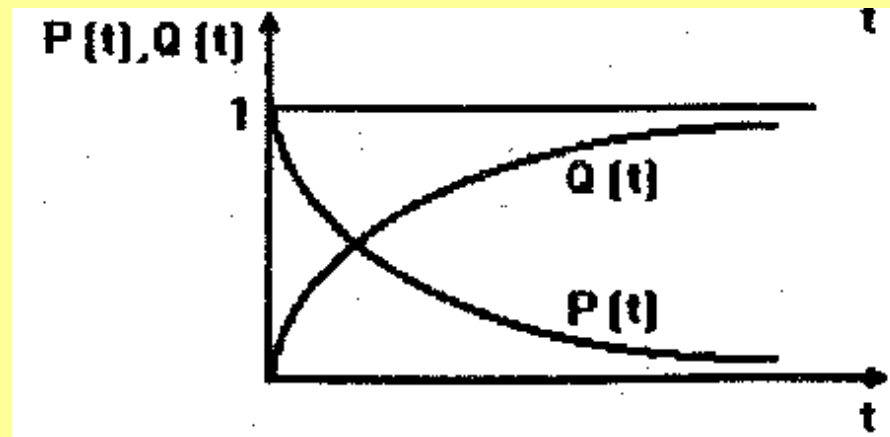
Seega

$$\ln P(t) = - \int_0^t \lambda(t) \cdot dt,$$

kust **töökindluse põhivõrrand:**

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) \cdot dt} = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) \cdot dt \right]$$

Graafiliselt

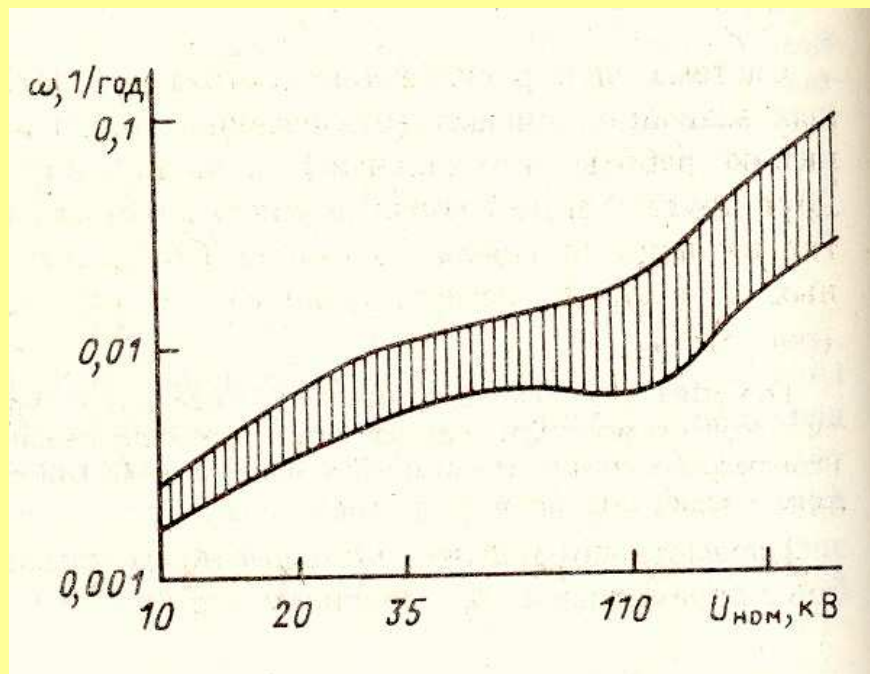


Joon. 5.27. Tõrketu töö (P) ja tõrke (Q) tõenäosus

Tabelis 5.1 Mõningate elektrivarustussüsteemi elementide keskmiste tõrgete ja töövõimelisuse taastamisaja väärtused

Elemendi nimetus	Tõrgete arv aastas	Töövõimelisuse taastamisaeg, h
Lahklüliti	0,01	2
Lühisti	0,02	10
Madalpingeline kaitselüliti	0,05	4
Kõrgepingeline sulavkaitse	0,1	2
Madalpingeõhuliin (1 km pikkune)	0,02	5
Sünkroongeneraator	1	100
Madalpingeline asünkroonmootor	0,1	50
Kõrgepingeline asünkroonmootor	0,1	160

Siin on toodud tõrgete keskmised väärtused. Tegelikud väärtused sõltuvad olulisel määral konkreetse elektrivarustuselemeni parameetritest. Näiteks kasvab pinget madaldava trafo tõrgete arv nimiprimaarpinge kasvamisega oluliselt.



Joonis 5.28. Pinget madaldava trafo tõrgete sõltuvus nimiprimaarpinge väärtusest

Elektrivarustussüsteemi elementide tüüpilisteks tõrkeks on volujuhtide isolatsiooni rikkumine, mis viib lühiseni ja selle elemendi automaatse väljalülitumiseni. Tõrgete hulka kuuluvad ka juhtmete ja teiste volujuhtide katkemine, mitmesuguste seadmete osade purunemine, ülekuumenemine jt nähtused, mis viivad avariitalitluseni.

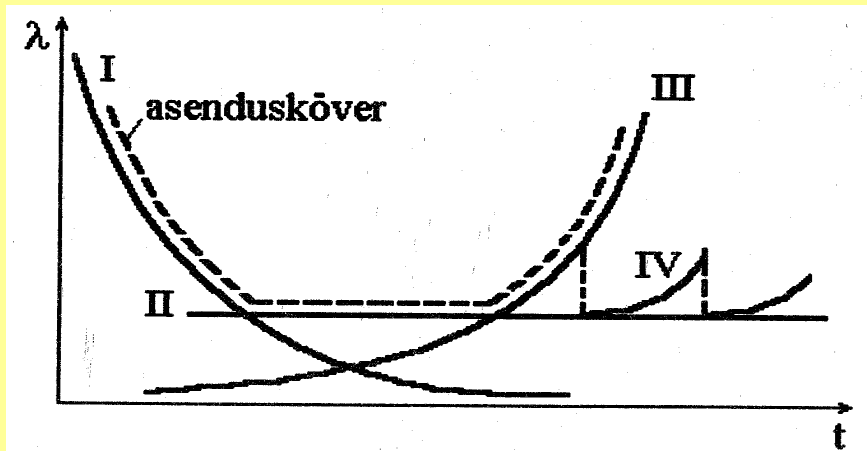
Pärast elektrivarustussüsteemi elemendi tõrget võib osutada vajalikuks selle elemendi häälestamine, remont, ülevaatus, mahajahutamine normaaltemperatuurini, kaitseelementide vahetamine vms.

Elektrivarustussüsteem koosneb paljudest lülitest, milledest osa on teineteisest sõltuvad (ühe tõrge põhjustab ka ülejäänute töö katkemise), osa aga on vastastikku reserveeritavad.

Teineteisest sõltuvate elementide puhul nende tõrgete tõenäosused liituvad, mille tõttu süsteemi tõrke tõenäosus kasvab. Vastastikku reserveeritavate elementide kasutamine tõstab töökindlust nii oluliselt, et selliste elementide arvu tõstetakse harva üle 2.

Tõrgete iseloomustus

Nõuetekohase käidu puhul näeb tõrgete statistiline kõver välja nii:



Joon. 5.28. Tõrkeintensiivsuse muutumine ajas t :

I - sissetöötamisperioodi tõrked

II - normaalse ekspluateerimise perioodi sirge

III - tõrgete intensiivse tõusu perioodi kõver

IV - ennetava remondi mõju iseloomustav kõver

Mistahes tõrkele eelneb tõrkuva elemendi vigastumisprotsess ehk *kahjustus*. Selle kulg võib olla prognoositav või mitteprognoositav.

Aeglaselt e. progresseeruvaid tõrkeid põhjustavate protsesside — väsimuse, kulumise, korrosiooni ja vananemise — kulg on üldjuhul prognoositav.

Äkktõrkeid, näiteks pikselöögi kahjustusi, pole võimalik ette näha. Küll aga saab konkreetset tüüpi objektide kasutamisest või katsetamisest kogutud statistiliste andmete omamisel prognoosida nende tõrgete tekke tõenäosust. Need iseloomustavad objekti *normaalse kasutamise perioodil* (lõik II), mil ennetaval remondil pole mõtet.

Prognoositavad pole ka *sissetöötamisperioodil* (I) ilmnevad tõrked, mis sõltuvad projekteerimis-, ja valmistamisvigadest ja -puudustest, samuti varjatud defektidest põhjustatud äkktõrked. Tähtsaim abinõu on seadeldise sissetöötamine enne müümist või kasutuselevõttu. Puudused kõrvaldatakse, asendades defektsed detailid ja koostud töövõimelistega.

Kolmandal perioodil domineerivad tõrked, mida on põhjustanud vananemine, korrosioon, kulumine ja väsimus, on prognoositavad nende protsesside kulgemise seaduspärasuste tundmise korral.

Töökindlust aitab tõsta (kõver IV) kriitiliste detailide väljavahetamine *ennetava remondi* ajal.

Tehniline diagnostika

Tõrgete avastamisel ja ennetamisel on oluline osa diagnostikal. Vajalikku teavet annavad mitmesugused mõteriistad ja andurid. Diagnoosimise objekt võib olla tervikseade või mõni tema üksikosa.

Tehnilist seisukorda hinnatakse iseloomulike tunnuste ja parameetrite järgi, mida võib liigitada

1. **väljundparameetrid**, mis vastavalt tehnilistele tingimustele määravad seadeldise töövõimelisuse. Jõumasinail võib kontrollida väljundvõimsust või kasutegurit, töömasinail tootlikkust ja/või kvaliteeti, trafol näiteks pinget. Nii saab andmeid töövõime kohta, kuid enamasti ei saa kindlaks teha kahjustuse liiki ega asukohta.
2. **kahjustused**, mis on põhjustanud või võivad põhjustada tõrkeid. Liikuvatel detailidel on sellisteks kulumine, deformatsioon, korrodeerumise vms., mis võimaldavad hinnata tehnilist seisukorda ning olla diagnoosimisparameetrik. Neid on tervikseadmes paraku palju ning seetõttu enamasti järgneb kahjustuste kontroll eelmisele, väljundparameetrite kontrolli etapile. Sageli on töövõimet piiravad elemendid juba ette teada (näiteks mootori laagrid)
3. **kaudsed tunnused**, mille kontrollimine on eriti tõhus siis, kui väljundparameetreid on raske mõõta. Hea on, kui masinat saab tema töötamise ajal kontrollida pidevalt. Sellise uurimise nimi on **seire** ehk **monitooring**. Kontrollitavateks tunnusteks võivad olla akustilised signaalid (müra), nt. trafo õli temperatuurimuutused, mootorite laagrite määrdes leiduvate kulumisproduktide hulk, suurus ja koosseis jne.

Kokkuvõttes tuleb rõhutada, et elektrivarustussüsteemi töökindlus on väga aktuaalne valdkond, milles tehakse palju uuringuid ja investeeringuid eesmärgiga vähendada ootamatutest toitekatkestustest tingitud majanduslikku kahju.