

Maanduspaigaldiste ehitus

Rein Oidram

Tallinna Tehnikaülikool

Elektroenergeetika instituut

Tallinn

2005

MAANDUSPAIGALDISED

EVS-HD637S1:2002 alusel

Maanduspaigaldiste projekteerimise, paigaldamise, testimise ja hooldamise nõuded esitab **EVS-HD637S1:2002**, mille kohaselt peab olema tagatud:

- paigaldiste talitus igasugustes oludes,
- inimeste ohutus igas paigas, kuhu neil on ametlik õigus pääseda,
- maanduspaigaldistega ühendatud seadmete terviklikkus.

Maandusi liigitatakse:

- kaitsemaandus**

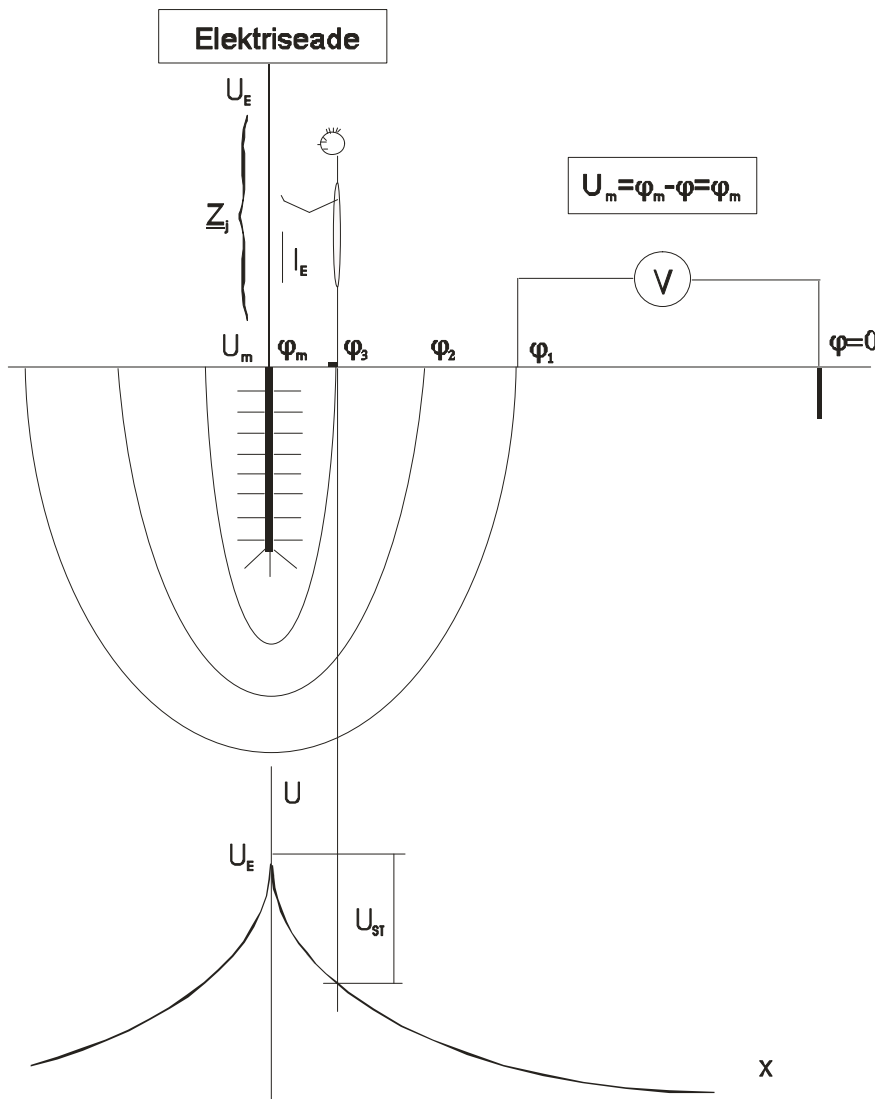
Pingestamiseks mitte ettenähtud juhtiva osa maandamine inimeste kaitseks elektrilöögi eest

- talitusmaandus, võrgumaandus**

Elektrivõrgu mingi punkti maandamine, mis on vajalik seadmete või alajaamade nõuetekohase talitluse tagamiseks

- piksekaitsemaandus**

Maandus, mis on vajalik välguvoolu hajutamiseks maasse



- Lihtsaim maanduspaigaldis koosneb ühest elektroodist (vertikaalsest või horisontaalsest) ja maandusjuhust.
- Elektrivoolu voolamisel maasse tekib voolu valgumisala, vool valgub maasse **maanduselektroodilt (maandurilt)**.
- Maanduspaigaldisest kaugel on **nullpotentsiaaliala**.
- Maandurile lähenemisel maapinna potentsiaal tõuseb, kuni kasvab potentsiaalini φ_m maanduril. Sellele potentsiaalile vastab pinge maanduril U_m .
- valgumisalale vastab **valgumistakistus**

$$R_E = \frac{U_m}{I_E}$$

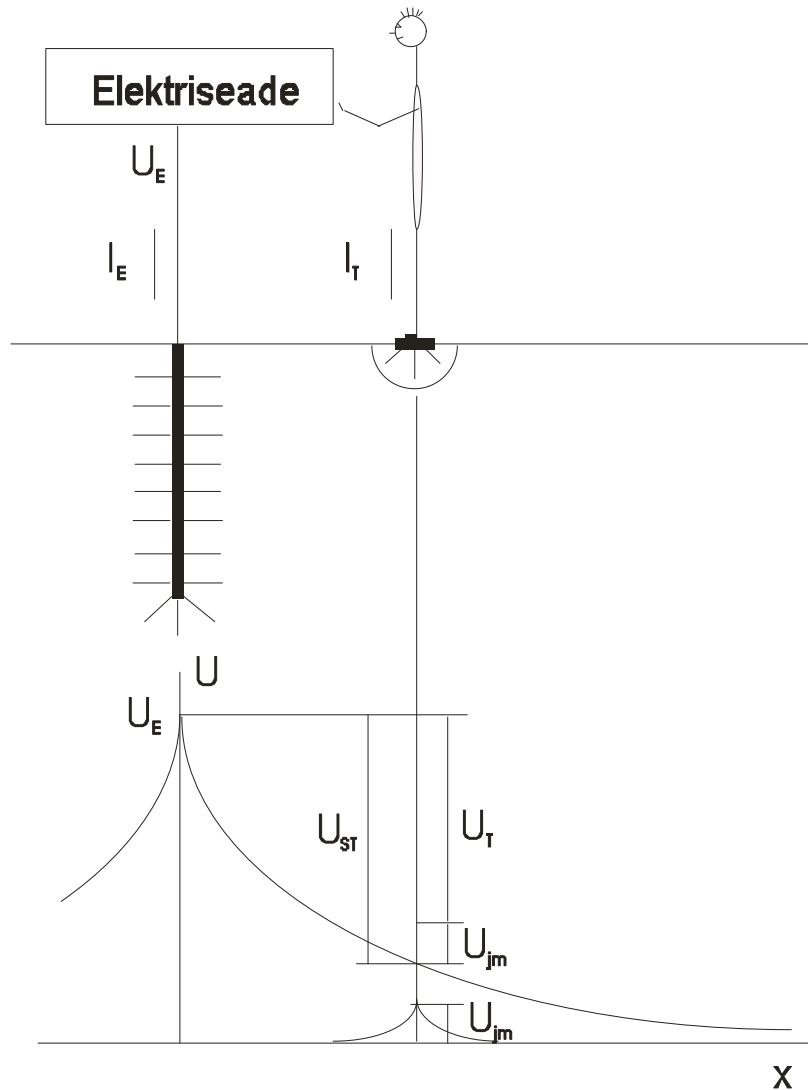
- Valgumistakistusele lisandub voolu teekonnal **maandusjuhi** takistus \underline{Z}_j .
Maandusahela **maandus-näivtakistus**, e lühemalt **maandustakistus** on

$$\underline{Z}_E = \underline{Z}_j + R_E$$

- Maandusvoolu \underline{I}_E mõjul tekib sellel takistusel **maanduspinge** \underline{U}_E

$$\underline{U}_E = \underline{I}_E \underline{Z}_E$$

- Kui inimene ei puuduta elektriseadet, siis omandab ta selle maapinnapunkti potentsiaali, millel ta seisab. Selle punkti ja elektriseadme kere (pingealdis juhtiva osa) vahel on pinge U_{ST} , mida nimetatakse **arvutuslikuks puute-pingeks** e **puute-eelseks pingeks**.



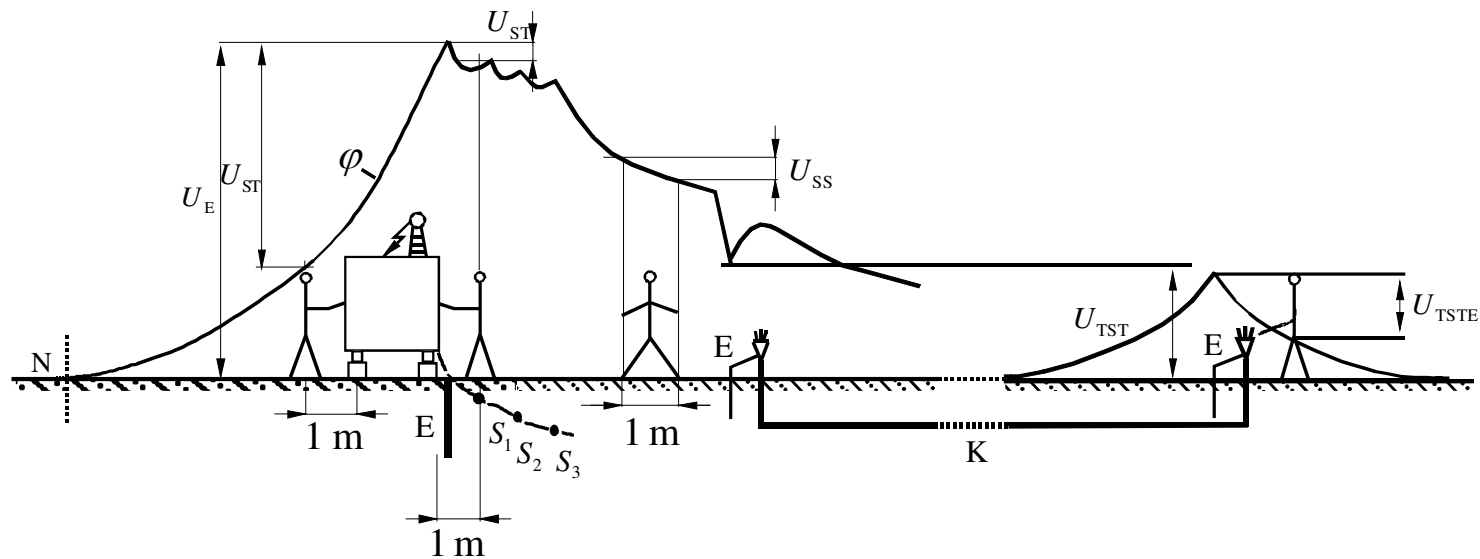
- Kui inimene puudutab riknenud isolatsiooniga elektriseadme keret, siis pinge U_{ST} mõjul läbib tema keha vool I_T . Voolu mõjul tekib jalgade alla voolu valgumisala, millel tekib pingelang U_{jm} . Tegelik pinge, mille alla inimene satub, on

$$U_T = U_{ST} - U_{jm}$$

See pinge on **puutepinge**.

- Puutepinge ja puute-eelse pinge vahel on seos

$$U_T = U_{ST} \frac{R_T}{R_T + R_{jm}}$$



E maandur, K kaabel, mille metallmantel on kogu pikkuses isoleeritud, kuid mõlemas otsas pingevaldis ja alajaamas maandatud, N oluliselt kaugel nullpotentsiaaliala, S_1 , S_2 , S_3 potentsiaalitasanduselektroodid (nt põhimaanduri külge ühendatud rõngaselektroodid), U_E maanduspinge, U_{SS} arvutuslik sammupinge, U_{ST} arvutuslik puutepinge (vasakul potentsiaalitasanduseta, paremal potentsiaalitasanduse kasutamisel), U_{TST} arvutuslik kandunud puutepinge, kui kaabli mantel on kaugemas otsas maandamata, U_{TSTE} arvutuslik kandunud puutepinge, kui kaabli mantel on mõlemas otsas maandatud, φ maapinna potentsiaal

EVS-HD637S1:2002

Maanduspaigaldisi käsitleb standardi 9. peatükk. Standardi kohaselt maanduspaigaldise kujundus peab vastama neljale nõudele:

- tagama mehaanilise tugevuse ja korrosioonikindluse,
- termiliselt vastu pidama suurimale maaühendusvoolule (selle nõude täitmist kontrollitakse tavaliselt arvutuslikul teel),
- ära hoidma vara ja seadmete kahjustumise,
- tagama inimeste ohutuse, arvestades maanduspaigaldistes suurima maaühendusvoolu kestel tekkivaid pingeid.

Kolm esimest nõuet määravad maanduspaigaldise põhilahenduse. Seda lahendust tuleb kontrollida puutepingetele ja seejärel võib seda käsitleda kui tüüplahendust, mis sobib kasutamiseks ka muudel samasugustel juhtudel.

✧ **Dimensioneerimine mehaanilise tugevuse ja korrosioonikindluse järgi**

•**Maanduselektroodid**

Pinnasega vahetult kokkupuutuvad maanduselektroodid peavad olema materjalist, mis on võimeline vastu pidama korrosioonile (keemilisele või bioloogilisele agressioonile, oksüdeerumisele, galvaaniliste paaride tekkele, elektrolüüsile jne). Maanduselektroodid peavad vastu pidama nii nende paigaldamise ajal kui ka tavatalitlusel esinevatele mehaanilistele jõududele. Maanduspaigaldise ühe osana võib kasutada betoon-vundamentidesse paigutatud terast, terasvaiasid või muid loomulikke maandureid.

Peamised maanduselektroodi materjalid on teras ja vask.

•**Maandusjuhid**

Mehaanilise tugevuse ja korrosioonikindluse tagamiseks peavad maandusjuhtide ristlõiked olema vähemalt järgmised:

- vase puhul 16 mm^2 ,
- alumiiniumi puhul 35 mm^2 ,
- terase puhul 50 mm^2 .

✧ **Dimensioneerimine termilise tugevuse järgi**

- Maandusjuhtide ja maanduselektroodide dimensioneerimisel tuleb lähtuda standardis esitatud vooludest (vt tabel järgmisel slaidil).
 - Mõnikord tuleb maandusjuhtide ja maanduselektroodide dimensioneerimisel arvestada ka kestvaid nulljärgnevusvoolusid.
 - Projekteerimisel tuleb juhi mõõtmete määramisel silmas pidada arvutuslike voolude edaspidise suurenemise võimalust.
- Sageli jaguneb maaiühendusvool maanduri üksikelektroodide vahel ja seega võib iga üksikelektroodi mõõtmed määrata maaiühendusvoolu vastava osa järgi.
- Projekteerimisel tuleb silmas pidada lõpptemperatuure, et vältida materjali tugevuse vähenemist ja materjali ümbruse (nt betooni või isoleermaterjalide) kahjustusi. EVS-HD 637 S1 ei normi maandureid ümbritseva pinnase lubatavat temperatuuritõusu, kuna kogemus näitab, et pinnase temperatuuri tõus on tavaliselt tähtsusetu.

Maanduspaigaldiste projekteerimisel kasutatavad voolud

Kõrgepingevõrgu liik			Termilise toime järgi		Maanduspinge ja puutepinge järgi
			Maandus-elektrood	Maandus-juht	
Isoleeritud neutraaliga võrgud			–	I''_{kEE}	$I_E = r I_C$
Resonants-maandatud võrgud	Maandusreaktoritega alajaamad		–	I''_{kEE}	$I_E = r \sqrt{I_L^2 + I_{res}^2}$
	Maandusreaktoriteta alajaamad				$I_E = r I_{res}$
Väikese näivtakistuse kaudu maandatud neutraaliga võrgud			I''_{k1}	I''_{k1}	I_E
Resonants-maandatud, ajutiselt väikese näivtakistuse kaudu maandatud neutraaliga võrgud	Alajaamades, kus neutraal maandatakse ajutiselt		I''_{k1}	I''_{k1}	I_E
	Kõigis muudes alajaamades	maandusreaktoritega	–	I''_{kEE}	$I_E = r \sqrt{I_L^2 + I_{res}^2}$
		maandusreaktoriteta			$I_E = r I_{res}$

Tähised tabeli juurde:

- I_C - arvutatud või mõõdetud mahtuvuslik maaihendusvool
- I_{res} - maaihenduse jääkvool; kui selle täpne väärtus ei ole teada, võib aluseks võtta voolu $0,1 I_C$
- I_L - vaadeldava alajaama rööbiti ühendatud maandusreaktorite nimivoolude summa
- I''_{kEE} - HD 533 järgi arvutatud kaksikmaalühisvool (I''_{kEE} suurima väärtusena võib kasutada kolmefaasilise lühisvoolu perioodilise komponendi 0,85-kordset algväärtust)
- I''_{k1} - HD 533 järgi arvutatud ühefaasilise lühisvoolu perioodilise komponendi algväärtus
- I_E - maandusvool
- r - vähendustegur; kui alajaamast väljuvatel õhu- ja kaabelliinidel on vähendustegurid erisugused, tuleb arvutuslik vool leida standardi lisa N juhiste järgi, s.t iga liini vähendustegurit ja liini faasijuhi nulljärgnevusvoolu tuleb arvestada eraldi

★ Õhuliinide piksetrosse ja maakaablite metallkatted arvestavad vähendustegurid

Õhuliinide piksetrossid ja maakaablite metallkatted osalevad maaihendusvoolude maassejuhtimises. Tänu sellele toimib kõrgepingepaigaldise maandussüsteem maaihendusel efektiivsemalt.

Kolmefaasilise õhuliini piksetrossi arvestav vähendustegur r on maandusvoolu ja kolmefaasilise ahela nulljärgnevusvoolude summa jagatis

$$r = \frac{I_E}{3I_0} = \frac{3I_0 - I_{EW}}{3I_0},$$

kus I_{EW} vool piksetrossis (võrgu püsiseisundis),

I_E maandusvool,

$3I_0$ nulljärgnevusvoolude summa.

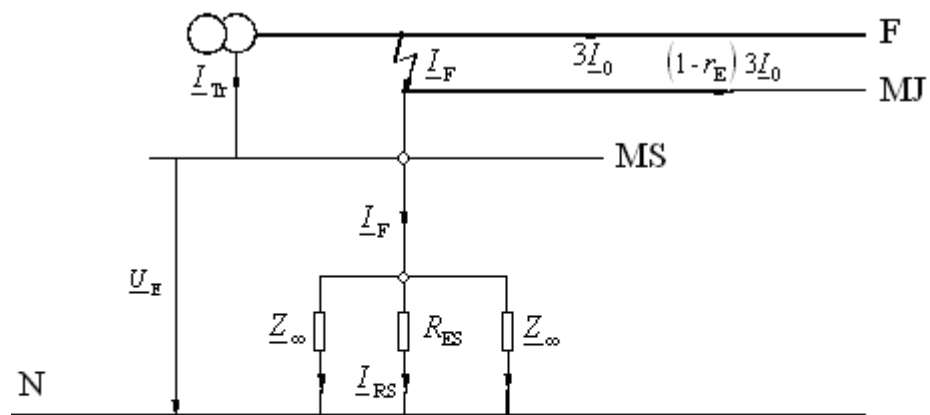
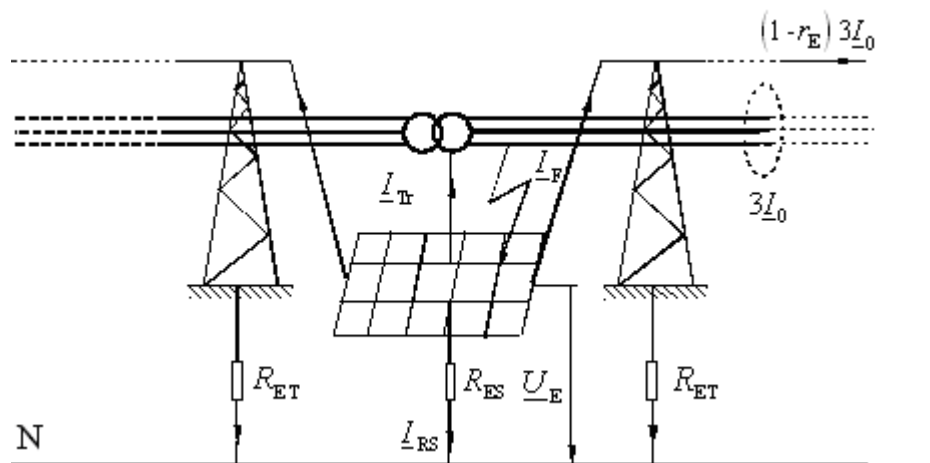
Samasugune määratlus kehtib metallmantli, -varje ja -soomusega maakaablite ning nende ümbris-terastorude kohta, kui piksetrossi vool I_{EW} asendada metallmantlis, -varjes ja -soomuses kulgeva vooluga.

Õhuliini voolude sümmeetria korral võib piksetrossi vähendusteguri arvutada lähtudes faasijuhtme näivtakistusest Z_{L-E} , piksetrossi näivtakistusest Z_{EW-E} ja faasijuhtmete ning piksetrossi vahelisest näivtakistusest Z_{ML-EW} valemiga

$$r = \frac{Z_{EW-E} - Z_{ML-EW}}{Z_{EW-E}} = 1 - \frac{Z_{ML-EW}}{Z_{EW-E}} .$$

Näivtakistuse Z_{ML-EW} väärtust mõjutab kõige enam faasijuhtide ja piksetrossi vaheline keskmine kaugus, näivtakistuse Z_{EW-E} väärtust aga piksetrossi takistus. Piksetrossi vähendav toime suureneb (r väärtus väheneb) seetõttu faasijuhtide ja piksetrossi väiksemate vahekauguste ja piksetrossi väiksemate takistuste korral.

Näide: Maaihendus maandatud neutraaliga trafoalajaamas

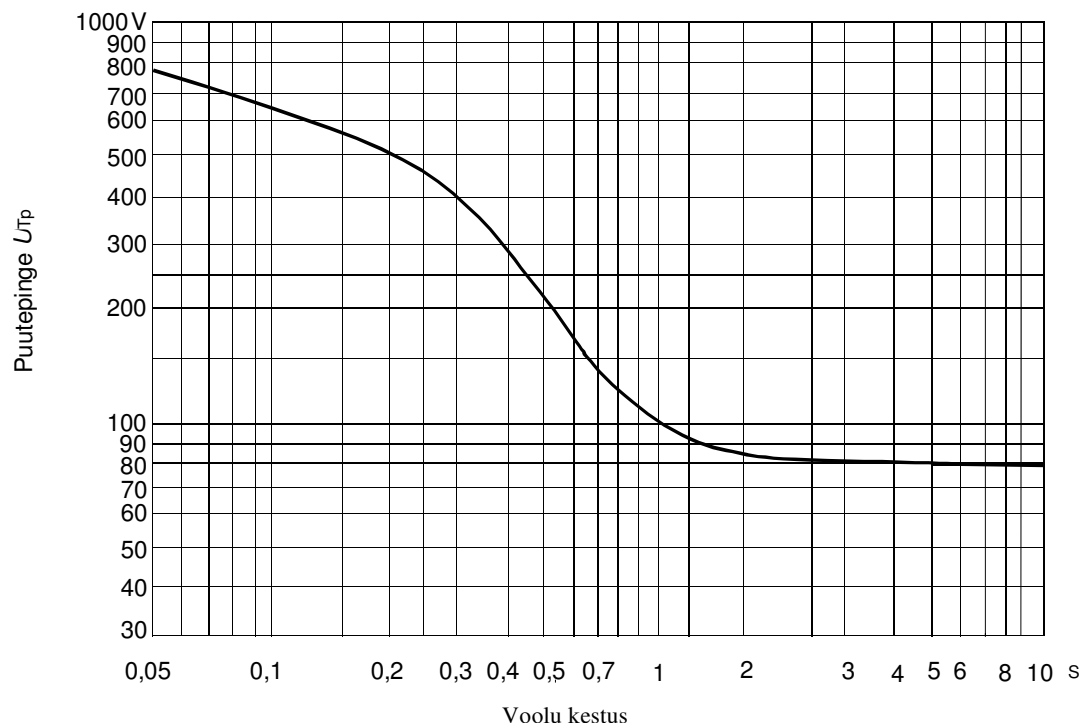


$$\begin{aligned} \underline{I}_F &= 3\underline{I}_0 + \underline{I}_{Tr} \\ \underline{I}_E &= r_E (\underline{I}_F - \underline{I}_{Tr}) & \underline{Z}_E &= \frac{1}{\frac{1}{R_{ES}} + n \frac{1}{Z_\infty}} \\ \underline{U}_E &= \underline{I}_E \underline{Z}_E \end{aligned}$$

✧ Dimensioneerimine puute- ja sammupinge järgi

•Puutepinge lubatavad väärtused

Maandus peab tagama olukorra, kus elektripaigaldises puutepinge ei ületaks lubatud puutepinget U_{Tp} . Joonisel esitatud kõver kehtib maaiühenduse puhul kõrgepingevõrgus. Kui voolu kestus on palju suurem kui joonisel esitatud, võib U_{Tp} väärtuseks võtta 75 V.



Märkus: Eesti varem väljakuunenud oludes võib maaiühenduse kestus küündida mõne tunnini ja isegi mõne ööpäevani. Sellistes paigaldistes tuleb HD637S1 nõuetest erinevalt juhinduda kestva maanduspinge lubatavast väärtusest eeskirja EEI 3-4 joonise 44 A järgi (67 V).

Puutepinge suurust mõjutab maanduspinge U_E . Seose sellega normib standard EVS-HD 637 S1 üle 1000 V elektripaigaldiste maandustele enimalt lubatava maanduspinge, mille väärtus sõltub madalpingevõrgust. Kui madalpingevõrk on Eestis levinud TN-süsteemis, siis juhul, kui madalpingevõrgu PEN-juht ja kõrgepingevõrgu maanduspaigaldis on kokku ühendatud ainult alajaamas, lubatakse

$$U_E \leq U_{Tp}.$$

Kui madalpingevõrgu PEN-juht on maaga ühendatud mitmes punktis eesmärgiga vähendada neutraalile toimivat pinget, siis

$$U_E \leq X * U_{Tp},$$

kus tavaliselt $X = 2$.

Maanduspaigaldise parameetrid määratakse standardi kohaselt järgmiste suuruste alusel:

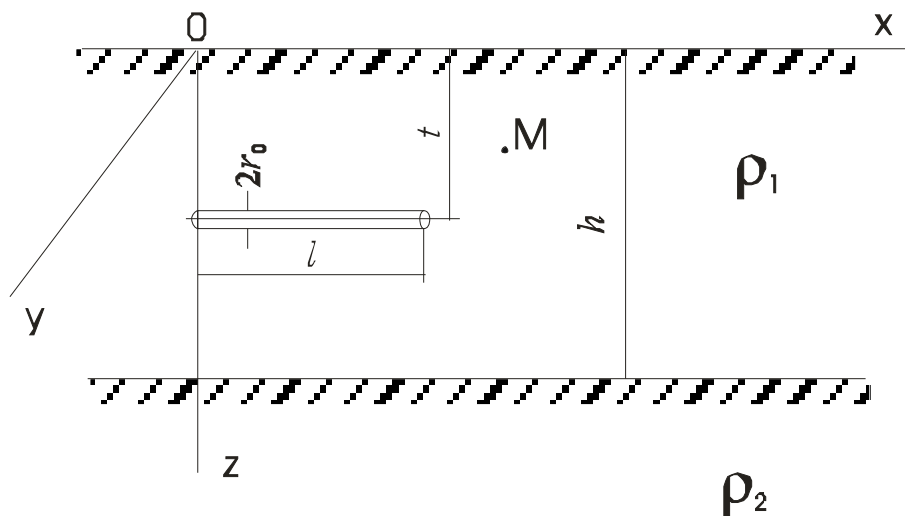
- ✧ maaihendusvoolu väärtus,
- ✧ maaihenduse kestus,
- ✧ pinnase omadused.

Esimesed kaks suurust sõltuvad peamiselt kõrgepingevõrgu neutraali maandamisviisist.

Maanduspaigaldise maanduspinget ja puutepingeid võib arvutada olemasolevate andmete (pinnase eritakistuse, olemasolevate maanduspaigaldiste maandusimpedantsi) põhjal. Arvutustel võib arvesse võtta kõiki maanduselektroode ja teisi maanduspaigaldisi, mis on vaadeldava maanduspaigaldisega töökindlalt ühendatud ja mis taluvad piisavalt suurt voolu. Eriti kehtib see õhuliinide piksetrosside, pinnasesse süvistatud juhtide ja maanduritoimega kaablite kohta. See kehtib ka selliste maanduspaigaldiste kohta, mis on ühendatud vaadeldava maanduspaigaldisega kaablimantlite, -varjete ja PEN-juhtide kaudu või muul viisil.

Maanduri valgumistakistuse arvutamine

- Maanduri valgumistakistus R_E sõltub pinnase eritakistusest, maanduri mõõtmetest (peamiselt pikkusest, vähemal määral ka ristlõikest) ning asetusest pinnases.
- Standardis on toodud arvutusvalemid mõne lihtsama juhtumi jaoks, nt võrkelektrood või vertikaalelektrood ühtlases pinnases.
- Eesti pinnaseid tuleb tavaliselt arvutada vähemalt kahekihilise pinnase mudeli abil ja arvutused muutuvad kiiresti keerukaks.



Näide rõhtelektroodi arvutamisest kahekihilises pinnases:

- **valgumistakistus**

$$R_h = \frac{\rho_1}{4\pi l} \left\{ 2 \ln \frac{l}{r_0} + \ln \frac{0,5l + \sqrt{(0,5l)^2 + (2t)^2}}{-0,5l + \sqrt{(0,5l)^2 + (2t)^2}} + \right. \\ \left. + \sum_{n=1}^{\infty} k_{2,1}^n \left[\ln \frac{(0,5l + \sqrt{(0,5l)^2 + (2nh+2t)^2})(0,5l + \sqrt{(0,5l)^2 + (2nh-2t)^2})}{(-0,5l + \sqrt{(0,5l)^2 + (2nh+2t)^2})(-0,5l + \sqrt{(0,5l)^2 + (2nh-2t)^2})} + \right. \right. \\ \left. \left. + 2 \ln \frac{0,5l + \sqrt{(0,5l)^2 + (2nh)^2}}{-0,5l + \sqrt{(0,5l)^2 + (2nh)^2}} \right] \right\}$$

- **punkti M potentsiaal.** Selle alusel saab arvutada potentsiaali ja pinge maapinnal (vt. järgmine slaid)

Maanduspaigaldise täpne arvutamine on sageli jõukohane vaid spetsialiseeritud arvutiprogrammidele.

$$\begin{aligned}
\varphi(M) = \frac{I_k^{(1)} \rho_1}{4\pi l} & \left\{ \ln \frac{\left(l - x_M + \sqrt{(l - x_M)^2 + y_M^2 + (z_M - t)^2} \right)^*}{\left(-x_M + \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + (z_M - t)^2} \right)^*} \rightarrow \right. \\
& \rightarrow \frac{* \left(l - x_M + \sqrt{(l - x_M)^2 + y_M^2 + (z_M + t)^2} \right)}{* \left(-x_M + \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + (z_M + t)^2} \right)} + \\
& + \sum_{n=1}^{\infty} k_{2,1}^n \left[\ln \frac{\left(l - x_M + \sqrt{(l - x_M)^2 + y_M^2 + (2nh + z_M - t)^2} \right)^*}{\left(-x_M + \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + (2nh + z_M - t)^2} \right)^*} \rightarrow \right. \\
& \rightarrow \frac{* \left(l - x_M + \sqrt{(l - x_M)^2 + y_M^2 + (2nh + z_M + t)^2} \right)}{* \left(-x_M + \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + (2nh + z_M + t)^2} \right)} + \\
& + \ln \frac{\left(l - x_M + \sqrt{(l - x_M)^2 + y_M^2 + (2nh - z_M + t)^2} \right)^*}{\left(-x_M + \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + (2nh - z_M + t)^2} \right)^*} \rightarrow \\
& \left. \rightarrow \frac{* \left(l - x_M + \sqrt{(l - x_M)^2 + y_M^2 + (2nh - z_M - t)^2} \right)}{* \left(-x_M + \sqrt{x_M^2 + y_M^2 + (2nh - z_M - t)^2} \right)} \right] \Bigg\}.
\end{aligned}$$

Maandurite ja maandusjuhtide paigaldamine

Enamasti koosneb maanduspaigaldis pinnasesse kaevatud või sellesse surutud mitmest üksikust rõht-, püst- või kaldelektroodist.

Pinnase eritakistuse vähendamist kemikaalide abil ei soovitata.

Rõhtelektroodid tuleb tavaliselt paigutada pinnasesse 0,5 kuni 1 m sügavusele, mis tagab piisava mehaanilise kaitse. On soovitatav, et maanduselektrood paikneks allpool pinnase külmumispiiri.

Pinnasesse surutud püstvarraste puhul paikneb iga varda ülemine ots tavaliselt allpool maapinda. Püst- või kaldvardad on eriti otstarbekad, kui pinnase eritakistus sügavuse suurenemisel väheneb.

Standardi kohaselt maandatud metall-ehitustarindeid, mis kujutavad endast konstruktiivset tervikut, võib kasutada vahetult nende külge kinnitatud maandatavate osade maandusjuhina. Seejuures peab kogu tarind olema piisava juhtiva ristlõikega ning tarindi liited peavad olema nii juhtivuse poolest kui ka mehaaniliselt töökindlad. Tuleb tagada, et sellise tarindi mingit osa ei saaks maanduspaigaldisest ajutiste lahtivõtutööde korral eraldada. Suured tarindid tuleb maanduspaigaldisega kokku ühendada piisavalt paljudes kohtades.

ÕHULIINIDE MAANDUSPAIGALDISED

EN 50341-1:2001 alusel

Maanduspaigaldisi käsitleb 6. peatükk ning normatiivlisa G ja tabelisa H Kuues peatükk esitab maanduspaigaldise projekteerimise, paigaldamise ja katsetamise kriteeriumid, mis peavad tagama paigaldise talitluse igasugustes oludes ning sammu- ja puutepinge vastuvõetaval tasemel.

Maanduspaigaldiste vajalikkus sõltub liini projektist, mastide tüübist ja kohalikest tingimustest.

Üldiselt erineb EN 50431 maanduste osa üsna vähe EVS-HD637' st. Siin on toodud ainult spetsiifilised, ainult õhuliine puudutavad seisukohad.

Mastide maandamisest:

Juhtivast materjalist mastid on põhimõtteliselt maandatud oma vundamendi kaudu (ka pinnasesse kaevatud mast ise võib olla elektroodiks), kuid maandamisel võivad vajalikuks osutuda täiendavad meetmed.

Mittejuhtivast materjalist maste ei ole vaja maandada.

Juhul, kui elektriliin on kogu pikkuses varustatud piksekaitsetrossidega, peab maandustakistuse määramisel arvestama kaitsetrosside mõjuga.

Märkus: Maanduspaigaldise ühe osana võib kasutada betoonvundamentide terrassarruseid ja terasvaiasid.

Nõuded maanduritele ja maandusjuhtidele on samad, lisaks on märkus:

Märkus: Ka komposiitjuhtmeid võib maandamiseks kasutada, kui nende takistus vastab toodud näidetele. Alumiiniumi puhul peab arvestama korrosiooni mõjudega. Terasest maandus- ja ühendusjuhtmed nõuavad korrosioonikaitset.

Termilise tugevuse järgi dimensioonimiseks vajalikud lühisvoolud on määratud rohkem elektrivõrgu kui õhuliiniga ja vastavad lühisvoolu väärtused peab andma elektrivõrgu ettevõtte.

Enimalt lubatud puutepingete määramine toimub analoogselt EVS-HD'ga on aga öeldud, et enimalt lubatud puutepingete väärtused ja arvutusmeetodid peavad olema sätestatud ka siseriiklikes erinõuetes SEN või projekti lähteülesande erinõuetes (spetsifikatsioonis).

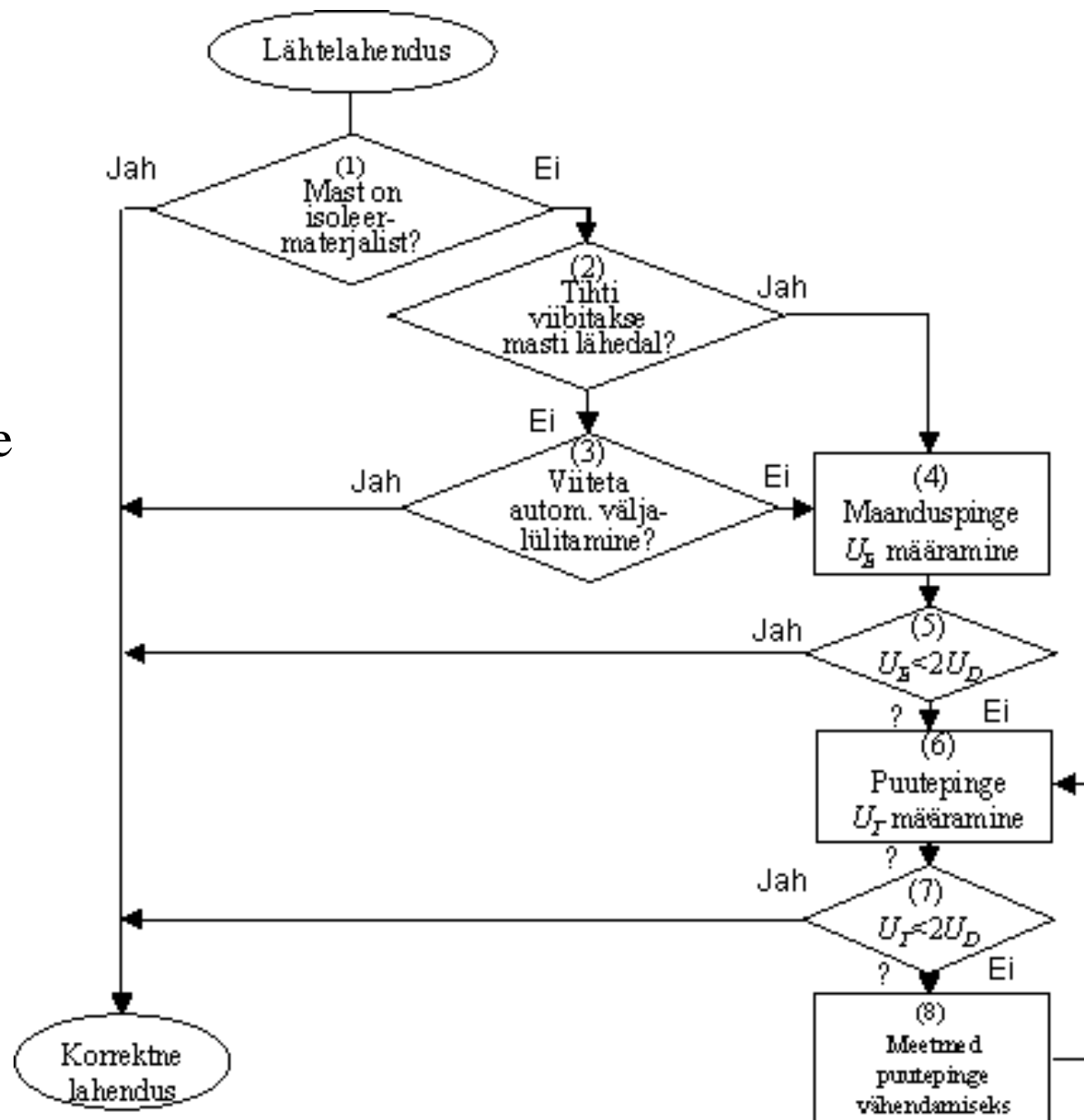
Maanduspaigaldise lähtelahenduse määravad mehaanilise tugevuse, korrosioonikindluse ja termilise taluvuse nõuded. Saadud lahendust tuleb kontrollida puutepingetele ja seejärel võib seda käsitleda kui tüüplahendust, mis sobib kasutamiseks ka muudel taolistel juhtudel.

Maanduspaigaldise lubatud puutepingest lähtuv üldine projekteerimise käik on joonisel. Sulgudes olevate numbrite tähendus on selgitatud pärast joonist.

Selgitavad märkused, mis puudutavad joonist:

1. Puidust või muust mittejuhtivast materjalist mastid ilma maani ulatuvate juhtivate detailideta. Maalühis ei ole sel juhul praktiliselt võimalik ja maandamine ei ole nõutav.
2. Mastid asuvad kergesti ligipääsetavas kohas ja kus võib eeldada, et seal viibivad inimesed pikaajaliselt (mõned tunnid päevas) mitmete nädalate jooksul või lühiajaliselt väga sageli (mitu korda päevas), näiteks kuuluvad siia piirkonnad elamute või mänguväljakute lähedal, kus tuleb olukorda uurida eriti detailselt. Siia ei kuulu aegajalt külastatavad piirkonnad, nagu näiteks metsad, põllumajandusmaa jne.

Maanduspaigaldise
projekteerimine
arvestades lubatud
puutepinget



3. Mastide puhul piirkondades, mis ei ole vabalt ligipääsetavad või mida inimesed külastavad harva, ei ole vaja puutepingeid arvestada juhul, kui liin lülitatakse maaiühenduse korral automaatselt välja.

Kui võib eeldada, et inimesed külastavad piirkonda harva, siis on külastuse ja automaatselt väljalülitatava maaiühenduse samaaegse esinemise tõenäosus tühine ning seega võib sellise lahenduse lugeda rahuldavaks.

4. Vaata lisa H punkt 4.3.
5. Vaata joonis 6.2. Kui juhtumitel 1), 2), 3) või 4) on maanduspinge väiksem, kui $2U_D$, võib lahendust pidada vastuvõetavaks. Enamikel nendel juhtudel moodustab puutepinge ainult murdosa maanduspingest (detailiselt selgitatakse seda lisa G punktis 4.1).
6. Vaata lisa G punkt 4.V
7. Vaata joonist 6.2, kus kõver U_{DI} vastab enimlubatud puutepingele U_{TP} . Kui märkuse tingimus ei ole täidetud, siis peab rakendama puutepinge vähendamise meetmeid kuni nõuded on täidetud. Need meetmed võivad olla kindlaks määratud SEN'is.

Märkus: Nendeks meetmeteks võivad olla näiteks potentsiaaliühtlustusring pinnases, masti isoleerimine, pinnase ülemise kihi takistuse suurendamine jne.

Erinevates paikades lubatud puutepinged

Standardi joonisel 6.2 on toodud lubatud puutepinged (puuteeelsed pinged), mis võivad erinevates tüüpilistes asupaikades inimkehale mõjuda. Kõverad U_{D2} , U_{D3} , ja U_{D4} illustreerivad suurenevate lisatakistuste mõju. Puute-eelne pinge U_D toimib puuteahelas pingeallikana sellise pinge väärtusega, mis tagab inimese ohutuse, kui ahelas on lisatakistus R_a (vaata lisa G, punkt 4.2).

Joonis 6.2. Näited lubatud puutepingete (puute-eelse pinge U_D) sõltuvusest maaihendusvoolu kestusest t_F

Joonisel 6.2 on järgmised kõverad:

Kõver U_{D1} : $R_a = 0 \Omega$ (juhtum 1).

Kõver U_{D2} : $R_a = 1\,750 \Omega$, $R_{al} = 1000 \Omega$, $\rho_E = 500 \Omega\text{m}$ (juhtum 2).

Kõver U_{D3} : $R_a = 4\,000 \Omega$, $R_{al} = 1000 \Omega$, $\rho_E = 2\,000 \Omega\text{m}$ (juhtum 3).

Kõver U_{D4} : $R_a = 7\,000 \Omega$, $R_{al} = 1000 \Omega$, $\rho_E = 4\,000 \Omega\text{m}$ (juhtum 4).

Joonise 6.2 juhtumitele 1 kuni 4 ja kõveratele U_{D1} kuni U_{D4} vastavate tüüpiliste paikade kirjeldused:

- *Juhtum 1. Kõver U_{D1}*

Sellised paigad nagu mänguväljakud, ujumisbasseinid, laagripaigad, puhkealad ja muud paigad, kus inimesed võivad viibida paljajalu. Mingit takistust inimkeha takistusele lisaks ei arvestata.

- *Juhtum 2. Kõver U_{D2}*

Sellised paigad, kus on tõenäone oletada, et inimesed kannavad kingi, näiteks üldkasutatavate teede sillutis, parklad jne. Arvestatakse lisatakistust $1\,750 \Omega$.

- *Juhtum 3. Kõver U_{D3}*

Sellised paigad, kus on tõenäone oletada, et inimesed kannavad kingi ja pinnase eritakistus on kõrge, näiteks $2000 \Omega\text{m}$. Arvesse tuleb võtta lisatakistus $4\,000 \Omega$.

- *Juhtum 4. Kõver U_{D4}*

Sellised paigad, kus on tõenäone oletada, et inimesed kannavad kingi ja pinnase eritakistus on väga kõrge, näiteks $4000 \Omega\text{m}$. Arvesse tuleb võtta lisatakistus $7\,000 \Omega$.

Lisameetmed isoleeritud või resonantsmaandatud võrkudes:

Isoleeritud ja resonantsmaandatud võrkudes, kus puutepinged on lubatavast väärtusest suuremad, võidakse selleks, et kestva maaihenduse tekkimine mastis oleks ebatõenäoline või, et tekkinud maaihendus oleks lühiajaline, rakendada järgmisi meetmeid:

- kasutada varras- või massiivisolaatoreid;
- kasutada isolaatoreid, mille läbilööki võib visuaalsel vaatlusel avastada (näiteks klaasist taldrikisolaatoreid);
- kasutada maaihenduskaitsset ja lülitada liin maaihenduse puhul välja.

Meetmed välgu toime vähendamiseks:

Masti maandustakistuse väärtus mõjutab liini isolatsiooni vastusuunalise ülelöögi määra mõjutades seega liini töökindlust. Aga töökindlus on optimeerimise objektiks konkreetses projektis, ega kuulu seega sätestamisele standardis. Takistuse maksimaalsed või tugiväärtused /reference values/ peavad olema kindlaks määratud SEN'is või projekti spetsifikatsioonis.

Õhuliinide pikse(kaitse)trosse arvestavate vähendustegurite leidmine käib analoogselt EVS-HD'ga, puudub aga väärtuste tabel. On ainult öeldud (lisas G), et vähendustegurite väärtused varieeruvad piirides 0,2 kuni 1 ja sõltuvad mitmetest parameetritest, nagu näiteks: liini geomeetria, pikse(kaitse)trossi(de) asukoht faasijuhtmete suhtes, pinnase takistus, pikse(kaitse)trosside arv ja nende paigutus.

Lisa H, punkt4.3

Maanduspinge leidmine:

Maanduspinge U_E avaldub valemiga

$$U_E = Z_E I_E$$

kus I_E maandusvool;

Z_E mõõtmiste või arvutuste alusel saadud maandusnäivtakistus.

Pikse(kaitse)trossi ja külgnevate mastide mõju võib ligikaudsel arvutusel arvesse võtta kasutades järgmist valemit:

$$Z_E = 0,25 \left(Z_S + \sqrt{Z_S (4 R_t + Z_S)} \right)$$

kus Z_S pikse(kaitse)trossi ühe visangu näivtakistus;

R_t masti jala takistus.

Maandusvool rikke korral avaldub valemiga:

$$I_E = r^3 I_0$$

kus r pikse(kaitse)trossi vähendustegur