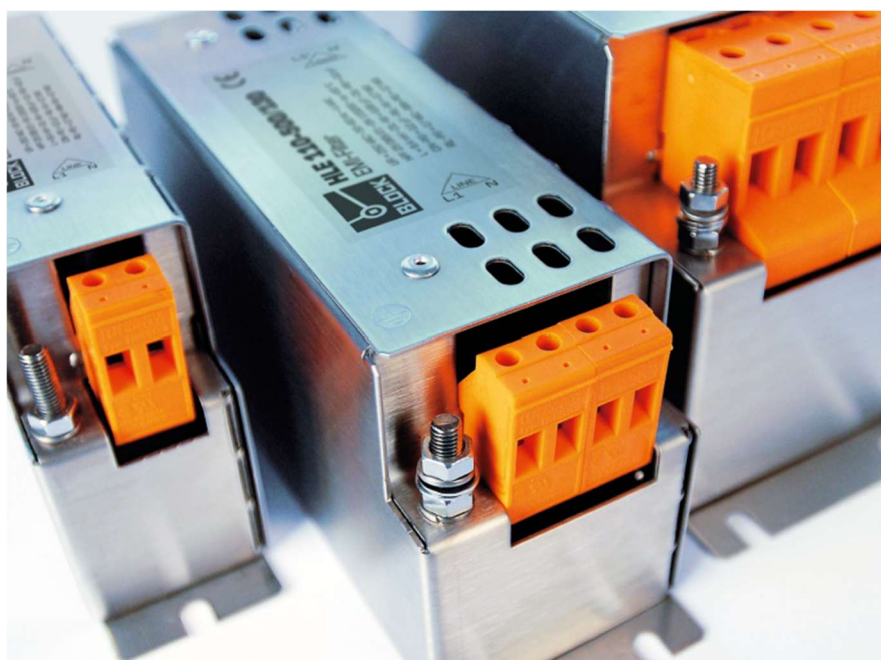


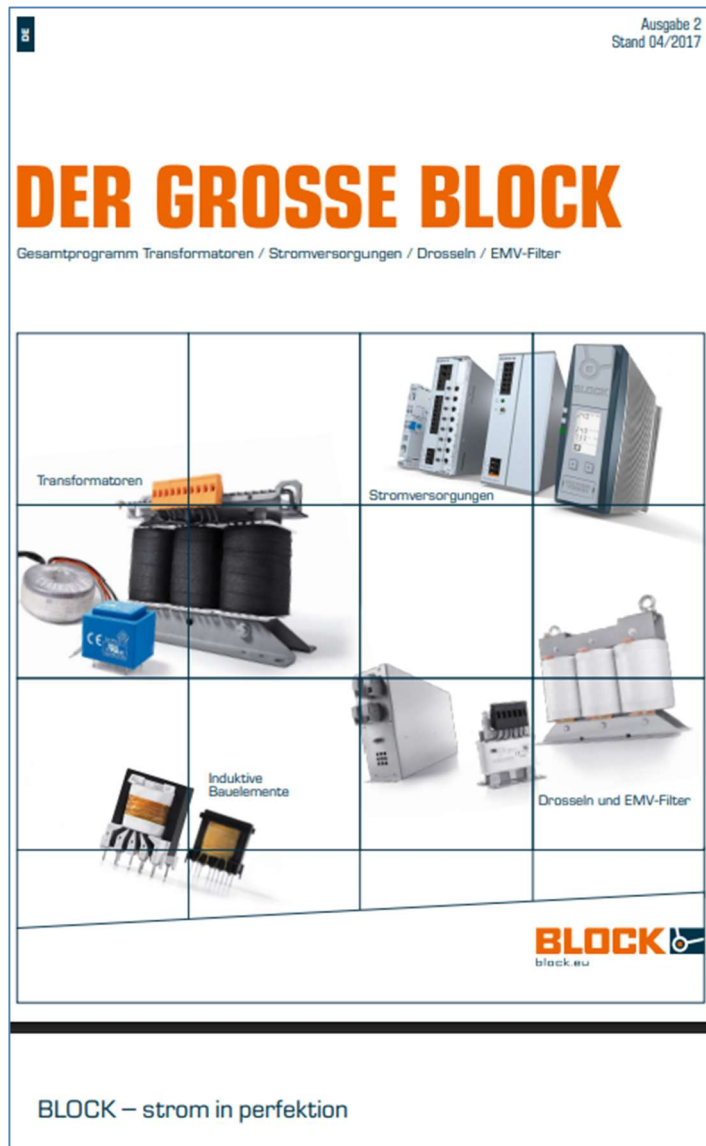
BLOCK Transformatoren-Elektronik GmbH

Passiivfiltrid ja häiresummutus- komponendid

Tehniline informatsioon – EMC häiresummutus



block.eu
7-27-2026



Käesolev dokument on lühendatud ja Eesti oludele kohandatud tõlge raamatust “*Der Grosse Block*” peatükk 5 “Technische Informationen EMV-Entstörung”, BLOCK Transformatoren-Elektronik GmbH, Verden 2017, lk 682 - 705.

https://www.block.eu/fileadmin/Blaetterkatalog_und_ebook/Blaetterkatalog.pdf

Tõlge: Energiatehnika OÜ tehisaru abil, 2026.

Sisukord

Passiivfiltrid ja häiresummutuskomponendid	5
Üldine tehniline teave	5
Nõuded	5
Normid.....	6
Nimipinge	6
Pingevahemik	7
Nimisagedus.....	7
Nimivool.....	7
Ümbritseva temperatuuri mõju nimivoolule	7
Lekkevool	8
Passiivfiltrid elektromagnetiliste häirete summutamiseks (EMÜ-filtrid)	8
Y-kondensaator.....	10
X-kondensaator.....	10
Tühjendustakisti.....	10
Ühissignaali drossel	11
Summutustegur	11
Summutusteguri mõõtmine.....	12
Võrgufiltrid	14
Mootoridrosselid.....	14
Siinusfiltrid	15
Mootorifiltrid.....	16
Ülevaade drosselite ja passiivfiltrite kasutamisest sagedusmuunduritega	16
Kaasaegsete sagedusmuundurite eripärad.....	18
Passiivfiltrid sagedusmuundurite toitesisendis.....	20
Väljundsageduse muutmine	20
Lülitussageduse muutumine	21
Varjestatud mootorikaabli pikkuse muutumine	22
Passiivfiltrid sagedusmuunduri väljundis.....	23
Sagedusmuunduriga ajamite paigaldusjuhised	27
Elektrikilbi ehitamise põhimõtted.....	27

Kaablite valik ja nende ühendamine.....	29
Kaablivarjestuse õige ühendamine.....	30
Drosselid	33
Üldine tehniline teave	33
Sageduskarakteristik.....	34

Passiivfiltrid ja häiresummutuskomponendid

Üldine tehniline teave

Juhtmetes levivate elektromagnetiliste häirete summutamiseks kasutatakse peamiselt järgmisi komponente:

Passiivfilter

Erinevatest komponentidest koosnev seade, mis sisaldab induktiiv-, mahtuvus- ja takistuselemente ning mida kasutatakse elektri- ja elektroonikaseadmete või muude häireallikate põhjustatud elektromagnetiliste häirete vähendamiseks.

Drossel

Element, mille näivtakistus on madalatel sagedustel väike, kuid kõrgetel sagedustel suur tänu induktiivsele reaktiivtakistusele.

Kondensaator

Element, mille näivtakistus on madalatel sagedustel suur, kuid kõrgetel sagedustel väike tänu mahtuvuslikule reaktiivtakistusele.

Nõuded

Passiivsete elektrifiltrite ja häiresummutuskomponentide konstruktsioonilised erinevused – edaspidi ühiselt filtrid – sõltuvad eelkõige nende kavandatud kasutusala. Vastavad nõuded on sätestatud paigaldus-, seadme- ja elektromagnetilise ühilduvuse (EMÜ) standardites, näiteks EN / IEC 60204, EN / IEC 60335, EN / IEC 60950, EN 61000-6-1 kuni EN 61000-6-4, EN 61800-3, EN 62041.

Üks tähtsamaid valikukriteeriume on filtri saavutatav juhtmetes levivate häirete summutus sõltuvalt sagedusest.

Madalsagedushäirete filtrid

- Võrgudrosselid*
- Filtriahela drosselid*

Madal- ja kõrgsagedushäirete filtrid

- Võrguhäirefiltrid
- Mootoridrosselid
- Mootorifiltrid
- Siinusfiltrid

Kõrgsagedushäirete filtrid

- Voolukompenseeritud EMÜ-drosselid
- Passiivsed EMÜ-filtrid

Märkus

EMÜ-standardites sätestatud piirväärtuste täitmist (vt peatükid „Elektromagnetilised häired” ja „Elektromagnetiline häirekindlus”) saab tõendada üksnes mõõtmiste teel kogu süsteemi katsetamisel, kus võetakse arvesse kõiki süsteemi kuuluvaid komponente.

* Vt raamatu peatükki „Drosselid”.

Normid

Kui tellijaga ei ole teisiti kokku lepitud, valmistab Block oma tooted vastavalt uusimale tehnikale tasemele ning järgmiste standardite nõuetele:

- EN / IEC 60939-1: Passive filter units for electromagnetic interference suppression (Passiivfiltrid elektromagnetiliste häirete summutamiseks)
- EN / IEC 60938 – Fixed inductors for electromagnetic interference suppression (Püsiinduktiivpoolid elektromagnetiliste häirete summutamiseks)
- EN / IEC 61558 Part 1: General requirements and tests, Part 2–20: Particular requirements for small reactors; Part 2–20: Particular requirements for small reactors (Osa 1 – üldnõuded ja katsed; osa 2-20 – erinõuded väikedrosselitele)

Nimipinge

Nimipinge (U_R) on kas tööpinge¹ suurim efektiivväärtus nimisagedusel või suurim tööalalispinge, mille korral filtrit võib pidevalt kasutada temperatuurivahemikus, alates kliimakategooria madalaimast temperatuurist² kuni keskkonna nimitemperatuurini (vt EN / IEC 60939).

1) Täiendus

Kolmefaasiliste süsteemide puhul tähendab see faaside vahelist e liinipinget.

2) Täiendus

Madalaimat lubatud ümbritseva keskkonna temperatuuri, vt peatükist „Kliimaklass”.

Märkus

Elektromagnetiliste häirete summutamiseks kasutatavad passiivfiltrid (EMÜ-filtrid) tuleb valida nii, et nende nimipinge oleks vähemalt võrdne selle elektrivõrgu nimipingega, kuhu filter ühendatakse.

Sealjuures tuleb arvestada, et võrgupinge võib tõusta kuni **10% üle nimiväärtuse**.

3) Täiendus

Vt peatükk „Madalpingevõrkude pinge muutmise”.

Märkus

Filtrite nimipinge tähistus põhjustab sageli arusaamatusi, sest see erineb elektriseadmete tavapärasest ja standardikohasest märgistusest. Näiteks kasutatakse 230 V nimipingega madalpingevõrgus (tolerants –10...+6%, s.o 207...244 V vastavalt standarditele HD 472 S1 / IEC 60038) järgmisi seadmeid:

- tööstusarvuti,
- sagedusmuundur,
- elektromagnetiliste häirete summutamiseks mõeldud passiivfilter.

Tööstusarvuti ja sagedusmuunduri tüübisildil on nimipingeks märgitud 230 V.

Seadmete standardid (EN 60950 / IEC 60950 ning EN 61800 / IEC 61800) näevad ette, et neid seadmeid võib pidevalt kasutada kuni 110% nimipingest. Seetõttu on nende seadmete ohutu töö tagatud ka pärast 2008. aastat, mil lubatud võrgupinge vahemik muutus 207...253 voldini.

Passiivfiltri tüübisildil on aga märgitud 250 V. See väärtus tähistab juba filtri suurimat lubatud pidevat tööpinget vastavalt standardile EN / IEC 60939. Seetõttu võib filter pärast 2008. aastat sattuda 253-voldises võrgus juba oma lubatud tööpiirile.

Blocki valmistatud passiivfiltrid on võimalikult suure kasutusohutuse tagamiseks tavaliselt märgistatud elektriseadme nimipingega ja standardi EN 60939 / IEC 60939 kohase nimipingega (U_R).

Pingevahemik

Pingevahemik on filtrile määratud lubatud tööpingete vahemik, mida väljendatakse alumise ja ülemise piirväärtusega ning mille piires võib filtrit pidevalt kasutada. Alumine piirväärtus ei ole tavaliselt kriitiline. Ülemise piirväärtuse määravad isolatsioonisüsteem ning näiteks kondensaatorite pingetaluvus.

Erinevalt elektriseadmete tavapärasest standardikohasest pingemärgistusest tähistab filtri nimipinge, kui ei ole märgitud teisiti, selle lubatud tööpinge ülemist piiri!

Nimisagedus

Nimisagedus on toitesagedus, mille jaoks filter on antud töötingimustes kasutamiseks ette nähtud.

Kui ei ole kokku lepitud teisiti, projekteeritakse raadiohäirefiltrid kasutamiseks sagedusel **50–60 Hz**.

Nimivool

Nimivool (EN / IEC 60939) on töövoolu suurim efektiivväärtus nimisagedusel või suurim alalisvool, millega filtrit võib pidevalt nimitemperatuuril¹ kasutada.

Tootja määrab nimivoolu ühe või mõlema järgmise paigaldusviisi korral:

- a) vabalt õhus (I_{R0})
- b) kindlaksmääratud jahutuspinnale paigaldatuna (I_{RH})

¹ Täiendus: nimikeskkonnatemperatuur.

Kui ei ole kokku lepitud teisiti, projekteeritakse filtrid vastavalt punktile b) kasutuasendis puidust alusele paigaldamiseks.

Ümbritseva temperatuuri mõju nimivoolule

Filtri nimivool kehtib vahetu ümbruskonna nimikeskkonnatemperatuuril.

Kõrgema ümbritseva temperatuuri korral tuleb lubatud voolu vähendada järgmise sõltuvuse järgi:

$$I_{\max} = I_B \times \sqrt{\frac{T_K - T}{T_K - T_B}}$$

$I_{\max}$ = suurim lubatud vool temperatuuril T , A

I_B = nimivool nimikeskkonnatemperatuuril T_B , A

T_K = kliimakategooria ülemine temperatuuripiir [°C], näiteks **85 °C**

T = ümbritseva keskkonna temperatuur [°C]

T_B = nimikeskkonnatemperatuur [°C]

Näide

Filtril kliimaklassiga **25/085/21** on nimikeskkonnatemperatuuri **40 °C** nimivool **16 A**.

Millise suurima vooluga võib filtrit koormata, kui ümbritseva keskkonna temperatuur on **55 °C**?

$$I_{\max} = 16 \text{ A} \times \sqrt{\frac{85^\circ\text{C} - 55^\circ\text{C}}{85^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}}} = 13 \text{ A}$$

$I_{\max} = 13 \text{ A}$

Kui ümbritseva keskkonna temperatuur on nimikeskkonnatemperatuurist madalam, ei soovitata lubatud voolu suurendada üle nimivoolu, kuna see võib põhjustada drosselite magnetilist küllastumist ja induktiivsuse vähenemist.

Lekkevool

Lekkevool on soovimatu vahelduvvool erineva elektripotentsiaaliga juhtivate osade vahel. Kõrgsageduslike asümmeetriliste häirete tõhusaks summutamiseks on sageli vältimatu kasutada filtris kondensaatoreid, mis on ühendatud kaitsemaandusega (PE). Need mahtuvused põhjustavad võrgu nimisagedusel lekkevoolu kaitsemaanduse (PE) suunas.

Mõnedes paigaldiste ja seadmete standardites on lekkevoolule kehtestatud maksimaalsed piirväärtused. Tavaliselt jäävad need vahemikku 0,1 mA (meditsiiniseadmetel) kuni 5 mA (kodumasinatel).

Suurema lekkevooluga filtreid kasutatakse peamiselt tööstuses. Sellised filtrid on varustatud vastava hoiatusmärgistuse ja maandusjuhistega.

Mitmefaasilistes süsteemides tekib suurim võimalik lekkevool olukorras, kus üks faasijuht on ühendatud kaitsemaandusega (PE).

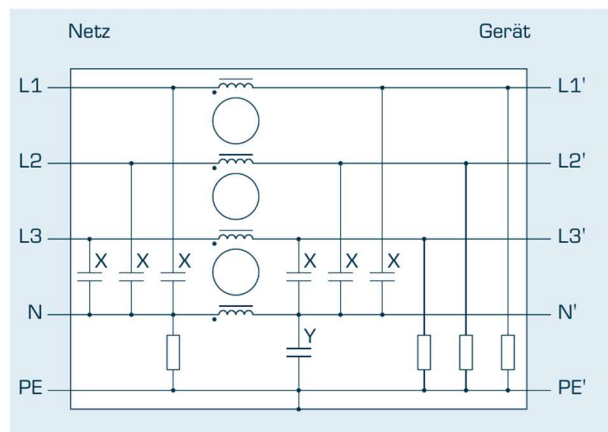
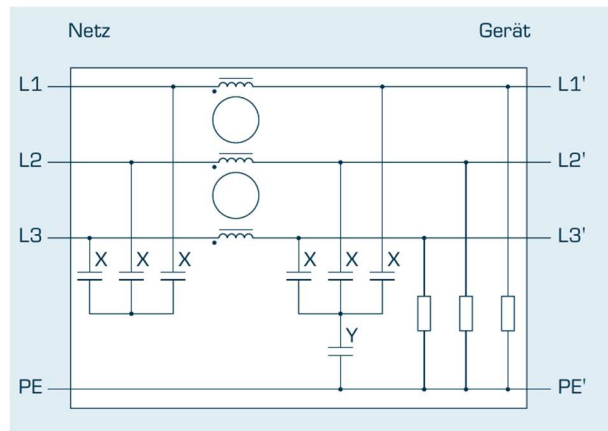
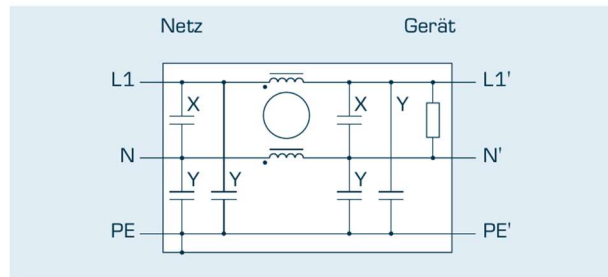
Suure lekkevooluga filtrite kasutamisel ei soovitata kasutada rikkevoolu kaitselüliteid (RVK), kuna sisselülitamise hetkel võivad need soovimatult rakenduda.

Passiivfiltrid elektromagnetiliste häirete summutamiseks (EMÜ-filtrid)

Passiivseid elektromagnetiliste häirete summutamise filtreid (EMÜ-filtreid) kasutatakse juhtmetes levivate häirete summutamiseks elektrivõrgus sagedusvahemikus **150 kHz** (või **9 kHz**¹⁾ kuni **30 MHz**.

¹ **Märkus:** Seda sagedusvahemikku ei ole EMÜ standardites seni veel käsitletud.

Allpool on toodud mõned madalpääsfiltrite põhilülitused (joonis 1).



Joonis 1. Madalpääsfiltrite põhilülitused: ülal 1faasiline, keskel 3faasiline üksikule sümmeetrilisele koormusele, nt sagedusmuundur, ja all asümmeetrilisele koormusele, nt terve masina häirete summutamiseks.

Filtrites kasutatakse järgmisi häiresummutuskomponente:

- Y-klassi kondensaatorid (L-PE, N-PE)
- X-klassi kondensaatorid (L-L, L-N)
- Kondensaatorite tühjendustakistid
- Voolukompenseeritud ringsüdamikdrosselid

Veelgi tõhusam häiresummutus ja suurem summutustegur saavutatakse täiendavate häiresummutuskomponentide lisamisega, mille tulemusena moodustuvad mitmeastmelised filtrid.

Y-kondensaator

Vahelduvvooluvõrkudes kasutamiseks ettenähtud passiivfiltrites elektromagnetiliste häirete summutamiseks (EN / IEC 60939) peavad kondensaatorid sõltuvalt nende asukohast skeemis vastama **X- või Y-klassi** nõuetele.

Y-klassi kondensaatorid on ette nähtud kasutamiseks kohtades, kus kondensaatori rike võib põhjustada inimesele ohtliku elektrilöögi.

Seetõttu ei tohi Y-kondensaator normaalsel kasutamisel rikneda lühise ega isolatsiooni läbilöögi tõttu. Y-kondensaatorid ühendatakse vastavalt rakendusele kaitsemaanduse (PE) suhtes.

Y-kondensaatorite klassid

Alamklass	Isolatsiooni liik	Nimipinge vahemik	Löökpinge tippväärtus
Y1	Kahekordne või tugevdatud isolatsioon	≤ 500 V	8,0 kV
Y2	Põhiisolatsioon või lisaisolatsioon	150...300 V	5,0 kV
Y3	Põhiisolatsioon või lisaisolatsioon	150...250 V	–
Y4	Põhiisolatsioon või lisaisolatsioon	< 150 V	2,5 kV

X-kondensaator

Vahelduvvooluvõrkudes kasutamiseks ettenähtud passiivfiltrites elektromagnetiliste häirete summutamiseks (EN / IEC 60939) peavad kondensaatorid sõltuvalt nende asukohast skeemis vastama **X- või Y-klassi** nõuetele.

X-klassi kondensaatorid liigitatakse nende suurima impulsspinge järgi, mis võib võrgupingele töö ajal lisanduda.

X-kondensaatorid ühendatakse sõltuvalt rakendusest faasi ja faasi (L–L) või faasi ja neutraaljuhi (L–N) vahele.

X-kondensaatorite klassid

Alamklass	Impulsi tippingele töö ajal	Paigalduskategooria (IEC 60664)
X1	$> 2,5$ kV kuni 4,0 kV	III
X2	$\leq 2,5$ kV	II
X3	$\leq 1,2$ kV	–

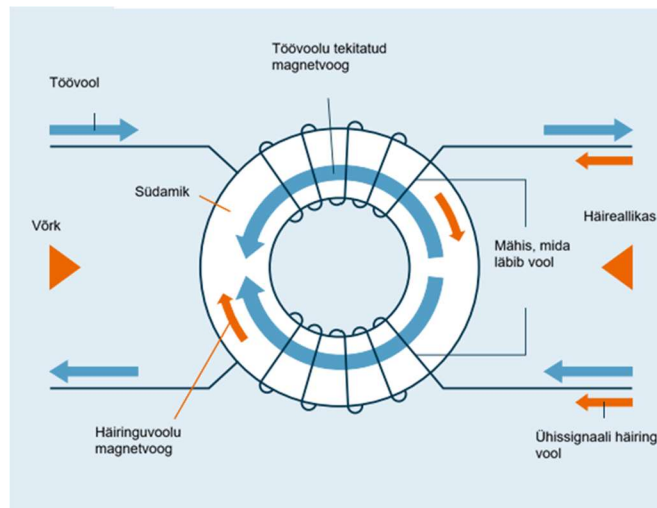
Tühjendustakisti

Filtrisse integreeritud tühjendustakistid on ette nähtud kondensaatorite salvestunud elektrilaengu ohutuks eemaldamiseks.

Pärast toitepinge väljalülitamist peavad kondensaatorid tühjenema **vähem kui 5 sekundi jooksul** alla **60 V** pingeni, et vältida elektrilöögi ohtu.

Ühissignaali drossel

Voolukompenseeritud ühissignaali häirete summutamise drosseli mähised on paigutatud suletud magnetsüdamikule selliselt, et töövoolu (sümmeetrilise voolu) tekitatud magnetvood kompenseerivad teineteist ja nad läbivad drosseli takistuseeta. Asümmeetriliste häirevoolude korral kompenseerimist ei toimu ning drosselil tekib suur induktiivne takistus, mis summutab tõhusalt ühissignaali häireid.



Joonis 2. Vooluga kompenseeritud ühissignaali drosseli näide.

Summutustegur

Summutustegur **a** on passiivfiltri süsteemist sõltumatu iseloomustav suurus.

Mõõtmismeetod on standardiseeritud (CISPR 17) ning pärineb sidetehnikast.

Summutustegur kirjeldab filtri sisestamisel vooluahelasse häirepinge logaritmilist suhet

$U_1 : U_2$ sõltuvalt sagedusest. Mõõtmine toimub filtri väljundis.

$$a = 20 \cdot \lg (U_1 / U_2), \text{ dB}$$

Sageli kasutatavad väärtused on järgmised:

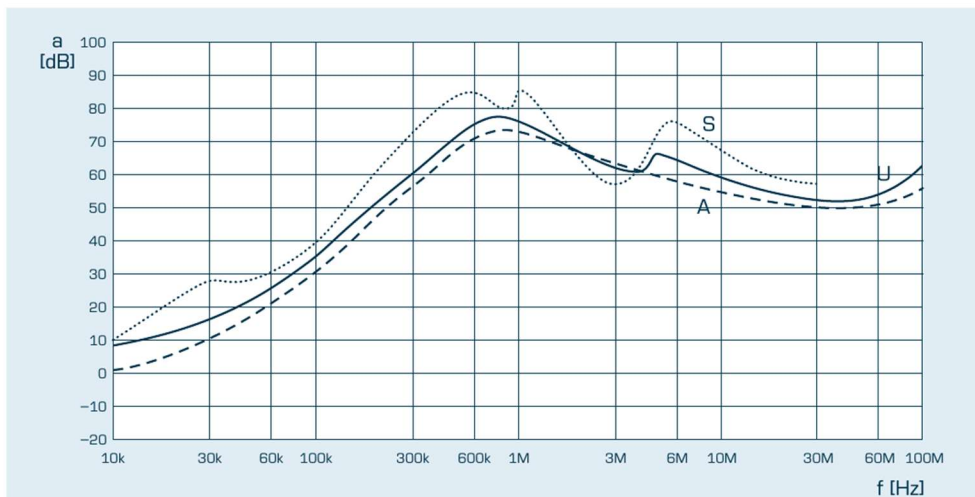
Summutustegur Pingesuhe $U_1 : U_2$

0 dB	1 : 1
3 dB	1 : 1,41
6 dB	1 : 2
10 dB	1 : 3,16
20 dB	1 : 10
40 dB	1 : 100
60 dB	1 : 1 000
80 dB	1 : 10 000

Summutustegur Pingesuhe $U_1 : U_2$

100 dB	1 : 100 000
120 dB	1 : 1 000 000
140 dB	1 : 10 000 000

Kui filtri summutustegurit mõõdetakse nii, et filtri mõlemal poolel on **50 Ω** aktiivtakistus, nimetatakse saadud tulemust **50 Ω summutusteguriks**.



Joonis 3. Filtri summutustegur a sageduse funktsioonina: A – asümmeetrilise (ühissignaali), sümmeetrilise (töövoolu, diferentsiaalsignaali) ebasümmeetrilise (kõrvalharu ühendamisega).

Summutusteguri mõõtmine

Summutustegur on võimalik mõõta ka erineva aktiivse lõpptakistiga (näiteks **0,1 Ω / 100 Ω** või **100 Ω / 0,1 Ω**).

Sellised mõõtekombinatsioonid võimaldavad hinnata filtri käitumist koormuse mittedobivuse korral. Sellisel juhul võib esineda isegi **negatiivne summutustegur**, st häirepinge võib filtri tõttu suurened.

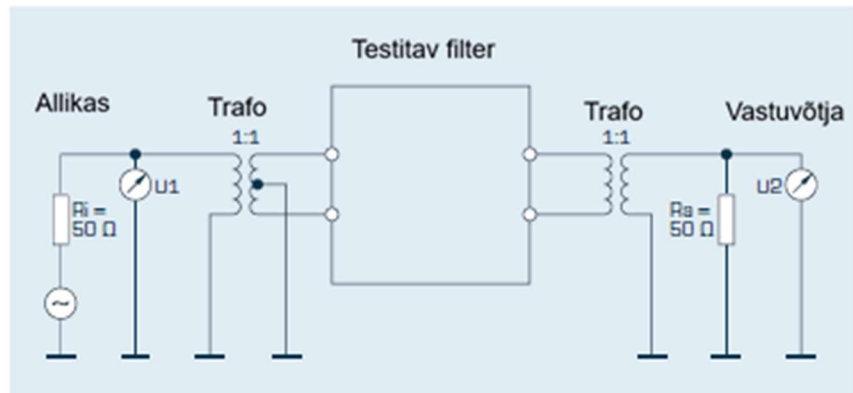
Need mõõtmismeetodid võimaldavad küll võrrelda erinevaid filtreid ja teha nende summutusomaduste põhjal esmase valiku, kuid annavad filtri tegeliku töö kohta praktilises rakenduses vaid piiratud teavet.

Põhjuseks on asjaolu, et ei häireallikas, häire suhtes tundlik seade ega ühendusjuhtmed ei oma tegelikult süsteemis **50 Ω** aktiivtakistust.

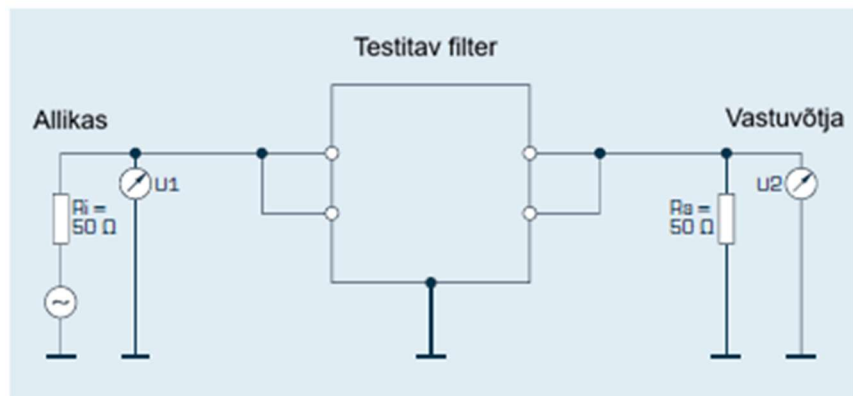
Lisaks mõõdetakse **50 Ω summutustegur** väikese signaali tingimustes (ligikaudu **1 V**). Sellisel mõõtmisel ei läbi filtri induktiivpooli nimivool ning seetõttu ei arvestata magnetsüdamiku mittelineaarset magnetiseerumiskõverat ega eelmagneetumust.

Häirepinge ise on küll samuti väikese amplituudiga, kuid filtri tegelik töö sõltub siiski ka töövoolust.

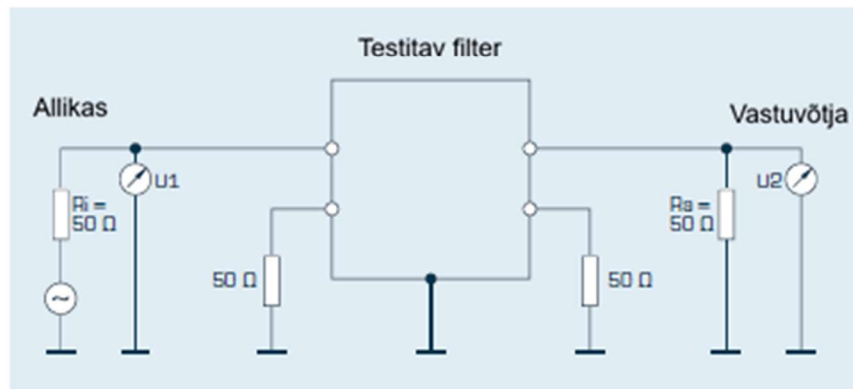
EMÜ-standardites sätestatud piirväärtuste täitmist (vt peatükid „**Elektromagnetilised häired**” ja „**Elektromagnetiline häirekindlus**”) saab tõendada üksnes kogu süsteemi mõõtmisega, milles võetakse arvesse kõiki süsteemi kuuluvaid komponente.



a



b

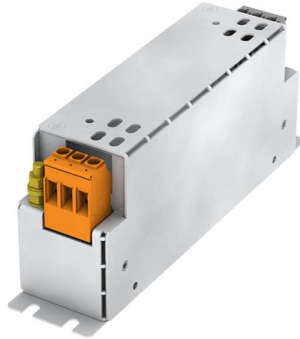


c

Joonis 4. Filtri summutusteguri mõõteskeemid: a – sümmeetrilise e diferentsiaalsignaali, b – asümmeetrilise e ühissignaali mõõtmiseks 50 Ω takistitega.

Võrgufiltrid

Võrguhäirete filtreid kasutatakse tavaliselt võrgu ja koormuse (nt sagedusmuunduri) sisendi vahel. Saadaval on ühe- ja kolmefaasilised versioonid. Võrguhäirete filter ühendab tõhusalt võrgudrosseli (vt "Drossel") ja passiivse elektromagnetiliste häirete (EMI) summutusfiltri omadused üheks väga laiaribaliseks filtriks. Optimaalne komponentide sobitamine võimaldab võimsusega juhitavat võrguhäirete summutamist kuni 30 MHz sagedusel.



Joonis 5. Võrgufilter

Mootoridrosselid

Kiiresti lülituvate võimsuspooljuhtide kasutamine sagedusmuundurites suurendab kolmefaasiliste asünkroonmootorite käitamisega seotud probleemide hulka.

Väljundpinge järsk tõus ja langus (du/dt kuni **12 kV/ μ s**) põhjustab muu hulgas:

- probleeme mootorimähiste isolatsiooni elektrilise tugevuse ja tööeaga;
- suure amplituudiga harmoonilisi, mis ulatuvad kõrgsagedusalasse.

Mootoridrosselite kasutamisel:

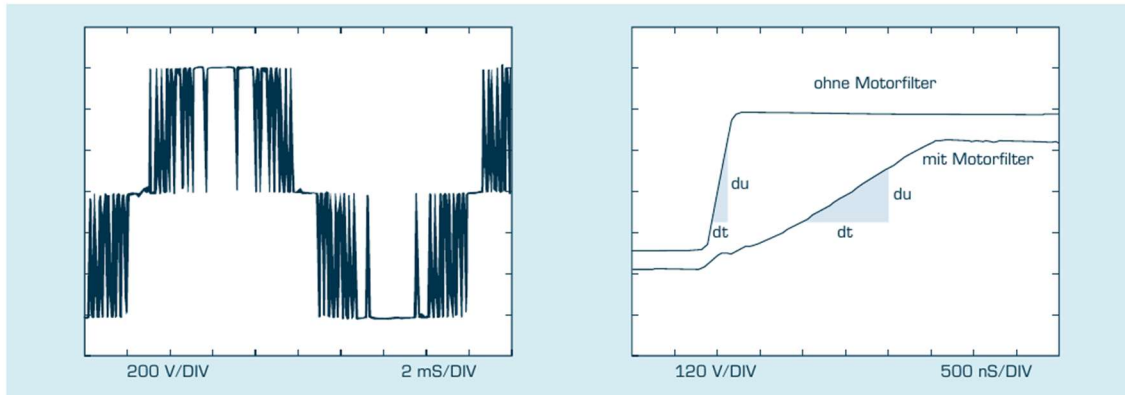
- väheneb pingetõusu kiirus (du/dt) ligikaudu **500 V/ μ s**-ni ning mootor on paremini kaitstud;
- väheneb kõrgsageduslike harmooniliste sisaldus, parandades elektromagnetilist ühilduvust teiste süsteemi komponentidega.

Mootoridrosselid tagavad siiski ainult **minimaalse kaitse**.

Oluliselt parema tulemuse saavutamiseks kasutatakse **mootorifiltreid** või **siinusfiltreid**.



Joonis 6. Mootoridrosseli näide.



Joonis 7. Väljundpinge tõusu- ja langusnõlvad mootoridrosselita drosseliga: vasakul sagedusmuunduri moduleeritud faasipinge drosselita; paremal väljundpinge impulsi tõusunõlv ilma mootoridrosselita (ülal) ja mootoridrosseliga (all).

Siinusfiltrid

Siinusfiltreid kasutatakse sagedusmuunduri väljundi ja varjestatud mootorikaabli vahel juhtmetes levivate häirete summutamiseks, alates ligikaudu **500 Hz** sagedusest.

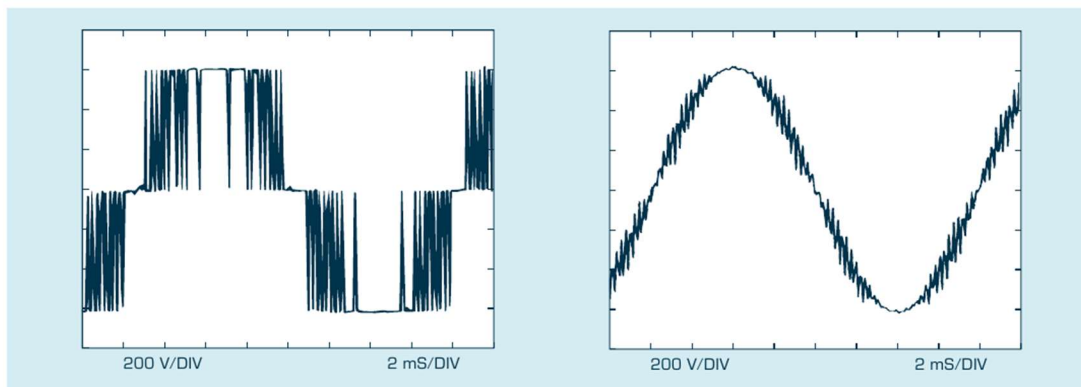
Siinusfilter saavutab väga suure filtreerimise efekti tänu täpselt häälestatud madalpääsfiltrile, mis on optimeeritud sagedusmuunduri lülitussagedusele.

Kasulik signaal (mootori toitepinge töösagedus) kuni ligikaudu **120 Hz** läbib siinusfiltri ainult väikese pingelanguga, samal ajal kui lülitussagedus (tüüpiliselt **8...10 kHz**) väheneb ligikaudu **90%**.

Lülitussageduse kõrgemad harmoonilised filtreeritakse peaaegu täielikult välja.

Siinusfiltri peamised eelised

- väga suur filtreerimise efekt tänu täpselt häälestatud madalpääsfiltrile;
- väljundpinge tõusunõlv muutub praktiliselt võrgu siinuspinge omaga võrreldavaks;
- sagedusmuunduri väljundpinge lülitussagedus ja selle harmoonilised summutatakse tõhusalt;
- võimalik kasutada pikki varjestatud mootorikaableid;
- mootori töö muutub vaiksemaks tänu lülitussageduse tugevale summutamisele;
- väheneb lekkevool.



Joonis 8. Sagedusmuunduri ja siinusfiltri väljundpinge võrdlus: vasakul sagedusmuunduri väljundi faasipinge, paremal pinge siinusfiltri väljundis.

Eelneva joonise paremal ostsillogrammil on näha, et pärast siinusfiltrit on sagedusmuunduri lülitussagedus alles vaid väikese amplituudiga ning see on liitub mootori toitepinge töösagedusele.

Mootorifiltrid

Mootorifiltreid kasutatakse sagedusmuunduri väljundi ja varjestatud mootorikaabli vahel juhtmeslevivate elektromagnetiliste häirete vähendamiseks.

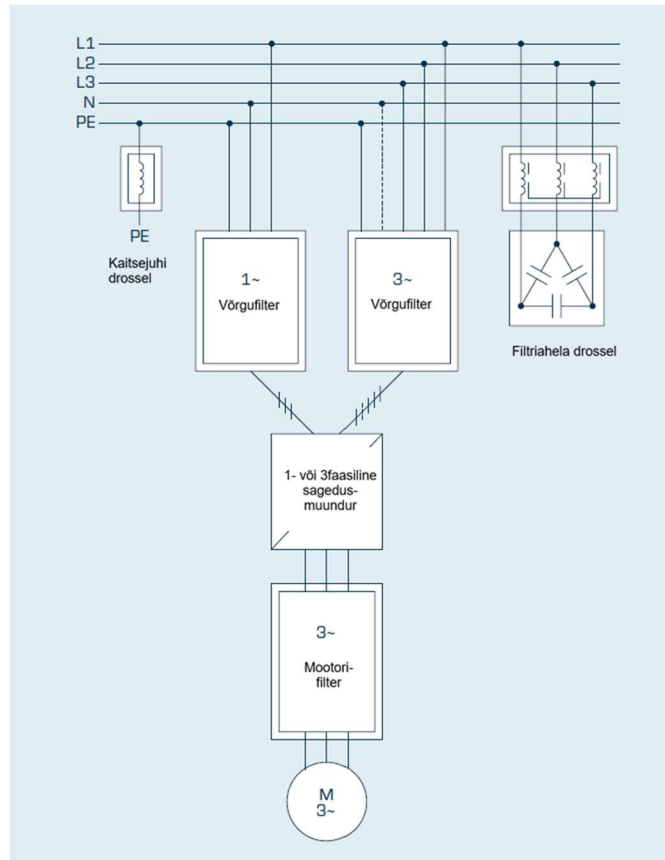
Võrreldes mootoridrosseliga saavutatakse oluliselt parem summutus, kuna lisaks drosselile kasutatakse ka spetsiaalselt valitud kondensaatoreid.

Mootorifilter pakub järgmisi eeliseid:

- vähendab väljundpinge tõusunurka (**du/dt**) veelgi tõhusamalt;
- vähendab kõrgsageduslike harmooniliste taset;
- parandab elektromagnetilist ühilduvust (EMÜ);
- vähendab mootori isolatsiooni koormust;
- võimaldab kasutada pikemaid varjestatud mootorikaableid;
- vähendab laagrivoolude ja lekkevoolude teket;
- vähendab mootori tekitatud müra.

Ülevaade drosselite ja passiivfiltrite kasutamisest sagedusmuunduritega

Sagedusmuundurid on tehnilis-majanduslikust seisukohast üldtööstuslike elektrimootorite juhtimise ja reguleerimise optimaalseim lahendus. Tüüpiline kasutatavate elektriseadmete paigutus on näidatud järgneval joonisel.



Joonis 9. Ühe- või kolmefaasilise toitega sagedusmuunduri filtrite tüüpiline konfiguratsioon

400 V / 50 Hz kolmefaasilisest elektrivõrgust võetakse elektrienergia ühe- (230 V) või kolmefaasilise (3×400 V) **võrgufiltri** kaudu ning suunatakse ühe- või kolmefaasilise sagedusmuunduri toitesisendisse.

Sõltuvalt rakendusest võib võrgufilter olla teostatud järgmiselt:

- võrgudrossel,
- võrguhäirefilter (drossel ja EMÜ-filter) või
- EMÜ-filter.

Sagedusmuunduris 50 Hz võrgupinge alaldatakse ning elektrienergia salvestatakse alalisvoolu vahelülisse. Vahelüli toide võib olla

- ühefaasiline B4-sildalaldiga kuni u 3 kW sagedusmuunduritel või
- kolmefaasiline tavaliselt B6-sildalaldiga.

Vaheldi tavaliselt kuue pooljuhtlüliti (nt IGBT- või MOSFET-tüüpi transistori) ajastatud sisse- ja väljalülitamisega tükeldatakse vahelüli energia ning moodustatakse kolm vajaliku sageduse ja pingega omavahel 120° elektrilist kraadi nihutatud väljundpinget.

Sagedusmuunduri väljundpinge sõltub sisendpingest:

- ühefaasiline 230 V seade annab väljundis kuni 3×230 V;
- kolmefaasiline 3×400 V seade annab väljundis kuni 3×400 V.

Vaheldi juhtimine võimaldab realiseerida mitmesuguseid juhtimis- ja reguleerimisfunktsioone, näiteks

- sujuvkäivitus;
- konstantne pöördemoment;
- voolu piiramine;
- mootori toitepingete sageduse muutmine.

Sagedusmuunduri väljundi kolmefaasiline väljundfilter ühendatakse lühema või pikema kaabli abil tavalise kolmefaasilise asünkroonmootoriga.

Sõltuvalt rakendusest võib väljundfilter olla:

- mootoridrossel;
- mootorifilter või
- siinusfilter.

Kaasaegsete sagedusmuundurite eripärad

Eristatakse pinge- ja vooluvaheldiga (U- või I-tüüpi) sagedusmuundureid. Mõlemal lahendusel on sõltuvalt rakendusest oma tehnilised eelised ja puudused.

Soodsama maksumuse tõttu kasutatakse tänapäeval kõige sagedamini **pingevaheldiga sagedusmuundurit** ning järgmised käsitlused puudutavad eelkõige seda tüüpi seadmeid.

Kaasaegne pingevaheldiga sagedusmuundur koosneb põhimõtteliselt järgmistest plokkidest:

- võrgualaldi;
- alalisvoolu vaheahel;
- pidurduslülit ja pidurdustakisti (vajaduse korral);
- inverter kuue IGBT-võimsustransistoriga;
- juht- ja reguleerimiselektronika.

Kõigepealt alaldatakse kolmefaasiline võrgupinge dioodsillaga. Alaldatud pinge silutakse vahelüli kondensaatoritega ning salvestatakse neis elektrivälja alalispingena.

Seejärel inverter moodustab IGBT-transistoride kiire lülitamise e modulatsiooni abil vahelüli alalispingest kolmefaasilise muutuva sageduse ja pingega väljundpinge.

Väljundpinge tippväärtust ja sagedust juhitakse pulsilaiusmodulatsiooni (PWM) abil.

Lülitussagedus on tavaliselt vahemikus **2...16 kHz**, sõltuvalt sagedusmuunduri tüübist ja seadistusest.

Mida kõrgem on lülitussagedus, seda

- väiksem on mootori tekitatav kuuldav müra;
- lähedasem on mootori vool siinusfunktsioonile;
- suuremad on aga lülituskaod ja elektromagnetilised häired.

Seetõttu tuleb valida kompromiss kasuteguri, mürataseme ja elektromagnetilise ühilduvuse vahel.

Sagedusmuunduri väljundis tekivad väga järsud pingeservad (**du/dt**), mille tõusukiirus võib ulatuda mitme **kV/μs** väärtuseni.

Need pingeservad põhjustavad:

- juhtmetes levivaid häireid;

- kiirguvaid elektromagnetilisi häireid;
- mootori isolatsiooni suuremat elektrilist koormust;
- laagrivoolude teket;
- lekkevoolude suurenemist;
- peegeldusnähtusi pikkades mootorikaablites.

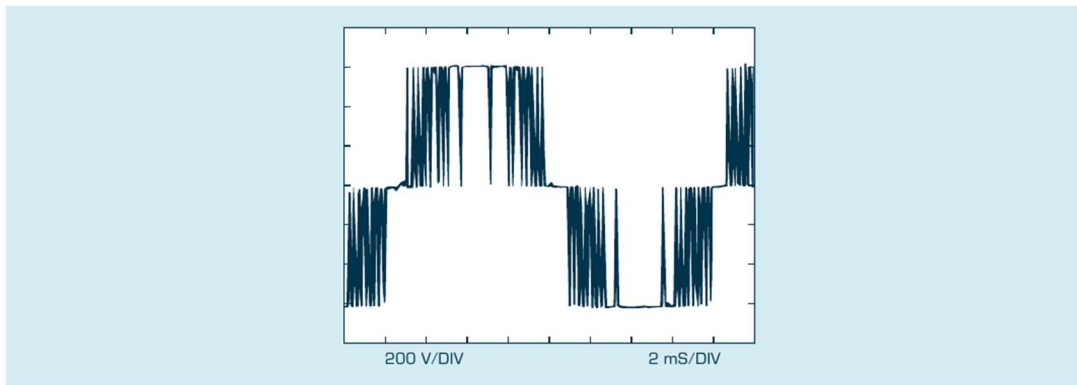
Seetõttu kasutatakse sõltuvalt rakendusest sagedusmuunduri sisendis võrgudrosseleid või EMÜ-filtreid ning väljundis mootoridrosseleid, mootorifiltreid või siinusfiltreid.

Suured tootmismahud ja pidevalt täiustuv lülitustehnoloogia võimaldavad valmistada järjest väiksemaid, suurema võimsustihedusega ja soodsama hinnaga sagedusmuundureid.

Need eelised saavutatakse eelkõige:

- üha kõrgemate lülitussageduste kasutamisega;
- üha kiiremini lülituvate IGBT-võimsustransistoridega;
- väiksemate lülituskadudega.

Alloleval ostsillogrammil (Joonis 9) on kujutatud impulsslaiusmodulatsiooniga (PWM) juhitava sagedusmuunduri ühe väljundfaasi pinget.



Joonis 10. PWM-modulatsiooniga sagedusmuunduri väljundfaasi pinget ajadiagramm.

Ostsillogramm on esitatud ühe kasuliku signaali perioodi kohta, st mootori tööks vajaliku kolmefaasilise pinget ühe perioodi ulatuses (mootori töösagedus võib sõltuvalt tüübist olla kuni u 150 Hz).

Kolmefaasiline väljundpinge moodustatakse alalisvoolu vahelüli pinget täpselt ajastatud sisse- ja väljalülitamisega sagedusmuunduri lülitussagedusel (tüüpiliselt alates **4 kHz**). Pinget väga järsk tõus ja langus (**du/dt** , kuni **$12 \text{ kV}/\mu\text{s}$**) põhjustab aga olulisi probleeme mootori mähiste isolatsioonile.

Mähiste isolatsiooni lubatav pingetõusukiirus ei tohiks ületada ligikaudu **$500 \text{ V}/\mu\text{s}$** , sest suuremate väärtuste korral võivad tekkida:

- keerdude vahelised läbilöögid;
- mähiste lühised;
- mootori eeldatava kasutusea oluline lühenemine.

Lisaks on oluline aspekt elektromagnetiline ühilduvus (EMC) teiste süsteemikomponentidega. Impulsspinget järsud lülitusnõlvad tekitavad tugevaid pingeharmonilisi, mis ulatuvad kõrgsagedusvahemikku. Nende probleemide

lahendamiseks ja mootori müra vähendamiseks on võimalik kasutada liini- ja väljundfiltreid, mis on spetsiaalselt kohandatud sagedusmuundurite töönoüetele. Kõigi süsteemikomponentide kaablite pikkus peaks olema võimalikult lühike, et vältida kõrgsageduskiirgust (antenniefekti) kaablite kaudu.

Passiivfiltrid sagedusmuundurite toitesisendis

Kas elektrilise ajamisüsteemi elektromagnetilise ühilduvuse (EMÜ) nõuded on koos sagedusmuunduriga täidetud, saab kindlaks teha üksnes mõõtmistega kogu süsteemi ulatuses, kaasates kõik süsteemi komponendid.

EMÜ-filter

Juhtmeslevivate häirete emissiooni sagedusvahemik **150 kHz...30 MHz** on peamine toitesisendi EMÜ-filtri valikut määrav tegur sagedusmuunduri ja elektrivõrgu vahel, mida käsitleb Euroopa standard **EN 55011 Tööstus-, teadus- ja meditsiiniseadmed**.

Raadiosageduslike häiringute tunnussuured. Piirväärtused ja mõõtemetodid (ISM-industrial, scientific and medical). Sagedusmuundur tekitab oma tööks vajalikku kõrgsageduslikku energiat ning liigitatakse seetõttu **1. rühma ISM-seadmeks**.

Kui võib eeldada, et elektriline ajamisüsteem ei tööta üksnes eraldatud tööstuslikus madalpingevõrgus, vaid seda võidakse ühendada ka avalikku elektrivõrku, tuleb sagedusmuundurit käsitleda **B-klassi seadmena**.

B-klassi seadmed peavad vastama **B-klassi raadiohäirete piirväärtustele**.

Kui elektriline ajamisüsteem töötab ainult tööstuslikus madalpingevõrgus, käsitletakse sagedusmuundurit **A-klassi seadmena**.

Sellisel juhul tuleb täita üksnes **A-klassi raadiohäirete piirväärtused**, mis on vähem ranged kui B-klassi nõuded.

Passiivne elektromagnetiliste häirete summutamise filter, mida kasutatakse koos sagedusmuunduriga, peab olema projekteeritud vastavalt elektrilise ajamisüsteemi erinevatele töörežiimidele ning konkreetsele kasutusotstarbele.

Kõige olulisemad tööparameetrid, mille muutumine mõjutab elektromagnetiliste häirete taset, on järgmised:

- sagedusmuunduri väljundsagedus (mootori pöörlemiskiirus);
- lülitussagedus;
- varjestatud mootorikaabli pikkus.

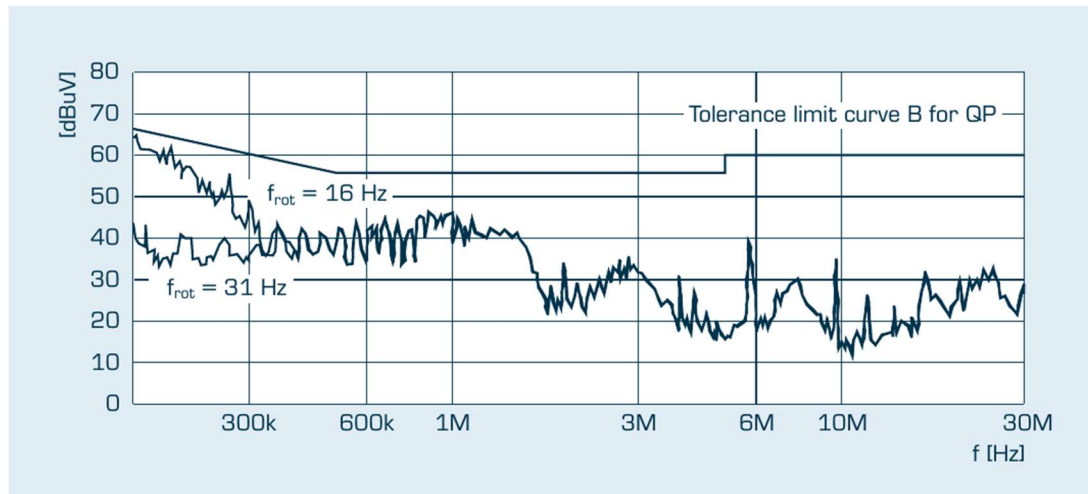
Väljundsageduse muutmine

Tööstuslike kolmefaasiliste asünkroonmootorite pöörlemiskiiruse lihtne reguleerimine on sagedusmuundurite kasutamise peapõhjus. Juba selle tööparameetri muutmine mõjutab seadme tekitatavaid häirepingeid.

Paljude sagedusmuundurite puhul on mõõtmised näidanud, et eriti **madalatel pöörlemiskiirustel** suureneb elektromagnetiliste häirete emissioon märgatavalt.

Juba filtri väljatöötamise etapis tuleb seetõttu **pidevalt muuta sagedusmuunduri väljundsagedust**, et määrata kindlaks **halvim talitusjuhtum** ning dimensioneerida selle alusel filtri vajalik summutusvõime.

Järgneval diagrammil (joonis 12) on esitatud **EN 55011** kohase häirepinge mõõtmise tüüpiline tulemus.



Joonis 11. Häirepingete spektri sõltuvus väljundpinge sagedusest

Diagrammilt on näha, et **16 Hz** väljundsageduse korral on juhtmetes leviv häireemissioon suurem kui **31 Hz** korral ning läheneb **B-klassi piirväärtuskõverale**.

Seetõttu ei piisa filtri projekteerimisel ainult nimikiiruse arvestamisest. Filtri toimivust tuleb hinnata kogu mootori töökiiruste vahemikus ning dimensioneerimine peab lähtuma kõige ebasoodsamast tööolukorrast.

Lülitussageduse muutumine

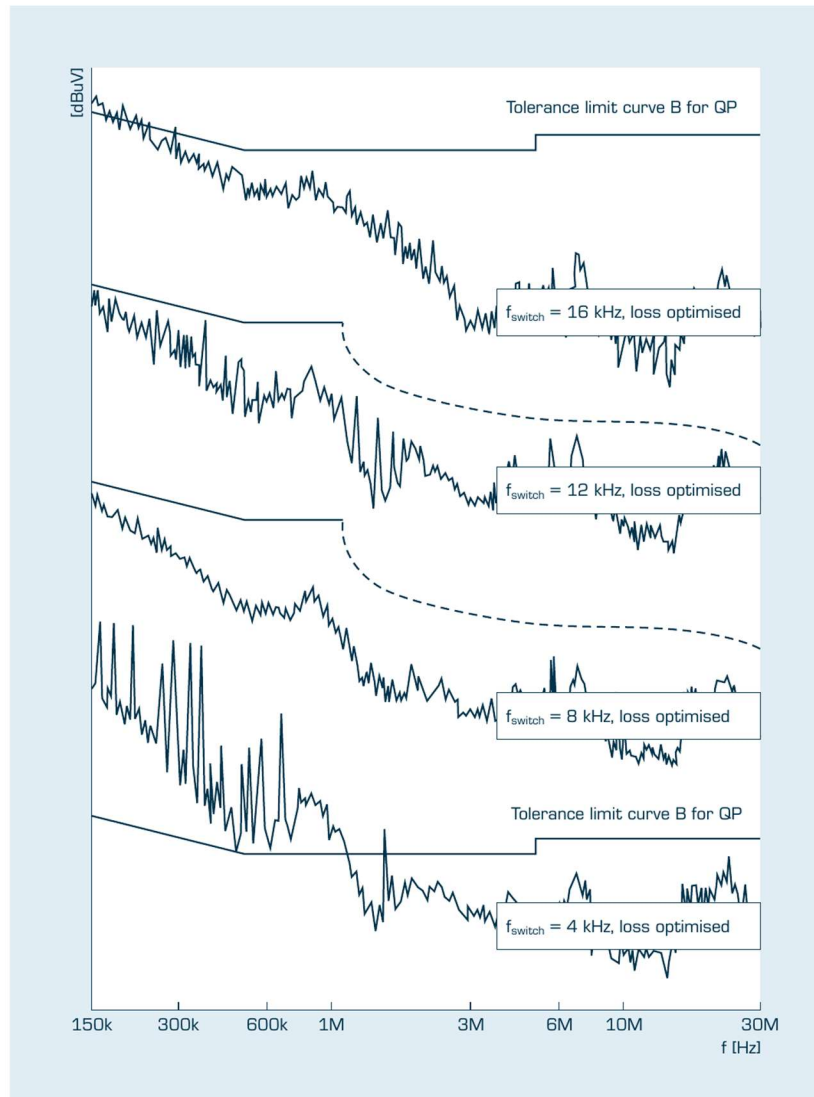
Kaasaegsed sagedusmuundurid, mille väljundastmes kasutatakse kiiresti lülituvaid IGBT-transistore, võimaldavad lülitussagedust astmeliselt seadistada tüüpiliselt vahemikus **4...16 kHz**.

Turul on ka seadmeid, mille **lülitussagedus** muutub automaatselt, et vältida seadme ülekuumenemist. Sellised seadmed vähendavad äärmuslikes tööolukordades iseseisvalt eelnevalt seadistatud kõrget lülitussagedust madalamale väärtusele.

Ka selline lülitussageduse muutumine mõjutab oluliselt filtri vajalikku summutustegurit.

Alloleval diagrammil (Joonis 13) on sama filtriga mõõdetud häirepinged erinevate sagedusmuunduri lülitussageduste korral.

Kui **16 kHz**, **12 kHz** ja **8 kHz** lülitussageduse korral jäävad mõõdetud häirepinged **B-klassi piirväärtuskõvera** lähedale või veidi sellest kõrgemale, siis **4 kHz** lülitussageduse korral ei ole filter enam piisava summutusvõimega.



Joonis 12. Häirepingete sõltuvus lülitussagedusest 16 kHz, 12 kHz, 8 kHz ja 4 kHz juures

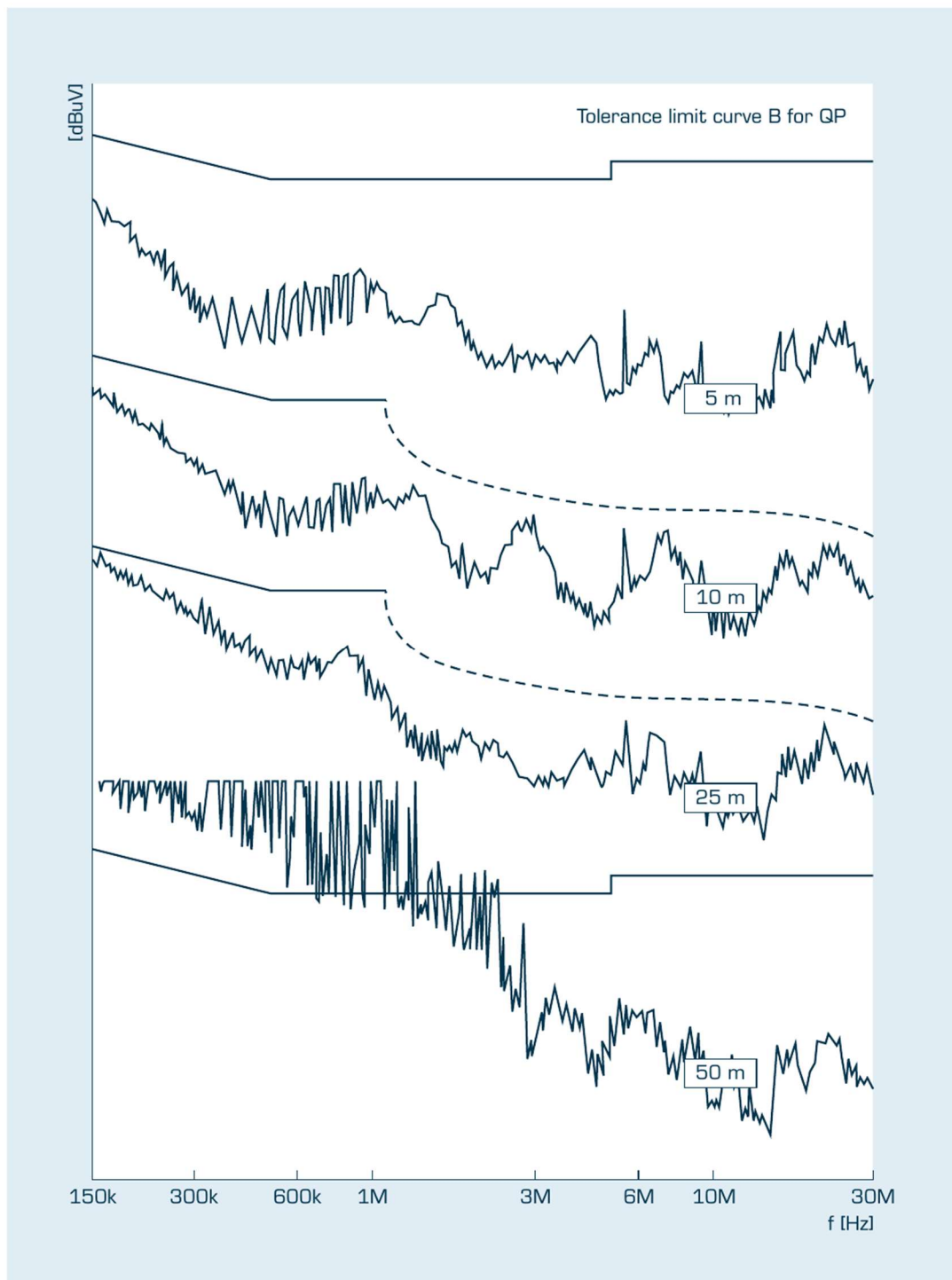
Varjestatud mootorikaabli pikkuse muutumine

Sagedusmuunduri väljundiga ühendatud mootorikaabli pikkus ning sellest tulenev varjestuse pindala mõjutavad samuti EMÜ-filtri konstruktsiooni.

Järgnev diagramm näitab sagedusmuunduri sisendi häirepinge sõltuvust väljundisse ühendatud mootorikaabli pikkusest. Selgelt on näha, et juhtmetes leviv elektromagnetiline häiring suureneb koos kaabli pikkusega.

25 m pikkuse kaabli korral ületatakse sagedusvahemiku alumises osas juba **B-klassi piirväärtus**.

50 m pikkuse kaabli korral ei ole filter enam võimeline nõutavat summutust tagama.

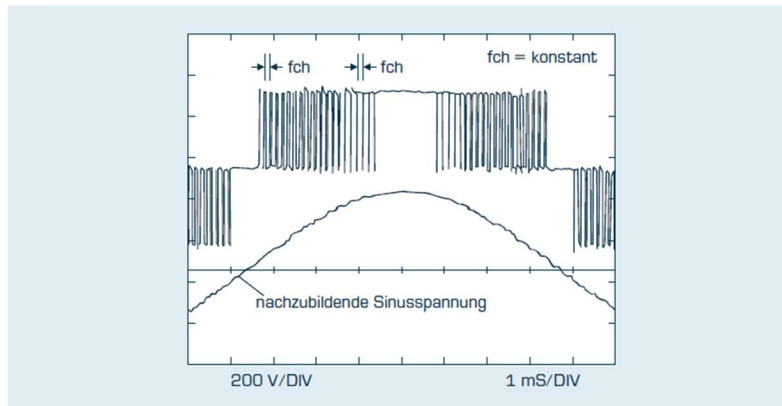


Joonis 13. Häirepinge sõltuvus mootorikaabli pikkusest

Passiivfiltrid sagedusmuunduri väljundis

Sagedusmuundurite ülesanne on juhtida kolmefaasilisi elektrimootoreid. Seda ülesannet tuleb täita kõrge kasuteguri ning peaaegu eranditult kasutatava kolmefaasilise

asünkroonmootori tööomaduste mugavate seadistusvõimalustega. Selleks on vaja sagedusmuunduri kolmefaasilisi väljundpingeid lülitada. Järgnev joonis kujutab ostsillograafia mõõdetud väljundpinget ühelt tüüpilise U/f-sagedusmuunduri kolmest omavahel 120° võrra nihutatud faasist.



Joonis 14. Sagedusmuunduri väljundpinge ja filtreeritud siinuspinge ajadiagramm

Filtreeritud siinuslaine poolperiood aitab paremini mõista tööpinge kujundamise protsessi. Muunduris tekitatud alalispinge jaotatakse konstantse lülitussagedusega (valitav sammudena vahemikus 4–16 kHz) üksikuteks konstantse tipuväärtusega impulsspaksideks.

Alates siinuslaine esimesest nullületusest esinevad väga kitsad ja väikese energiasisaldusega impulsspaketid. Edasi impulsside kestus pidevalt pikeneb kuni jälgendatava lainekuju amplituudi maksimumini. Sealt alates impulsside kestus jälle lüheneb kuni järgmise nullületuseni. Teisel poolperioodil kordub sama protsess vastupidise polaarsusega.

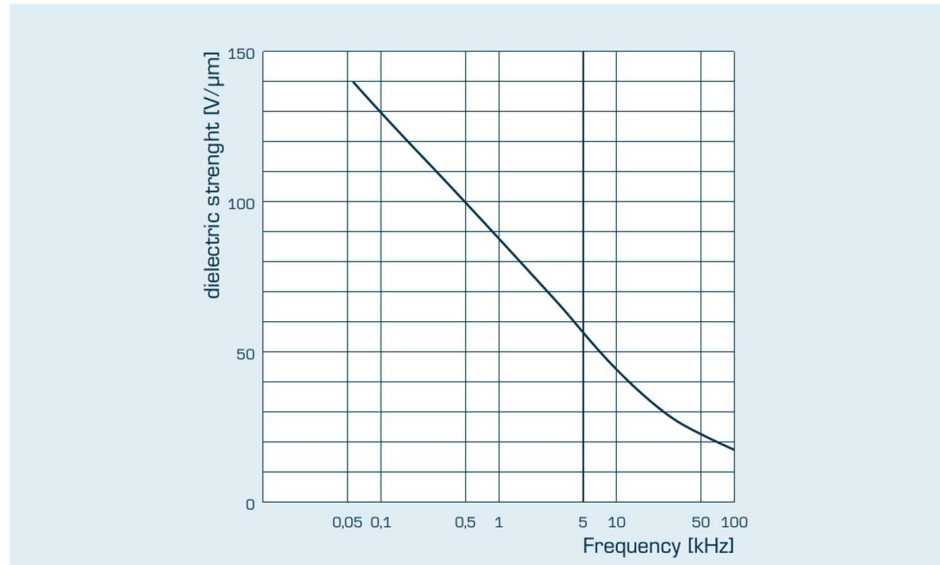
Impulsside ja pauside kestuse muutmisega on võimalik juhtida ühendatud mootori pöörleva magnetvälja sagedust, pöördemomenti ning käivitus- ja pidurdusomadusi. Kahjuks kaasnevad nende eelistega ka mõned puudused:

- Mootori kasutusea lühenemine järskude lülitusfrontide tõttu
- Ülepinged mootori klemmidel
- Elektromagnetilise ühilduvuse (EMÜ) probleemid
- Suurenevad probleemid pikemate mootorikaablite korral
- Täiendav mürateke mootoris

Madalasagedusliku siinuskujulise toitepinge jaoks projekteeritud elektrimootorites kasutatavate tavapäraste emailitud vaskjuhtmete isolatsiooni läbilöögikindlusega ei olnud minevikus praktiliselt probleeme. Kui sagedusmuundurite tehnoloogia algusaegadel kasutati suhteliselt madalaid lülitussagedusi ja aeglaseid lülitusprotsesse, siis pooljuhtkomponentide järjepideva arendamise tulemusena on kasutusele võetud üha lühemad lülitusajad ja pidevalt kasvavad lülitussagedused.

Standardsete elektrimootorite emailitud vaskjuhtmete isolatsioonikindlus ei ole samas tempos arenenud. Seetõttu mõjutavad mähisejuhtmeid lisaks senistele koormustele nüüd ka sagedusest sõltuvad isolatsioonipinged, mille tagajärjeks on eeldatava kasutusea lühenemine.

Järgnev diagramm näitab emailitud vaskjuhtme isolatsioonikindluse sõltuvust sagedusest.



Joonis 15. Emailisolatsioon modifitseeritud polüestri baasil, isolatsioonikihi paksus umbes 75 μm. Katsepinget tõstetakse kuni läbilöögini 10–20 sekundi jooksul.

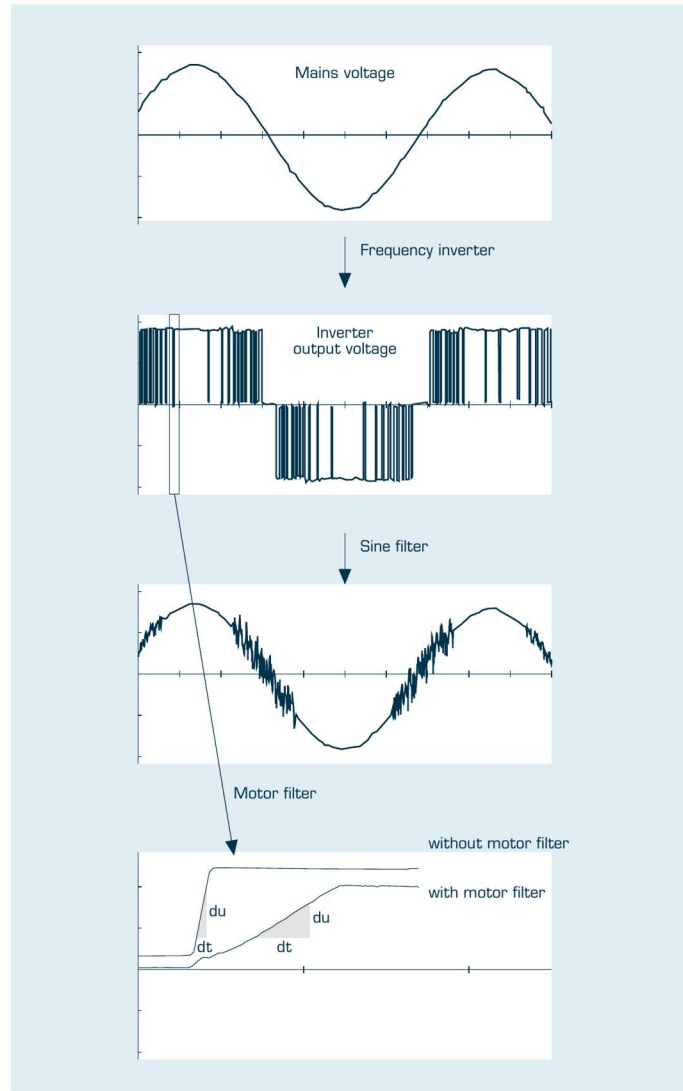
Juba 10 kHz sagedusega siinuspinge korral väheneb isolatsioonikindlus rohkem kui kolm korda. Kui arvestada lülitusfrontides sisalduvat ning märkimisväärse energiaga kõrgemate harmooniliste spektrit, langeb isolatsiooni pingetaluvus äärmiselt madalale tasemele.

Kontrollimatult tekkivad ülepinged on mootorikaablis levivate või seisvate kõrgemate harmooniliste tagajärg. Sagedusspekter ei ole püsiv, vaid muutub vastavalt mootori juhtimiseks kasutatavatele impulsspaksidele. Kuna ülekandesüsteem **sagedusmuundur – mootorikaabel – mootor** peab olema optimeeritud võimsuse ülekandmiseks mootori pöörleva magnetvälja sagedusalas, tekib kõrgemate harmooniliste sagedusspektri jaoks alati sobimatus, mis soodustab kontrollimatute resonantsnähtuste teket.

Kuigi see ei ole elektrilise töökindluse seisukohalt määrava tähtsusega, peetakse mootori müratasest mõnes rakenduses (eelkõige eluruumides) väga häirivaks. Eriti kuuldepiirkonnas kuni 16 kHz avalduvad häirivalt nii lülitussagedusest põhjustatud mootori lehtterase magnetostriksioon kui ka mähiste mehaanilised võnkumised.

Kriitilistel juhtudel võib osutuda vajalikuks kasutada suurema väljundvõimsusega sagedusmuundurit. Selle põhjuseks on sagedusmuunduri täiendav koormus, mida põhjustavad kaabli parasiitmahtuvustest tulenevad voolud ning lekkevoolud maasse.

Nimetatud puuduste leevendamiseks kasutatakse sagedusmuunduri väljundpoolel mootoridrosseleid, mootorifiltreid ja siinusfiltreid.



Joonis 16. Kaabli parasiitmahtuvustest tulenevate voolude, maalekkevoolude ning kuulda määra vähendamiseks kasutatakse sagedusmuunduri väljundis mootoridrosselit, mootorifiltrit või siinusfiltrit.

Kui mootoridrosselid pakuvad minimaalset kaitset sagedusmuunduri väljundpinge järsu lülitusnõlva vastu, siis mootorifiltrid on märksa tõhusamad. Nende mõju on näha eelpool esitatud ostsillogrammil.

Mõõdetuna tavapärase 8 kHz lülitussagedusega sagedusmuunduri korral vähendab mootorifilter **du/dt** väärtust ligikaudu **12 kV/μs** tasemelt ohutule väärtusele **500 V/μs**. Sellega taastatakse mootori algselt eeldatud kasutusiga. Lisaks sisaldab filter väikeste kadudega lahendust kaablites tekkivate seisulainete summutamiseks. See tagab stabiilse töö erineva pikkusega mootorikaablite korral.

Siinusfiltrid muudavad sagedusmuunduri lülitatava väljundpinge väheste moonutustega siinuspingeks. Ostsillogrammil on kujutatud olukord enne ja pärast siinusfiltrit. Mootori pöörleva magnetvälja põhiharmoonilisele siinuspingele jäävad alles vaid vähesed kõrgemad harmoonilised, mis viitavad sagedusmuunduri algele väljundpingele.

Sellega väldib elektripaigaldiste ehitaja järgmisi sagedusmuundurajamite puudusi:

- **du/dt**-koormus mähisejuhtmetele

- Ülepinged mootori mähistel
- Lülitussagedusest põhjustatud mürateke mootoris
- Pikkadest mootorikaablitest tulenevad probleemid

Kirjeldataud probleemid koonduvad nüüd täielikult kasutatava filtri ülesandeks, millel on ülekandesüsteemis **sagedusmuundur – filter – mootorikaabel – mootor** võtmeroll.

Ainult pikaajaline kogemus, hoolikas materjalide valik ning ulatuslikud katsed võimaldavad välja töötada ja valmistada töökindlaid filtreid sagedusmuundurajamitele.

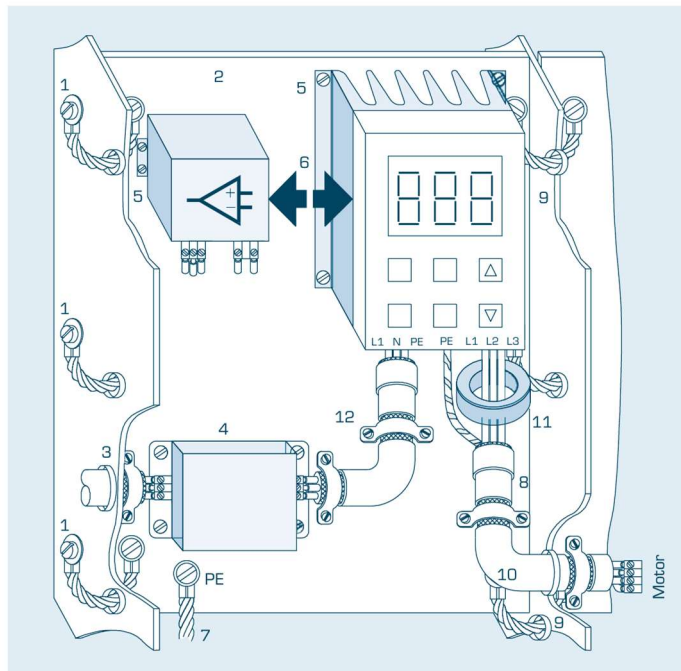
Sagedusmuunduriga ajamite paigaldusjuhised

Elektrikilpi tõhusa häirefiltri paigaldamine ei taga iseenesest veel nõuetekohast elektromagnetiliste häirete summutamist.

Elektrikilbi ehitamise põhimõtted

Ainult siis, kui elektrikilbi projekteerimisel on valitud õige kontseptsioon kõrgsageduslike elektromagnetiliste häirete emissiooni ja immuunsuse seisukohalt, annavad kõik elektromagnetilise ühilduvuse (EMÜ) meetmed soovitud tulemuse.

Esimene samm professionaalseks toimetulekuks selle keeruka tehnikaga on kriitiliste komponentide äratundmine. Sellisteks komponentideks on näiteks sagedusmuundurid, lülitustoiteallikad ja PLC-seadmed. Kui need on ühendatud ühisesse elektrivõrku ja paiknevad üksteise lähedal, tuleb arvestada nende vastastikuse mõjutamise ning võimalike negatiivsete mõjudega teistele tarbijatele. Võimalikke nõrku kohti ning sobivaid lahendusi on kujutatud järgneval joonisel.



Joonis 17. Sagedusmuunduri elektrikilbi elektromagnetilise ühilduvuse nõuete kohase teostuse näide.

Vajaduse korral tuleb iga häireallika ette paigaldada eraldi filter, et piirata juhtmete kaudu levivaid häireid ja vähendada nende mõju teistele seadmetele. Sellise lahendusega vähendatakse juhtmete kaudu levivate häirete taset lubatud piiridesse ning samal ajal parandatakse filtreeritud komponendi häirekindlust elektrivõrgust lähtuvate pingehäirete suhtes.

Üksikfiltrit kasutamisel tuleb filter paigutada võimalikult häireallika lähedale. Kui see ruumipuuduse tõttu võimalik ei ole, tuleb filtri ja häireallika vahel kasutada varjestatud kaablit (joonis 17/12).

Releed, kontaktorid, magnetventiilid jms, mis asuvad elektroonikakomponentidega samas vooluahelas, tuleb varustada sobivate sädemekustutusahelate või liigpingekaitseahelatega.

Üldised häirefiltrid piiravad kogu seadme juhtmete kaudu levivaid häireid. Need tuleb paigaldada võimalikult elektrivõrgu sisendi lähedale (joonis 17/3). Selle lahenduse täiendav eelis on ühendatud seadme parem vastupidavus elektrivõrgust pärinevatele **piik-, puhangu-** ja **laine-**impulssidele (peak, burst ja surge).

Häirefiltrid peavad häirete summutamiseks juhtima vastavad voolud kaitsejuhi (PE) kaudu maasse. Selleks vajalikud Y-kondensaatorid põhjustavad kaitsejuhis lekkevoolu. Enamiku kolmefaasiliste filtrite korral on lekkevool normaalrežiimis väga väike. Asümmeetrilise elektrivõrgu korral võib olukord siiski muutuda ning lekkevool võib ulatuda mitmesaja milliamprini. Seetõttu tuleb kindlasti tagada piisava ristlõikega kaitsejuhi (PE) ühendus.

Paljude tootjate häirefiltritel märgitud nimipinge tähistab maksimaalselt lubatud pinget. **Tähelepanu!** Sellisel juhul tuleb märgitud väärtust käsitada maksimaalselt lubatud tööpingena ilma ülespoole lubatud tolerantsita.

EMÜ-nõuetekohase paigalduse eelduseks on kõigi seadmete ja süsteemikomponentide kõrgsageduslik ühendamine. See tähendab, et need peavad olema suure kontaktpinnaga, väikese üleminekutakistusega ning korrosioonikindlalt ühendatud kaitsemaanduse (PE) potentsiaaliga (joonis 17/5).

Häirekindluse suurendamiseks kiirguvate elektromagnetiliste häirete suhtes parandab töökindlust piisava vahekauguse hoidmine häireallikate ja häiretele tundlike komponentide vahel. See on tõhus ja kuluefektiivne lahendus (joonis 17/6). Kui ruumi ei ole piisavalt, saab kasutada metallist eraldusseinaid (joonis 17/7).

Elektrikilbi kõik metallosad, nagu tagasein, küljeseinad, ülemine ja alumine plekk, tuleb omavahel ühendada kõrgsagedussobivalt. Kui seda ei tehta, toimivad need pinnad antennidena ja kiirgavad häireid (joonis 17/1). Ühendusteks sobivad suure ristlõikega peenkiulised juhtmed või maanduslindid. Täistraatjuhtmeid ei tohi kasutada (joonis 17/1). Sama kehtib ka kaitsejuhi (PE) ühenduse kohta (joonis 17/7).

Kõik elektrikilbi metallosad (seadmed, paigaldusplaadid jne) tuleb omavahel ühendada kõrgsagedussobivalt (joonis 17/9).

Kahjuks kasutatakse elektrikilpides endiselt värvitud paigaldusplaate. EMÜ-nõuetele vastava paigalduse seisukohalt on need ebasobivad, sest mõistliku töömahuga ei ole võimalik saavutada piisavalt kvaliteetseid kõrgsagedusühendusi.

Ka anodeeritud pinnad ei sobi kõrgsageduslikeks ühendusteks, kuna nende üleminekutakistus on kõrge.

Isetehtud lahenduste puhul tuleb jälgida, et kasutatavad metallpinnad oleksid püsivalt korrosiooni eest kaitstud ja vastaksid kõrgsagedustehnika nõuetele.

Kaablite valik ja nende ühendamine

Ühenduskaablite õige valik ja paigaldus on elektromagnetilise ühilduvuse (EMÜ) nõuetele vastava süsteemi üks põhinõudeid. Suuremad probleemid süsteemikomponentidega ilmnesevad alles viimastel aastatel turule tulnud kaasaegsete sagedusmuundurite kasutuselevõttuga, mille IGBT-väljundastmed tekitavad kuni 12 kV/ μ s pingefronte ning põhjustavad märkimisväärsed elektromagnetilisi häireid. Joonisel 18 on näidatud tüüpilised ühenduskaablite paigaldusviisid.

Häireallikatega („kuumade“) ja häirevabade („külmade“) kaablite vahel tuleb tagada piisav vahekaugus. See tähendab, et häireid tekitavaid juhtmeid ei tohi paigaldada paralleelselt või vahetusse lähedusse juba filtreeritud või häirevabade juhtmetega (joonis 18/1).

Vajaduse korral tuleb kaablikimpude vahele paigaldada varjestus või metallist eraldussein (joonis 18/7).

Häireid tekitavad juhtmed tuleb paigaldada võimalikult lähedale võrdluspotentsiaaliga metallpindadele, näiteks elektrikilbi taga- või külgseinale. Nii neeldub osa kiirgavast häirest metallpinna poolt (joonis 18/6).

Vältida tuleb häireid tekitavate ja häirevabade juhtmete korrastatud paralleelset ning lähestikku kulgevat paigaldust. Igal kaablil on elektrivälja komponent, mis põhjustab mahtuvusliku sidestuse ning kannab häired üle ka seni häirevabale kaablile (joonis 18/2).

Kui häireid tekitavad jõukaablid ja juhtmiskaablid peavad ristuma, tuleb seda teha võimalikult 90° nurga all (joonis 18/3).

Üleliigsed „varupikkused“ tuleb ära lõigata, mitte kerida rulli ja jätta elektrikilpi. Sellised juhtmekeerud toimivad antennidena, mis kas võtavad häireid vastu või kiirgavad neid välja.

Varjestamata analoogjuhtmete keerdpaigaldus on lihtne ja tõhus meede sümmeetriliste häirete vähendamiseks (joonis 18/5).

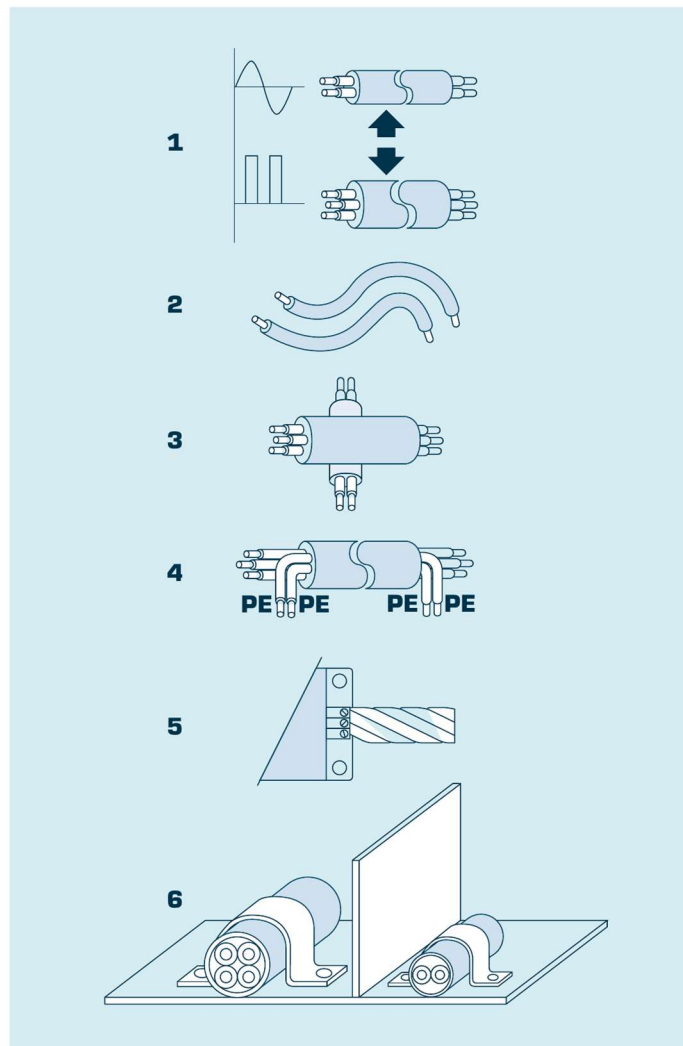
Kasutamata juhtmesooned tuleb mõlemast otsast ühendada kaitsemaandusega (PE). Vastasel juhul toimivad need antennidena (joonis 18/4).

Kasutada tuleb ainult vaskpunutisega varjestatud kaableid (YCY). Teraspunutisega kaablite elektrijuhtivus on kõrgsageduslikes rakendustes ebapiisav ning nende varjestusefekt on väga väike. Uusimate kaablite varjestused on valmistatud ferriitmaterjaliga plastkilest. Sellisel juhul tuleb hinnata lahenduse maksumuse ja kasu suhet.

Kui varjestus tuleb katkestada, tuleb see võimalikult suure kontaktpinnaga uuesti ühendada. Varjestamata juhtmeotsad ühendusklemmideni peavad olema võimalikult lühikesed.

Varjestatud mootorikaabli sees ei tohi vedada muid juhtmeid, näiteks juhtimis- ega andmesidekaableid.

Häirefiltri ja häireallika vaheline ühendus tuleb võimaluse korral teostada varjestatud kaabliga. Väga lühikeste ühenduste korral (≤ 20 cm) võib sellest mõnel juhul loobuda.



Joonis 18. Ühenduskaablite tüüpilised paigaldusviisid

Kaablivarjestuse õige ühendamine

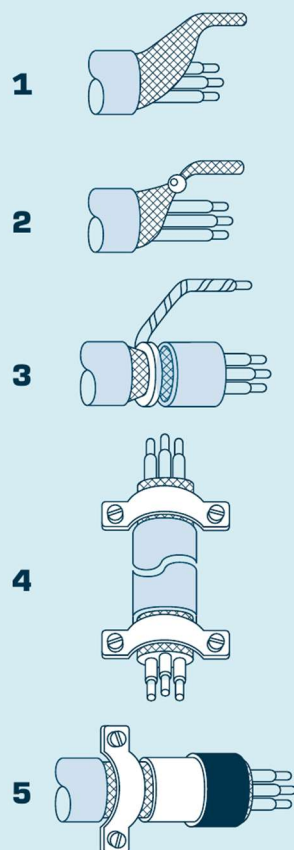
Levinud arusaam kaablivarjestuse ühendamisest põhineb analoogsignaali edastamisel. Sellisel juhul soovitatakse sageli ühendada varjestus ainult ühest otsast, et vältida maandussilmuseid ja võrgusuminat.

Digitaalsignaali ning eriti sagedusmuundurite puhul on selline lahendus **ebasoodne**.

Soovitused

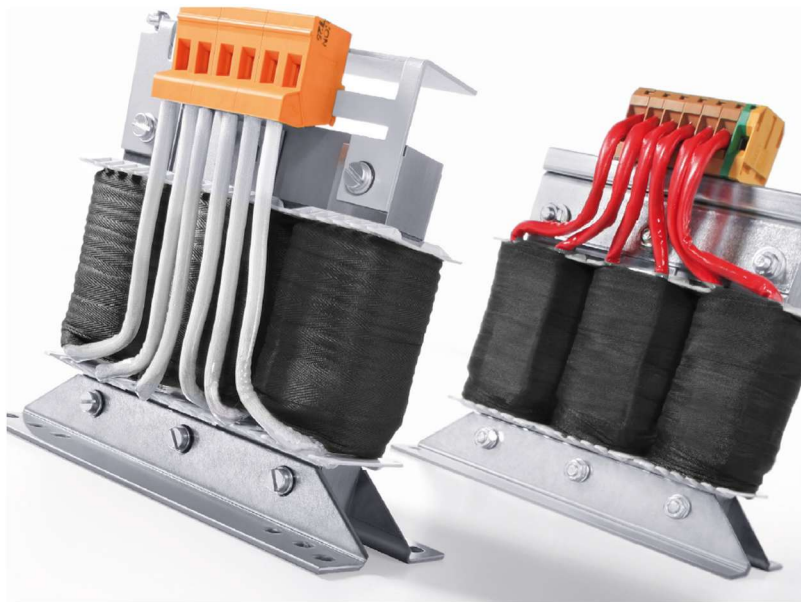
- **Digitaalsete signaalidega varjestatud kaablid tuleb ühendada varjestusega mõlemast otsast** (vt joonis 19/4).
- Kaablivarjestus tuleb alati kinnitada **võimalikult suure kontaktpinnaga**, näiteks spetsiaalse kaabliklambriga (vt joonis 19/4).
- Varjestuse ühendamine ainult peenikese „seasaba“-juhtmega ning selle ühendamine PE-klemmiga **ei ole piisav lahendus** (vt joonis 19/1).

- Samuti ei tohi varjestust ühendada PE-klemmiga joodetud juhtme abil (seasaba) (vt joonis 19/2).
- Ka varjestuse ühendamise presshülsi ja sellele joodetud juhtmega ei anna rahuldavat tulemust (vt joonis 16/3).
- Kaabliklambri ja ühendusklemmi vaheline kaugus peab olema võimalikult lühike (vt joonised 7/8 ja 7/12). Kui seda ei ole võimalik saavutada, tuleb varjestus viia ühendusklemmi võimalikult lähedale ning vajadusel kinnitada mehaaniliselt varjestatud termokahaneva toruga (vt joonis 19/5).
- Kaablite läbiviikudel tuleb kasutada spetsiaalseid **PG-läbiviike**, mis tagavad kõrgsagedusliku varjestuse õige ühendamise.
- Suurim häireallikas on tavaliselt **mootorikaabel**. Seetõttu tuleb eriti pikemate ühenduste korral kasutada alati varjestatud mootorikaableid (vt joonis 7/10).
- Pikkades varjestatud mootorikaablites hajub märkimisväärne osa energiast varjestusse. Selle põhjuseks on mootori pingesignaalide suur pingefrontide tõusukiirus (**du/dt**). Väiksemate sagedusmuundurite puhul võib suur **du/dt** põhjustada olukorra, kus märkimisväärne osa võimsusest hajub kaablis. Probleemi aitavad vähendada **mootoridrosselid, mootorifiltrid ja siinusfiltrid**, mis vähendavad pingefrontide tõusukiirust. Lisaks EMÜ parandamisele pikendab see ka mootori mähiseisolatsiooni tööiga.
- **Siinusfiltrid** muudavad sagedusmuunduri impulssväljundi taas peaaegu siinuskujuliseks tööpingeks. Tänu sellele saab kasutada väga pikki varjestatud mootorikaableid ning lisaks väheneb mootori müra.
- Mootorikaabel tuleb võimaluse korral viia sagedusmuundurist **otse elektrikilbist välja**. See vähendab sisemiste häirete levikut (vt joonis 7/10).
- Mootorikaablile paigaldatud **ferriitrõngas** võib teatud juhtudel vähendada kiirguslikke häireid ning mootorikaabli varjestuses voolavaid lekkevoolusid (vt joonis 7/11).



Joonis 19. Kaablivarjestuse ühendamise viisid

Drosselid



Üldine tehniline teave

Drossel on seade, mis koosneb ühest või mitmest mähisest, mille näivtakistus e impedants sõltub sagedusest, ning töötab eneseinduktsiooni põhimõttel. Mähist läbiv magnetiseeriv vool tekitab magnetvälja, mis sulgub magnetiliselt aktiivse südamikuga või õhu kaudu (viide: EN / IEC 61558-2-20).

Nõuded

Drosselitele kehtivad samad üldised nõuded nagu trafodele, sealhulgas kaitseklass, kaitseaste, isolatsioonimaterjali temperatuuriklass, nimikeskkonnatemperatuur ning muud asjakohased nõuded.

Tavapärastelt ja juhul, kui tellijaga ei ole kokku lepitud teisiti, valmistatakse drosselid põhiisolatsiooniga pingestatud osade ja südamiku vahel.

Vähemalt ühe õhupilu olemasolu tõttu on drosselitel füüsikaseadustest tulenevalt töösagedusel märkimisväärne puistemagnetväli ning akustiline müra, mille sagedus on kaks korda suurem töösagedusest.

Seetõttu tuleb tagada piisav vahekaugus naabruses paiknevatest elektriseadmetest ja ferromagnetilistest materjalidest (näiteks terasest elektrikilbist).

Drosseli dimensioneerimisel on oluline arvestada selle kavandatud kasutusotstarvet madalsageduslikes rakendustes, näiteks:

- võrgudrossel
- silumis-/kommutatsioonidrossel
- filtrialhela drossel
- mootoridrossel
- mootorifilter
- siinusfilter

Standardid

Kui tellijaga ei ole kokku lepitud teisiti, valmistame tooted vastavalt uusimale tehnika tasemele ning järgmistele standarditele:

EN / IEC 61558 – Trafode, toiteallikate ja sarnaste seadmete ohutus (*Safety of power transformers, power supply units and similar*)

- Osa 1: Üldnõuded ja katsed (*General requirements and tests*)
- Osa 2–20: Erinõuded väikedrosselitele (*Particular requirements for small reactors*)

Sageduskarakteristik

Ainult ideaalsed induktiivsused ja õhusüdamikuga poolid võimaldavad eeldada, et induktiivsus ei sõltu sagedusest. Tegelikud induktiivsused ja ferromagnetilise südamikuga drosselid näitavad ka madalsagedusalas suuremal või vähemal määral sagedussõltuvust, mille määrab peamiselt kasutatav südamikumaterjal.

Drosselite tavapärase kasutusala standardite **EN / IEC 61558-2-20** kohaselt on esitatud tabelis.

Kõrgemad harmoonilised põhjustavad drosselis sageduse kasvades eksponentsiaalselt suurenevaid kadusid. BLOCK arvutab need teoreetiliselt ning optimeerib drosseli praktiliseks kasutamiseks.

Tavapärane termiline dimensioneerimine (näiteks võrgudrosseli dimensioneerimine nimivoolule ja nimisagedusele) arvestab üksnes kõigi kõrgemate harmooniliste voolude summast tuleneva lisakoormusega kuni **5%**.

Suurema lisakoormuse korral tuleb suurendada südamiku võimsust.

Selleks peab drosseli termiliseks dimensioneerimiseks olema lisaks nimivoolule ja nimisagedusele (põhiharmooniline) teada ka iga esineva kõrgema harmoonilise voolu efektiivväärtus.

Kriitilistel juhtudel, kui mõne kõrgema harmoonilise vool ületab ligikaudu **10%** põhiharmoonilise voolust, tuleb arvestada ka harmooniliste omavahelist faasinihet.

Drosselite tavapärase kasutusalad standardi kohaldamisalas

Lamineeritud terassüdamikud	Pulberraudsüdamikud	Ferriitsüdamikud
< 3 kHz*	< 250 kHz*	< 1 MHz
Silumis- /kommutatsioonidrossel	Silumis- /kommutatsioonidrossel	Silumis- /kommutatsioonidrossel
Võrgudrossel	Mootoridrossel	Mootoridrossel
Filtri ahela drossel	Mootorifilter	Mootorifilter
Mootoridrossel	Siinusfilter	Siinusfilter
Mootorifilter		
Siinusfilter		

* Efektiivne siinuspingel.

Tolerants

Pingelang (viide: **EN / IEC 61558-2-20**) ei tohi püsirežiimis nimisageduse ja nimivoolu korral erineda nimiväärtusest rohkem kui **25%**.

Eelmagnetiseeritud drosselite ning lisakomponente (näiteks kondensaatoreid, alaldeid jne) sisaldavate drosselite korral ei tohi pingelang erineda nimiväärtusest rohkem kui **30%**.

Drosselite erilahendused, näiteks filtri ahela drosselid, tuleb häälestada väga täpselt ning seetõttu kehtivad neile oluliselt rangemad tolerantsid.

Induktiivsus arvutatakse võrdeliselt nimipingelanguga järgmiselt:

$$L = \Delta U / (2 \pi f I_N)$$

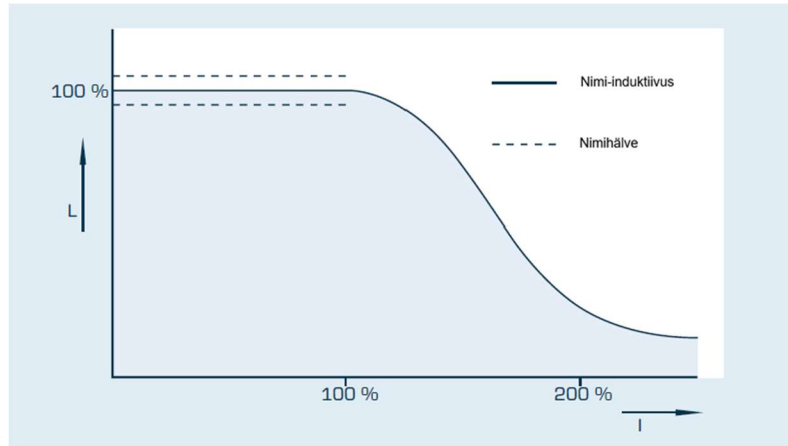
Lineaarsus

Drosseli induktiivsuse lineaarsust saab teatud piirides mõjutada konstruktsioonilise dimensioneerimisega. Tavapärane lahendus, näiteks võrgudrosseli puhul (lineaarse õhupiluga), on kujutatud joonisel A.

Induktiivsus muutub peaaegu lineaarselt kuni nimivooluni (termilise dimensioneerimise piirini) ning hakkab ülekoormusvoolu korral südamiku magnetilise küllastumise tõttu suhteliselt märamatult vähenema.

Üldjuhul on võimalik vältida lineaarsuse vähenemist ülekoormuspiirkonnas ainult südamiku võimsuse suurendamisega.

Kui on nõutav suurem alinduktiivsus kuni ligikaudu **10–20%** nimivoolust, saab selle saavutada mittelineaarse õhupilu abil. Selle lahenduse puuduseks on aga suhteliselt määramatu induktiivsuse karakteristik ning sellest tulenevalt suurem induktiivsuse tolerants.



Joonis 20. Lineaarse õhupiluga võrgudrosseli induktiivsuse tüüpiline sõltuvus voolust

Nimivõimsus

Drosseli nimivõimsus (viide: **EN / IEC 61558-2-20**) on nimisagedusel arvatatud kõigi nimipingelangude ja nimivoolude korrutiste summa.

Reaktiivvõimsus esitatakse ühikutes **kVAR** või **VAR** (volt-amper reaktiivne).

$$W = U \times I \times t = \frac{L \times I^2}{2}$$

kus:

W = energia džaulides e vattsekundites (J)

U = pingelang voltides (V)

I = vool amprites (A)

t = aeg sekundites (s)

L = induktiivsus henrides (H)

Silumis- / kommutatsioonidrosselid

Neid drosseleid kasutatakse sageli elektrienergia salvestamiseks alalisvooluahelates. Südamik on seejuures tavaliselt eelmagnetiseeritud alalisvooluga, millele lisandub erineva lainekuju ja sagedusega vahelduvvool või mida kasutatakse voolu suuna muutmiseks (kommutatsiooniks) jõupooljuhtmuundurites. Selliste drosselite dimensioneerimine sõltub suurel määral konkreetsest lülitusest ja rakendusest.

Võrgudrosselid

Neid drossleid kasutatakse tavaliselt elektrivõrgu ja tarbija vahele jadamisi ühendatuna. Saadaval on nii ühe- kui ka kolmefaasilised võrgudrosselid. Võrgudrossel täidab järgmisi olulisi kaitseülesandeid:

- kõrgemate harmooniliste voolude summutamine tänu induktiivtakistuse sagedussõltuvusele;
- tarbija käivitusvoolu piiramine ning seeläbi komponentide koormuse vähendamine, näiteks alaldiahelates;
- elektrivõrguettevõtete poolt sageli nõutava **4% lühispinge (U_k)** tagamine.

Näide: kolmefaasilises $3 \times 400 \text{ V} / 50 \text{ Hz}$ elektrivõrgus on drosseli nimivoolu (näiteks 4 A) ja nimisageduse (näiteks 50 Hz) korral, kui drosseli $U_k = 4\%$, tarbijale (oomilisele koormusele) kättesaadav **96% võrgupingest**, s.o $3 \times 384 \text{ V}$.

Drosseli nimipingelang igas faasis on:

$$16 \text{ V} \times 1/\sqrt{3} = 9,2 \text{ V}$$

Sellest arvutatakse drosseli niminduktiivsus järgmiselt:

$$L = \Delta U / (2 \pi f I_N)$$

$$= 9,2 \text{ V} / (4 \text{ A} \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \text{ Hz}) = 7,3 \text{ mH faasi kohta.}$$

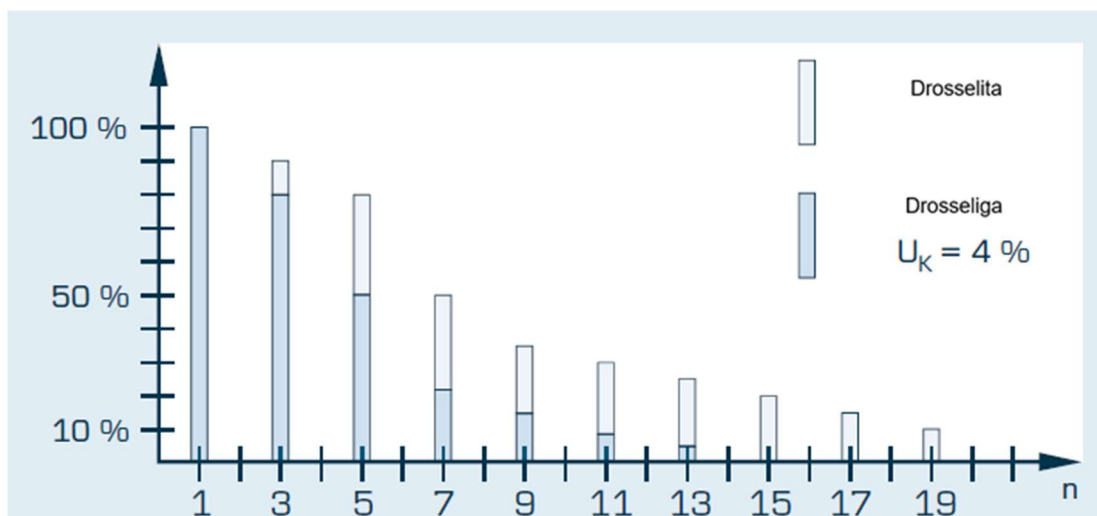
Nimisageduse (põhiharmoonilise) korral arvutatakse induktiivtakistus järgmiselt:

$$X_L = 2 \pi f L_N$$

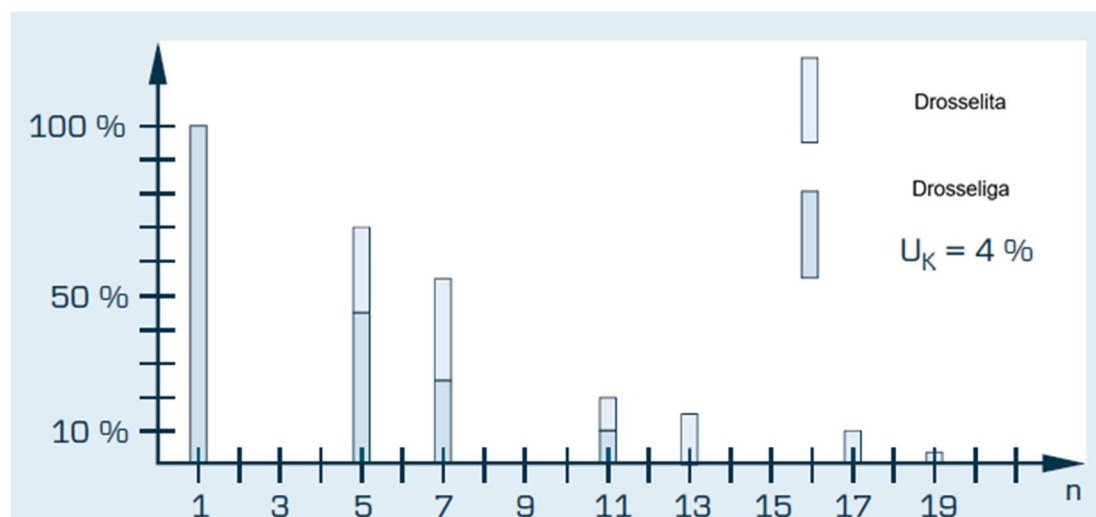
$$X_L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 7,3 \text{ mH} = 2,3 \Omega \text{ faasi kohta.}$$

Idealiseeritud käsitluse kohaselt vähenevad kõrgemate harmooniliste voolud võrreldes põhiharmoonilisega (1. harmooniline = 50 Hz) vastavalt harmoonilise järgule (näiteks 3. harmooniline = 150 Hz , järk = 3).

Selle juures tuleb siiski arvestada drosselite peatükis sageduskarakteristiku kohta toodud selgitustega.



Joonis 21. Drosseli tüüpiline mõju alalisvoolu vahelüluga ühefaasilise tarbija harmooniliste osakaalule



Joonis 22. Drosseli tüüpiline mõju alalisvoolu vahelüluga 3faasilise tarbija harmooniliste osakaalule

Tänapäeval kasutatakse elektrivõrkudes üha enam alaldeid ja sagedusmuundureid. Need tekitavad võrku kõrgemaid harmoonilisi, mis põhjustavad täiendavaid kadusid eelkõige reaktiivvõimsuse kompensatsiooniseadmete kondensaatorites.

Filtriühela drosselite kasutamine pakub muu hulgas järgmisi eeliseid:

- väiksemad kaod ning reaktiivvõimsuse kompensatsiooniseadme kondensaatorite ülekoormuse vältimine;
- elektrivõrgu impedantsiomaduste parandamine.

Filtriühela drosselid nõuavad töökindla ja pikaajalise kasutamise tagamiseks eridimensioneerimist:

- väiksem induktiivsuse tolerant;
- lineaarne induktiivsuse karakteristik märgatavalt üle nimivoolu ning ka kõrgemate harmooniliste korral;
- termiline dimensioneerimine pidevaks tööks nii võrgusagedusel kui ka kõrgemate harmooniliste juures.

Kondensaatoritega ühendatakse filtrialhela drosselid peaaegu alati kolmefaasilise jadalülitusena, mistõttu nende mõju ulatub kogu kolmefaasilisele elektrivõrgule.

Filtrialhela drosselid reaktiivvõimsuse kompensatsiooniseadmetele



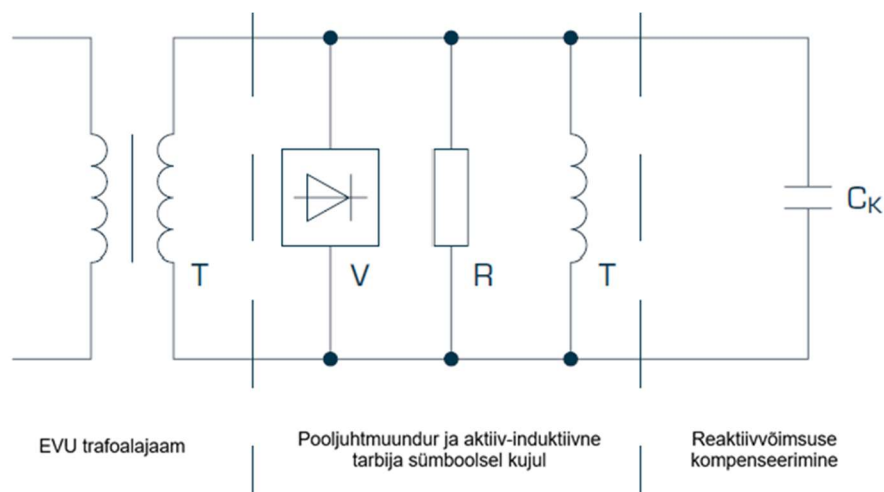
Induktiivsete tarbijate, nagu elektrimootorite, trafode ja luminofoorlampide, ökonoomne töö on võimalik ainult sobivate reaktiivvõimsuse kompenseerimise meetmete rakendamisel.

Induktiivsete tarbijate reaktiivvoolu kompenseerib mahtuvuslik reaktiivvool. Sellega on võimalik viia võimsustegur soovitatavale tasemele **$\cos \varphi = 0,9$ (induktiivne) kuni 1**.

Lisaks vähenevad reaktiivenergia kulud ning koormus elektrienergia võrguettevõtjate (EVU-de) elektrivõrkudele.

Tavaline reaktiivvõimsuse kompenseerimine

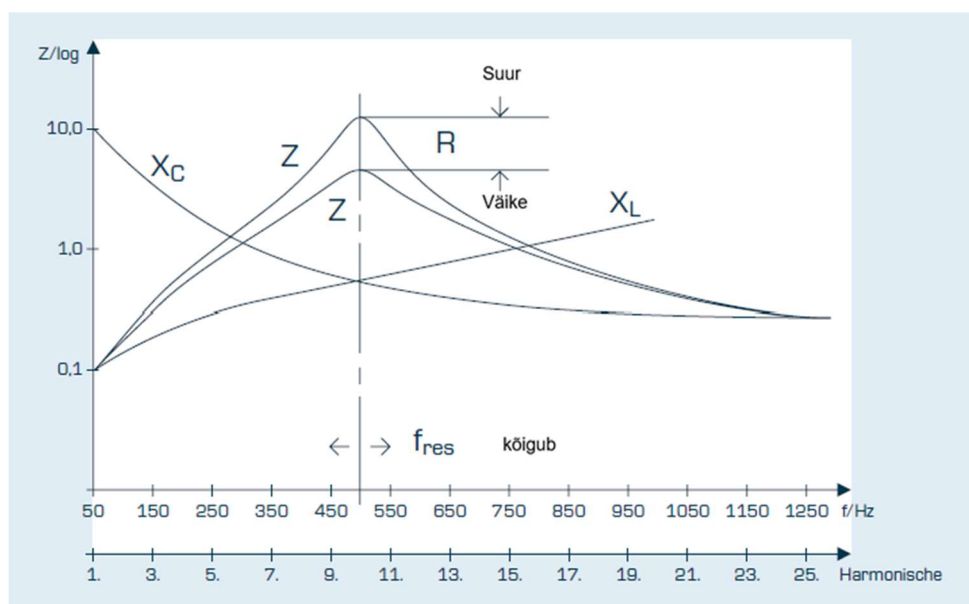
Joonis kujutab reaktiivvõimsuse kompensatsioonisüsteemi põhimõttelist üleshitust elektrivõrgus, mis on koormatud kõrgemate harmoonilistega.



Joonis 23. Reaktiivvõimsuse kompensatsioonisüsteemi põhimõtteline ülesehitus elektrivõrgus

Kõrgemad harmoonilised tekivad tarbija **V** toimel. Juba suhteliselt väike kõrgemate harmooniliste sisaldus põhjustab lisakadusid juhtmetes, trafodes, lülitusseadmetes ning eriti kriitiliselt reaktiivvõimsuse kompensatsioonikondensaatorites.

Lisaks muutub elektrivõrgu impedants määramatuks. Järgnev joonis kujutab elektrivõrgu tüüpilist impedantsikarakteristikut.



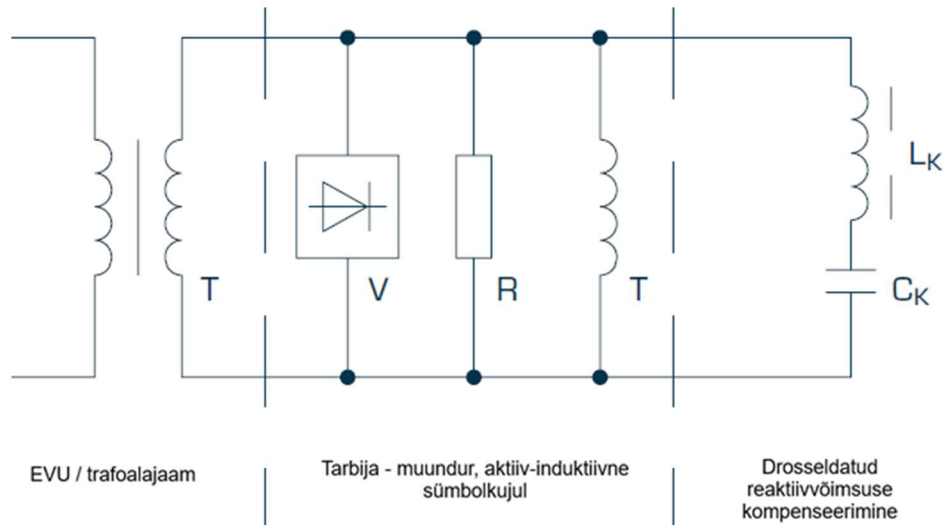
Joonis 24. Elektrivõrgu näivtakistuse e impedantsi tüüpiline sagedustunnusjoon

Sõltuvalt koormusest ning olemasoleva paralleelse resonantsahela mõjust, mis koosneb kõigi induktiivsuste summast ja reaktiivvõimsuse kompensatsioonikondensaatorist, võivad tekkida resonantsi võimendumised.

Tekkinud resonantssagedus võib muutuda ning koos võrku tekitatud kõrgemate harmoonilistega põhjustada vaadeldava elektrivõrgu üksikute komponentide kahjustumise või hävimise.

Drosselitega reaktiivvõimsuse kompenseerimine

Järgmine joonis kujutab drosselitega reaktiivvõimsuse kompensatsioonisüsteemi põhimõttelist ülesehitust.



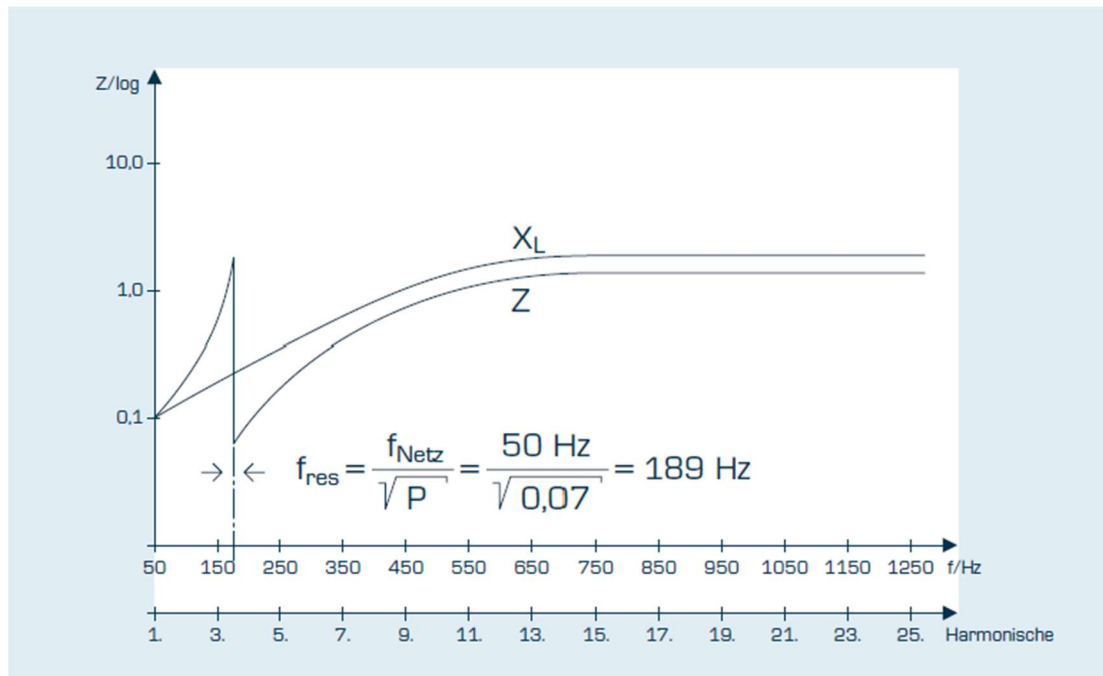
Joonis 25. Drosselitega reaktiivvõimsuse kompensatsioonisüsteemi põhimõtteline ehitus

Filtri ahela drosseli L_K ühendamise jadamisega reaktiivvõimsuse kompensatsiooni kondensaatori C_K -ga loob elektrivõrgus määratletumad töötingimused.

Üldjuhul muutub drosselite kasutamine hädavajalikuks siis, kui kõrgemaid harmoonilisi tekitavate tarbijate näivvõimsus ületab **1/5 toitetrafo nimivõimsusest**.

Seades jada-resonantsahela (L_K , C_K) resonantssageduse sobivale, mittekriitilisele väärtusele, välditakse määramatu resonantsi võimendumisi ning kaitstakse reaktiivvõimsuse kompensatsioonikondensaatorit, mis on eriti tundlik kõrgsageduslike kõrgemate harmooniliste suhtes.

Järgmine joonis näitab elektrivõrgu tüüpilist impedantsikarakteristikut kõige sagedamini kasutatava **7% drosseldamise ($p = 0,07$)** korral.



Joonis 26. Elektrivõrgu tüüpiline impedantsikarakteristik kõige sagedamini kasutatava 7% drosseldamise ($p = 0,07$) korral

Drosseldustegurit p väljendatakse reaktiivtakistuste suhtena:

$$p = \frac{X_{LK}}{X_{CK}}$$

Jadaresonantsahela resonantssagedus on:

$$f_{res} = \frac{f_{Netz}}{\sqrt{p}} \text{ (Hz)}$$

50 Hz elektrivõrgus on resonantssagedus seega **189 Hz**.

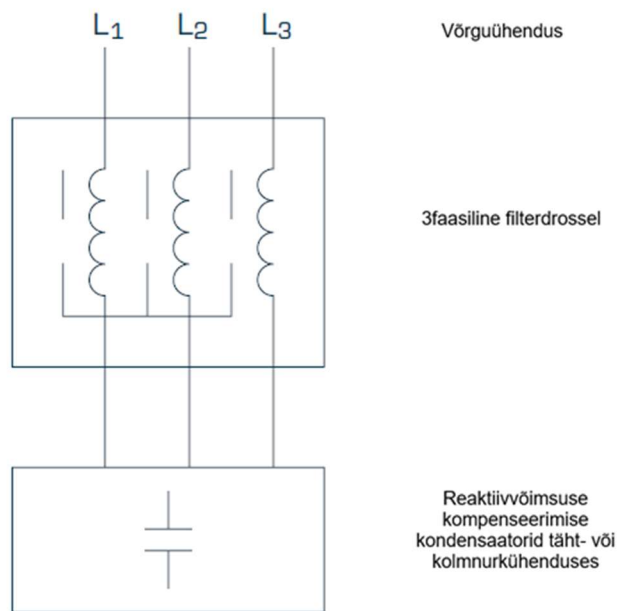
Seda resonantssagedust peetakse ohutuks, sest ühelt poolt on see oluliselt kõrgem võrgu põhisagedusest **50 Hz**, kuid teiselt poolt madalam kõrgemaid harmoonilisi tekitavate tarbijate põhisagedusest ning elektrivõrguettevõtjate (EVU-de) toonjuhtimissüsteemide sagedusest.

Süsteemi sobivus tuleb siiski igal konkreetsel juhul kooskõlastada kohaliku elektrivõrguettevõtjaga (EVU).

Sellises rakenduses peavad filtri ahela drosselid vastama mitmele erinõudele, näiteks:

- väike induktiivsuse tolerant;
- induktiivsus peab jääma lineaarseks ka nimivoolust oluliselt suuremate voolude korral;
- induktiivsus peab olema lineaarne ka kõrgemate harmooniliste korral;
- terminaalne dimensioneerimine peab tagama pideva töö nii võrgu põhisagedusel kui ka kõrgemate harmooniliste olemasolul.

Filtri ahela drosseleid kasutatakse peaaegu eranditult kolmefaasilisena.



Joonis 27. Reaktiivvõimsuse kompensaator filtrialhela drosseliga

Reguleeritavates reaktiivvõimsuse kompensatsiooniseadmetes tuleb **iga kondensaatorigrupi juurde paigaldada sellele vastavalt dimensioneeritud filtrialhela drossel**.