METOODIKA TAASTUVENERGIA-ELEKTRI-JAAMADE PAIGALDISTE KIIRGUSLIKE HÄIRINGUTE MÕÕTMISEKS JA TULEMUSTE HINDAMISEKS

Rahastanud Euroopa Liit
NextGenerationEU

Eesti
tuleviku heaks

Kuupäev: 12.05.2026

Ver: 2.0

Tallinna Tehnikaülikool, 2026

Sisukord

1 Eessõna 5

1.1 Alusdokumendid 6

1.2 Kirjandusviited 7

2 Üldist 9

2.1 Muundurseadmed ja EM-häiringute algupärad 9

2.2 Elektrituuliku / tuuleelektrijaama (TEJ) struktuuri üldvaade 11

2.3 Päikeseelektrijaama (PEJ) üldvaade 11

2.4 TE-elektritootmis-paigaldiste poolt põhjustatud raadiohäiringute hindamine 13

2.5 IEC 61400-40:2026 14

3 Metoodika valiku taustainfo 15

3.1 Elektromagnetkeskkonna kaitse printsiibid juhuslike EM-emissioonide eest . 15

3.2 EM-häiringuemissioonide ohjeks esitatud vajadused ja nõuded mõõtemetoodikale 17

3.3 Juhtivuslikud ja kiirguslikud häiringusuurused üksiktoote ja paigaldise vaates18

3.4 EL direktiiv 2014/30/EL ja harmoneeritud standardid 19

3.5 EM-keskkondade ja häiringute klassifikatsioon IEC/CISPR alustel 20

4 Päikeseelektrijaama struktuuri ülevaade 23

4.1 Päikeseelektrijaama inverterid 25

4.1.1 Päikeseelektrijaama inverterseadme talitlusahelate struktuuri selgitus . 26

4.1.2 Päikesepaneelide pinge-voolu-võimsuse karakteristikud 27

4.1.3 Alalistoitesisendiga seotud muunduri talitlusahelad 29

4.1.4 Vaheldi ja vahelduvvoolu-väljundiga seotud muunduri talitlusahelad 30

4.2 Potentsiaalsed häiringumehhanismid päikeseelektrijaamas 31

4.3 Täiendavad tingimused PEJ EM-häiringuemissioonide mõõtmiste läbiviimiseks 32

5 Tuuleelektrijaama (TEJ) struktuuri ülevaade 34

5.1 Tuule-elektrijaama (TEJ) muundurseadmed 35

5.1.1 Elektrituuliku muundurseadmete talitlusahelate struktuuri selgitus 36

5.2 Tuule-elektrijaama abikomponendid ja lisaahelad 38

5.3 Potentsiaalsed häiringumehhanismid elektrituulikus 40
5.4 Tingimused mõõtmiste läbiviimiseks 41
6 Metoodika elementide kaalutlused TE paigaldiste mõõtmiseks 42
6.1 IEC mõõtemetoodika üldkirjeldus TEJ vastavushindamiseks 42
6.2 Elektri- ja magnetväljatugevuste mõõtmine 43
6.2.1 Mõõteantennide tüübid 43
6.2.2 Antennitegurid 44
6.2.3 Mõõteantennide seadistamine 45
6.2.4 Mõõteahela üldkirjeldus 45
6.2.5 Elektriväljatugevuse mõõtetulemus 46
6.2.6 Magnetväljatugevuse mõõtetulemus 47
6.3 Mõõtevastuvõtja spetsifikatsioon CISPR 16-1-1:2019 48
6.4 Kiirguslike häiringute mõõtmise metoodika CISPR 16-2-3 50
6.5 Mõõteahelate võimekus ja ahelate kavandamine 52
6.6 Mõõteasukohtade valik 53
6.7 Paigaldise ja üksiksüsteemi mõõtmine taastuvenergia-elektrijaamade hindamiseks 55
6.7.1 Üksiksüsteeme ja paigaldise katsetamine 55
6.7.2 Paigaldise katsetamisel rakendatavad piirtasemed 56
6.7.3 Ettepanekud protseduurideks tervikpaigaldise mõõtmiseks 57
7 Mõõtemetoodika päikeseelektrijaamade (PEJ) EM-häiringuemissiooni mõõtmiseks 59
7.1 Mõõdetavad suurused 59
7.2 Mõõteasukohtade valik 61
7.3 Mõõtetajurite valik ja ülesseadmine 63
7.4 Mõõtevastuvõtjate ülesseadmine 65
7.5 Mõõteahelate koostamine ja ettevalmistus 67
7.6 Katsetatava PEJ ettevalmistamine 67
7.7 Mõõtmiste läbiviimise protseduurid 69
7.8 Üksiksüsteemi mõõtmise katsete läbiviimise käik 70

7.9 Kogu paigaldise katsete läbiviimise käik 72
7.10 Mõõtetulemuste töötlemine 73
8 Mõõtemetoodika tuuleelektrijaamade (TEJ) EM-häiringuemissiooni mõõtmiseks . 75
8.1 Mõõdetavad suurused 75
8.2 Mõõteasukohtade valik 77
8.3 Mõõtetajurite valik ja ülesseadmine 80
8.4 Mõõtevastuvõtjate ülesseadmine 82
8.5 Mõõteahelate koostamine ja ettevalmistus 83
8.6 Katsetatava TEJ ettevalmistamine 84
8.7 Mõõtmiste läbiviimise protseduurid 85
8.8 Üksiksüsteemi mõõtmise katsete läbiviimise käik 86
8.9 Kogu paigaldise katsete läbiviimise käik 89
8.10 Mõõtetulemuste töötlemine 90
9 Piirsuurused ja nõutava mõõtevõime taseme definitsioon 92
9.1 Nõuded mõõteahelatele 92
9.2 Mõõtevahendite spetsifitseeritud suutlikkus mürasuuruste mõõtmisel 94
9.3 Antennitegurid 97
9.4 Kaablite ülekandetegurid 99
10 Taustamüra oodatavad suurused 101
11 Piirtasemete arvutus eri mõõtekaugustel.....104

1 Eessõna

Käesolev dokument esitab taastuvenergiapaigaldistest lähtuvate EM-häiringu-emissioonide mõõtmiseks ja nende tasemete vastavushindamiseks sobiliku metoodika kirjelduse. Mõõtemetoodika esitatakse kokku kahte liiki paigaldistele:

1) Päikeseelektrijaama (PEJ) mõõtmiseks
2) Tuuleelektrijaama (TEJ) mõõtmiseks

Aruanne kirjeldab selliste mõõtmiste läbiviimiseks olulisi kaalutlusi, viidates erinevatele alus- ja normdokumentidele. Metoodika on välja pakutud pidades silmas mõõdetavaid sagedusvahemikke

- 150 kHz ... 30 MHz, kasutades silmusantenni
- 30 MHz ... 1 GHz, kasutades logoperioodilist antenni
- 1 GHz ... 3 GHz, kasutades logoperioodilist antenni

Metoodika rakendamise sagedusvahemikku saab tõsta 6 GHz-ni, kui viia mõõtmised läbi samadel alustel kui siin esitatud kirjeldus 1 GHz ... 3 GHz kohta. Käesolevas aruandes on käsitlus piiratud kõrgeima sagedusega 3 GHz kuivõrd selle metoodika alusel mõõtmiste sooritamiseks ja metoodika kinnitamiseks kasutaud antennide sagedusvahemiku ülemine piir oli 3 GHz.

Mõõtmiste läbi viimise kavandamiseks on esitatud ka näidis-mõõtearuanne MA-25121-1 koos vastavate lisadega.

Aruande koostas:

- Lauri Kütt, kaasprofessor tenuurirajal
  e-post lauri.kutt@taltech.ee
  tel 620 3806

Teostaja üldkontakt:

Elektrotehnika ja mehhatroonika instituut
Tallinna Tehnikaülikool
Ehitajate tee 5
e-post ee@taltech.ee
tel 620 3300

1.1 Alusdokumendid

Siin aruandes kasutatud viited normatiiv-alus dokumentidele on loetletud allolevas tabelis (vt Tabel 1-1).

Tabel 1-1. Dokumendis kasutavad viited normdokumentidele.

Viide dokumendile	Dokumendi täiskirje
CISPR 37	CISPR 37, CIS/B/783/CD: 2021 Industrial, scientific and medical equipment – Radio-frequency disturbance characteristics – Limits and methods for measurements in situ and at defined sites
IEC 61400-40	IEC 61400-40:2026 - Wind energy generation systems - Part 40: Electromagnetic compatibility (EMC) - Requirements and test methods (IEC 61400-40:2026)
EVS-EN 62920	EVS-EN 62920:2017+A11+A1:2021 - Fotoelektrilised toitevõimsuse genereerimissüsteemid. Toitemuundurseadmete elektromagnetilise ühilduvuse nõuded ja katsetusmeetodid
CISPR TR 16-4-4	CISPR TR 16-4-4:2025 „Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 4-4: The CISPR model for the calculation of limits for the protection of radio services
CISPR TR 16-4-4:2007/AMD2	CISPR TR 16-4-4:2007/AMD2:2020 Amendment 2 - Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 4-4: Uncertainties, statistics and limit modelling - Statistics of complaints and a model for the calculation of limits for the protection of radio services
IEC TR 61000-2-3	IEC TR 61000-2-3:1992 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2: Environment - Section 3: Description of the environment - Radiated and non-network-frequency-related conducted phenomena
CISPR 11: 2015	EVS-EN IEC 55011:2016 / CISPR 11:2015 - Tööstus-, teadus- ja meditsiiniseadmed. Raadiosageduslike häiringute tunnussuurused. Piirväärtused ja mõõtemeetodid
CISPR 11: 2025	EVS-EN IEC 55011:2025 - Tööstus-, teadus- ja meditsiiniseadmed. Raadiosageduslike häiringute tunnussuurused. Piirväärtused ja mõõtemeetodid
EVS-EN IEC 61000-6-3	EVS-EN IEC 61000-6-3:2021 - Elektromagnetiline ühilduvus. Osa 6-3: Erialased põhistandardid. Emissioonistandard seadmetele olmekeskkondades
EVS-EN IEC 61000-6-4	EVS-EN IEC 61000-6-4:2019 - Elektromagnetiline ühilduvus. Osa 6-4: Erialased põhistandardid. Tööstuskeskkondade kiirguslike häiringute standard
IEC TR 61000-2-5	IEC TR 61000-2-5:2017 - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-5: Environment - Description and classification of electromagnetic environments
CISPR 16-1-1	CISPR 16-1-1:2019 / EVS-EN IEC 55016-1-1:2019 - Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Measuring apparatus

Viide dokumendile	Dokumendi täiskirje
CISPR 16-1-4	CISPR 16-1-4:2025 / EVS-EN IEC 55016-1-4:2025 - Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-4: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Antennas and test sites for radiated disturbance measurements
CISPR 16-2-3	CISPR 16-2-3:2016+AMD1:2019+AMD2:2023 / EVS-EN 55016-2-3:2017+A1+A2:2023 - Raadiohäiringute ja häiringutaluvuse mõõteseadmed ja -meetodid. Osa 2-3: Häiringute ja häiringutaluvuse mõõtemeetodid. Kiirgushäiringute mõõtmine
ITU-T K.34	ITU-T K.34 (12/2020) - Classification of electromagnetic environmental conditions for telecommunication equipment – Basic EMC Recommendation Recommendation

1.2 Kirjandusviited

[1] S. Kouro, J. I. Leon, D. Vinnikov, and L. G. Franquelo, “Grid-connected photovoltaic systems: An overview of recent research and emerging PV converter technology,” IEEE Ind. Electron. Mag., vol. 9, no. 1, pp. 47–61, 2015, doi: 10.1109/MIE.2014.2376976.

[2] F. Blaabjerg, Y. Yang, K. A. Kim, and J. Rodriguez, “Power Electronics Technology for Large-Scale Renewable Energy Generation,” Proc. IEEE, vol. 111, no. 4, pp. 335–355, 2023, doi: 10.1109/JPROC.2023.3253165.

[3] Gajewski, P.; Pieńkowski, K. Control of the Hybrid Renewable Energy System with Wind Turbine, Photovoltaic Panels and Battery Energy Storage. Energies 2021, 14, 1595. https://doi.org/10.3390/en14061595

[4] J. M. Carrasco et al., “Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 53, no. 4, pp. 1002–1016, 2006, doi: 10.1109/TIE.2006.878356.

[5] M. G. Molina, “Energy Storage and Power Electronics Technologies: A Strong Combination to Empower the Transformation to the Smart Grid,” Proc. IEEE, vol. 105, no. 11, pp. 2191–2219, 2017, doi: 10.1109/JPROC.2017.2702627

[6] Ma, R.; Wang, X.; Shan, M.; Yu, N.; Yang, S. Recognition of Variable-Speed Equipment in an Air-Conditioning System Using Numerical Analysis of Energy-Consumption Data. Energies 2020, 13, 4975. https://doi.org/10.3390/en13184975

[7] Y. -K. Wu, J. -H. Lin and H. -J. Lin, "Standards and Guidelines for Grid-Connected Photovoltaic Generation Systems: A Review and Comparison," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 4, pp. 3205-3216, July-Aug. 2017, doi: 10.1109/TIA.2017.2680409

[8] Dnr 20EV4540 Elektromagnetiska störningar - regeringsuppdrag Rapport framtagen som underlag till regeringsuppdrag Fi2020/02994/SPN december 2020 Fi2020/02994/SPN

[9] Kane, M.M.; Taylor, N.; Månsson, D. Electromagnetic Interference from Solar Photovoltaic Systems: A Review. Electronics 2025, 14, 31. https://doi.org/10.3390/electronics14010031

[10] DER DC-STRING ALS STÖRFALL https://www.photovoltaik.eu/titelthema/der-dc-string-als-stoerfall Photovoltaik 02/ 2020

[11] T. Degner, W. Enders, A. Schülbe, and H. Daub, “EMC and Safety Design for Photovoltaic Systems (ESDEPS),” Sixt. Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf., pp. 2253–2256, 2020, doi: 10.4324/9781315074405-48.

[12] D. Kroner and U. Lundgren, “Radiated Electromagnetic Emissions from Photovoltaic Systems - Measurement Results from Inverter and Modules,” IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat., vol. 2023-Septe, 2023, doi: 10.1109/EMCEurope57790.2023.10274340.

[13] H. J. Loschi, L. A. S. Ferreira, D. A. Nascimento, P. E. R. Cardoso, S. R. M. Carvalho, and F. D. Conte, “EMC Evaluation of Off-Grid and Grid-Tied Photovoltaic Systems for the Brazilian Scenario,” J. Clean Energy Technol., vol. 6, no. 2, pp. 125–133, 2018, doi: 10.18178/jocet.2018.6.2.447.

[14] C. Keyer, R. Timens, F. Buesink, and F. Leferink, “In-situ measurement of high frequency emission caused by photo voltaic inverters,” IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat., pp. 74–78, 2014, doi: 10.1109/EMCEurope.2014.6930880.

[15] B. Zhang and S. Wang, “A Survey of EMI Research in Power Electronics Systems with Wide-Bandgap Semiconductor Devices,” IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron., vol. 8, no. 1, pp. 626–643, 2020, doi: 10.1109/JESTPE.2019.2953730

[16] Z. Ma, S. Wang, Q. Huang, and Y. Yang, “A Review of Radiated EMI Research in Power Electronics Systems,” IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron., vol. 12, no. 1, pp. 675–694, 2024, doi: 10.1109/JESTPE.2023.3335972

2 Üldist

Käesolev metoodika aluskirjeldus kajastab ekspertteadmistele tuginevat kajastust kaasaegsete taastuvenergia-sisendiga elektrienergia tootmisüksuste elektromagnetilise kiirgusliku emissiooni taseme määramisega seotud mõõtmiste sooritamiseks. Elektrienergia tootmis-paigaldistest on vaatluse all päikeseelektrijaamad (PEJ) ja tuuleelektrijaamad (TEJ) nende tüüpilises oodatavas ülesehituses.

Siin aruandes esitatud mõõte- ja vastavushindamise metoodika tugineb IEC 61400-40:2026 normdokumendile (edaspidi lühidalt „61400-40“), mis on välja töötatud Rahvusvahelise Elektrotehnika Komisjoni (IEC) poolt. 61400-40 dokumendi sihtobjektiks on elektrituulik, käesolev aruanne laiendab selle käsitlust ka PEJ paigaldistele.

2.1 Muundurseadmed ja EM-häiringute algupärad

Põhimõtteliselt kõik taastuvenergial põhineva elektrienergia tootmise süsteemid hõlmavad lülitustalitluses töötavaid pooljuhtmuundureid [1][2][3]. Muutuva sisendvõimsusvooga energiaallikad, nagu päikese- ja tuuleenergia, suudavad pakkuda stabiilse tootmistalitluse üksnes elektrienergia muundurite talitluse läbi. Sellised muundurid sobitavad

- väljundpinge tasemed ja võrku sisestatava voolutugevuse
- muundavad need vahelduvtoitesuurusteks
- sünkroniseerivad need vahelduvtoitepingel toidetava jaotusvõrgu suurustega [1] [4].

Väikese võimsusega elektrienergia tootmissüsteemid, sealhulgas akusalvestus-süsteemid, kasutavad oma ülesehituses tavaliselt rohkem kui üht pooljuhtmuundur-astet [2][7]. Näiteks päikeseelektrijaamade inverterseadmetes toimub esmalt alalis-toitesisendist saadud pingesuurusel energia muundamine puhverlüli pingetasemele, seejärel alles vaheldamine vahelduvtoitesüsteemi ühendamisel.

Elektrivõrku antava vahelduvtoitevõimsuse genereerimine vaheldites on toimub üldjoontes samal viisil kui näiteks muutuvkiirusega elektrimootoritega ajamites. Viimastes toimub mootorite toitmine samuti vaheldi kaudu, selle vahelduv-väljundtoitesuuruse võnkesagedus genereeritakse tänu pooljuhtalaldi impulss-laiusmodulatsioonile tugineva lülitusprotsessi juhtimise [6]. Vahelduvtoitesuuruste alaldamine juhitavate alaldite rakendamisega võimaldab saavutada koormusvoolu parema võrgu toitepinge lainekuju järgmise, mis muudab sellised muundurid sobilikumaks vahelduvtoite-jaotusvõrkudesse ühendamisel. Samas on ka siin tegemist impulss-laiusmodulatsiooniga juhitavate pooljuhtkomponentidega, mille lülitustega

kaasneb märkimisväärne impulsshäiringute emissiooni potentsiaal. Kaasaegsete TE-põhiste elektritootmis-süsteemide laialdase kasutuselevõtuga seotud elektromagnetiliste häirete tõsidust rõhutavad mitmed teated häiretest kaasaegsele telekommunikatsiooni infrastruktuurile [7] [8]. Näiteks Rootsi ametiasutuste tegevuste üksikasjalik ülevaade EMI emissioonide selgitamisel teemal on esitatud allikates [8] [9] [10].

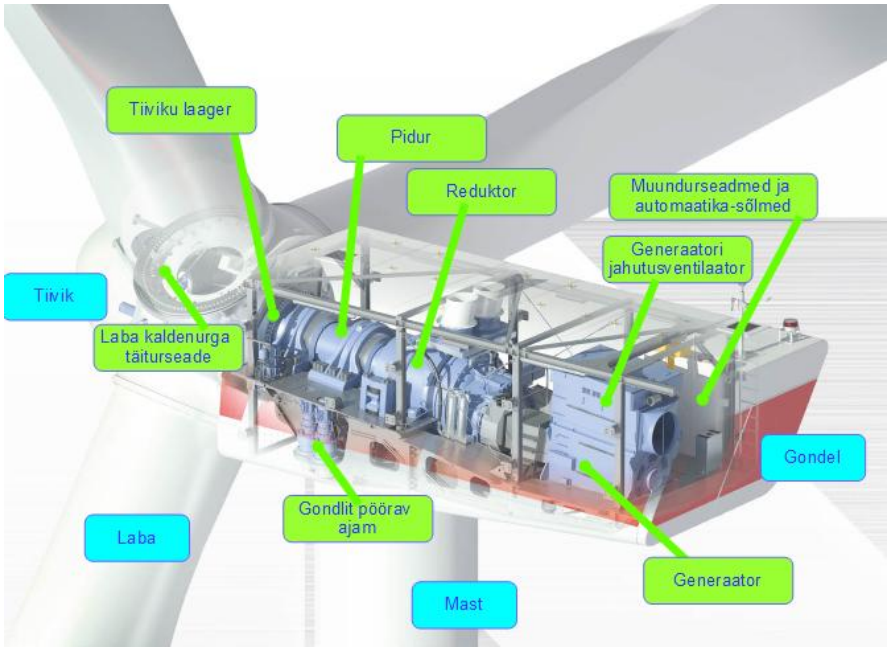
Kui elektromagnetiliste häiringute üldine emissiooni algupära on seotud taastuvenergia paigaldiste muundurseadmetega [11], siis samal ajal paigaldises tervikuna on kiirguslike häiringute emissioonipotentsiaal seotud tugevalt ka juhtide paigutuse topoloogia ja paigaldusviisiga. Paremat kiirguslike häiringute emissioonipotentsiaali pakuvad näiteks päikesepaneelisüsteemide paigaldamine katustele, et tagada päikesekiirguse parem kättesaadavus; päikesepaneelide ja inverteri lihtsaim juhtmestuslahendus võib hõlpsasti moodustada suuri silmus-kontuure, mis toimivad üsna tõhusate raamantennidena [12], Ka päikesepaneelid ise moodustavad suure tasapinnalise, maaga mahtuvuslikult sidestatud pinna, mis võib toimida nn beverage-antennina [13]. Lisaks ei ole regulatiivsed sätted üldjuhul ette nähtud käsitlema rohkemat kui üksikseadmeid. TE-tootmissüsteemi paigaldiste elektromagnetilise ühilduvuse aspekte ei pruugita sätestada ka projekteerimistingimustes. Isegi kui tooted on varustatud EL siseselt nõutava EMÜ nõuetele vastavuse deklaratsiooniga, ei kindlusta see nende täitmist seadmete tegelikus talitlusolukorras [11][14].

Kuigi inseneri- ja teaduskirjanduses käsitletakse lülitustalitluses töötavate pooljuhtmuundurite häiringuid üldiselt üsna palju, on kontekst tavaliselt üldine ja ei selgita paigaldist hõlmavat vaadet. Näiteks on vähe materjali, mis kiirguslikke emissioone seoksid juhtivuslike häiringute mehhanismidega [13]. Seoses normatiivide käsitlusega, vaadeldakse kiirguslikke häiringuid tavaliselt alles sagedustel üle 30 MHz [16]. Tootestandarditena esitatud normdokumendid ei nõua valdavalt kiirguslike häiringute mõõtmist ja ohjet alla 30 MHz [11] [13], ning pooljuhtmuundurite intensiivseim EM-emissiooni sagedusala jääb pigem alla 30 MHz. TE-põhiste seadmete kohta esitatud materjalides on samas kirjeldatud, et elektromagnetilise emissiooni potentsiaal kasvab nii alla kui ka üle 30 MHz sagedusalas.

PEJ toitemuundureid käsitlevas normdokumendis EVS-EN 62920:2017+A11+A1:2021 esitatakse EM-keskkondade liigitus vastavalt üldisele klassifikatsioonile „olmekeskkond“ ja „mitte-olmekeskkond“, kus viimane hõlmab nii tööstuskeskkonna EM-emissiooni kui ka tugevate häiringutega tööstuskeskkonna EM-emissiooni piirnõuded.

2.2 Elektrituuliku / tuuleelektrijaama (TEJ) struktuuri üldvaade

Tuuleenergia-elektrijaamade (TEJ) levinuimad paigaldised hõlmavad horisontaalse turbiiniga struktuure. Nendes on tugimastile kinnitatud pöörlev gondel, mille suunda seatakse vastavalt tuule suunale. Tüüpiliselt kolme-labaline turbiini struktuur võimaldab töötada labade kaldenurga muutmisega tuulekiiruste vahemikus 5 – 25 m/s, seejuures nimivõimsus saavutatakse tuulekiiruse 13 – 16 m/s alates. Näide sellise elektrituuliku struktuurist on esitatud alloleval joonisel (vt Joonis 2-1).

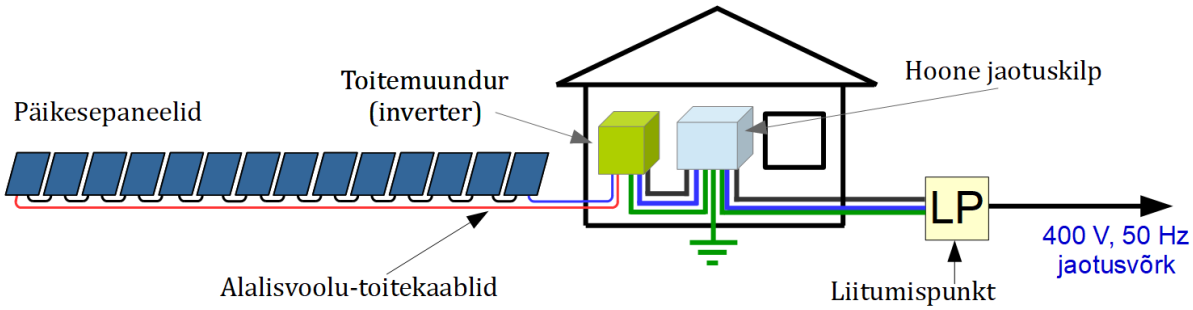


Joonis 2-1. Ülevaade elektrituuliku olulistest komponentidest, mis paiknevad gondlis (alusgraafika: eno energy GmbH).

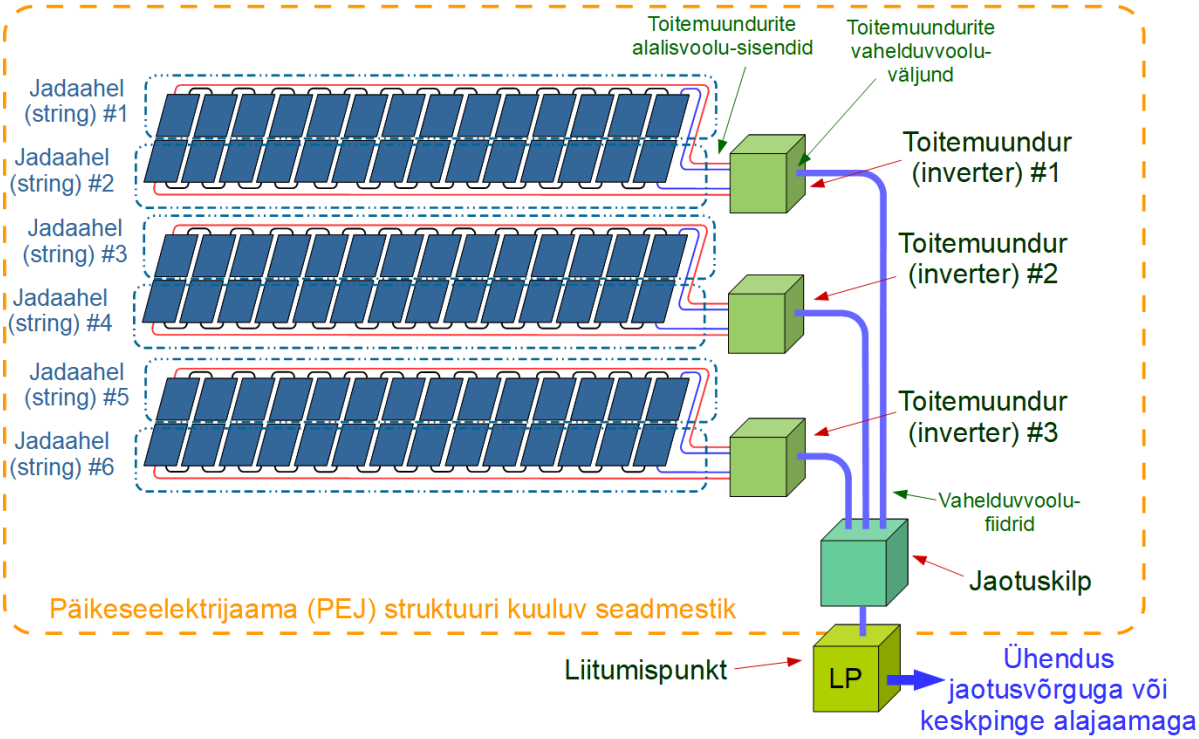
Turbiini aeglane pöörlemiskiirus ei ole soodne elektromehaanilise generaatori konstruktsiooni kujundamiseks, mistõttu varustatakse gondel pöörlemiskiirust tõstva reduktoriga. Turbiini avariipeatamiseks rakendatakse mehaanilist pidurit. Gondlis paiknevad ka esmased muundusseadmed ja erinevate täiturahelate ajamite koosseisus olevad sagedusmuundurid ja regulaatorid. Toitevõrguga liitmiseks vajalike sõlmedega seotud vajalikud komponendid reeglina gondlis ei paikne, sest tõstaksid viimase massi ja sellega ka mehaanilist keerukust.

2.3 Päikeseelektrijaama (PEJ) üldvaade

Päikeseelektrijaama (PEJ) olulisemaks komponendiks on fotogalvaanilisele efektile põhinevad pooljuht-päikesepaneelid, millele langev päikesekiirgus muundatakse ilma liikuvate osadeta elektrienergiaks. Päikeseelektrijaama näites on esitatud allolevatel joonistel (vt Joonis 2-2 ning Joonis 2-3).



Joonis 2-2. Väikese eramu juurde kuuluva päikeseelektrijaama struktuuri näide.



Joonis 2-3. Eraldi liitumispunktiga päikese-elektrijaama näide.

Päikeseelektrijaama talitlevate päikesepaneelide väljund-elektrienergia edastatakse alalispingel. Päikesepaneelide väljundpinge tüüpiline vahemik on u 100 – 400 V ja nimi-väljundvoolutugevus 10 – 20 A. Päikesepaneelid koondatakse pikematesse jada-ahelatesse, milles pingetase on kuni 1200 V. PEJ-s töötav inverterseade teostab alalis-sisendisse antava elektrienergia muundamise vahelduvtoitel edastatavaks energiaks. Inverterseade on PEJ puhul kõige kõrgema ühikhinnaga komponent, seetõttu koondatakse ühe inverteriga ühendusse kaks või enam stringi, millega tõstetakse sisendvõimsust. Inverterseade on ühendatud läbi jaotusseadmete liitumispunktiga kas otse või täiendava keskpingetrafo kaudu.

2.4 TE-elektritootmis-paigaldiste poolt põhjustatud raadiohäiringute hindamine

TE süsteemide talitlusest tingituna on nendega seotud EM-häiringute emissiooni potentsiaal suur ja see hõlmab nii juhtme juhitud EM emissioone kui ka kiirguslikke emissioone. TE-süsteemide puhul mängib EM-häiringute levimehhanismide juures kriitilist rolli nende paigaldus- ja ehitusvõtete baas. TE-paigaldiste suured mõõtmed (TEJ puhul kõrgus ja PEJ puhul laius) ja juhistike pikkused võivad kujundada EM-häiringute jaoks väga head leviteed ja antennid, mis võrreldes muude tööstus- ja olmepaigaldistega võivad esineda olulisemalt intensiivsemate raadiosageduslike mõjutuste allikatena.

IEC on töötanud koostöös teiste valdkondlike ekspertide kogude ja organisatsioonidega välja juhendite seeriad, mis kirjeldavad erinevate juhusliku iseloomuga EM-mürade ja häiringusuuruste potentsiaalse mõju hindamise ja piiramise metoodika alused. CISPR-seeria tehnilised dokumendid seeriast CISPR 16-4 kirjeldavad vastavaid elemente, kuid ei ole kujundatud normdokumentidena. Nendes esitatud võtted aitavad hinnata potentsiaalseid mõjusid erinevatele raadiosideteenustele, eriti keskendudes ringhäälinguteenustele.

- ***CISPR TR 16-4-4:2025 „Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 4-4: The CISPR model for the calculation of limits for the protection of radio services“***
  See dokument sõnastab põhimõtted, mille alusel on võimalik teostada analüüs raadioteenuste kvaliteedi kohta lähtudes juhusliku EM-müra intensiivsuse tasemetest. Seejuures esitatakse ka põhjendused ja alussuuruste valiku põhimõtted EM-häiringuemissioonide piirtasemetele, mis on leidnud kajastamist erinevates toote- ja üldstandardites. Dokumendi viimane versioon on avaldatud oktoobris 2025 ja see on kättesaadav Eesti Standardimis- ja Akrediteerimis-keskuse kaudu. Kättesaadavust piirab dokumendi kõrge hind.
- ***CISPR TR 16-4-4:2007/AMD2:2020 Amendment 2 - Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 4-4: Uncertainties, statistics and limit modelling - Statistics of complaints and a model for the calculation of limits for the protection of radio services***
  Kuigi tegemist on CISPR 16-4-4 tehnilise dokumendi lisaga, on antud lisa TE-paigaldiste seisukohast oluline kontekstis, kus esitab põhjendused ja alusmaterjali PEJ paigaldistest lähtuvate EM-emissioonide piiramisele raadiosideteenuste kvaliteedikriteeriumidest lähtuvalt. NB! Antud dokumendis esitatud lisad „C“ ja „D“ ei ole dokumendi CISPR 16-4-4:2025 aasta uusversiooni üle kantud. Dokumendi antud versioon on avaldatud oktoobris 2020 ja see on

kättesaadav Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskuse kaudu. Kättesaadavust piirab dokumendi kõrge hind.

CISPR 16-4-4 tehnilisi aruandeid alusmaterjalina kasutades on tagatud muudes CISPR-seeria elektromagnetilist ühilduvust käsitlevates väljaannetes ja normdokumentides esitatud meetodite, mõõtevahendite ja sätestatud piirtasemete põhjuslikud seosed. Raadioteenuste kvaliteediga ja juhuslike EM-häiringuemissioonide piiramist sätestavad täiendavalt ITU, ETSI, ECC jt poolt avaldatud materjalid, kuid need väga suures osas viitavad samuti IEC CISPR poolt välja antud materjalidele.

Tähelepanu! Euroopa liidus on CISPR-seeria dokumendid harmoneeritud EL elektromagnetilise ühilduvuse direktiivile tuginedes. CENELEC-i poolt üle võetud CISPR-seeria dokumendid kannavad tähist, mis algab koodiga „EN 550xx“, milles xx tähistab CISPR-seeria vastavat dokumendi identifikaatorit. Eelnevalt nimetatud CISPR-16-4-4 dokument ei ole CENELECi poolt üle võetud normdokument ja sellel EN-kood puudub.

2.5 IEC 61400-40:2026

IEC 61400-dokumendiseeria kajastab elektrituulikute ja tuuleenergiast elektrienergiat tootvate süsteemide kohta esitatavaid nõudeid ja tehnilisi juhendmaterjale. IEC 61400-40 on elektrituulikute EM-häiringuemissioonide tasemeid, mõõtemeetodeid ja häiringukindluse nõudeid kirjeldav dokument. Dokumendis esitatud põhimõtted üldjoontes on tuttavad varasematest CISPR-seeria dokumentidest. IEC 61400-40:2026 hõlmab sagedusalad 150 kHz ... 1 GHz ja EM-häiringuemissiooni kriteeriumides sätestab see normatiiv ainult kiirgusliku emissiooni mõõtmise.

IEC 61400-40 dokumendi eripäraks on asjaolu, et tegemist on esimese IEC normdokumendiga, mis adresseerib spetsiifiliselt paigaldises koos talitlevate elektriseadmete koostu poolt emiteeritavaid EM-häiringusuuruseid. Dokument esitab nõuded ühele komplektsele elektrituulikule, kuid mitte laiemale tuulepargile.

Võrreldes erinevate muude saadaolevate ja paigaldiste koosseisus kasutatavate seadmete kohta esitatud üksiktoodete jaoks ette nähtud normdokumentidele esitab IEC61400-40:2026 konkreetsed mõõtemeetodid paigaldise tegelikus asukohas mõõtmiste läbi viimiseks ja mõõteandmete esmaseks töötlemiseks. Tootepõhiste normdokumentidega võrreldes on suurimaks erisuseks selge viide välimõõtmiste läbiviimiseks oluliselt suurematelt mõõtekaugustelt, kui katselaborites tüüpiliselt kasutuses on. See esitab terve rea väljakutseid, mil moel vähendada mõõtetulemustes taustamürade esiletoomist, kusjuures viimaste intensiivsus võib ületada isegi nõuetena esitatud EM-häiringuemissiooni piirtaset.

3 Metoodika valiku taustainfo

TE-paigaldiste mõõtemetoodika spetsifitseerimisel tuleb arvestada nende koosseisus olevate seadmete ja potentsiaalsete EM-häiringuallikate iseloomu ja talitluse eripäradega. Käesolev peatükk esitab ülevaate kaalutlustest, milliseid on vaja arvesse võtta mõõte- ja hindamismetoodika kavandamisel ja rakendamisel.

3.1 Elektromagnetkeskkonna kaitse printsiibid juhuslike EM-emissioonide eest

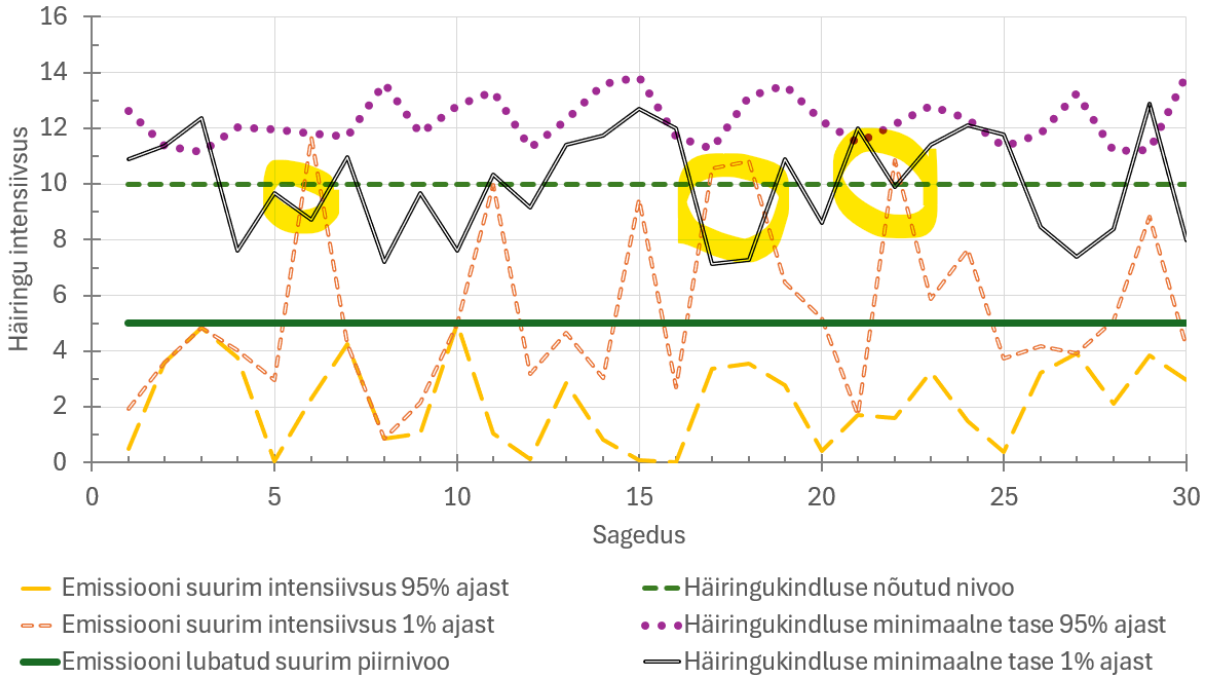
Elektriseadmete, sh elektritoiteenergiat tootvate seadmete talitlusega kaasneb paratamatult seda ümbritsev elektri-, magnet- ja elektromagnetväli (vastavalt E-, H- ja EM-väli), kuid elektromagnetjälg võib levida ka ühendusjuhtmete kaudu. Sellised kaasnevad nähtused ei ole sihiliku funktsioonina tekitatud, kuid paratamatud näiteks mingite komponentide toimimise printsiipide kaudu. Seepärast kui kirjeldatakse nende nähtuste levimist ümbritsevasse keskkonda, kasutatakse „juhusliku emissiooni“ või „häiringute“ nimetust (i.k „*spurious emission*“, „*disturbance*“). Viimane viitab, et puutudes kokku mingi talitlusahelaga naabruses olevas seadmes, võib selline elektromagnetiline mõjutus kujuneda talitlust häirivaks. See tähendab, et mõni seadme põhifunktsioonide sooritamiseks vajalikest tingimustest ei ole piisaval tasemel täidetud ja võib viia talitlushäireni (i.k „*fault*“).

Elektromagnetiline ühilduvus tähistab sellist elektri- ja elektriseadmete talitlust, kus ühe seadme poolt emiteeritav elektromagnetiline mõjutus kas väljasuuruste näol või juhtide kaudu levivate suurustena on tasemel, mis ei põhjusta talitlushäireid kõrvalolevas seadmes ja samal ajal on seade ise küllaldaselt häiringukindel tema ümbruses olevate seadmete poolt kujundatud elektromagnetkeskkonnast tulenevate mõjutuste suhtes. Sellised tingimused ei ole seadmete ehitusega üheselt tagatud ja kehtestatakse läbi täiendavate seadusandlike meetmete. Üldised printsiibid reguleeritakse vastavalt nõutud ja lubatud tasemetele, mis tehnilises vaates on alljärgnevad:

1) Häiringukindlusnivoo – seadme tegelikku EM-nähtusele vastupidavust kirjeldav suurus, mille ületamisel esineb talitlushäire.
2) Nõutud häiringukindluse (piir)nivoo – seadmele esitatav nõue, mille kohaselt sellele tasemele vastavale häiringu nivoole peab seade säilitama nõrgenemata talitlusvõime.
3) Ühilduvusnivoo – kokkuleppeline nivoo nõutud häiringukindlusnivoo ja emissiooninivoo vahel.
4) Lubatud emissiooni piirnivoo - seadmele esitatav nõue häiringusuuruse tasemele, millest intensiivsemat häiringusuurust ei tohi seade oma talitlusel emiteerida.

5) Emissiooni tegelik nivoo – seadme poolt emiteeritud häiringusuuruse tegelik tase.

Esitatud nivoode roll ja selgitus on kirjeldatud alloleval graafikul (vt Joonis 3-1).



Joonis 3-1. Graafik selgitustega emissiooninivoo, häiringukindlusnivoo ja häirumise tõenäosuse kohta (kollased alad).

Kõik need suurused on tõenäosuslikud ja mõjutatud nii EM-keskkonna tingimustest kui ka seadme enda talitlusviisist. Piirnivood on paigutatud üksteisest sellisele suhtelisele kaugusele, et talitlusel tõenäoline oodatava emissiooni tegeliku suuruse kõrgem tase ei ulatuks üle tegeliku häiringutaluvuspiiri, mis võib mõnedele tingimustel olla madalam. Ühilduvusnivoo on emissiooni piirnivoo ja häiringukindluse nõutud nivoo vahelises alas. Häirumine leiab aset, kui tegelikus talitlusolukorras esinev kõrgenenud emissiooni tegelik tase ületab samal ajahetkel süsteemil olevat häiringukindlustaset.

Piirtasemete nõuetele vastavate süsteemide puhul eeldatakse, et 95% talitluse ajast on tegelik EM-emissioonitase madalam lubatud suurimast piirnivoost; samuti 95% talitlusajast omab süsteem häiringukindlust, mis on kõrgem nõutud häiringukindluse piirnivoost. Sellegipoolest võib talitlusel väikese aja jooksul esineda oluliselt intensiivsemaid emissiooni-olukordi, mis ületavad häiringukindluse nõutud taset. Juhul, kui samal ajal mingi välis-süsteemi häiringukindluse tegelik tase on vaadeldava häiringuallika emissiooni tasemest madalam, võib olla võimalik välise süsteemi häirumine.

3.2 EM-häiringuemissioonide ohjeks esitatud vajadused ja nõuded mõõtemetoodikale

EM-häiringuemisioonide tasemete ohjeks kasutatav pragmaatika tugineb käesoleval hetkel normdokumentidele tuginevatel alustel nõuete esitamisele nii EM-häiringu-emissiooni kui ka EM-häiringutaluvuse tasemetele tegelike toodete juures.

- Toode või süsteem loetakse piisavalt madalat häiringuemissiooni omavaks, kui selle katsetamisel ettenähtud või kõige oodatavamas talitlusolukorras ei ületa mõõtmisel registreeritud emissiooni tegelik tase normatiivses aluses esitatud emissiooni intensiivsuse piirtaset;
- Toode või süsteem loetakse piisavalt kõrget häiringutaluvust omavaks, kui selle katsetamisel ettenähtud või kõige oodatavamas talitlusolukorras ei esine talitlushälbeid juhul, kui seade allutatakse EM-mõjutusele intensiivsusega, mis vastab normatiivses aluses esitatud häiringutaluvuse nõutud tasemele.

EM-häiringuemissiooni ja häiringutaluvuse ohjeks esitatud kriteeriumide täitmise osutamiseks tuleb seega läbi viia ulatuslikud katsed seadmete ja süsteemide tegelikes talitlusolukordades. Katsete läbiviimisel tuleb eeskätt tagada, et katsetel saadud tulemused oleksid piisavalt mõjusad. Näiteks EM-emissioonikatseteks tuleb tagada, et seadme või süsteemi ülesseadmise ja talitluse juhtimise viisid võiksid tingida võimalikult tugeva EM-häiringuemissiooni esinemise; häiringukindluskatsetel tuleb tagada, et nendes kasutatud stsenaariumidel oleks võimalik selliste mõjutuste rakendamine, mis ka tegelikus olukorras võiksid viia seadme funktsionaalsuse hälbimiseni. Katseid ei ole mõtet sooritada juhtumile, kus seadmed on minimaalses talitlusvõimekuses, milles ei ole tõenäoline EM-emissioonide intensiivne esinemine, ega ka talitluse häirumine.

Järgnevalt on käesoleva aruande kontekstis tähelepanu üksnes EM-häiringuemissioonide mõõtmise asjaoludel.

Normatiivalus EM-ohjeks tugineb seadme või süsteemiga läbi viidud katsetel selgitatud EM-häiringuemissioonide võrdlemisel piirtasemetega. Seade või süsteem loetakse vastavaks normatiivselt kehtestatud nõudele, kui selle EM-häiringuemissiooni intensiivsus jääb kõikidel tingimustel alla samas normatiivis esitatud piirtaseme(te) suuruste. Selleks normatiivalus esitab mh

- Piirtasemed, millega mõõtmistel selgitatud mõõtetulemust võrreldakse;
- Suuruste kirjeldus, mida piirtasemega võrdlemiseks võrreldakse;
- Keskkonna kirjeldus, milles mõõtmised läbi viiakse;
- Katsetatava seadme ülesseadmine ja seadistus;
- Mõõtmisteks kasutatavate EM-suuruste tajurite kirjeldus;

- Mõõtmisteks kasutatavate analüüsisüsteemide kirjeldus;
- Mõõtmisel registreeritud tulemuste töötlemise viisid mõõtetulemuse saamiseks;
- Mõõtmistel esineva mõõtemääramatuse hindamise viisid.
  jm

Normatiivalustes esitatud metoodika elementide sõnastamine võimaldab saavutada hea koordinatsiooni kõikide tootega seotud osapoolte – toote müüja, kasutaja, EM-keskkonna valdaja, järelvalvet teostavate regulaatorite, mõõtmisi läbi viivate laborite – vahel.

3.3 Juhtivuslikud ja kiirguslikud häiringusuurused üksiktoote ja paigaldise vaates

Talitlushäirete ilmnemise mehhanismide puhul lähtutakse emissiooni allika, levitee ja häiritava seadme omadustest. Üks üldisimaid klassifikatsiooni lähtekohti on juhtme kaudu levivate (juhtivuslike häiringute) ja vabas keskkonnas levivate (kiirguslike häiringute) suuruste eristamine. Sellise lähtekoha eristuseks on asjaolud, et

- vabas keskkonnas märkimisväärse intensiivsusega levimiseks on vajalik välja tekitava kontuuri suhteliselt suured mõõtmed, mis on seotud objekti lainepikkusega;
- juhtide süsteemi kaudu levimiseks on soodsad madalad sagedused, mille korral ebakorrapärane lainetakistus tänu ühenduskohtadele ei ole oluliseks takistuseks.

Kirjeldatud asjaolude tõttu on tüüpiliseks lähenemiseks üksikseadmete (s.o toodete) kontekstis juhtivuslike häiringusuuruste käsitlus kuni sageduseni 30 MHz ja seejärel kiirguslike häiringusuuruste käsitlus üle 30 MHz olevate sageduskomponentide kontekstis. Selline käsitlus on eristav asjaolu ka mõõtetehnika ja mõõtemetoodika valikul. Seadmete kui toodete nõuetele vastavuse kontrolliks sooritatakse katsed

- sagedusvahemikus 150 kHz ... 30 MHz reeglina ainult juhtivuslike häiringute emissiooni mõõtmistega; eeldatakse, et kui selles sagedusvahemikus on juhtivuslike häiringute mõõdetud tasemed allpool lubatud piirtaset, siis ei esine probleeme ka kiirguslike häiringutega.
- sagedusvahemikus 30 MHz ... 1 GHz (või kõrgem) reeglina ainult E-välja häiringute emissiooni mõõtmistega; eeldatakse, et kui selles sagedusvahemikus on kiirguslike häiringute mõõdetud tasemed allpool lubatud piirtaset, siis ei esine probleeme ka juhtivuslike häiringutega.

Elektripaigaldiste ja suuregabariidiliste seadmete puhul on tegemist üksiktoodetega võrreldes erijuhtumiga. Üksiktoote poolt tekitatud EM-emissioonide määramise

kontekstis üritatakse laboratoorsetes tingimustes üles seada esinduslikku ja tüüpilist kasutusjuhtumit kajastavat makett-seadistust. Selles on

- filtreeritud või maha surutud erinevate kõrvaliste ahelate poolt tekitatud EM-häiringute leviteed;
- seadme endaga seotud sidendid (füüsilised ühendused ja liidesed) on sobitatud tüüpilist kasutusolukorda modelleerivate ekvivalentahelatega;
- seadmega ühendatud ahelad on lühikesed ja paigaldatakse maandatud tasandile suhteliselt madalalt.

Kõik need aspektid võimaldavad tagada toote katsetatavuse selliselt, et korratavus oleks suur ja määramatus vähim. Paigaldise puhul, milles katsetatav(ad) seade(seadmed) on üles seatud tegelikus talitlusolukorras, on loetletud tingimused täitmata ja võivad kujundada hoopiski olukorra, milles senised passiivkomponendid (juhtmed, metall-ehitus-struktuuri komponendid jt) võivad kujundada EM-emissioonide jaoks hoopis soodsama ja võimendavama keskkonna.

Üldised lähtekohad TE paigaldiste ja ehitatud elektrijaamade EM-häiringuemissioonide seisukohast on:

- TEJ ja PEJ paigaldised on väikseima EM-mürajäljega juhul, kui nende talitlus on peatatud;
- TEJ ja PEJ süsteemide ooteolekus on peatatud energiamuundurite lülitustalitlus;
- Erinevatel TEJ ja PEJ väljundvõimsusel talitlusel võib EM-häiringuemissioon olla erineva intensiivsusega.

3.4 EL direktiiv 2014/30/EL ja harmoneeritud standardid

Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv 2014/30/EL (elektromagnetilise ühilduvuse (EMÜ) direktiiv) sätestab Euroopa Liidu (EL) alal tingimused, mille eesmärgiks on üldine elektromagnet-(EM)keskkonna kaitse häiringute eest. EMÜ direktiiv loetleb ühe peamise eesmärgina EM-keskkonna reguleerimisel tagada

- elektriliste- ja elektromagnetsuuruste kaudu toimivate sideteenuste kvaliteet, siia hulka kuulub mistahes raadioside kui ka sidevõrkude kaudu teostatav side;
- elektri- ja telekommunikatsioonivõrkude ning nendega ühendatud seadmete kaitse elektromagnetiliste häiringute eest.

Asukohas esineva praktilise EM-mürasuuruste tausta ülevaate ja EM-müra esinemise oodatavate tasemete põhjuste ülevaade on esitatud IEC tehnilises aruandes IEC TR 61000-2-3:1992. EM-taustamüra on üldiselt reguleerimata suurus. EL direktiivi(de) ja

riiklike regulatsioonidega kaetud EM-keskkonna kaitse reguleerimisalasse kuulub EM-keskkonda panustav mõnest tehisallikast algatatud EM-emissioon.

Elektrimagnetilise ühilduvuse direktiiv 2014/30/EL on jõustatud eesmärgiga EL sisese kaupade ja teenuste piiride ülese liikuvuse tagamiseks. Antud direktiiviga sätestatakse nõuded elektromagnetilise ühilduvuse kriteeriumide täitmiseks, millised võimaldaksid ühisturul kaubanduslikult müüdavate erinevate seadmete talitlemise ohutult ja kvaliteetselt. EL direktiivile vastavus tähendab, et seadmed enda sihtotstarbelisel talitlusel ei tekita vastuvõetamatuid elektromagnetilisi häiringuid seda ümbritsevas keskkonnas ja seadmed on võimelised reeglite kohases elektromagnetiliste häiringute keskkonnas halvenemiseta ettenähtud viisil toimima.

EL direktiivile vastavuse osutamise nõue on esitatud igale tootele. Turule viidava toote kujundaja peab arvestama terve rea direktiividega, millele vastavuse kohta on võimalik leida viited EL harmoniseeritud standardite nimekirjast. Toote valmistaja deklareerib vastavust EL direktiivide nõuetele tähistades oma toote märgisega „CE“. Sellele lisaks peab tootja varustama oma toote selge teabega, millele tuginevalt EL direktiivile vastavust osutatakse. See on ka üldine printsiip elektromagnetilise ühilduvuse nõuete ja elektriseadmete kontekstis.

Oluline on rõhutada, et toote jaoks kohalduvate standardite valiku ja selle vastavuse osutusmeemete üle otsustab kõigepealt tootja ise. Vastavuse osutamiseks tuleb kasutada eeskätt tootestandardeid (nt PEJ inverterseadmete kohta EVS-EN IEC 62920), kuid tootja võib asjakohasel põhjendusel kirjeldada vastavuse osutamise aluseks tugineda ka üldstandarditele, nt EVS-EN IEC 55011 või EVS-EN 61000-6-3. NB! Osutades vastavust mingi standardi kriteeriumidele, võib tootja valida ka vastavuse osutamise kõrge häiringuemissiooni klassiga spetsifikatsioonile (nt tööstuskeskkonna seadmed). Sellist erisust CE märgistus ei kirjelda ja selleks on vaja süvendatult tutvuda CE märgise deklareerimise aluseks olevale dokumendile. Info selle kohta on leitav üldiselt „Certificate of conformance“ dokumendist, milline võib olla leitav tootja kodulehelt.

3.5 EM-keskkondade ja häiringute klassifikatsioon IEC/CISPR alustel

EM-tehismürakeskkonnad kirjeldavad tingimused, millises toimivad erinevad seadmed. Seadmete talitlusest tingitud häiringute raamistikus kirjeldatakse erineva iseloomuga (iseloom, levitee, algupära, esinemise sagedusriba jpm) EM-nähtuseid. Üldisem klassifikatsioon EM-keskkonnas esinevate häiringute- ja mõjutuste suuruste iseloomustamiseks on (IEC/TR 61000-2-5:2017):

- Madalsageduslikud nähtused (so EM-suurused sagedusega alla 9 kHz);

- Kõrgsageduslikud nähtused (so EM-suurused sagedusega üle 9 kHz);
- Elektrostaatiliste nähtustega seotud suurused.

Käesoleva aruandes raamistikus TE kiirguslike häiringute mõõtmis- sagedusala 150 kHz kuni 3 GHz jääb seega kõrgsagedusnähtuste klassi. Madalsageduslikke nähtusi käsitletakse antud projektis ainult kontekstis, mis võimaldab kirjeldada PEJ või muu katsetamise seisukohast olulisi energeetilisi- või talitlussuurusi.

EM-keskkonnad jagatakse nendes esinevate häiringute kontekstist kolmeks põhiliseks (IEC/TR 61000-2-5:2017):

- Olmekeskkond
    - Madalaima EM-häiringutasemega üldine keskkond, milles tavakasutaja seadmed ja süsteemi töötavad. Selline keskkond vajab suhteliselt vähe täiendavat EM-häiringusuuruste ohjet ja kasutaja väljaõpet, et tagada töökindel ja väikese EM-häiringujäljega talitlusviis. Olmekeskkonna alla kuulub ka ühendus avaliku jaotusvõrguga.
- Teenindus- ja väiketööstuskeskkond
    - Üldjoontes sama madala EM-häiringutasemega keskkond, erisuseks inimeste igapäevaeluga seotud toimingute puudumine. Selles keskkonnas on tavalised kontori- ja väikese võimsusega teenindus- ja täiturseadmed (nt valgustus, pumbad, kliima- ja külmutusseadmed, väikesemad tööpingid jt). Selle EM-keskkonna omapära on ühendus avaliku jaotusvõrguga.
- Tööstuskeskkond
    - Potentsiaalselt intensiivse EM-häiringutasemega keskkond, milles eeldatakse EM-häiringute piiratud ulatust. Tööstuskeskkonnas olevate EM-tingimuste eest vastutab reeglina tööstuspaigaldise omanik ja tema poolt volitatud ja vastava väljaõppega spetsialistid sh käidukorraldaja. Häiringuemissioonide lubatud tasemed on oluliselt kõrgemad kui olmekeskkonna puhul; samuti on tööstuskeskkonna jaoks sobilike seadmed tugevama häiringukindlusega. Tööstuskeskkonnas töötamiseks ette nähtud seadmeid ei tohi kõrgema häiringupotentsiaali tõttu ühendada olmekeskkonda ilma lisameetmeteta (nt filtrid).

Täiendavalt, seoses võib käsitleda

- Tugevate häiringutega tööstuskeskkonda
- Kaitstud (EM-vaikset) keskkonda

Vastava keskkonna kaitseks on koostatud põhistandardid, mis käsitlevad EM-emissioonide piiramist määratletud tasemel:

- EVS-EN IEC 61000-6-3:2021 – olmekeskkondade emissioonistandard;

    - See standard esitab üldise nõuete kirjelduse olmeala EM-keskkonna ohje kontekstis, loetleb nii kiirguslike kui juhtivuslike häiringute lubatavad emissioonitasemed.
- EVS-EN IEC 61000-6-4:2019 – tööstuskeskkondade emissioonistandard;
    - See standard esitab üldise nõuete kirjelduse tööstus-EM-keskkonna ohje kontekstis, loetleb nii kiirguslike kui juhtivuslike häiringute lubatavad emissioonitasemed.
- EVS-EN 55011:2025 – Tööstus-, teadus- ja meditsiiniseadmed. Raadiosageduslike häiringute tunnussuurused. Piirväärtused ja mõõtemeetodid;
    - See dokument esitab nii olme, tööstuse, kui ka tugevate häiringutega tööstuskeskkonna emissiooni-piirtasemed.
- Suunatult telekommunikatsioonikeskuste EM-keskkonda ja selles oodatavaid EM-väljasuurusi kirjeldab ITU-T K.34.

IEC 61400-40 lähtub TEJ jaoks kohalduvate piirtasemete nimetamisel CISPR 11 avaldatud tööstuskeskkonna seadmete jaoks kohalduvatele häiringuemissiooni piirtasemetele. Seega on 61400-40 normdokument sobilik tööstus-EM-keskkonna tasemete kaitseks ja ei pruugi olla sobilik olme-EM-keskkonna kaitseks piisav.

4 Päikeseelektrijaama struktuuri ülevaade

PEJ on terviklik süsteem, mille põhifunktsiooniks on keskkonnas oleva päikesekiirguse muundamine elektriliseks toiteenergiaks ja selle ette valmistamine edastamiseks elektritoiteenergia tarbijatele. Päikesekiirgus on iseloomuliku EM-sagedusspektriga kirjeldatav, Päikeselt lähtuv EM-kiirgus.

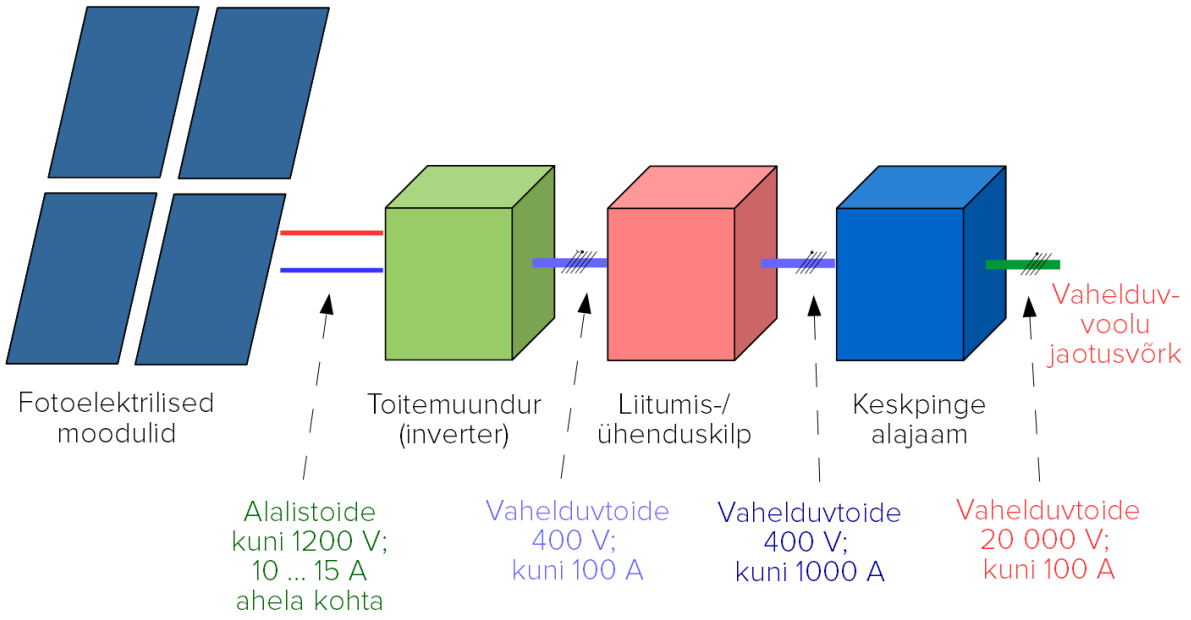
Päikesekiirgus muundatakse elektrienergiaks fotoelektriliste energiamuundurite abil. Fotoelektrilisteks muunduriteks (muundur-elementideks) on monokristall-räni-materjalil põhinevad suure pindalaga pn-pooljuhtstruktuurid. Nendes toimiv füüsikaline protsess annab elektronidele footonite poolt avaldatud mõju kaudu kindla suunaga tõuke, milline avaldub elektrilise alalispinge ilmnemisega elementide piirpindadega seotud elektrijuhtidel. Fotoelektrilise elemendi ühendamisel elektrilise koormusega on võimalik saavutada märkimisväärne muunduskasutegur, milline jääb oodatult vahemikku (15 ... 20) %. Fotoelektrilise elemendi mudeliks on pooljuhtdiood, mille siirde allutamisel päikesekiirgusele tekib vältimatu, langevast päikesekiirguse võimsusest tingitud elektrivool pooljuhtsiirdes. Pooljuhtelemendi tüüpiline väljundpinge on 0,5 V.

Fotoelektrilisi elemente koondavad suuremad päikesepaneelid, milliste koosseisus on mõnikümmend kuni mõnisada fotoelektrilist elementi. Päikesepaneelid tagavad fotoelektriliste elementide töökindla paigutuse ja kinnituse, tagades hermeetilise konstruktsiooni läbi püsiva kaitse ümbritsevate keskkonnatingimuste eest. Päikesepaneelide koosseisus on teostatud fotoelementide vahelised elektrilised ühendused, tüüpiliselt jadaahelas. Viimasega saavutatakse väikese pingega allikate jadaühendus, mille tulemuseks on päikesepaneelide nimivõimsuspunkti pinge kasv kuni kümnete voltideni. Päikesepaneelide tüüpilised nimivõimsuspunkti voolutugevuse väärtused on tasemel 10 ... 15 A, paneelide võimsusega 200 ... 500 W.

Fotoelektrilise mooduli väljundpinge ja -vool on määratud päikesekiirguse intensiivsuse, mooduli pinnale langemisnurga ja elektriliste koormusparameetrite kaudu. Fotoelektriliste moodulite väljund-elektrienergia parameetrite stabiliseerimiseks, sobilike/parimate koormusolukordade tagamiseks on kasutusel toitemuundur, mille ülesandeks on fotoelektrilistelt muunduritelt saadud elektrienergia muundamine kindlate parameetritega elektritoiteenergiaks. Tüüpiline toitemuundur on tuntud kui „inverter“, mille nimi on asjaolust, et selline toitemuundur teostab alalisvoolul edastatava elektrienergia muundamise vahelduvvoolul edastatavaks elektrienergiaks.

Toitemuundurite sisendite paremaks kasutuseks koondatakse päikesepaneelid omakorda jadaahelasse, milles on suuremate päikeseelektrijaamade puhul kuni mõnikümmend päikesepaneeli. Selliste jadaahelate võimsused küündivad kW tasemele,

samas kasutades suhteliselt ökonoomset voolutugevust 10 ... 15 A (ühendusjuhtmete vaates). Päikesepaneelide jadaühendus tõstab omakorda jadaahela (stringi) pinge kõrgele, muundurite sisendpingete vahemik võib ulatuda kuni 1200 V-ni.



Joonis 4-1. PEJ üldine struktuurskeem ja elektrienergiaga seotud suurused.

Toitemuundurisse võib olla ühendatud üle kümne päikesepaneelide jadaahela. Iga jadaahela või jadaahelate grupi kohta teostab toitemuundur maksimaalse võimsuspunkti järgimist ja reguleerimist (i.k *maximum power point tracking* – *MPPT*). Selline talitlus võimaldab leida automaatselt optimaalseima tööpunkti, sõltuvalt päikesekiirguse intensiivsusest ja temperatuurist. Maksimaalse võimsuspunkti reguleerimine toimub toitemuunduri poolt alalisvoolu-sisendist rakendatava koormusvoolu reguleerimisega. Sisendi koormusvoolu reguleeritakse, kuni tuvastatakse koormusvoolu väärtus, millise korral on AV-sisendist saadav võimsus suurim, võrreldes mõnel muul koormusvoolul saadava võimsusega.

Toitemuunduri (inverteri) väljund on seotud vahelduvvooluvõrguga madalpingetasemel

- 1-faasilises süsteemis on faasipinge (so faasijuhi ja neutraaljuhi vaheline pinge) nimisuurusega 230 V ja nimisagedusega 50 Hz.
- 3-faasilises süsteemis on iga toitefaasi faasipinge nimisuurusega 230 V ning liinipinge (so faasijuhtmete vaheline pinge) nimisuurusega 400 V. Nimisagedus on 50 Hz.

Suuremate PEJ puhul rakendatakse tüüpiliselt massiivset toitemuundurite rööpühendusskeemi, kus kõik toitemuundurid töötavad väljundpingega 400 V, olles

ühendatud sama vahelduvvoolusüsteemi juhistikuga. Selliselt koondatakse mitmete toitemuundurite väljundvool liitumis- või ühenduskilpides.

Tugev vahelduvvooluvõrgu ühendus on tagatud keskpingealajaama kaudu, milles paikneb toitetrafo. Viimase kõrgepingeahel on ühendatud keskpinge-jaotusvõrguga, mille nimipinge on 10 kV või 20 kV. Toitetrafo madalpingeahel on ühendatud nimipingele 400 V. Toitealajaam töötab 3-faasilises talitluses.

4.1 Päikeseelektrijaama inverterid

Päikeseelektrijaama inverterseadmed on mitmekülgsete toitemuundusfunktsioonidega seadmed, milles talitlevad

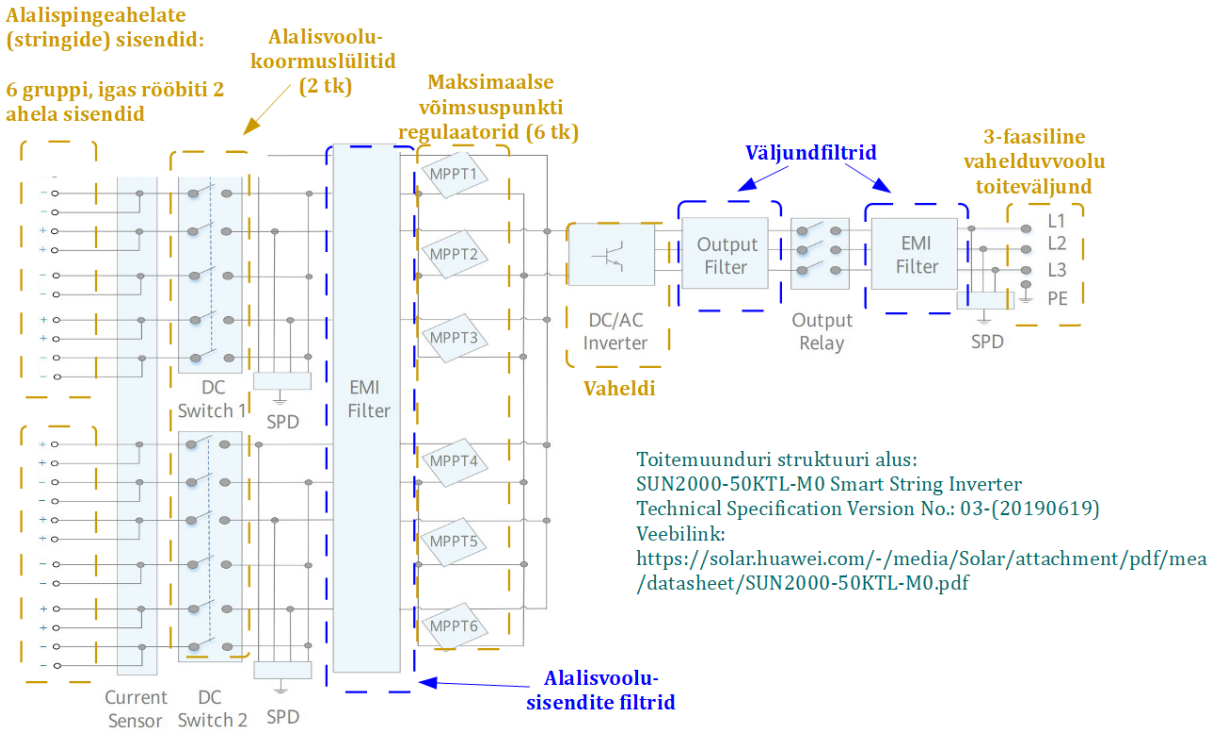
- Alalispinge-toitesisendist saadud toiteenergia muundamine stabiilsel pingel alalispingeliseks toiteenergiaks;
- Alalispinge-toitesisendi koormuse juhtimine vastavat päikesepaneelide oodatavatele talitluskarakteristikutele;
- Vahelduvvoolu-väljundis võimsusvoo tagamine erineval seadevõimsusel vastavalt alalistoitesisendis saadaolevale võimsustasemele.
- Kaitsefunktsioonid, ahela kontrollfunktsioonid ja muud talitluse üksikasju juhtivaid funktsioone tagavad ahelad.

Alalispingel töötavat toitesisendit toidetakse päikesepaneelidest ja nende jadaühenduses olevatest massiividest (i.k *string*). Ühe päikesepaneeli väljundvõimsuse vahemik on kuni mõnisada vatti, mistõttu suurte koguvõimsuste saavutamiseks ühendatakse sama inverterseadme sisendisse kümneid päikesepaneele jada-stringidesse ja ühe inverterseadme kooseesisu võib olla kümneid stringi-sisendeid.

Madalpingevõrguga liidestatava inverterseadme töö on tagatud tüüpiliselt vahelduvtoitevõrguga tugevas ühenduses. Inverterseadme väljundahelad on seadistatud tagama püsivoolu-allika talitluses võimsuse sisestamise toitevõrku. Iseseisva (saartalitluse või ka iseseisva talitluse) võimekus sellistel inverteritel tüüpiliselt puudub. Tugeva võrguühenduse kaudu saab inverter signaali vahelduvtoitesageduse täpse sageduse kohta, samuti on võrguühendusega tagatud võrgu stabiilne toitepinge tase. Inverteri poolt väljastatava voolutugevuse kujundamisel määrab kriitilise lähtekoha sisendist igal ajahetkel saadaolev võimsus. See on aga otseses seoses päikesepaneelidele langeva päikesekiirguse intensiivsusega.

4.1.1 Päikeseelektrijaama inverterseadme talitlusahelate struktuuri selgitus

Päikeseelektrijaama keskmise võimsusega (50 kW) inverteri struktuur on esitatud graafilise skeemina alloleval joonisel (vt Joonis 4-2). Esitatud näitel on tegemist ulatusliku struktuuriga, mis kaasab multistring-sisenditega struktuuri. Väikesema võimsusega inverterite struktuurid on lihtsama koosseisuga.



Joonis 4-2. Näide keskmise võimsusega päikeseinverteri sisemisest struktuurist.

Näitel (vt Joonis 4-2) esitatud alalistoitesisendid on kajastatud 12 string-sisendina, millest iga MPP sisend grupp toetab kuni 1100 V sisendpingel ja sisendvoolutugevust 22 A. Stringid omakorda on koondatud kahekaupa maksimaalse võimsuspunkti jälgimist teostava sisend-muunduri külge (joonisel võimsuspunkti regulaatorid).

Iga sisendipaari võimsuspunkti jälgimine tagab kõrgema väljundvõimsuse, kuna iga grupi (siin grupp on 2 stringi) kaupa reguleerimine toimub arvestades ainult selle stringi karakteristikuid ja võimsuspunkti arvestuses. Selline tehnoloogia võimaldab ühelt poolt tagada parima päikesepaneelide koormamise osalise varjutuse ja väikese päikesekiirguse intensiivsuse korral, samuti juhul, kui paneelid on osaliselt kaetud lumekihi või mustunud. Sisendigrupi jälgimiseks on rakendatud voolusensorid, mis monitoorivad iga stringipaari karakteristikuid, võimsuste hetkväärtust ja kontrollivad talitluspunkti vastavust maksimumtingimustele.

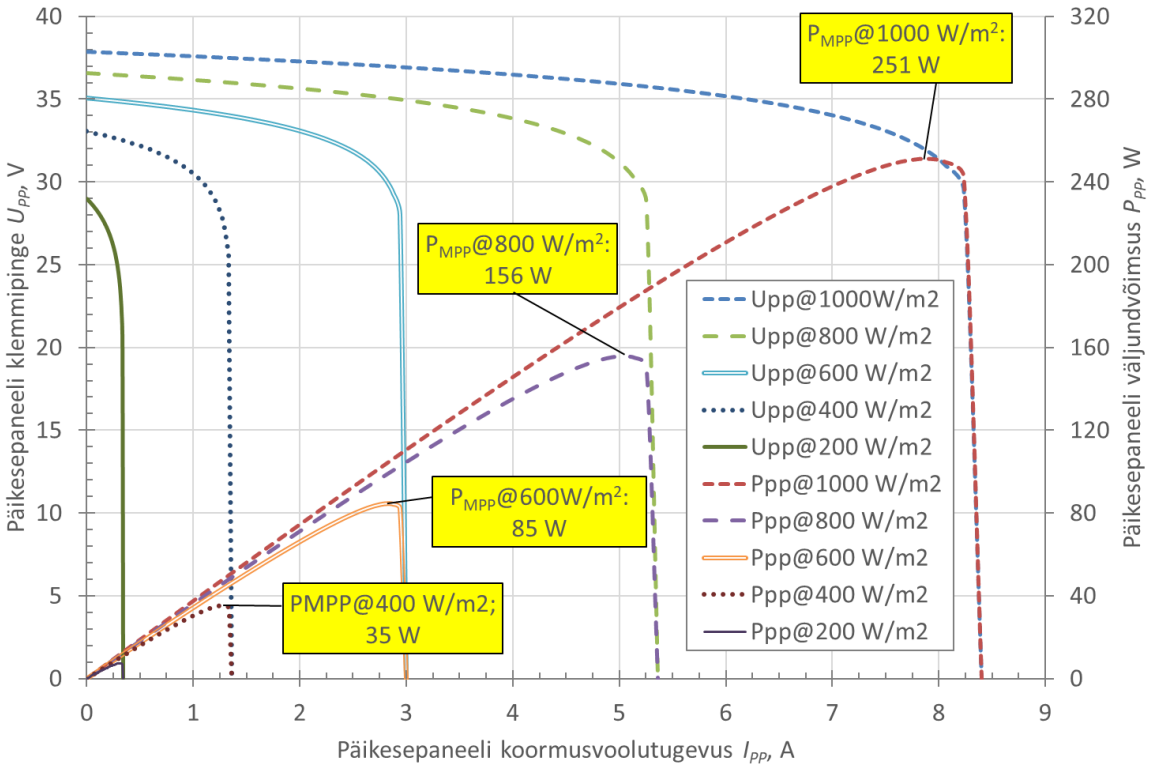
Võimsuspunkti regulaatorite järele on ühendatud alalisvoolu-puhverkondensaatorid, mis stabiliseerivad alalistoitesisendist saadud sisendpinget ja tagavad stabiilse talitluse koormuse kiirete muutuste korral

4.1.2 Päikesepaneelide pinge-voolu-võimsuse karakteristikud

Päikesepaneelide väljundvõimsuse (s.o inverterseadme sisendvõimsuse) karakteristikud on mittelineaarsete tunnusjoontega, mis on tingitud päikesepaneelides kasutatavate pooljuhtelementide karakteristikutest. Energiatootmisfunktsioonide seisukohast on päikesepaneeli olulisimad baassuurused

- Tühijooksupinge $U_{PP,TJ}$ (tähistus andmelehel V_{OC} vastavalt ingliskeelsele mõistele „tühijooks -> „open circuit“
- Maksimaalse võimsuspunkti pinge U_{MPP} (tähistus andmelehel V_{MP} vastavalt ingliskeelsele mõistele „suurim võimsus -> „maximum power“
- Maksimaalse võimsuspunkti voolutugevus I_{MPP} (tähistus andmelehel I_{MP} vastavalt ingliskeelsele mõistele „suurim voolutugevus -> „maximum current“
- Lühistalitlus-voolutugevus $I_{PP,LT}$ (tähistus andmelehel I_{SC} vastavalt ingliskeelsele mõistele „lühis“ -> „short circuit“

Nimetatud tunnused esitatakse päikesepaneelide nimitingimustel, milleks on paneeli temperatuur 20°C, päikesekiirgustugevus G_{NIMI} = 1000 W/m^2. Alloleval joonisel (vt Joonis 4-3) on näitena toodud päikesepaneeli pinge-voolu (UI)-karakteristikud, mille nimiparameetrid on esitatud allolevas tabelis (vt



Joonis 4-3. Näide päikesepaneeli UI-karakteristikutest. Paneeli tüüp: ZDNY-250C60, 250 W tootja ENF Ltd. Esitatud paneeli nimiparameetrid vt Joonis 4-2.

Tabel 4-1. Päikesepaneeli ZDNY-250C60 mudelis kasutatud parameetrid. Nimiparameetrid on esitatud andmelehel 1000 W² päikesekiirguse intensiivsuse korral, nimitingimustel (20°C, 1,5 AM).

Päikesekiirguse intensiivsus G (W/m²)	**Maksimaalse võimsuspunkti väljundpinge U_{MP} (V)**	**Maksimaalse võimsuspunkti väljundpinge I_{MP} (A)**	**Tühijooksu klemmipinge U_{TJ} (V)**	**Voolutugevus lühistalitlusel I_{LT} (A)**
200	27,8	1,5	32,5	1,7
400	29,4	3,2	34,8	3,4
600	30,2	4,8	36,0	5,0
800	30,8	6,4	37,0	6,7
1000	31,2	8,0	37,9	8,0

Päikese-elektrijaama inverterseadme roll on pidevalt jälgida sisendis olevat tööpunkti ja sellele vastavalt seadistada muundur, et selle sisendkoormuse tööpunkt oleks maksimaalse võimsuspunktile lähedal. Tööpunkti graafikutelt (vt Joonis 4-3) on ilmne, et maksimaalse võimsuse saavutamiseks on vajalik muunduri sisendastme juhtimine pidevalt ja kontrollides, kas vastavale sisend-päikesekiirguse intensiivsusele on lähedane parim tööpunkt on leitud või tuleb korrigeerida talitlust (st sisend-koormusvoolutugevust).

Päikeseelektripaneelide suurim võimsus antud päikesekiirguse intensiivsuse ja temperaturitingimuste korral on arvutatav võimsuse arvutustehtega

$$P_{MP} = U_{MP} \cdot I_{MP},$$

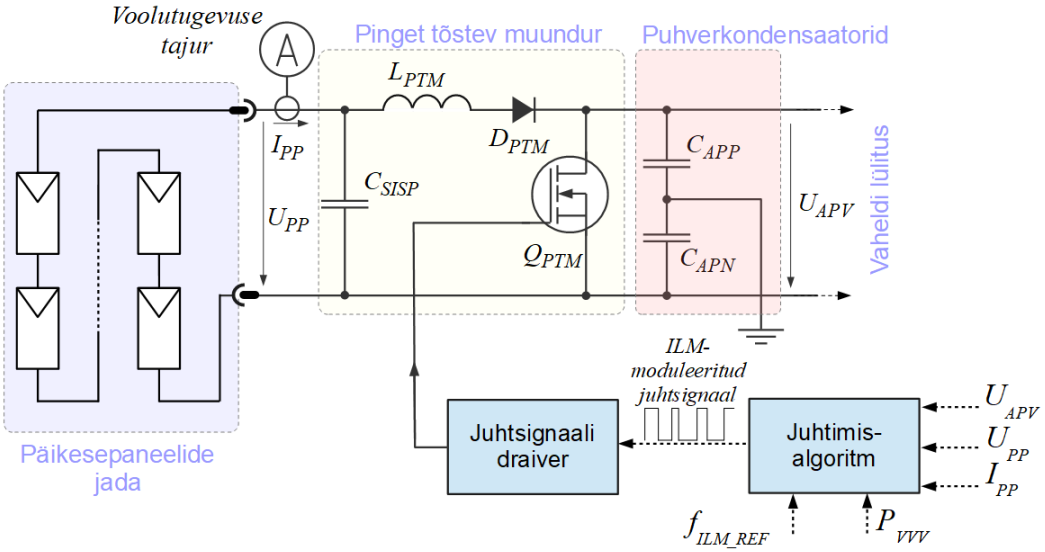
milles U_{MP} – maksimaalse võimsusega tööpunkti alalispingetase ja I_{MP} – maksimaalse võimsusega tööpunkti alalisvoolutugevuse suurus.

4.1.3 Alalistoitesisendiga seotud muunduri talitlusahelad

Muunduri talitlusahelate ülesehitus peab tagama ohutuse nii inimesele, kes paigaldise lähedal viibib ja sellega ühendatud seadmeid kasutab. Selles tuleb tagada EL madalpingedirektiivis esitatud nõuete täitmine, sh erinevate sidendite dielektrilise isolatsiooni tugevuse tagamine. Isolatsiooni tagamist päikeseelektrijaamade inverterites on teostatud varasemalt vahelduvvooluvõrgu-väljundi ja vaheldi-osa (vt Joonis 4-2) isolatsioonitrafo lisamisega. Võrgusageduslikule (50 Hz) talitlusele kujundatud trafo on suhteliselt massiivne ja sellega kujundab ka märkimisväärse osa hinnast.

Uuemad inverterseadmed on kujundatud selliselt, et isolatsioon tagatakse alalispingepoolel ja tänu sellele võib lisanduda mõningane keerukus alalistoite sisendi juures töötavate muundurite topoloogias. Siin rakendatakse tüüpiliselt pinget tõstva alalisvoolu-muunduri topoloogiaid (vt skeeminäide Joonis 4-4). Inverteri sisestruktuuris on vahe-alalispinge tüüpiliselt valitud selliselt, et alalis-vahelüli pinge U_{APV} on võrdne inverteri poolt antava väljundpinge parameetritega. See peab olema kõrgem, kui kasutatava vahelduv-väljundpinge maksimaalne tase. Näiteks 400 V nimi-vahelduvpinge korral peaks inverter olema võimeline tööks 440 V vahelduvpingetaseme korral, kui pinge amplituudväärtus on 620 V. Sellisel juhul oleks sobilik alalis-vahelüli pingetase näiteks 650 V. Juhul, kui alalissisend ei ole galvaaniliselt eraldatud, peab inverteri sisendisse tagama kahepolaarse pinge, st nii kondensaatoritel C_{APP} kui C_{APN} peaks olema tagatud 650 V tasemel pinge.

Pinget tõstva sisendmuunduri juhtimine (vt Joonis 4-4) toimub transistori Q_{PTM} sisse- ja väljalülitamisega. Transistorile annab impulss-laiusmodulatsiooniga (ILM, i.k *PWM – pulse width modulated*) juhtsignaali mikrokontrollersüsteemis töötav juhtalgoritm. Pinget tõstva muunduri koosseisus on sisend-puhverkondensaator C_{SISP}, muunduri jadainduktiivpool L_{PTM} ja sisendisuunalist voolu blokeeriv diood D_{PTM}, mis sageli asendatakse ka juhitava transistoriga kadude vähendamise eesmärgil.



Joonis 4-4. Päikeseinverteri stringisisendi näide, milles töötab pinget tõstev muundur.

Alalistoitesisendi juhtimine toimub selliselt, et oleks tagatud alalisvoolu-vahelüli pinge stabiilne tase. Vaheldilülituse-poolse tagasiside alusel saab alalis-sisendi muundur info hetk-väljundvõimsuse kohta. Sellele toetudes juhib sisendastet, et tagada päikesepaneelide stringide sisendis koormusvõimsuse, mis vastaks vaheldi poolt võetavale võimsusele.

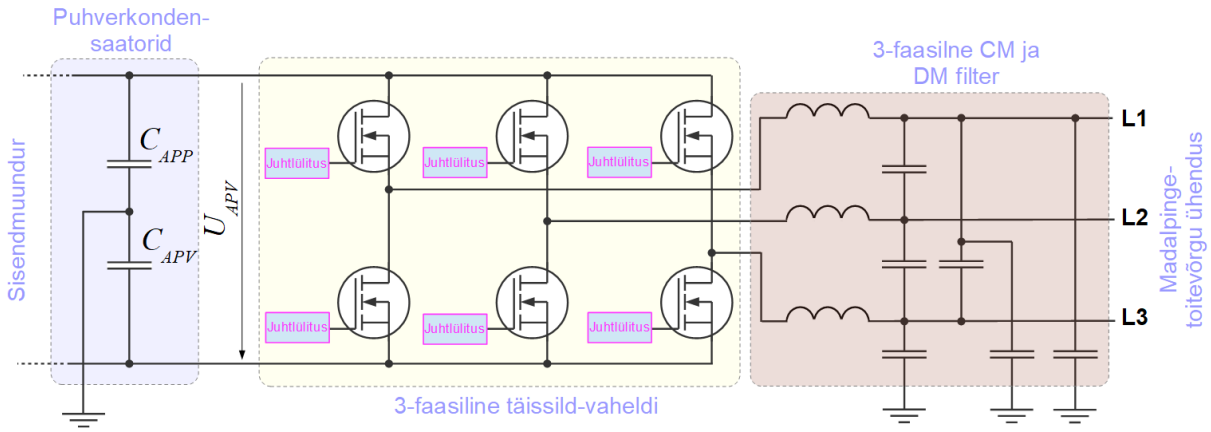
4.1.4 Vaheldi ja vahelduvvoolu-väljundiga seotud muunduri talitlusahelad

3-faasilise inverteri väljundi toiteks on ühendatud kolmefaasiline sild-vaheldi. Kolmefaasilises skeemis (vt Joonis 4-5) on vaheldi-ahelasse kujundatud kolm sildühenduses õlga, millest igas võib olla kasutuses 2 või enam jõutransistori. Viimased töötavad vaheldis lülitustalitluses.

Vaheldi väljundvoolutugevus kujuneb impulss-laiusmoduleeritud juhtsignaalide poolt tüüritud siinus-lähedase vahelduvvoolu juhtimise kaudu. Vaheldi tööd juhtiv algoritm tuvastab selleks madalpingevõrgu võnkesageduse ajastuse ja sünkroniseerib sisemise takteerimisüksuse. Antud võrgupinge sagedus-stiimuli järgi arutab algoritm siinusele lähedase lainekuju tunnus-arvumassiivi. Vastavalt alalissisendist saadaolevale tegelikule sisendvõimsusele suurusega saab vaheldi väljundvõimsuse P_{VVV} määrata kui

$$P_{VVV} \sim P_{PP} = U_{PP} \cdot I_{PP},$$

kui U_{PP} on päikesepaneelidelt inverteri alalistoitesisendisse antav pingesuurus, I_{PP} on samas tööpunktis sisendisse antav voolutugevus. Vaheldi väljundvõimsuse P_{VVV} tagamiseks mõõdab inverter madalpingevõrgu vahelduvtoitepinge taseme, selle järgi arvutatakse väljundvõimsuse tagamiseks vajalik väljundvoolutugevus I_{VVV} ja seatakse paika stiimul-protsessi amplituud.



Joonis 4-5. Kolmefaasilise täissild-vaheldi struktuuri näide.

Võrreldes sagedusmuundurite struktuuriga, on vaheldi osa siin põhjalikuma ehitusega ja seda peegeldab ka ahelat ja komponentide valik. Vaheldi väljundisse on paigutatud filtrid, mis võimaldavad vähendada tõhusalt lülitis-siirdeprotsessidega kaasnevate häiringukomponentide intensiivsust. Avaliku madalpingevõrguga ühendamiseks on sellised filtrid vältimatud, avalikes võrkudes kasutamiseks sobilikud seadmed peavad olema väikesema häiringutasemega, kui tööstusvõrkude seadmed. Siiski, tööstusvõrkudesse kasutamiseks sobilikud inverterid võivad omada oluliselt vähesema tõhususega filtreid ja sellisel juhul ei pruugi need olla sobilikus avaliku jaotusvõrguga ühendamiseks. Sellisel juhul on vastav märge ka selgesõnaliselt kantud inverterseadme kasutusjuhendisse.

4.2 Potentsiaalsed häiringumehhanismid päikeseelektrijaamas

Päikeseelektrijaamadega seotud suurema EM-häiringupotentsiaaliga talitlusahealad on seotud peamiselt inverterseadmete alalistoite-sisendmuundurite kaudu genereeritavate häiringutega. Lülitustalitluses muundurid on ühendatud sisendi juurde ja sageli on alalis-sisendi filtreerimine teostatud väga lihtsate ahelatega.

PEJ struktuuris olevad abisüsteemid on pigem passiivsed või oodatavalt mittesuure EM-häiringuemissiooni jäljega. Päikesepaneelid ise on passiivse jahutusega, mis on tagatud nende enda konstruktsiooniga (suur paneeli pindala). Ka inverterseadmed ise on ehitatud tihti välise passiivjahutusega, milles suuremad jahutusradiaatorid on avatud välisele õhuvoolule ning need radiaatorid on ka aktiivkomponentide jahutuseks nende monteerimiskoht seadme sees.

Juhul, kui inverteri sees või ka väljas on kasutuses jahutusventilaatoreid, on tegemist suhteliselt madala võimsusega mootoritega. Intensiivsemate EM-häiringute

põhjustamist siin ei ole oodata, kuivõrd juhistikud nende toiteahelas on lühikesed ja häiringuga seotud süsteemid ise väikeste mõõtmetega. Näiteks alalispingetoitel töötavad harjavabad mootorid omavad sisse ehitatud väikest inverter-ahelat, kuid selle töö on koondatud mootori koosseisus oleva väikese lülituse juurde.

Olulisemad EM-häiringupotentsiaaliga PEJ elemendid on päikesepaneelide tõhususe tõstmisega seotud nn optimeerijad. Need kujutavad endast ahelasse lisaks paigutatavaid abimuundureid, mille ülesanne on tagada täiendav jadaahelate lokaalne juhtimine selliselt, et võimalikult suur hulk PEJ koosseisus olevaid päikesepaneele töötaks oma tegeliku maksimaalse võimsuspunkti lähedal. Selleks aitab abimuundur teostada täiendava paneelide jadaahela optimeerimisülesande ja tagada voolutugevuse täpsustamiseks osalise koormusvoolu möödapääsu päikesepaneeli enda elementide ahelast. Sellised abimuundurid ühendatakse paneelide jadaahelatega rööbiti ja nende ühendused moodustavad suured silmus-kontuurid. Iga abimuunduri lülitusprotsessiga kaasnev juhitud häiring on nüüd silmusantenni-taolise kontuuri tõttu tõhus kiirgusliku häiringu tekitaja. Ka seni raporteeritud häiringujuhtumites Rootsis ja Hollandis oli häiringuemissiooni algupära seotud seal kasutatud abimuunduritega.

4.3 Täiendavad tingimused PEJ EM-häiringuemissioonide mõõtmiste läbiviimiseks

Päikeseelektrijaamas erinevatel väljundvõimsustasemetel mõõtmiste läbiviimine võimaldab paremini välja selgitada EM-häiringute tekitajate iseloomu. Siiski, inverterseadmed muundurid võivad väikesema võimsustaseme korral rakendada lülitusimpulsside hulka vähendavaid modulatsioone, mille korral võib inverterseadmed häiringuemissiooni tase kujuneda täisvõimsustalitlusest madalamaks. Seega võib ka praegusel juhul kasutada TEJ jaoks välja pakutud väikese ja suure väljundvõimsusega katsete stsenaariumid.

Päikeseelektrijaama EM-häiringusuuruste mõõtmiseks tuleb talitluse korduvusmustriks arvestada 20 ms, mis on kolmefaasilise vaheldiga inverterseadmed jaoks 50 Hz sagedusel siinuslainekujuga protsessi korduvusaeg. Päikesepaneelidelt saadud alalispingel võimsusvoo iseloom on püsiv ja see täiendavaid tingimusi ei sea.

IEC 61400-40 alusel on magnetväljatugevuse mõõtmine ette nähtud ainult ühes polarisatsioonitasandis (vertikaalne). Selle argumendiks on oodatavate tuulikust lähtuvate H-välja emissioonide esinemine. Tuuliku torni geomeetriat arvestades ei ole põhjust oodata H-välja komponentide esinemist, mida oleks otstarbekas mõõta silmusantenni horisontaaltasandis. Päikeseelektrijaamas on samas olemas ka

märkimisväärne pikkusmõõde. Selleks, et registreerida võimalikud pikisuunaliste kontuuride poolt tekitatud EM-häiringusuurused, on otstarbekas H-välja mõõtmine läbi viia ka silmusantenni horisontaalasendis.

5 Tuuleelektrijaama (TEJ) struktuuri ülevaade

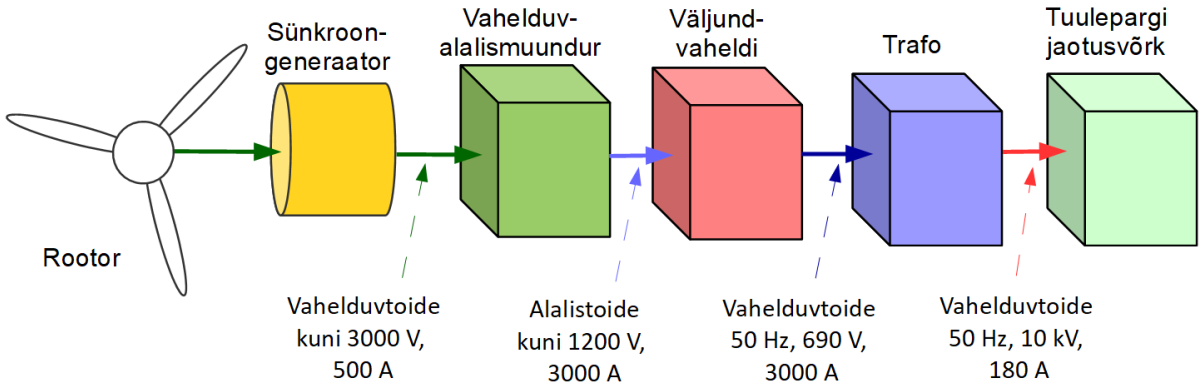
TEJ on terviklik süsteem, mille põhifunktsiooniks on keskkonnas oleva õhumassi liikumises oleva kineetilise energia muundamine elektritoiteenergiaks ja selle ette valmistamine edastamiseks elektritoiteenergia tarbijatele.

Tuuleenergia muundamine toimub turbiini abil, milles töötavad labad aerodünaamilise jõu arendamiseks. Labad on kinnitatud tiivikurummule (i.k *hub*), mis käitab tuuliku sisendvõlli. Suhteliselt aeglaselt liikuvate labade poolt arendatav mehaaniline jõud edastatakse peavõllile, rummu ja võlli koostu nimetatakse ka tuuliku rootoriks. Rootori poolt arendatav pöördemoment suunatakse tüüpiliselt edasi planetaar-reduktorile, mille ülesandeks on pöörlemissageduse kordistamine enne generaatorile suunamist.

Mehaanilise pöörlemise abil edasi antud kineetiline energia muundatakse pöörleva elektrimasina abil elektrienergiaks. Tüüpilisemaks muunduriks on sünkroongeneraator, mis rakendab rootori abiergutust või püsimagnetergutust. Sünkroongeneraatori valik on pragmaatiline, kuivõrd suurema pöörlemiskiirusega töötav generaator on kergem, kuid vajab täiendavalt suure massiga reduktorit; madalama pöörlemiskiirusega generaatori aktiivosade mass on suurem ja ülesehitus sageli kohmakam, mis kajastub jahutus- ja hooldustingimuste ja -meetmete keerukuses.

Generaatori väljundiks on vahelduvpinge- ja voolutugevus. Väljundparameetriteks olevad pinge- ja voolutugevuse aga ka sageduse suurused sõltuvad generaatori pöörlemissagedusest. Selline generaator on ühendatud lokaalsesse süsteemi, kuivõrd kõikide väljundparameetrid võivad samasse tuuleparki koondatud tuulikutel olla erinevad. Generaatori väljundsageduseks on üldiselt otsemuundusgeneraatoritel kuni 15 Hz ja reduktoritega ühendatud generaatoritel kuni 50 Hz. Pingetasemed ulatuvad kuni 3000 V-ni, kuivõrd kõrgema pingetasemega generaatoritel suureneb keerukus täiendava isolatsioonitugevuse tagamiseks. MW-väljundvõimsusklassi generaatoritel on koormusvoolutugevuseks kuni 2000 A. Generaatori koormamine toimub suurel määral sarnaselt PEJ koosseisus oleva inverterseadme funktsioonidega, milles sisendmuundur järgib päikesepaneeli optimaalset koormuskarakteristikut maksimaalse võimsuspunkti leidmiseks. Generaatorite kasutegur nimitalitluspunktis on võib ulatuda üle 95% taseme.

TEJ elektritoitesüsteemi üldine struktuur on kirjeldatud alloleval joonisel (vt Joonis 5-1).



Joonis 5-1. Elektrituuliku üldine muundamisega seotud elektritoiteahelate skeem 3 MW väljundvõimsusega tuuliku vaates.

Elektrituulikute ühendamine üldisesse toitevõrku toimub toitevõrguga sünkroonsel sagedusel 50 Hz. Muundamine toimub sageli kahes astmes: eraldi seadmestik on generaatori koormamiseks, see asub reeglina gondlis; alalissuurused viiakse torni kaudu tuuliku jalamile, milles paikneb tuuliku väljundvaheldi ja keskpingetrafo. Tuulikute peamiste toiteahelate struktuure muundurite erinevate paiknemis- ja ühendusviisidega on kasutuses mitmeid.

5.1 Tuule-elektrijaama (TEJ) muundurseadmed

Tuule-elektrijaamas paiknevad muundurseadmed omavad mitmekülgseid funktsioone, milles tagatakse järgmised toimingud:

- Generaatorilt saadud vahelduvpingel antava toiteenergia muundamine stabiilsel pingel alalispingeliseks toiteenergiaks;
- Generaatori koormuse juhtimine vastavat oodatavatele talitluskarakteristikutele ja korrektse töö-võimsuspunkti tagamine;
- Alalisvoolul antava toiteenergia vaheldamine stabiilsel toitesagedusel vahelduvpingel edastatavaks toiteenergiaks;
- Vahelduvvoolu-väljundis võimsusvoo tagamine erineval seadevõimsusel vastavalt alalistoitesisendis saadaolevale võimsustasemele.
- Kaitsefunktsioonid, ahela kontrollfunktsioonid ja muud talitluse üksikasju juhtivaid funktsioone tagavad ahelad.

Generaatori koormus kujundatakse läbi mitmeastmeliselt tagasisidestatud süsteemi, milles turbiini pöörlemissageduse jälgimise abil hoiab automaatjuhtimissüsteem tuuliku võllile generaatori poolt tekitatava koormuse vastava igal ajahetkel saadaolevale tuuleenergia-sisendvõimsusele. Kuigi siin on mitmeid sarnasusi päikeseelektrijaama (PEJ) talitluse ja reguleerimispõhimõtetega, on tuulikus vaja jälgida täiendavat

stabiilsuskriteeriumide komplekti. Nimelt, PEJ-s on päikesepaneelide koormamine seotud üksnes võrku edastatava võimsuse reguleerimisega. TEJ-s aga on vaja hoida rootori pöörlemiskiirust ettenähtud vahemikus ja rootori poolt arendatava momendi juhtimisel ei ole tegemist mitte ainult elektrilise väljundvõimsuse reguleerimisega, vaid ka generaatori mehaanilise koormuse reguleerimise ja tuuliku labade mehaanilise asendi juhtimisega. Seega TEJ-s tuleb tagada

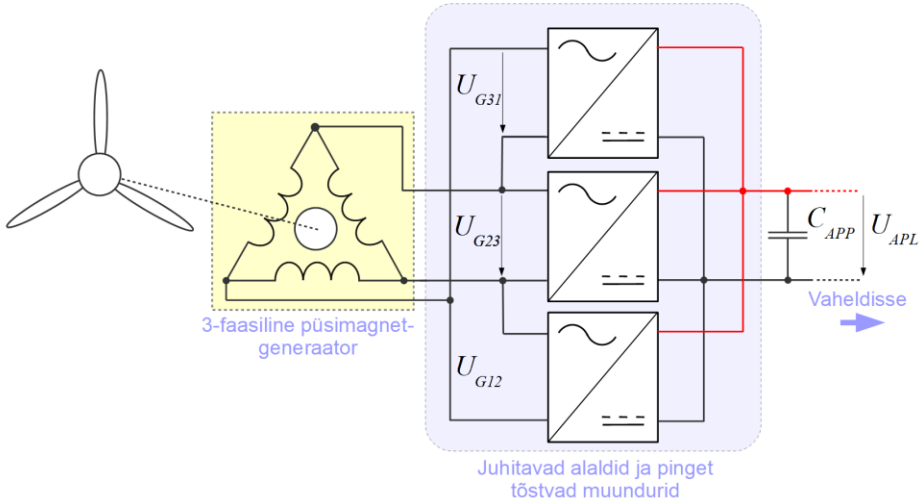
- Tuuliku rootori pöörlemissageduse hoidmine läbi labade pööramise;
- Generaatori koormuse reguleerimisega sisendvõimsusele vastava koormuse tagamine;
- Vaheldi väljundvõimsuse reguleerimine lähtuvalt generaatorist saadavale võimsusele.

Kui üks või mitu kirjeldatud lüli ei täida oma ülesannet, võib rootor kas kiireneda ohtliku pöörlemissageduseni, kus tekivad mehaaniliste kahjustuste oht või vastupidi, pidurduda seiskumiseni, mille korral rootorilt saadav võimsus kahaneb nullini.

Võimsustasakaalu saavutamiseks on elektrituulikul rakendatud tüüpiliselt ka abiahelad, mis ongi ette nähtud avariiolukorras täiendavaks võimsuse väljastamiseks. Tuulikute juurde on sageli paigaldatud näiteks ballast-takistusplokid, milles on sees koormustakistid. Juhul, kui tuuliku generaatori poolt väljastatava võimsuse edastamine jaotusvõrku on ebapiisav, suunatakse võimsus koormustakistitele, et hajutada see ümbritsevasse keskkonda.

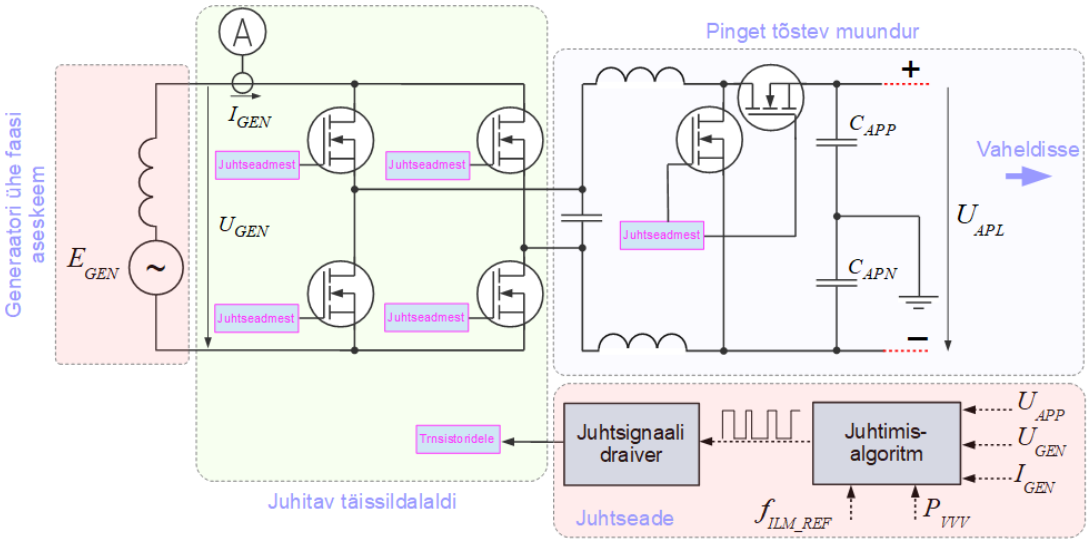
5.1.1 Elektrituuliku muundurseadmete talitlusahelate struktuuri selgitus

Seoses generaatori koormamise suure dünaamilise ulatusega, samuti seoses generaatori erinevatel pöörlemissagedustel olevate tööpunktide parima kasuteguriga elektrienergia saamiseks, rakendatakse generaatori koormuseks tüüpiliselt juhitavaid alaldeid. Kolmefaasilise generaatori koormamisel siinuslainekujuga koormusvooluga on kõikide faaside koormus igal ajahetkel konstantne. Iga generaatori faasi mähiste komplekt on koormatud omaette alaldus-muunduriga, mis võimaldab kolmefaasilise generaatori iga faasi eraldi reguleerimist (vt Joonis 5-2).

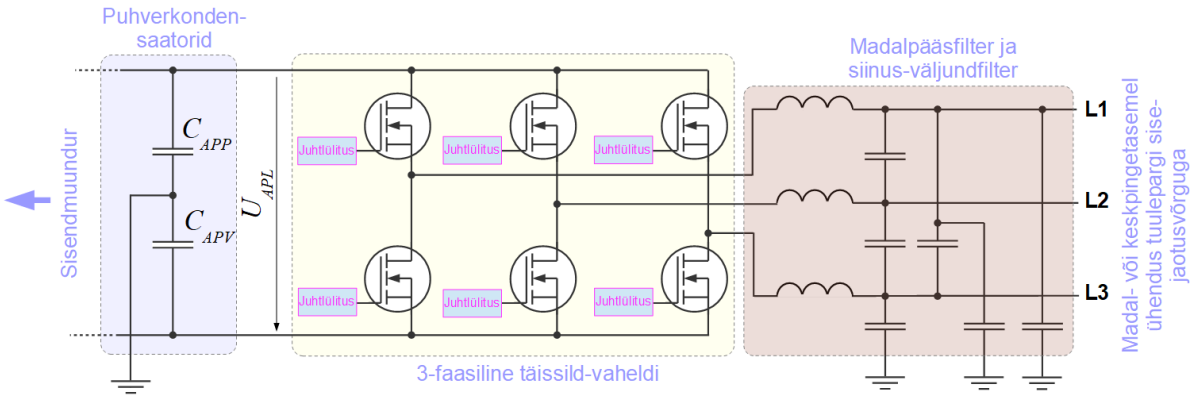


Joonis 5-2. Tuuliku generaatori väljundiga seotud ahelate struktuuri kirjelduse üldvaade.

Juhitavaks alaldiks ja esimeseks muundusastmeks on impulss-laiusmodulatsiooniga juhitav täissild-lülitus (vt Joonis 5-3). Selline lülitus on võimeline sooritama nii pinget tõstvat kui ka pinget madaldavat talitlust, mille omadusi saab konfigureerida pea täies ulatuses tarkvaraliste meetmetega (nt pooljuhtseadiste lülitamiste ajastamisega). Lisaks sellele võib alalistoiteahelas olla täiendavalt pinget tõstev või madaldav lülitus, mis taaskord töötab impulss-laiusmodulatsiooniga tüüritult.



Joonis 5-3. Tuuliku generaatori koormamisega seotud juhitava alaldi ja alaldatud pinget tõstva muunduriga näidisahel.



Joonis 5-4. Elektrituuliku väljundahela näidis.

Elektrituuliku väljundahelas on kolmefaasiline vaheldi (vt Joonis 5-4), mida samuti tüüritakse impulss-laiusmodulatsiooni abil. Selliselt on võimalik parima dünaamikaga tagada vaheldi väljundvõimsuse vastavus generaatorist ja eelnevatest muundus-astmetest saadud võimsusele.

EM-häiringute tekkemehhanismide kirjeldamises osas TEJ energiamuundus-ahelatest tuleb arvestada, et suurema võimsusega elektrituulikutes on kasutuses muundurid, milles olevate induktiivkomponentide ja kondensaatorite dimensioonid on suured. Põhjuseks on nendes puhverdatava energiakoguse suuruse kaalutlused. Selliste ahelate lülitussagedused on madalamad PEJ ahelates kasutatavatest (8 – 16 kHz TEJ puhul vs 20 – 80 kHz PEJ puhul) ja ahelate enda inerts suurem. Tänu sellele on TEJ energiamuundusahelate põhilülituste tõttu oodatavad potentsiaalsed häiringusuurused samuti spektris paigutunud pigem madalamatele sagedustele.

5.2 Tuule-elektrijaama abikomponendid ja lisaahelad

Elektrituulikus (TEJ) peavad talitluse ajal pidevalt töötama erinevad abiseadmed, mis on mitmetel juhtudel elektrimootoritega ajamitel põhinevad täiturid. Enamikul juhtumitest kasutatakse kas tagasisidestatud muutuvkiirusega ajamit, või teisel juhul servoajamit, millel teostatakse mootori või asendi positsiooni täppisjuhtimist. Nendes olevaid mootoreid käitatakse sagedusmuunduri toitel, mille abil saab kujundada nii mootorite staatilist kui ka dünaamilist karakteristikut. Alljärgnevas tabelis on näidisloetelu erinevatest süsteemidest, mis suure võimsusklassi tuulikus mootorsüsteemidega seotud on (vt Tabel 5-1).

Tabel 5-1. Näidisloetelu täitursüsteemidest, mis on elektrituulikus mootoritega ja potentsiaalselt sagedusmuunduritega varustatud.

Alamsüsteemi nimetus	Mootorite loetelu	Mootorite roll
Asimuudisüsteem	Asimuudiajami mootorid	Pööravad gondlit, et joondada rootor tuulesuunaga tavatalitluse ja tuulesuuna muutuste ajal.
Laba kalde süsteem	Laba kaldenurga ajamid	Muudavad laba kaldenurka võimsuse reguleerimiseks, käivituseks, seiskamiseks, ülemkiiruse kaitseks ja koormuse juhtimiseks.
Reduktori määrdesüsteem	Määrdeõlipumba mootorid	Käigukasti õli tsirkulatsioon määrimiseks, jahutamiseks, filtreerimiseks ja rõhu hoidmiseks.
Reduktori õlijahutus	Õlijahuti ventilaatori mootorid / jahutusvedeliku pumba mootorid	Eemaldavad käigukasti õlist soojust õhk- või vedelikjahutuskontuuride kaudu.
Generaatori jahutussüsteem	Jahutusventilaatori mootorid / jahutusvedeliku pumba mootorid	Soojust eemaldamine staatorilt, rootorilt, laagritelt ja korpusest, et hoida generaator ettenähtud talitlus-temperatuurivahemikus
Muunduri / jõuelektroonika jahutus	Jahutusventilaatori mootorid / jahutusvedeliku pumba mootorid	Jahutavad muundureid, invertereid, alaldeid ja nendega seotud abiahelaid.
Hüdraulikaseade	Hüdraulikapumba mootor	Tagab hüdraulilise rõhu piduritele, laba kaldenurga hüdraulikale jt ajamid hüdraulilise lahenduse korral.
Suurte laagrite määrimine	Automaatse määrdepumba mootorid	Doseerivad määret pealaagritele või pöörderõngastele etteantud intervallidega.
Gondli ventilatsioon	Ventilaatormootorid / puhuri mootorid / kompressorimootorid	Hoiavad gondli, seadmekilpide ja torni temperatuuri ning niiskuse seadmete töökindluse tagamiseks kontrolli all.
Trafo jahutus	Jahutusventilaatori mootorid / õlitsirkulatsioonipumba mootorid	Jahutavad gondlis või tornis paiknevaid trafosid kasutades sundõhk- või sundõlijahutust.

Alamsüsteemi nimetus	Mootorite loetelu	Mootorite roll
Külma kliima kütte- / ringlussüsteem	Jahutusvedeliku ringluspumba mootorid / puhuri mootorid	Eelsoojendavad või tsirkuleerivad sooja õhku või jahutusvedelikku taaskäivituseks ja tööks madalatel välistemperatuuridel.

Tabelis loetletud süsteemid omavad laia mootorite valikut, mis erinevad võimsuse ja pöörlemiskiiruse poolest. Iga mootor on seejuures varustatud oma sagedusmuunduriga ja tuulikus tervikuna on kümneid mootorite-sagedusmuunduritega seotud toiteahelaid.

5.3 Potentsiaalsed häiringumehhanismid elektrituulikus

Tuulikus olevate süsteemide töö sõltub tuuliku üldisest talitlusest, sh TEJ poolt võrku genereeritavast toitevõimsusest. Arvestades erinevate sagedusmuunduritega ajamite talitlusega ja ülesannetega elektrituuliku tulemuslikuks tööks, tuleb lisaks peamisele elektrienergia genereerimise funktsioonile kaaluda erinevate alamsüsteemide rakendamise tõenäolisi olukordi.

Tuuliku rootori seisatud olekus võivad olla käigus erinevad õlitus- ja hüdraulikasüsteemide ajamid. Tuuliku käivitamisele eelnevalt pööratakse tuuliku rootor tuule suunas; tuuliku labade pöörlema hakkamise eel peavad töös olema kõik talitlusüksused, mis oleksid võimelised labade kaldenurki muutma. Lisaks võivad käigus olla jahutuskontuurides oleva õli ja jahutusvedeliku tsirkulatsioonisüsteemid.

Tuuliku töös madalal kiirusel/väljundvõimsusel on lisaks eelnevale töös jahutus-seadmed ja aktiveeritakse ventilaatorid nii reduktori kui ka generaatori poolt eraldatava soojusvoo eraldamiseks ümbritsevasse õhku.

Tuuliku töös suurel kiirusel/väljundvõimsusel on täisvõimsusel töös nii jahutuskontuuridega seotud täiturseadmed (ventilaatorid, pumbad) kui ka määrdeainete tagamise süsteemid. Lisanduvad gondli seadmete üldised jahutussüsteemid, mis eriti suvel intensiivselt eralduva soojuse tingimustes tagavad terve gondli seesmise jahutamise. Aktiveeritud on ka TEJ jalamil ja torni allosas olevate seadmete jahutusfunktsioonid.

Tänu kõikide erinevate alamsüsteemide talitlusele tuuliku juures on põhjendatud tuuliku EM-häiringute mõõtmisel tähelepanu osutamine nii tuuliku jalamil esineva EM-häiringuolukorra mõõtmiseks kui ka potentsiaalselt gondlit emiteeritavate EM-häiringusuuruste mõõtmine. Selline lähenemine on esitatud ka IEC 61400-40

normdokumendi koosseisus toodud mõõtmiste stsenaariumide kavas. Ka antud aruandes esitatud ettepanekud TEJ mõõtmiste läbiviimiseks järgivad sama kava.

5.4 Tingimused mõõtmiste läbiviimiseks

Täiendavate tingimustena IEC 61400-40 normdokumendis välja pakutud mõõtemetoodika juures on esitatud viited mõõtmiste sooritamise ajale. IEC 61400-40 kirjeldab selleks tuuliku rootori 1 pöörde sooritamise pikkust ajavahemikku.

Kolmelabalise rootori korral on elektriliselt sarnase olukorra kordumine reaalne iga laba liikumisel kolmandiku pöörlemistsükli võrra. Tuuliku rootori pöörlemiskiirus ei ületa võimsamatel tuulikutel 20 p/min taset (1 MW võimsusega ja suuremad). Siit kolmandiku pöörde sooritamise aeg vastab ligikaudu 1 sekundile.

Elektrienergia edastamisega ja esmase muundamisega seotud ahelad talitlevad kordustsükliga 20 ms, see on oluliselt kiirema korduvusajaga kui on rootori pöörlemise tsükkel.

Seega sageduspunkti mõõtmisaja pikkus peaks olema vähemalt 1 s, et registreerida olukord, mil labade asendi tõttu esineb sarnane juhtivate osade ja talitlustingimuste kordus. Arvestades CISPR 16-1-1 mõõtevastuvõtjate sagedussammu suurust ¼ ribafiltri pääsuriba laiusest, on selline mõõteaeg ilmselt piisav, et katkematu sagedusspektri mõõtetulemus registreerida.

TEJ mõõtmisel esitab IEC 61400-40 protseduurilise ülevaate, milliste antennidega ja millises suunas seadistatud antennidega TEJ mõõtmist läbi viiakse. Põhijoontes on üle 30 MHz sagedustel vaja sooritada kokku 2 mõõtmiste komplekti:

1) Mõõtmine torni suunas, antenni kõrgus 2,0 m maapinnast, antenn suunatud torni keskteljele. Mõõtmine teostatakse nii vert. kui hor. polarisatsioonis.
2) Mõõtmine gondli suunas, antenni kõrgus 2,0 m maapinnast, antenn suunatud gondli keskteljele. Mõõtmine teostatakse nii vert. kui hor. polarisatsioonis.

Antud mõõteviisi kasutatakse nii 30 MHz ... 1 GHz kui ka 1 GHz ja kõrgemate sageduskomponentide mõõtmisel. 150 kHz ... 30 MHz sagedusvahemikus toimub mõõtmine silmusantenniga ainult 1 pol. tasandis (vertikaalne), kuivõrd horisontaalse häiringukomponendi intensiivset esinemist ei ole tuuliku torni geomeetrilise ülesehituse korral oodata.

6 Metoodika elementide kaalutlused TE paigaldiste mõõtmiseks

IEC 61400-40 normdokument on esitatud üksikus TEJ paigaldise mõõtmiseks ja see on hetkel normdokumentide esitatud seisukohtades lähtekoht tervikliku paigaldise mõõtmiseks. Siiski, IEC 61400-40 normdokumendis esitatud põhimõtetes on esitatud mitmed asjaolud, mis nii reaalsetes oludes mõõtmiste läbiviimisel vajab täiendavat käsitlemist.

6.1 IEC mõõtemetoodika üldkirjeldus TEJ vastavushindamiseks

IEC 61400-40:2026 esitab tingimused üksiku TEJ süsteemi EM-ohjeks rakendatavatele meetmetele vastavuse hindamiseks. Vastavus IEC 61400-40:2026 normatiivalusele on tagatud, kui mõõtmistel registreeritud EM-emissioonide tasemed ei ületa CISPR 11:2015 (Eesti standardina EVS-EN-IEC 55011:2016) tabelis 16 esitatud tasemeid. **Tähelepanu! Erinevates CISPR standardi versioonides võib seesama tabel olla erineva numbriga.** Näiteks CISPR 11:2024 väljaandes (Eesti standardina EVS-EN-IEC 55011:2025) on selle tabeli numbriks 20. Piirtasemete väljavõte on esitatud allolevas tabelis (vt Tabel 4-1).

Tabel 6-1. IEC 61400-40:2026 / CISPR 11:2015 tabel 16 kirjeldatud piirtasemed. Kõikide esitatud suuruste puhul on tegemist kvaasitippväärtus-suurusega.

Spektrikomponendi sagedus, MHz	Elektriväljatugevus dB(µV/m)	Magnetväljatugevus dB(µA/m)
0,15 … 0,49		– 13,5
0,49 … 3,95		– 3,5
3,95 … 20		–11,5
20 … 30		–21,5
30 … 230	30	
230 … 1 000	37	

Tabelis esitatud piirsuurused on sagedusvahemikus 0,15 … 30 MHz esitatud magnetväljatugevuse-piirsuurusega ning sagedusvahemikus 30 MHz … 1000 MHz elektriväljatugevuse-suurusega. Piirsuuruste kohta täpsemalt vt peatükk 9.

TEJ poolt emiteeritavate EM-suuruste mõõtmiseks kasutatakse tajuritena

- Sagedusvahemikus 0,15 … 30 MHz kasutatakse CISPR 11 esitatud mõõtmismeetodite alusel CISPR 16-1-4 vastavat silmusantenni, mille madalaim punkt paigutatakse 1,0 m kõrgusele maapinnast.

- Sagedusvahemikus 230 ... 1000 MHz kasutatakse CISPR 11 esitatud mõõtmismeetodite alusel CISPR 16-1-4 vastavat logoperioodilist antenni, mille keskpunkt paigutatakse 2,0 m kõrgusele maapinnast.

Mõõtetajurite väljundis olev pingesuurus mõõdetakse elektromagnetiliste häiringute kontrollvastuvõtjaga (ik *electromagnetic interference receiver*, *EMI-receiver*), millelt nõutakse vähemalt järgmiseid funktsioone:

- Mõõtetulemuste kvaasi-tipp detektor.
- Sagedusvahemikus 150 kHz ... 30 MHz mõõteribafiltri laius 9 kHz;
- Sagedusvahemikus 30 MHz ... 1000 MHz mõõteribafiltri laius 120 kHz;
- Häiringuvastuvõtja sagedussammu suurim väärtus pool mõõteribafiltri laiust.
- TEJ mõõtmisel peaks ühe sagedussammu jälgimine toimuma TEJ rootori 1 pöörlemistsükli jooksul.

IEC 61400-40 koosseisus välja pakutud meetmed erinevad samas kontekstis CISPR-seeria dokumentides esitatud juhistest.

6.2 Elektri- ja magnetväljatugevuste mõõtmine

Kiirguslike EM-häiringute mõõtmiseks rakendatavate tajurite valiku osa juhendab normatiiv CISPR 16-1-4:2025 (Eesti viide: EVS-EN IEC 55016-1-4:2025). Antud normatiiv on nimetatud mh IEC 61400-40 dokumendi mõõtmiste läbiviimise kontekstis. CISPR 16-1-4 kohaselt on häiringute mõõtmiseks nõutud lineaarselt polariseeritud antenn, mille paigutus on võimalik kõikides olulistes lainefrondi polarisatsioonitasandites.

6.2.1 Mõõteantennide tüübid

Arvestades nii IEC 61400-40 kui ka CISPR 16-2-3 juhiseid kiirguslike häiringute mõõtmiste läbiviimiseks, on vajalik järgmiste antennide kasutamine CISPR 16-1-4 kontekstis

- 150 kHz ... 30 MHz
  - Magnetväljatugevuse mõõtmiseks on sobilik varjestatud silmusantenn, mille suurima külje pikkus on kuni 60 cm.
  - Magnetvälja-antenni baaspunktiks on selle antenni silmuse keskpunkt.
- 30 MHz ... 1 GHz
  - Elektriväljatugevuse mõõtmiseks tuleks rakendada hübriidantenne, bikoonilisi antenne või logoperioodilisi dipool-antenne.
- 1 GHz ... 3 GHz

- Elektriväljatugevuse mõõtmiseks tuleks rakendada lineaarselt polariseeritud antenne, sh logoperioodilisi dipool-antenne või ruuporantenne.

Mõõtesüsteemi jaoks teostab ülalkirjeldatud antenn järgmised sisendsuuruse muundamised:

- Silmusantenn muundab mõõteasukohas esineva magnetväljatugevuse (H-väli) suuruse pingesuuruseks ja sobitab selle 50 Ω väljundtakistusega.
- Logoperioodiline antenn muundab mõõteasukohas oleva elektriväljatugevuse (E-väli) suuruse pingesuuruseks ja sobitab selle 50 Ω väljundtakistusega.

Elektromagnetilise ühilduvuse valdkonnas eeldatakse üldjuhul, et mistahes mõõtmisel on tegemist kaugvälja-olukorraga, seda ka alla 30 MHz sagedustel mõõtmisel. Seetõttu rakendatakse mõnes kontekstis eeldust, et elektri- ja magnetväljatugevuste vaheline seos on alati võrdne vaba ruumi lainetakistusega e. 377 Ω:

$$E_{MÕÕT} \sim H_{MÕÕT} \cdot 377\Omega$$

6.2.2 Antennitegurid

Mõõteantennide puhul kirjeldab antenni poolt väljastatava pingesuuruse ülekandetegurit antennitegur. Füüsikalises plaanis kirjeldab antennitegur sellist väljatugevuse taset, mille korral esineb antenni väljundis ühikuline pingesuurus. Elektriväljatugevuse mõõtmisel

$$AF = \frac{E_{MÕÕT}}{U_{AVÄLJ}},$$

logaritmilistes suurustes ja EM-häiringute süsteemis sagedamini kasutatavates µV/m ühikutes

$$AF_{dB/m} = \frac{E_{MÕÕT}\,[dB\mu V/m]}{U_{VÄLJ}\,[dB\mu V]}.$$

Magnetväljatugevuse suuruste puhul on täiendavalt vaja kaasata teisendus 1 A = 1 V / 1 Ω, mille tulemuseks on

$$AF_{dBS/m} = \frac{H_{MÕÕT}\,[dB\mu A/m]}{U_{VÄLJ}\,[dB\mu V]}$$

Antennitegurite väärtused on esitatud antennide kalibreerimistunnistustel. Tähelepanud tuleb juhtida asjaolule et antenni kalibreerimise metoodikal võib olla teatav mõju

antennitegurite raporteeritud suurustele. CISPR-seeria normdokument antennide kalibreerimismeetmete kirjeldusega on CISPR 16-1-6.

Antennitegurid esitatakse kalibreerimisel kasutatud tingimustes, milles on märgitud mh antenni kalibreerimisel rakendatud kaugus kiirgusallikast (nt 3 m, 5 m, 10 m vm). Üldjuhul viiakse kalibreerimine läbi selliselt, et antenni aktiivosade lähedal juhtivast materjalist komponente ei ole. Antennide kalibreerimisel esitatud antennitegurid kehtivad juhul, kui antenni rakendatakse mõõtmisel samal viisil, nagu see kalibreerimisel üles oli seatud. See tähendab, et mõõtmiste läbiviimisel peab samuti olema tagatud antennide hoidmine juhtivatest detailidest, sh antenni enda kinnitamiseks rakendatud tugitarindite metallosadest mõjusasse kaugusesse. Soovitav on rakendada täielikult isoleermaterjalist valmistatud antenni tugitarindeid.

6.2.3 Mõõteantennide seadistamine

Mõõteantennide seadistamine toimub lähtudes soovitustest, mis on esitatud suuremõõtmeliste objektide nende talitlusasukohas mõõtmiseks. CISPR 16-2-3 esitab punktis 7.7.3.1, et mõõteantenni ja läheduses asuvate metallosade, sealhulgas kaablite, vaheline kaugus peaks olema suurem kui 2 m.

Sama normatiiv esitab soovituse kasutada bikoonilisi antenne mõõtmisteks sagedusalas kuni 200 MHz ning logaritmilis-perioodilisi antenne mõõtmisteks sagedusalas üle 200 MHz.

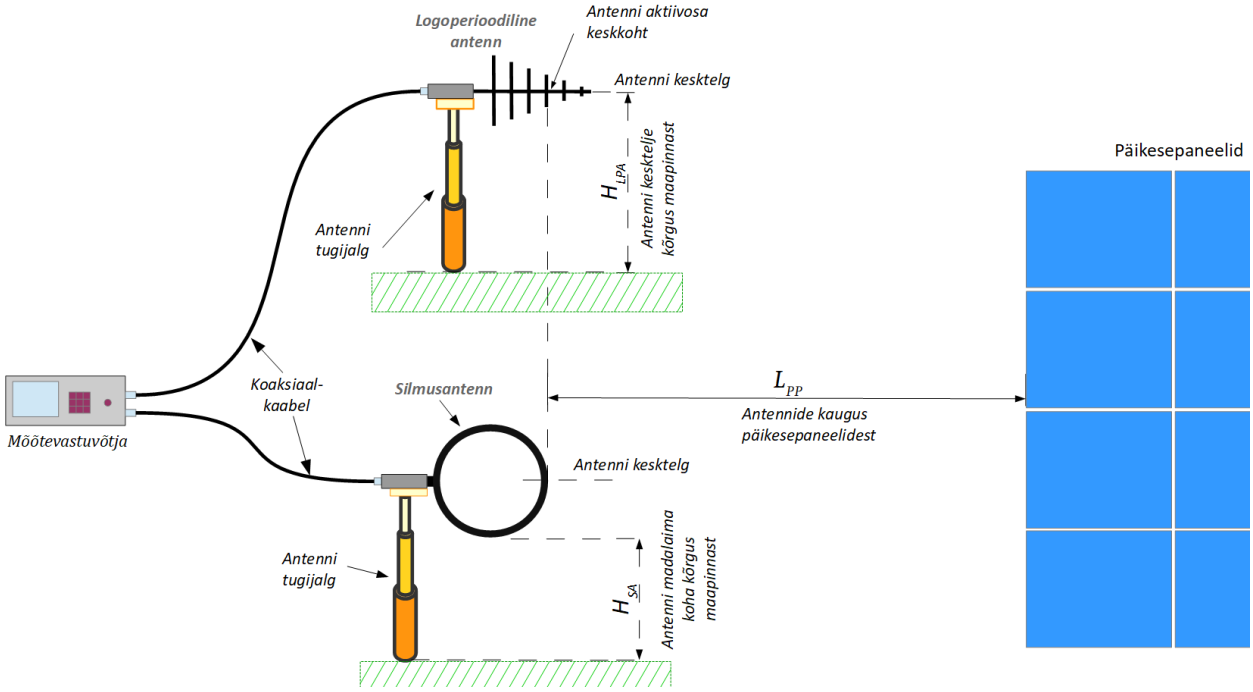
Antennimastidele ja kinnitustele esitab nõuded CISPR 16-1-4, mille punktis C4 ja C6 esitatud tingimused võimaldavad tagada elektri- ja magnetväljade mõõtmise minimaalse mõjutuse tajuri ja tajuri süsteemi poolt.

Mõõtmine peab toimuma selliselt, et mõõdetakse nii horisontaal- kui vertikaalpolarisatsiooniga EM-välja suurused. Selleks tuleb antenne pöörata telje ümber 90° ulatuses.

6.2.4 Mõõteahela üldkirjeldus

Mõõteahela üldkirjeldus sh põhilised geomeetriasuurused on esitatud alloleval joonisel (vt Joonis 6-1). Mõõtetajuritena töötavad antennid on üles seatud samale kaugusele päikesepargi suhtes, milles mõõtekaugus L_{PP} on mõlema mõõteantenni jaoks sama pikk. Mõõtekaugust arvestatakse logoperioodilise antenni aktiivosa keskkohast ja silmusantenni mõõteobjektile lähimast osast. Mõõteantennide seadistuskõrgus maast esitatakse

- Logoperioodilise antenni aktiivosa keskkoha kõrgusena maa suhtes;
- Silmusantenni madalaima osa kõrgusena maa suhtes juhul, kui silmusantenn on vertikaalpolarisatsiooni asendis.



Joonis 6-1. Mõõteahelate üldine ülesseadmine päikeseelektrijaama mõõtmisülesande näitel.

Mõõtetulemus esitatakse konkreetses geomeetrilises asukohas oleva suurusena, konkreetsel ajahetkel. Mõõteasukoht on määratud mõõtetajuriks oleva mõõteantenni asukohaga. Geomeetrilise asukoha määratleb üheselt mõõtetajuri paigutust kirjeldav parameetrite kogum, mis seadistatakse iga katse alustamise eel.

Mõõtmiste läbi viimiseks tuleb mõõteanalüsaator ühendada mõõteantenniga, sealhulgas tuleb mõõtmisteks rakendada vähemalt 2 antenni. Kui analüsaatoril puudub sisseehitatud kahe mõõtesisendi tugi, saab kasutada väliseid multipleksereid ja kommutaatoreid, kuid sel juhul tuleb arvesse võtta sellise sõlmega seotud ahela ülekandetegurid.

6.2.5 Elektriväljatugevuse mõõtetulemus

Elektrivälja (E-välja) tugevus mõõteasukohas on tähistatud muutujaga $E_{MÕÕT}$. Suuruse füüsikaline ühik on V/m, mille taset võidakse edasi anda ka logaritmilises skaalas, kasutades ühikut dBµV /m. Mõõtetulemusena saadava füüsikalise keskkonnasuuruse *E*-väli absoluutsuuruse arvutamiseks teostatakse mõõtetulemuse arvutus kujul

$E_{MÕÕT} = U_{SIS,A} + c_{MVV} + c_{MAHEL} + c_{ANT}$	

kus $E_{MÕÕT}$ on mõõtmiste lõpptulemusena avaldatav füüsikaline suurus elektrivälja tugevus ühikutes dBµV /m;

$U_{SIS,A}$ on mõõtevastuvõtja poolt registreeritud sisendi pinge väärtuse statistiline vahetulemus (dBµV);

c_{MVV} on mõõtevastuvõtja sagedussõltuv ülekandetegur;

c_{MAHEL} on mõõteahelas olevate ülekandekomponentide sagedussõltuv ülekandetegur;

c_{ANT} on mõõtetajuriks oleva antenni sagedussõltuv ülekandetegur (ühikuga 1/m).

6.2.6 Magnetväljatugevuse mõõtetulemus

Magnetvälja tugevus lähiala asukohas on tähistatud muutujaga $H_{MÕÕT}$. Suuruse füüsikaline ühik on A/m, mille taset võidakse edasi anda ka logaritmilises skaalas, kasutades ühikut dBµA/m. Mõõtetulemusena saadava füüsikalise keskkonnasuuruse H-väli absoluutsuuruse arvutamiseks teostatakse mõõtetulemuse arvutus kujul

$H_{MÕÕT} = U_{SIS,A} + c_{MVV} + c_{MAHEL} + c_{ANT}$	(6-1)

kus $H_{MÕÕT}$ on mõõtmiste lõpptulemusena avaldatav füüsikaline suurus elektrivälja tugevus ühikutes dBµA/m;

$U_{SIS,A}$ on mõõtevastuvõtja poolt registreeritud sisendi pinge väärtuse statistiline vahetulemus (dBµV);

c_{MVV} on mõõtevastuvõtja sagedussõltuv ülekandetegur;

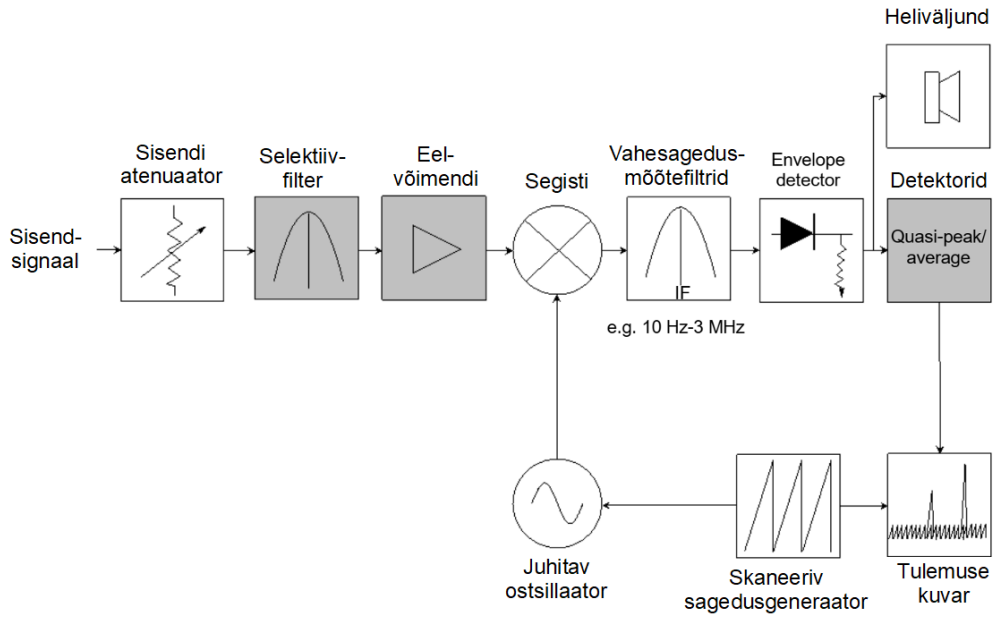
c_{MAHEL} on mõõteahelas olevate ülekandekomponentide sagedussõltuv ülekandetegur;

c_{ANT} on mõõtetajuriks oleva antenni sagedussõltuv ülekandetegur (ühikuga dBµA/m/V = dBS/m).

6.3 Mõõtevastuvõtja spetsifikatsioon CISPR 16-1-1:2019

CISPR 16-1-1:2019 on Eestis harmoneeritud standardina EVS-EN-IEC 55016-1-1:2019.

CISPR 16-1-1:2019 lisa I selgitab nõuete baasi EM-häiringuvastuvõtjatele, mida saab rakendada CISPR-seeria dokumentides esitatud mõõtemetoodikatele vastavate katsete läbiviimiseks. Alloleval skeemil on esitatud ülevaade nõutud mõõteseadme sisestruktuurist vastavalt CISPR 16-1-1 tingimustele (vt Joonis 6-2).



Joonis 6-2. Näide CISPR 16-1-1 EM-häiringuvastuvõtja struktuurist.

EM-häiringuemissioonide mõõtmisel edastatakse mõõtetajurist saadud pingesignaal mõõtevastuvõtja sisendisse. Mõõtetulemuse väljastamiseks sooritab mõõtevastuvõtja erinevad sisendsignaali eeltöötluse, võimendamise, järeltöötluse ja mõõtetulemuse registreerimise etapid. Kõikide nende etappide ühesugusel viisil sooritamine võimaldab saada üheselt tõlgendatavad tulemused, millele tuginevalt sooritada normatiivile vastavuse hindamine.

EM-häiringuvastuvõtja eripäraks on lühiajalistele impulss- ja juhuslikele häiringutele tagatud normeeritud reaktsioon ja suur dünaamilise mõõteulatuse tagamine. Impulsshäiringud võivad omada suurt hetkelist intensiivsust, kuid nende spektrikomponendi intensiivsuse efektiivjälg võib olla suhteliselt madal. Samuti on EM-häiringuvastuvõtja lähtuvalt CISPR nõuetest ette nähtud suhteliselt laias sagedusvahemikus mõõtmiste sooritamise võimekust omavaks, mistõttu tuleb tagada kitsamas sagedusribas mõõtmise sooritamisel seadme ülekoormuse tekkimist. Seetõttu on EM-mõõtevastuvõtja struktuur erinev spektrianalüsaatori ülesehitusest.

1. Spektrianalüsaatoritel puuduvad sisendi eelselektsioonifiltrid (i.k preselector) ja selle puudumisel väheneb oluliselt mõõtmistel saavutatav dünaamiline mõõtepiirkond. Muutub ka impulsshäiringute mõõtetulemus.
2. Spektrianalüsaatori mõõte-ribafiltri sumbuvuskarakteristik on pääsusagedus-ribast vahetult väljaspool tasemel vähemalt –3 dB. EM-häiringuvastuvõtjatel on spetsifitseeritud sumbuvus vähemalt – 6 dB tasemel. Selline filter on selektiivsem laiaribaliste häiringute puhul ja spektrianalüsaatori mõõtetulemus võib olla oluliselt suurem, kui EM-häiringuvastuvõtja puhul.
3. Mõõteribafiltri pääsu-sagedusribana on EM-häiringuvastuvõtjal kirjeldatud nn CISPR-mõõtesagedusvahemike spetsifikatsiooni alusel sagedusribad 200 Hz, 9 kHz ning 120 kHz, mis tüüpilistel spektrianalüsaatoritel puuduvad.
4. EM-häiringuvastuvõtja juures on täiendavalt kasutuses kvaasitipp-suuruse analüüsidetektor. Selline mõõtedetektor spektrianalüsaatoritel tüüpiliselt puudub. Kvaasitipp-mõõtedetektori dünaamilised omadused on kirjeldatud CISPR 16-1-1 normdokumendis iga mõõte-sagedusvahemiku kohta.

CISPR 16-1-1 spetsifitseerib klassikalises vaates skaneeriva mõõtevastuvõtja heterodüünstruktuuri kasutamise. See hõlmab häälestatavat ostsillaatorit, mille sageduse juhtimise kaudu teisendatakse sisendsuurus vahesageduslikuks signaaliks. Häälestamine toimub sagedusvahemikus püsimise määratletud ajaks (i.k *dwell time*), mille järel häälestatakse vastuvõtja uue sageduskomponendi mõõtmiseks. Selline järjestik-mõõtmine on siin stsenaariumis suure ajakuluga, kuivõrd mõõte-sagedusvahemikud on suure ulatusega. Kiiremat mõõtmist pakuvad kaasaegsed nn FFT-baasil toimivad mõõtevastuvõtjad.

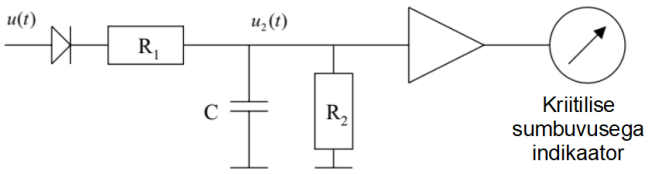
CISPR 16-1-1 poolt esitatavad mõõte-sagedusvahemikud ja nendega seotud parameetrid on loetletud allolevas tabelis (vt Tabel 6-2).

Tabel 6-2. CISPR 16-1-1 nimetatud mõõte-ribalaiused ja kvaasitipp-detektori dünaamikat iseloomustavad ajakonstandid. Sagedusribas "E" ei ole kvaasitipp-detektori parameetrid fikseeritud.

Sagedusriba	Riba "B" 150 kHz ... 30 MHz	Riba "C ja D" 30 MHz ... 1000 MHz	Riba "E" 1 ... 18 GHz
Mõõte-ribafiltri pääsuriba laius	9 kHz	120 MHz	1 MHz
Kvaasitipp-detektori suurused			
Laadimis-ajakonstant	1 ms	1 ms	Ei spetsifitseerita
Tühjenemis-ajakonstant	160 ms	550 ms	Ei spetsifitseerita

Mehaaniline ajakonstant	160 ms	100 ms	Ei spetsifitseerita

Kvaasitipp-detektor kujutab endast integreerivat ahelat (vt Joonis 6-3), millele on seatud tühjendamiskoormus ja mille tulemust registreerib aeglustatud indikaator. Tegemist on põhimõtteliselt ahelaga, kus detektordioodile on lisatud jadaühenduses takisti, millega on ühendatud puhvriks olev kondensaator. Kondensaatori tühjendamist reguleerib sellele rööpselt ühendatud takistusahel. Mehaaniline ajakonstant kirjeldab indikaatori reaktsiooni.



Joonis 6-3. Kvaasitipp-detektori elektrilise aseskeemi näide (allikas A novel quasi-peak-detector for time-domain EMI-measurements].

Kvaasitipp-detektori väljastatav tulemus on tänu selle iseloomule alati tippväärtuse ja keskväärtuse vahelises alas.

6.4 Kiirguslike häiringute mõõtmise metoodika CISPR 16-2-3

CISPR 16-2-3 esitab metoodika kiirguslike häiringute üldisteks mõõtmisteks. Selles on täiendavalt kirjeldatud nõue ribafiltri laiusest tingitud mõõte-sagedussammude suurus Δf_{SAMM}, mis ei või olla pikemad kui $\Delta f_{RBW}/2$. Mõõtevastuvõtjate põhihäälestuses on selleks üldjuhul fikseeritud sagedussammu suurus $\Delta f_{SAMM} = \Delta f_{RBW}/4$.

Sageduspunktide arv kogu mõõdetava sagedusvahemiku mõõtmisteks on üldises plaanis

$$N_{MP} = \frac{\Delta f_{MRIBA}}{\Delta f_{SAMM}}$$

Sageduspunktide mõõtmise aeg sõltub otseselt häiringuallika ja häiringusuuruse iseloomust. Kuivõrd häiringute intensiivsus võib ajas suurel määral varieeruda tuleb mõõtmiste läbiviimisel lähtuda eesmärgist kaardistada kogu häiringusuurusega seotud sagedusspektri komponendid. Juhul, kui on tegemist harva esineva impulsshäiringuga, on mõõteaeg selle tõttu veelgi pikem. Pidevtalitluses olevatel süsteemidel on häiringute

intensiivsuse ja impulsside esinemine seotud eeskätt talitlustingimuste ja koormusega. Teades talitluse perioodilisust saab sätestada ka mõõtmiste läbiviimiseks vajaliku aja.

Ühes sageduspunktis mõõtmiseks häälestatakse vastuvõtja minimaalselt nõutud sageduspunktis viibimise ajavahemikuks e sageduskomponendi mõõteajaks $\Delta t_{SK,MÕÕT}$ (i.k *dwell time*). Selline mõõteaeg sõltub nii mõõdetavast suurusest kui selle statistilisest esitusvormist. CISPR 16-2-3 sõnastab minimaalsed mõõteajad, millest saab lähtuda pidev-häiringusuuruse mõõtmiseks kui registreeritakse tippväärtustulemus. Kvaasitipp-mõõtmisaja määravad üldises plaanis nii häiringu esinemise ajaline iseloom kui ka detektori ajakonstandid. Kvaasitipp-väärtuse leidmiseks vajalik mõõtepunktis viibimise aeg võib ulatuda üle 10 sekundi, ning samas see tüüpiliselt alla sekundi ei ole. Sagedusvahemiku mõõtmisaeg kokku võib seetõttu ulatuda tundidesse ja osutuda ebapraktiliseks.

Tabel 6-3. Väljavõte CISPR 16-2-3 dokumendist, mis esitab

Sagedusvahemik	150 kHz ... 30 MHz	30 MHz ... 1000 MHz	1 GHz ... 3 GHz
Mõõteribalaius	9 kHz	120 kHz	1 MHz
Sagedussamm	4,5 kHz	60 kHz	0,5 MHz
Minimaalne sagedus-komponendi mõõteaeg*	0,5 ms	0,06 ms	0,1 ms
Mõõdetavaid sageduspunkte, min.	6 630	16 170	4 000
Tippväärtuste min. mõõtmisaeg	3,4 s	0,97 s	0,4 s
Kvaasitipp-väärtuste min. mõõteaeg	5 970 s	19 400 s	-

CISPR 16-2-3 annab ka täpsustatud soovitused ajatõhusate mõõtmiste läbiviimise kohta. Juhul, kui tegemist on püsitalitlusliku olukorraga ja suhteliselt eristuvate kitsaste spektritippudega, tuleb siin teostada mõõtmine 2 etapis:

1) Registreerida tippväärtused, kasutades kiirskaneeringut lühikese sageduspunkti mõõteajaga;
2) Intensiivseimate lokaalsete tippude jaoks diskreetselt sooritada kvaasitipp-skaneering, mille kestvus võib olla sekundites.

Kvaasitipp-skaneeringuks valitakse sellise juhul loetud arv (kuni 10) emissiooni intensiivseimat sageduskomponenti. Vastavuskatsete seisukohast on selliste skaneeringute ülesanne selgitada, kas need ulatuvad üle normatiivis esitatud piirtaseme või mitte. Arvestades, et kvaasitipptulemus on tippväärtus-tulemusest alati madalam, on selline kaalutlus põhjendatud.

Käesoleval hetkel on kiirel Fourier' teisendusel (FFT) ajadomeenis põhinevat laiendatud mõõtmisvõimekust omavad seadmed võimelised pakkuma mitmekümnekordset ajalist kiirendust. Näiteks Keysight'i analüsaatori poolt pakutav ajadomeen-mõõtmise spetsifitseeritud ajakulu nii tippväärtuse kui ka kvaasitipp-väärtuse mõõtmiseks (vt Tabel 6-4). Samalaadseid kiiremaid skaneerimisfunktsioone pakuvad ka muud tootjad, sh Rohde&Schwarz.

Tabel 6-4. Väljavõte Keysight N9038B spetsifikatsioonist, FFT-põhiste mõõtefunktsioonide ajakulu ja selle võrdlus CISPR 16-2-3 esitatud suurustega.

	CISPR 16-2-3 järjestik-skaneering (vt Tabel 6-3)	Keysight N9038B FFT-põhine skaneering
Sagedusriba 150 kHz ... 30 MHz, RBW = 9 kHz, sageduspunkti mõõteaeg = 100 ms tippväärtus-det. mõõtmine	~ 650 s	12,1 s (nimisuurus)
Sagedusriba 150 kHz ... 30 MHz, RBW = 9 kHz, sageduspunkti mõõteaeg = 1 s kvaasitippväärtus-det. mõõtmine	~ 6000 s	~185 s (nimisuurus)
Sagedusriba 30 MHz ... 1 GHz, RBW = 120 kHz, Sageduspunkti mõõteaeg = 10 ms, tippväärtus-det. mõõtmine	~1 620 s	3,1 s (nimisuurus)
Sagedusriba 30 MHz ... 1 GHz, RBW = 120 kHz, sageduspunkti mõõteaeg = 1 s, kvaasitippväärtus-det. mõõtmine	~19 400 s	~215 s (nimisuurus)

6.5 Mõõteahelate võimekus ja ahelate kavandamine

Häiringute mõõtmiseks rakendatavad analüsaatorid ja tajurid peavad olema ühendatud mõõtesuuruse signaali ülekandeahelatega, mis tagaksid küllaldase dünaamilise mõõtepiirkonna.

1) Madala omamüraga mõõteantennide ja mõõteahelate muude komponentide rakendamine;
2) Madala omamüra tasemega eelvõimendite rakendamine, mis pakub madala müratasemega füüsikalise sisendsuuruse võimendamise, nt mõõteanalüsaatori sisemise eelvõimendi rakendamisega.

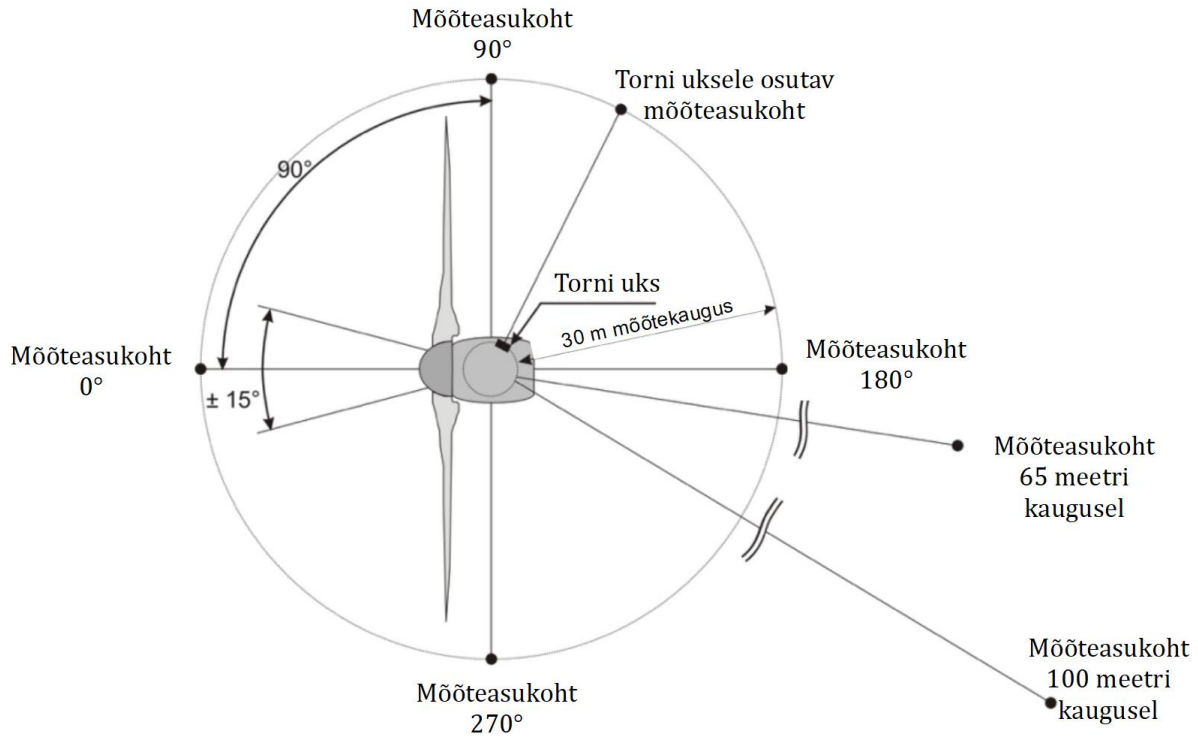
Madala müratasemega tundlike ahelate puhul kerkib küsimus sobitusest, sisendite küllastumisest ja erinevate juhuslike EM-välja impulssmürade tõttu riknemisest. Selle vältimiseks tuleb rakendada tundlikkust vähendavaid seadistusi ja vajadusel füüsikalisi sõlmi. Üks levinumaid viise on mõõteahelate atenuatsiooni (summutuse) lisamine tasemel 3 ... 10 dB. Viimast saab teostada nii mõõteanalüsaatori sisendi atenuatsiooni seadistades kui ka täiendava füüsilise atenuaatori komponendi lisamisega.

Mõõteahelate võimekuse planeerimine ja mõõteahelate komponentide valikuks pikem kirjeldus käesoleva aruande lisas P.

6.6 Mõõteasukohtade valik

Mõõteasukohaks TE paigaldiste mõõtmisel on mõõtetajurite ülesseadmise asukoht. Ühe statsionaarse TE-põhise elektrienergia tootmispaigaldise EM-häiringuemissiooni nõuete täitmiseks on vaja hinnata paigaldise poolt tekitatavat EM-häiringuvälja tugevust mitmes asukohas ümber paigaldise.

IEC 61400-40 esitab elektrituulikute kontekstis mõõteasukohtadeks vähemalt 4 ortogonaalselt paigutatud positsiooni, mis asuvad tuuliku masti kesktelje suhtes samal horisontaalsel kaugusel (vt Joonis 6-4). Kuigi IEC 61400-40 nõuab mõõtmiste läbi viimist 30 m kaugusel tuuliku tornist, ei pruugi sellised asukohad tegelikus looduslikus asukohas saadaval olla tänu looduslikele (põõsad ja võsa, ebatasased pinnavormid, märgunud ja vajuv pinnas veekogud jm) või ehituslikele asjaoludele (aiad ja piirded, kaabliteed, metallstruktuurid maas jm).



Joonis 6-4. IEC61400-40 alusel välja pakutud mõõteasukohtade skeem elektrituuliku ümber.

Täiendav tähelepanu on vaja pöörata asukohtadele, kus mingil põhjusel on oodata EM-häiringuemissioonide intensiivsemat esinemist. Sellised asukohad võivad olla seotud näiteks kriitilises rollis seadmete paigutusega. TEJ mõõtmiseks pakub IEC 61400-40 välja, et üks asekoht oleks tuuliku torni sissepääsuukse juures. See annab täiendava punkti mõõtmist läbi viimiseks.

Mõõtmiste läbiviimiseks tuleb tagada takistuste vaba ala nii mõõtetajuri ja mõõdetava objekti vahel, täiendavalt ka mõõtetajuri ümber. Takistused antud kontekstis on mistahes looduslikud või ehituslikud asjaolud ja objektid, mille tõttu võib EM-väli peegelduda, täiendavalt hajuda või sumbuda. Takistusteks on näiteks puud ja põõsad, hooned ja mistahes muud rajatised. Takistavalt võivad EM-välja levikule mõju avaldada pinnasehunnikud ja künkad. Takistustevabas alas tuleb vältida metallkonstruktsioone ja kaabelliine. Selles alas ei tohiks olla ka mõõtetehnika ja mõõtetajurite kaableid.

CISPR 16-1-4 punktis 6.2.3 esitatakse juhend vabaõhu-testkoha kontekstis nõutava takistustevaba ala suuruse kohta. Üldreeglina võib arvestada, et mõõteantenni ümbruses tuleb tagada takistustevaba ala raadiuses, mis vastab mõõtetajuri ja katsetatava seadme vahelise mõõtekauguse poolele väärtusele.

PEJ mõõtmistel on IEC 61400-40 alusel mõõtekauguste määratlemisel mõistlik lähtuda PEJ välisperimeetrist, kuivõrd PEJ võib laotuda küllalki suurele maa-alale. PEJ keskpunktist mõõtmete arvestamist on keeruline juhtida. Täiendavalt, seoses PEJ

territooriumi ümbritseva piirdeaia olemasolust võib olla vajalik sooritada mõõtmine selliselt, et vältida piirdeaia võimalikke mõjutusi. Viimast tuleb arvestada eriti juhtudel kui piirdeaed on mõõteantennile lähemal kui mõõtekaugus. Selleks võib olla vajalik näiteks piirdeaia demonteerimine.

6.7 Paigaldise ja üksiksüsteemi mõõtmine taastuvenergia-elektrijaamade hindamiseks

6.7.1 Üksiksüsteeme ja paigaldise katsetamine

IEC 61400-40 esitab nõuded ja tingimused üksiku tuuliku mõõtmisele. Käesolevas aruandes esitatud mõõtemetoodika ettepanekutes on selle alusel tuletatud mõõtmiste läbiviimise protseduuri elemendid kahel konkreetsel juhtumil:

1. Paigaldise sees olevate üksiksüsteemide mõõtmine. Eeldatavalt koosneb päikeseelektrijaam (PEJ) ja tuuleelektrijaam (TEJ) mitmetest teineteisega väga suures ulatuses sarnastest alamüksustest, millel on sarnane komponentide ja aktiivseadmete valik, juhistiku(süsteem) ja talitlusviiside valik.
2. Paigaldis on mitmete alamsüsteemide koostööl talitlev terviklik süsteem, mis antud asukohas reeglitepärases talitluses võib töötada selliselt, et kõik alamsüsteemid on töös.

Üldises plaanis algatavad EM-keskkonda jõudvad kiirguslikud emissioonisuurused üksiksüsteemi talitlusega seotud nähtused. Seejuures tuleb rõhutada nii aktiivseadmete (eeskätt muundurseadmete) talitluse erinevust erinevate mudelite vahel, samuti aktiivseadmest emiteeritavate suuruste jõudmist antennina käituvate elementideni. Seetõttu on oluline viia läbi katsed nii üksiksüsteemide kui ka paigaldise vaates koondina.

- Üksiksüsteemide katsed tuleks läbi viia iga olulise erinevusega üksiksüsteemi jaoks, erinevus tuleneb muundurite mudelitest ja ühendusviisidest, samuti abisüsteemide koosseisust.
- Paigaldise katsed viiakse läbi kogu paigaldise seisukohast. Spetsiifiline katsete käik, sh üldised talitlusviisid on samad, kui üksiksüsteemi mõõtmiseks. Paigaldise katsed viiakse läbi eeldusel, et üksiksüsteemide esinduslikud näited on katsetatud.
- Paigaldise katsete läbiviimisel peavad ettenähtud viisil talitlema vähemalt 75% üksiksüsteemidega installeeritud võimsuseid, sh peab olema tagatud vähemalt 50% (arvuliselt) igat tüüpi (erinevate) alamsüsteemide talitlus. Nt kui tüüpi „A“ alamsüsteeme on 4 tk võimsusega a’ 10 kW ja tüüpi „B“ alamsüsteeme on 18 tk võimsusega a’ 25 kW, peavad katsete läbiviimisel olema töös vähemalt 2 tk alamsüsteemi „A“ ja vähemalt 14 tk tüüp „B“ alamsüsteemi.

6.7.2 Paigaldise katsetamisel rakendatavad piirtasemed

Vastavushinnangul teostatakse võrdlus CISPR 11 normdokumendi alusel esitatud kiirguslike häiringute piirtasemete suhtes. Samas tuleb rõhutada, et CISPR 11 kaalutlustes on tegemist eeskätt lähiala-mõjude vastavushindamisega, millised kontrollitakse võrdluses katselabori-keskkonna laboritingimustega.

- Lähiala mõjutuse vastavushinnang võtab arvesse, et mõjutatav süsteem asub eeskätt vahetus läheduses (kaugusel kuni mõnisada meetrit) emissiooni allikast. Piirtasemetega juhitav EM-keskkond on siin eeskätt muudest üksikutest elektri- ja elektroonikaseadmetest koosnev ühistalitlus-komplekt ja nende asukoha elektripaigaldis.
- IEC 61400-40 poolt peegeldatav CISPR 11 alusel esitatud piirtasemete ettepanek lähtub EM-tööstuskeskkonna tasemete alusel kehtestatud nõuetest. Tundlikumate süsteemide jaoks ei pruugi selline tase olla piisavalt madal, et vältida häirimist. PEJ ja TEJ paigaldistes peaks seetõttu kasutama seadmeid, millised omavad vähemalt tööstuskeskkonna häiringukindlus-klassi.
- Kaugala mõjutuse ja suure paigaldise kogu-EM-jälge hindamiseks ei pruugi CISPR 11 piirtasemete alusel esitatud piirtasemed olla sobilikud. CISPR 11 tasemete kohta on esitatud interpolatsioonireeglid, millega viia piirtasemed vastavusse mingil muul kaugusel sooritatud tulemuste eeldatavate piirtasemetega. Probleemid tulenevad nii süsteemide mõõtevõime parameetritest kui ka CIPSR-süsteemi normdokumentides esitatud alusettepanekutest.
    - 100 m kaugusele teisendatud CISPR-piirtasemed on sedavõrd madalad, et jäävad mõõteahelate ja analüsaatorite sisendite termilise müra tasemete lähistele (vahe piirtasemega kohati alla 10 dB). Selliselt ei ole võimalik tagada mõõtemääramatust, mis võimaldaks kinnitada mõõtmistulemuste paikapidavust.
    - CISPR-tasemed on välja pakutud lähtudes eelduslike teenuste kvaliteedile mõjuvate alustena. Kriitiline vaade põhineb selliste teenuste valikus, kuivõrd tegemist on põhiliste kommerts-süsteemide keskmise teenusviisi valikuga (nt 150 kHz – 30 MHz vaadeldakse AM-ringhäälinguteenuse häirimist, kanali laius 9 kHz ja ühtlasi mõõte-sagedusriba 9 kHz). TE-elektrijaama-süsteemi kitsaribalist häiringut, mis tegelikult laia ribalaiuse ja vigu välistava modulatsiooniga defineeritud teenuse kanalit ei häiri, selline käsitlus ei kata.

6.7.3 Ettepanekud protseduurideks tervikpaigaldise mõõtmiseks

Tulenevalt esitatud kaalutlusest tuleb rõhutada täiendavate piirtasemete uurimise vajadust, mis võimaldaks arvesse võtta EM-kaugvälja levi, esinevad mõjud ja võimalikud häirimisvektorid sh võimalik häiritavate süsteemide töö-ribalaiused. Siiski, kuivõrd maailma parimas praktikas esitatud meetmed koonduvad CISPR-alustele nii viidete kui ka üldpõhimõtete valikus, saab IEC 61400-40 printsiipide alusel esitada ettepaneku kogupaigaldise hindamise alusteks.

- **Eeldus 1.** Paigaldise mõju mistahes olukorras ei tohiks olla suurem, kui üksikule süsteemi osale esitatavad nõuded (siin 30 m kaugusel esitatud nõuded CISPR 11 alusel).

Ettepanek paigaldise mõõtmiseks: Paigaldise vastavust hinnatakse seega samadel alustel kui süsteemi ühte osa ehk CISPR 11 alusel välja pakutud piirtasemetega võrreldes.

- **Eeldus 2.** Paigaldise kiirgus-suunadiagramm eeldatavalt on suhteliselt ühetaoline igas asukohas ümber paigaldise perimeetri. Paigaldise kaugelt mõõtmisel ei ole seetõttu vaja mõõtmisi läbi viia rohkem kui 2 - 4 asukohas.

Ettepanek paigaldise mõõtmiseks: Paigaldise vastavushinnanguks teostatakse mõõtmised kahes ortogonaalses ilmakaares paigaldise geomeetrilise keskpunkti suhtes, kui paigaldise perimeetri piirmõõde ei ületa 1 km. Juhul, kui paigaldise piirmõõde ületab 1 km, teostatakse mõõtmised 4 ilmakaares või 4 omavahel ortogonaalses asukohas ümber paigaldise.

- **Eeldus 3.** Üksikobjekti mõõtmisel lähtuti IEC 61400-40 alusel mõõtekõrgusest 1 m (silmusantenn) ja 2 m (logoperioodiline antenn), mis on CISPR 16-2-3 alusel vähim mõõtekõrgus kaugusel 30 m mõõtmise läbiviimisel. Paigaldise mõõtmisel kaugemates asukohtades selline kõrgus on eeldatavalt ebapiisav ning madalal asuva antenniga mõõdetud tulemus seotud olulisel määral maapinna vormiga, sh võib tulemusele olulise jälje jätta paigaldise ümber asuv piirdeaed.

Ettepanekud paigaldise koguemissiooni mõõtmiseks: Paigaldise vastavushinnanguks teostatakse mõõtmised kahes ortogonaalses ilmakaares paigaldise geomeetrilise keskpunkti suhtes, kui paigaldise perimeetri piirmõõde ei ületa 1 km. Juhul, kui paigaldise piirmõõde ületab 1 km, teostatakse mõõtmised 4 ilmakaares või 4 omavahel ortogonaalses asukohas ümber paigaldise.

- **Eeldus 4.** Piirtasemetele vastava ala hindamiseks lähtutakse tegelikust mõõtekaugusest. Mõõtekaugustena kasutatakse 100 m või 300 m paigal-

dise äärmise asjakohase talitluskomponendi kaugusest (juhistik, muundurseadmed jt), isegi suuremõõtmelise paigaldise korral.

Ettepanekud paigaldise koguemissiooni mõõtmiseks: Mõõtekaugus paigaldisest valitakse 100 m või 300 m, sõltuvalt looduslikest ja tehislikest objektidest ja asjaoludest. Asukoha ja paigaldise vahel ei tohi olla või peaks olema võrreldes alternatiivsete mõõteasukohtadega võimalikult vähe objekte, mis eeldatavalt võiksid kujundada elektri- ja magnetvälja jaoks peegeldava või muul viisil manipuleeriva reaktsiooni

- Piirtasemetele vastavuse hindamiseks kasutatakse 30 m kauguse jaoks esitatud CISPR 11 asjakohaseid tasemeid kuni 1 GHz sageduseni, mis on interpoleeritud tegeliku mõõtekauguseni.
- Sagedusribas üle 1 GHz piirtasemete hindamist CISPR 11 alusel läbi ei viida. Paigaldise jaoks arvestatakse üle 1 GHz hindamisel tulemust, mis on suurim üksiku seadme juures leitud tulemus. Põhjuseks on 1 MHz mõõte-ribalaiuse (CISPR 11 nõue) kasutamisel mõõteahela ja analüsaatori sisendi baasmüra tase.

7 Mõõtemetoodika päikeseelektrijaamade (PEJ) EM-häiringuemissiooni mõõtmiseks

Käesolev peatükk esitab eespool esitatud kaalutlustele tuginedes mõõtemetoodika kirjelduse päikeseelektrijaamade mõõtmiseks. Rakendatavad metoodika elemendid kirjeldatakse alljärgnevas struktuuris:

1. Mõõdetavad suurused
2. Mõõteasukohtade valik
3. Mõõtetajurite ülesseadmine
4. Mõõteahelate ülesseadmine
5. Mõõtevastuvõtjate ülesseadmine
6. Mõõdetava objekti ettevalmistus
7. Mõõtmiste läbiviimise protseduur
8. Mõõtetulemuste töötlemine
9. Protseduurid piirtasemetega võrdlemiseks

Eraldiseisvalt täpsustatakse paigaldise ja süsteemi alamosa mõõtmised.

7.1 Mõõdetavad suurused

PEJ-MT1: Päikeseelektrijaamade mõõtmisel on eesmärgiks selgitada järgmised EM-häiringuemissiooni kiirgusliku emissiooni suurused:

PEJ-MT1-1: Sagedusvahemikus 150 kHz ... 30 MHz mõõdetakse magnetväljatugevuse suurused ühikutes dBµA/m.

PEJ-MT1-1A: Mõõtetulemustena esitatakse kvaasitippväärtus-detektoriga saadud mõõtetulemustele toetuvad väärtused.

- Nõue vastab IEC 61400-40 dokumendi punktile 7.3.7.
- Võimaldab tulemust võrrelda muudes CISPR-seeria ja 61000-seeria dokumentides esitatud piirtasemetega.

PEJ-MT1-1B: Mõõtetulemustena esitatakse nii horisontaal- kui vertikaaltasandis polariseeritud EM-häiringuväljatugevuste suurused.

- Nõue vastab CISPR 16-2-3 dokumendi punktile 7.1.1
- Nõue erineb IEC 61400-40 juhisest sest PEJ puhul või ka horisontaalne H-välja komponent olla märkimisväärse tugevusega.

PEJ-MT1-1C: Mõõtetajuri seadistused peavad olema tagatud vastavalt punktile PEJ-MT-3.

PEJ-MT1-1D: Mõõtevastuvõtja seadistused peavad olema tagatud vastavalt PEJ-MT4-3.

PEJ-MT1-1E: Võimalusel mõõdetakse ja salvestatakse EM-häiringuemissiooni keskväärtus- ja tippväärtus-suurused.

PEJ-MT1-2: Sagedusvahemikus 30 MHz ... 1000 MHz mõõdetakse elektriväljatugevuse suurused ühikutes dBµV/m.

PEJ-MT1-2A: Mõõtetulemustena esitatakse kvaasitippväärtus-detektoriga saadud mõõtetulemustele toetuvad väärtused.

- Nõue vastab IEC 61400-40 dokumendi punktile 7.3.7.
- Võimaldab tulemust võrrelda muudes CISPR-seeria ja 61000-seeria dokumentides esitatud piirtasemetega.

PEJ-MT1-2B: Mõõtetulemustena esitatakse nii horisontaal- kui vertikaaltasandis polariseeritud EM-häiringuväljatugevuste suurused

- Nõue vastab IEC 61400-40 dokumendi punktile 7.3.7.

PEJ-MT1-2C: Mõõtetajuri seadistused peavad olema tagatud vastavalt punktile PEJ-MT-3.

PEJ-MT1-2D: Mõõtevastuvõtja seadistused peavad olema tagatud vastavalt PEJ-MT4-3.

PEJ-MT1-2E: Võimalusel mõõdetakse ja salvestatakse EM-häiringuemissiooni keskväärtus- ja tippväärtus-suurused.

PEJ-MT1-3: Sagedusvahemikus 1 GHz ... 3 GHz mõõdetakse elektriväljatugevuse suurused ühikutes dBµV/m.

PEJ-MT1-3A: Mõõtetulemustena esitatakse tippväärtus-detektoriga ja keskväärtusdetektoriga saadud mõõtetulemustele toetuvad väärtused.

- Nõue tuleneb CISPR 11 esitatud nõuetest sagedusala 1 GHz kuni 6 GHz mõõtmisteks.
- Võimaldab tulemust võrrelda muudes CISPR-seeria ja 61000-seeria dokumentides esitatud piirtasemetega.

PEJ-MT1-3B: Mõõtetulemustena esitatakse nii horisontaal- kui vertikaaltasandis polariseeritud EM-häiringuväljatugevuste suurused

- Nõue vastab IEC 61400-40 dokumendi punktile 7.3.7.

PEJ-MT1-3C: Mõõtetajuri seadistused peavad olema tagatud vastavalt punktile PEJ-MT-3.

PEJ-MT1-3D: Mõõtevastuvõtja seadistused peavad olema tagatud vastavalt PEJ-MT4-3.

7.2 Mõõteasukohtade valik

Mõõteasukohad on PEJ ümbruses asukohad, kuhu paigutatakse väljatugevuse tuvastamiseks sobilikud tajurid. Mõõdetakse nii elektrijaama iseloomulikku üksiksüsteemi kui kogu paigaldist.

PEJ-MT2-1: Mõõteasukohad valitakse lähtudes PEJ geomeetriast. Üksiksüsteemi mõõtmised viiakse läbi vähemalt 4 asukohas PEJ vahetus ümbruses.

PEJ-MT2-1A: Kõikides asukohtades sooritatakse mõõtmised PEJ-MT1-1, PEJ-MT1-2, PEJ-MT1-3.

PEJ-MT2-1B: Valitud mõõteasukohad peavad võimaldama PEJ-MT2-1A jaoks vajalike tajurite stabiilset ülesseadmist.

PEJ-MT2-1C: Eelistatud mõõteasukohad valitakse selliselt, et need paikneksid mõõdetavast PEJ-st ortogonaalses paigutuses.

- Nõue vastab IEC 61400-40 punktile 7.3.7 antennide asukohtade valikule.

PEJ-MT2-1D: tähelepanu pööratakse inverter-muundurseadme asukohale PEJ paigaldises. 1 mõõteasukoht valitakse selliselt, et kaugus inverterseadme asukohast ei ületaks 30 m, kui inverterseade on paigutatud päikesepaneelide juurde.

- Nõue on kohandatud IEC 61400-40 punkti 7.3.7 antennide asukohtade valiku tingimuste osas. IEC 61400-40 kirjeldab vajadust mõõta TEJ torni ukse juures.

PEJ-MT2-1E: Eelistatud kaugused mõõtmiste läbiviimiseks on ühesugused kõikides ortogonaalsetes positsioonides. Eelistatud kaugus mõõdetavast PEJ-st on 30 m PEJ paneeliderea keskteljest. Kauguste vahemik PEJ-st peaks olema vähemalt 10 m PEJ tarindite servast.

- Nõue on kohandatud IEC 61400-40 punkti 7.3.7 kirjeldusest, kus on nõutud 30 m mõõtekaugus. Siin on mõõtekaugus kirjeldatud eelistatuna, sest reaalse PEJ ümbruses võib 30 m tühja perimeetri leidmine olla piiratud.

PEJ-MT2-2: Mõõteasukohtade valikul tagatakse mõõtetehnika ülesseadmisel takistustevaba ala, mis täidab allolevad tingimused

PEJ-MT2-2A: takistustevaba ala mõõteasukohas juures vastab CISPR 16-1-4 punktis 6.2.3 / joonis 10 kirjeldatule.

- CISPR 16-1-4 esitab üldises vaates nõude antennist mistahes suunas poole mõõtekaugusega võrdse takistusvaba ala tagamiseks.

PEJ-MT2-2B: mõõdetava PEJ paigaldise ja mõõteasukoha vahele ei tohi jääda suure mõõtmega looduslikke ega tehislikke takistusi. Juhul, kui see ei ole täidetud tuleb see selgelt märkida mõõtearuandesse.

PEJ-MT2-2C: mõõdetava PEJ paigaldise ja mõõteasukoha vahele ei tohi jääda elektrijuht-materjalidest objekte ega takistusi. Juhul, kui see ei ole täidetud tuleb see selgelt märkida mõõtearuandesse.

PEJ-MT2-2D: mõõteasukohast vaadelduna ei tohi mõõdetava PEJ paigaldise taha jääda suurte mõõtmetega elektrijuht-materjalidest objekte ega takistusi. Juhul, kui see ei ole täidetud tuleb see selgelt märkida mõõtearuandesse.

PEJ-MT2-3: Mõõteasukohad kogu paigaldise mõõtmiseks valitakse lähtudes PEJ paigaldise ülesehitusest ja selle lähiümbruses olevatest looduslike ja tehiskeskkonna objektidega määratud tingimustest.

PEJ-MT2-3A: Paigaldise mõõtmised viiakse läbi vähemalt 2 asukohas PEJ vahetus ümbruses, kui tegemist on vähem kui 1 km pikkuse küljepikkusega paigaldisest ja 4 asukohas muul juhul.

PEJ-MT2-3B: Juhul, kui PEJ on ühendatud õhuliiniga ja see õhuliin on vähem kui 300 m kaugusel PEJst, valitakse täiendavalt 1 mõõteasukoht 30 m kaugusel sellest õhuliinist ja 30 m kaugusel sellest asukohast, kus õhuliinile toide on ühendatud (nt keskpingeliini lõpumast, milles on kaabelliinile üleminek).

PEJ-MT2-3C: Kõikides asukohtades sooritatakse suuruste PEJ-MT1-1, PEJ-MT1-2, PEJ-MT1-3 mõõtmised.

PEJ-MT2-3D: Valitud mõõteasukohad peavad võimaldama PEJ-MT2-3C jaoks vajalike tajurite stabiilset ülesseadmist.

PEJ-MT2-3E: Eelistatud mõõteasukohad valitakse selliselt, et need paikneksid mõõdetavast paigaldisest ortogonaalses paigutuses.

- Nõue vastab punktis eelnevalt punktis 6.7.3 kirjeldatud ettepanekutele.

PEJ-MT2-3F: Eelistatud kaugused mõõtmiste läbiviimiseks on ühesugused kõikides valitud ortogonaalsetes positsioonides. Eelistatud kaugus mõõdetavast PEJ-st on 100 m ... 300 m paikeseelektrijaama välisperimeetrist.

- Välisperimeetrina arvestatakse kas elektrijaama piirdeaeda või mõnda konstruktiivset komponenti, mis on seotud PEJ elektrilise talitlusega.

PEJ-MT2-4: PEJ kogu paigaldise mõõteasukohtade valikul tagatakse mõõtetehnika ülesseadmisel takistustevaba ala, mis täidab allolevad tingimused

PEJ-MT2-4A: takistustevaba ala mõõteasukohas juures vastab CISPR 16-1-4 punktis 6.2.3 / joonis 10 kirjeldatule.

- CISPR 16-1-4 esitab üldises vaates nõude antennist mistahes suunas poole mõõtekaugusega võrdse takistusvaba ala tagamiseks. Juhul, kui see ei ole võimalik, peab mõõteantenni ümber olema vähemalt 30 m ulatuses takistuste vaba ala.

PEJ-MT2-4B: mõõdetava PEJ paigaldise ja mõõteasukoha vahele ei tohi jääda suure mõõtmega looduslikke ega tehislikke takistusi. Juhul, kui see ei ole täidetud tuleb see selgelt märkida mõõtearuandesse.

PEJ-MT2-4C: mõõdetava PEJ paigaldise ja mõõteasukoha vahele ei tohi jääda elektrijuht-materjalidest objekte ega takistusi. Juhul, kui see ei ole täidetud tuleb see selgelt märkida mõõtearuandesse.

PEJ-MT2-4D: mõõteasukohast vaadelduna ei tohi mõõdetava PEJ paigaldise taha jääda suurte mõõtmetega elektrijuht-materjalidest objekte ega takistusi. Juhul, kui see ei ole täidetud tuleb see selgelt märkida mõõtearuandesse.

7.3 Mõõtetajurite valik ja ülesseadmine

PEJ-MT3-1: Mõõtmiste sooritamiseks valitud mõõtetajurid peavad vastama CISPR 16-1-4 nõuetele

PEJ-MT3-1A: Mõõtetajurid sagedusvahemikus 150 kHz ... 30 MHz mõõtmiste sooritamiseks peavad vastama CISPR 16-1-4 punkti 4.4.2 nõuetele.

- IEC 61400-40 esitab magnetvälja mõõtmise antennile esitatavate nõuete viite dokumendile CISPR 11, mis omakorda viitab CISPR 16-1-4 silmusantenni spetsifikatsioonile.

PEJ-MT3-1B: Mõõtetajurid sagedusvahemikus 30 MHz ... 1 GHz mõõtmiste sooritamiseks peavad vastama CISPR 16-1-4 punkti 4.5 nõuetele.

- IEC 61400-40 esitab elektriväljatugevuse mõõtmise antennile esitatavate nõuete viite dokumendile CISPR 11, mis omakorda viitab CISPR 16-1-4 spetsifikatsioonile.

PEJ-MT3-1C: Mõõtetajurid sagedusvahemikus 1 GHz ... 3 GHz mõõtmiste sooritamiseks peavad vastama CISPR 16-1-4 punkti 4.5 nõuetele.

- IEC 61400-40 selles sagedusvahemikus mõõtmisi ei kirjelda, kuid muudes osades viitab CISPR 11 põhimõtetele. Viimane omakorda viitab antenni spetsifikatsioonis CISPR 16-1-4 spetsifikatsioonile

PEJ-MT3-2: Mõõteahelate ülesseadmisel tuleb arvestada tingimustega, mis on kirjeldatud punktis PEJ-MT2-2.

PEJ-MT3-3: Mõõtetajurite kinnitamiseks kasutatavad tarindid peavad täitma järgmised nõuded:

PEJ-MT3-3A: mõõtetajuri fikseerimiseks kasutatav tarind peab olema mõõtetajuri juures elektrijuhtidest komponente mitte omavad.

PEJ-MT-3-3B: Antenni kinnitamiseks kasutatava tarindi juhtivad komponendid peavad paiknema vähemalt aktiivosa suurima pikkuse võrra kaugemal antenni aktiivosa mistahes osast.

PEJ-MT-3-3C: Tarind peab tagama mõõtetajuri mõõtepolarisatsioonitasandi pööramist võimaldav (vähemalt horisontaal- ja vertikaaltasandid).

- Tingimus tuleneb PEJ-MT1-2B, PEJ-MT1-3B, PEJ-MT1-4B sooritamise vajadusest.

PEJ-MT3-4: mõõtetajurid seadistatakse maapinnast kõrgusele:

PEJ-MT3-4A: üksiksüsteemi mõõtmisel silmusantenni kasutamisel seadistatakse selle madalaim punkt vertikaal-polariseeritud asendis kõrgusele 1,0 m maapinnast (vt IEC 61400-40 ja CISPR 16-2-5).

- Tingimus vastab IEC 61400-40 punktis 7.3.7 esitatud spetsifikatsioonile.
- Tingimus vastab CISPR 16-2-5 punktiks 6.3.4 esitatud spetsifikatsioonile.

PEJ-MT3-4B: üksiksüsteemi mõõtmisel logoperioodilise või bikoonilise antenni kasutamisel seadistatakse selle efektiivne keskpunkt maapinnast 2,0 m kõrgusele (vt IEC 61400-40 ja CISPR 16-2-5).

- Tingimus vastab IEC 61400-40 punktis 7.3.7 esitatud spetsifikatsioonile.
- Tingimus vastab CISPR 16-2-5 punktiks 6.3.3 esitatud spetsifikatsioonile. Selles nimetatakse 30 m mõõtekaugusel kõrguste vahemikuks 2 ... 6 m maapinnast ja 10 m mõõtekaugusel maapinnast 1 ... 4 m.

PEJ-MT3-4C: kogu paigaldise mõõtmisel silmusantenni kasutamisel seadistatakse selle madalaim punkt vertikaal-polariseeritud asendis

a) kõrgusele 1,0 m kõrgusele paigaldise asukohas maapinnast kõige kõrgemale ulatuvat punkti läbiva tasandi suhtes, kui mõõteantenni kõrgus mõõteasukohas ei ületa 4,0 m;
b) kõrgusele 4,0 m maapinnast muul juhul.

PEJ-MT3-4D: kogu paigaldise mõõtmisel logoperioodilise või bikoonilise antenni kasutamisel seadistatakse selle efektiivne keskpunkt

a) kõrgusele 4,0 m kõrgusele paigaldise asukohas maapinnast kõige kõrgemale ulatuvat punkti läbiva tasandi suhtes, kui mõõteantenni kõrgus mõõteasukohas ei ületa 6,0 m;
b) kõrgusele 6,0 m maapinnast muul juhul.

- Tingimus vastab IEC 61400-40 punktis 7.3.7 esitatud spetsifikatsioonile.
- Tingimus vastab CISPR 16-2-5 punktiks 6.3.3 esitatud spetsifikatsioonile. Selles nimetatakse 30 m mõõtekaugusel kõrguste vahemikuks 2 ... 6 m maapinnast ja 10 m mõõtekaugusel maapinnast 1 ... 4 m.

PEJ-MT3-5: mõõtetajuriga seotud abiahelad peavad täitma järgmised tingimused:

PEJ-MT3-5A: Mõõtetajuriga seotud abiahelad peavad olema galvaaniliselt lahti sidestatud mõõtetajuriga mitteseotud maandusahelatest.

PEJ-MT3-5B: Mõõtetajuriga seotud abiahelad peavad tagama tühise mõõtetulemuste mõjutamise. See peab olema saavutatud abiahelate komponentide valikutega ja abiahelatega seotud ahealte ülesehituse ja paigutusega.

7.4 Mõõtevastuvõtjate ülesseadmine

PEJ-MT4-1 Mõõtetulemuste registreerimiseks kasutatavad mõõtevastuvõtjad peavad vastama järgmistele tingimustele

PEJ-MT4-1A: mõõtmised tuleb sooritada CISPR 16-1-1 vastava mõõtevastuvõtjaga.

- Kohandatud, IEC 61400-40 spetsifikatsioon punktis 7.3.7 nõuab üksnes alamosa CISPR 16-1-1 esitatud tingimuste tagamist.

PEJ-MT4-1B: mõõtevastuvõtja peab võimaldama seadistada mõõtesagedus-vahemikku, mõõteribalaiust vastavalt CISPR 16-1-1 lisa H tabelile H.1**.**

- Kohandatud, IEC 61400-40 spetsifikatsioon punktis 7.3.7 nõuab üksnes mõõte-ribafiltrite laiuste tuge, samas ei spetsifitseeri kvaasitipp-detektori tingimusi.

PEJ-MT4-1C: mõõtevastuvõtja peaks eelistatult omama kiirel Fourier' teisendusel põhinevat mõõtmisfunktsionaalsust.

- Sobilik funktsionaalsus on kirjeldatud CISPR 16-1-1 punktis 4.1.

PEJ-MT4-1D: Mõõtevastuvõtja indikeeritud müratase peaks olema parem, kui -155 dBm/Hz

- Nõue tuleneb mõõteahela suutlikkuse analüüsist vt käesoleva aruande lisa P, millega tagada piirsuuruste kontrolliks vajalik dünaamiline mõõteulatus.

PEJ-MT4-2 Mõõtevastuvõtja kasutamisele eelnevalt peab olema edukalt läbitud käivitusjärgne sisemine kontroll (i.k *self-test*) ja joondamine (i.k *alignment*).

PEJ-MT4-3 Mõõtevastuvõtja häälestatakse mõõtmiste läbiviimiseks alljärgnevalt

	PEJ-MT4-3A	PEJ-MT4-3B	PEJ-MT4-3C
Sagedusvahemik	150 kHz ... 30 MHz	30 MHz ... 1000 MHz	1 GHz ... 3 GHz
Mõõteribafiltri laius (RBW)	9 kHz	120 kHz	1 MHz
Sageduspunkti mõõteaeg, min	20 ms keskv., tippv, ≥1 s kvaasitippv.	20 ms keskv., tippv, ≥1 s kvaasitippv.	20 ms
Sagedussamm	2,25 kHz	30 kHz	250 kHz
Mõõtedetektorid	Keskväärtus, tippväärtus, kvaasitippväärtus**	Keskväärtus, tippväärtus, kvaasitippväärtus**	Keskväärtus, tippväärtus,

- Kohandatud, IEC 61400-40 spetsifikatsioon punktis 7.3.7 nõuab üksnes RBW väärtuse tagamist ja sagedussammu, mille suurus on 2 korda suurem tabelis esitatust.
- Kvaasitippväärtuste mõõtmisel sooritatakse pidev-kvaasitippväärtus-mõõtmine ainult juhul, kui mõõtevastuvõtja toetab reaalajalist DFT-baasil kvaasi-tippväärtusanalüüsi. Juhul, kui sellist funktsionaalsust ei ole

võimalik kasutada, tuleb valida kvaasitippväärtus-analüüsiks spetsiifilised eelselekteeritud sageduspunktid ja korrata mõõtmisi.

7.5 Mõõteahelate koostamine ja ettevalmistus

PEJ-MT5-1 Mõõteahelate koosseisus peavad olema kvaliteetsed komponendid, sh ühendusvahendid ja madala sumbuvusteguriga kaablid, mis võimaldavad tagada küllaldase mõõtesuuruste registreerimise dünaamilise ulatuse.

PEJ-MT5-1A: Mõõteahelate koosseis tuleb dokumenteerida üksikasjalikult kõikide komponentide osas, mis mõõteahelasse on kaasatud tajuri ja ülekandeahela korrektseks tööks. Kirjeldada tuleb komponentide tüüp, olulised parameetrid (nt kaablite pikkus, attenuaatorite summutustegur jm) ja registreerimisnumber (seerianumber või laborisisene identifikaator).

PEJ-MT5-2 Mõõteahelate soovituslikud põhiskeemid peavad olema alljärgnevad

PEJ-MT5-2A: silmusantenniga mõõtmisel

PEJ-MT5-2B: logoperioodilise antenniga mõõtmisel

PEJ-MT5-3 Mõõteahelate koostamise järel peab olema läbi viidud esmane ahela korrasoleku kontroll.

7.6 Katsetatava PEJ ettevalmistamine

PEJ-MT6-1 Katsetatava PEJ paigaldise kohta tuleb fikseerida selles talitlevate võtmekomponentide andmed, ühendusviisid ja teostusskeem.

PEJ-MT6-1A: Fikseerida tuleb PEJ ehituse aluseks olev dokumentatsioon, sh projektdokumentatsioon, paigaldise elektriskeem, kasutatud juhtide ja kaablite tüübid jms. Mõõtmiste protokollis fikseeritakse viited konkreetsed projekti dokumentatsiooni failidele, joonistele vmt, millest antud info on üheselt leitav.

PEJ-MT6-1B: Veenduda tuleb paigaldise teostuses vastavalt ehitusprojektile ja teostusdokumentatsioonile. Kõik leitud olulised kõrvalekalded tuleb eraldi välja tuua.

PEJ-MT6-2 Katsetatava paigaldise võtmekomponendid tuleb täpsustatult registreerida

PEJ-MT6-2A: Kirjeldada tuleb paigaldises inverterseadmega seotud ahelate koosseisus olevad komponendid, sh päikesepaneelide tüüp ja nimiandmed.

PEJ-MT6-2B: Fikseerida tuleb inverterseadme tüüp ja selle tootja, seerianumber. Eraldi tuleb välja märkida, millistele elektromagnetilise ühilduvuse normdokumentidele vastavust seadme puhul deklareeritakse.

PEJ-MT6-2C: Fikseerida tuleb inverterseadme riist-, püsivara ja tarkvaraversioonid, mille seade väljastab või mis on muul moel teada. Samuti tarkvaraliselt teotatavad seadistused, mis lahknevad tehaseseadistustest (juhul, kui on seadistused on loetavad).

PEJ-MT6-2D: Fikseerida tuleb inverterseadme seadistamiseks kasutatavad tarkvaralised juhtimisvõtted ja nendega seotud parameetrite vahemik.

PEJ-MT6-3 Üksiksüsteemi mõõtmisel tuleb teostada inverterseadme väljundparameetrite ja võimalusel alalis-sisendite parameetrite registreerimise mõõteseadmete ühendamine.

PEJ-MT6-3A: Mõõdetavate talitlussuuruste registreerimine peab tagama minimaalselt võrku antava tegeliku võimsuse registreerimise.

PEJ-MT6-3B: Mõõtmiste käigus registreeritavate soovitatavate suuruste hulgas on pingetase vahelduvtoitevõrgus, vahelduvtoitevõrgu toitekvaliteedi suurused vastavalt IEC 61000-4-30, päikesekiirguse tugevus, alalistoitesidendi pingetase ja voolutugevus.

PEJ-MT6-3C: Olekusuuruste registreerimise ajaline intervall ei tohi olla suurem kui 1 min. Antud ajavahemikus suuruste koondtöötlus toimub aritmeetilise keskmistamise teel.

PEJ-MT6-4 Kogu paigaldise mõõtmisel tuleb teostada paigaldise kohta summaarse talitlusinfo kogumine.

PEJ-MT6-4A: Mõõdetavate talitlussuuruste registreerimine peab tagama võrku antava tegeliku võimsuse registreerimise.

PEJ-MT6-4B: Mõõtmiste käigus registreeritavate soovitatavate suuruste hulgas on pingetase vahelduvtoitevõrgus, vahelduvtoitevõrgu toitekvaliteedi suurused vastavalt IEC 61000-4-30, päikesekiirguse tugevus, alalistoitesidendi pingetase ja voolutugevus.

PEJ-MT6-4C: Olekusuuruste registreerimise ajaline intervall ei tohi olla suurem kui 1 min. Antud ajavahemikus suuruste koondtöötlus toimub aritmeetilise keskmistamise teel.

7.7 Mõõtmiste läbiviimise protseduurid

PEJ-MT7-1 Mõõtmiste alustamisel tuleb teostada mõõteahelate korrasoleku ja ühenduvuse kontroll. Sobilik protseduur on näiteks mõõtevastuvõtja mõõtetulemuse kuvalt keskkonna taustamüra iseloomustavate spektrikomponentide leidmine.

PEJ-MT7-2 Mõõteasukohas esineva EM-taustamüra mõõtmine

PEJ-MT7-2A: Taustamüra mõõtmine viiakse läbi selliselt, et võimalikult vähe EM-häiringusuurusi emiteerivaid süsteeme ja seadmeid oleks paigaldise juures töös. Üksiksüsteemi mõõtmisel mõõdetavas osas olev inverterseade peab olema võrgust lahutatud.

PEJ-MT-7-2B: Taustamüra mõõtmine viiakse läbi samades sagedusribades ja samadel tingimustel, kui on kirjeldatud punktis PEJ-MT1. Selliselt saavutatakse parim vastavus taustamüramõõtmiste ja katsetatava paigaldise mõõtetulemuste vahel.

PEJ-MT7-3 EM-häiringuemissiooni tasemete mõõtmine PEJ kindal väljundvõimsuse tasemel talitlusel

PEJ-MT7-3A: PEJ koosseisus oleva inverterseadme juhtimiseks kindlasse talitlusolekusse kasutatakse asjakohaseid tehnilisi meetmeid või ilmastikuolude eripärasid. PEJ juhtimiseks osalises koormusega talitlusse saab rakendada näiteks päikesetõusu või -loojanguaega.

- Tingimus on esitatud IEC 61400-40 dokumendis punktis 7.3.8 katsetatava seadme koormustalitluse kohta.

PEJ-MT7-3B: PEJ väljundvõimsuse taseme hindamine toimub läbi reaalse jaotusvõrku edastatud võimsuse mõõdetud suuruse alusel.

PEJ-MT7-3C: PEJ talitlussuuruste registreerimisel tuleb kirjeldada vähemalt madalpinge- jaotusvõrgu pingetase kõikides faasides, millega inverterseade on jaotusvõrguga ühendatud.

PEJ-MT7-3D: PEJ talitlussuurustest tuleb registreerida alalistoitesisendi koormusvoolutugevuse ja alalispinge efektiivsuurused.

PEJ-MT7-3E: Keskkonnasuurustest tuleb registreerida keskkonnatemperatuur ja päikesekiirguse tugevus mõõtmiste ajal.

7.8 Üksiksüsteemi mõõtmise katsete läbiviimise käik

PEJ-MT8-1 Iga üksiksüsteemi mõõtmiseks viiakse katsed läbi sellistel talitlusviisidel, millised iseloomustaksid oodatavalt PEJ seadmete kõige intensiivsema EM-häiringuemissiooni esinemist.

MEJ-MT8-1A: Mõõtmine viiakse läbi vähemalt kolme inverterseadme talitlusviisi korral, mis on kirjeldatud punktides **PEJ-MT8-1B, PEJ-MT8-1C ja PEJ-MT8-1D.**

PEJ-MT8-1B: Mõõtmine PEJ seadmete ooteolekus toimub selliselt, et tagatud oleks inverterseadmete sisemiste ahelate töö, kuid katkestatud oleks inverterseadmed poolt võrku elektrilise võimsuse andmine (väljundvõimsus 0).

PEJ-MT8-1C: Mõõtmine PEJ seadmete väikesel väljundvõimsusel toimub selliselt, et tagatud on inverterseadme talitlus võrku võimsuse edastamisega. Väikese võimsuse vahemikuks on talitlusvõimsus inverterseadme nimivõimsusega võrreldes tasemel 20% kuni 50%.

PEJ-MT8-1D: Mõõtmine PEJ seadmete suurel väljundvõimsusel toimub selliselt, et tagatud on inverterseadme talitlus võrku võimsuse edastamisega. Suure võimsuse vahemikuks on talitlusvõimsus inverterseadme nimivõimsusega võrreldes tasemel üle 50%.

PEJ-MT8-1E: Väikese võimsusega talitluse ala ja suure võimsusega talitluse ala vaheline talitlusvõimsuse erinevus peab olema vähemalt 20%.

PEJ-MT8-1F: Üksiksüsteemi mõõtmisel on ülejäänud PEJ väljalülitatud olekus või valdavas osas ooteolekus.

- Juhul, kui ülejäänud päikeseelektrijaama pingetustamine ei ole võimalik, peaksid kogu üksiksüsteemi mõõtmise ajal olema mõõdetava asukoha lähedal (100 m raadiuses) olema ülejäänud PEJ ahelad välja lülitatud.
- Kaugemal, kui 100 m raadiuses olevad energiatootmisahelas olevad seadmed peavad olema ooteolekus või välja lülitatud.

PEJ-MT8-2 Taustamüra mõõtmine toimub inverterseadme täielikult välja lülitatud olekus iga kahe PEJ-MT8-1 nimetatud talitlusviisi mõõtmise vahel.

PEJ-MT8-2A: Juhul, kui ülejäänud päikeseelektrijaama pingetustamine ei ole võimalik, peaksid kogu üksiksüsteemi mõõtmise ajal olema mõõdetava asukoha lähedal (100 m raadiuses) olema ülejäänud PEJ ahelad välja lülitatud.

PEJ-MT8-2B: Kaugemal, kui 100 m raadiuses olevad energiatootmisahelas olevad seadmed peavad olema ooteolekus või välja lülitatud.

PEJ-MT8-3 Soovituslik katsete läbiviimise kava on esitatud vt Tabel 7-1.

Tabel 7-1. Soovituslik katsete läbiviimise järjestuse loetelu.

Katse tähistus	Katse läbiviimine	Kirjeldus	Märkused
PEJ-TAUST1-V	**PEJ-MT7-2**	Taustamüra mõõtmine, vert. polarisatsioon	Taustamüra 1, inverter välja lülitatud, võrgust lahutatud
PEJ-TAUST1-H	**PEJ-MT7-2**	Taustamüra mõõtmine, hor. polarisatsioon	Taustamüra 1, inverter välja lülitatud, võrgust lahutatud
PEJ-STBY-V	**PEJ-MT8-1B**	PEJ seadmed ooteolekus, vert. polarisatsioon	Inverterseadme väljundvõimsus 0
PEJ-STBY-H	**PEJ-MT8-1B**	PEJ seadmed ooteolekus, hor. polarisatsioon	Inverterseadme väljundvõimsus 0
PEJ-TAUST2-V	**PEJ-MT7-2**	Taustamüra mõõtmine, vert. polarisatsioon	Taustamüra 2, inverter välja lülitatud, võrgust lahutatud
PEJ-TAUST2-H	**PEJ-MT7-2**	Taustamüra mõõtmine, hor. polarisatsioon	Taustamüra 2, inverter välja lülitatud, võrgust lahutatud
PEJ-PMIN-V	**PEJ-MT8-1C**	PEJ seadmed madalal võimsusel, vert. polarisatsioon	Inverterseadme väljund-võimsus 20%–50% nimi-võimsusest
PEJ-PMIN-H	**PEJ-MT8-1C**	PEJ seadmed madalal võimsusel, hor. polarisatsioon	Inverterseadme väljund-võimsus 20%–50% nimi-võimsusest
PEJ-TAUST3-V	**PEJ-MT7-2**	Taustamüra mõõtmine, vert. polarisatsioon	Taustamüra 3, inverter välja lülitatud, võrgust lahutatud
PEJ-TAUST3-H	**PEJ-MT7-2**	Taustamüra mõõtmine, hor. polarisatsioon	Taustamüra 3, inverter välja lülitatud, võrgust lahutatud
PEJ-PMAX-V	**PEJ-MT8-1D**	PEJ seadmed suurel võimsusel, vert. polarisatsioon	Inverterseadme väljund-võimsus üle 50% nimivõimsusest
PEJ-PMAX-H	**PEJ-MT8-1D**	PEJ seadmed suurel võimsusel, hor. polarisatsioon	Inverterseadme väljund-võimsus üle 50% nimivõimsusest
PEJ-TAUST4-V	**PEJ-MT7-2**	Taustamüra mõõtmine, vert. polarisatsioon	Taustamüra 4, inverter välja lülitatud, võrgust lahutatud

Katse tähistus	Katse läbiviimine	Kirjeldus	Märkused
PEJ-TAUST4-H	**PEJ-MT7-2**	Taustamüra mõõtmine, hor. polarisatsioon	Taustamüra 4, inverter välja lülitatud, võrgust lahutatud

7.9 Kogu paigaldise katsete läbiviimise käik

PEJ-MT9-1 kogu paigaldise summaarse emissiooni mõõtmiseks viiakse katsed läbi sellistel talitlusviisidel, millised iseloomustaksid oodatavalt PEJ seadmete kõige intensiivsema EM-häiringuemissiooni esinemist.

PEJ-MT9-1A: Mõõtmine viiakse läbi vähemalt kahe energiatootmis-talitlusviisi korral, mis on kirjeldatud punktides **PEJ-MT9-1B ja PEJ-MT9-1C.**

PEJ-MT9-1B: Mõõtmine PEJ seadmete väikesel väljundvõimsusel toimub selliselt, et tagatud on inverterseadmete talitlus võrku võimsuse edastamisega. Väikese võimsuse vahemikuks on talitlusvõimsus inverterseadmete nimivõimsusega võrreldes tasemel 20% kuni 60% (NB! eeldada suuremat vahemikku, kui üksiksüsteemidel)

PEJ-MT9-1C: Mõõtmine PEJ seadmete suurel väljundvõimsusel toimub selliselt, et tagatud on inverterseadmete talitlus võrku võimsuse edastamisega. Suure võimsuse vahemikuks on talitlusvõimsus inverterseadme nimivõimsusega võrreldes tasemel üle 60%. (NB! eeldada suuremat vahemikku, kui üksiksüsteemidel)

PEJ-MT9-1D: Väikese võimsusega talitluse ala ja suure võimsusega talitluse ala vaheline talitlusvõimsuse erinevus peab olema vähemalt 20%.

PEJ-MT9-2 Taustamüra mõõtmine toimub päikeseelektrijaama ooteolekus, kui terve päikeseelektrijaama pingetuks viimine ja taaspingestamine nõuab liiga suurt ajakulu.

PEJ-MT9-2A: Taustamüra mõõtmine sooritatakse vähemalt katsete alguses ja katsete lõpus.

PEJ-MT9-2B: Tagatud peab olema taustamüra mõõtmiste planeering kogu paigaldise mõõtmisel selliselt, et kahe taustamüra-mõõtmise vaheline ajavahe ei ole suurem, kui 2 h.

PEJ-MT9-3 Soovituslik kogu paigaldise katsete läbiviimise kava on esitatud vt Tabel 7-2.

Tabel 7-2. Soovituslik katsete läbiviimise järjestuse loetelu kogu paigaldise mõõtmiseks.

Katse tähistus	Katse läbiviimine	Kirjeldus	Märkused
PEJ-TAUST1P-V	**PEJ-MT7-2**	Taustamüra või ooteolekus mõõtmine, vert. polarisatsioon	Taustamüra 1, PEJ paigaldisena ooteolekus
PEJ-TAUST1P-H	**PEJ-MT7-2**	Taustamüra või ooteolekus mõõtmine, hor. polarisatsioon	Taustamüra 1, PEJ paigaldisena ooteolekus
PEJ-PMINP-V	**PEJ-MT9-1B**	PEJ seadmed madalal võimsusel, vert. polarisatsioon	Inverterseadme väljundvõimsus 20%–50% nimivõimsusest
PEJ-PMINP-H	**PEJ-MT9-1B**	PEJ seadmed madalal võimsusel, hor. polarisatsioon	Inverterseadme väljundvõimsus 20%–50% nimivõimsusest
PEJ-PMAXP-V	**PEJ-MT9-1C**	PEJ seadmed suurel võimsusel, vert. polarisatsioon	Inverterseadme väljundvõimsus üle 50% nimivõimsusest
PEJ-PMAXP-H	**PEJ-MT9-1C**	PEJ seadmed suurel võimsusel, hor. polarisatsioon	Inverterseadme väljundvõimsus üle 50% nimivõimsusest
PEJ-TAUST2P-V	**PEJ-MT7-2**	Taustamüra mõõtmine, vert. polarisatsioon	Taustamüra 1, PEJ paigaldisena ooteolekus
PEJ-TAUST2P-H	**PEJ-MT7-2**	Taustamüra mõõtmine, hor. polarisatsioon	Taustamüra 1, PEJ paigaldisena ooteolekus

7.10 Mõõtetulemuste töötlemine

PEJ-MT10-1 Üldine mõõtetulemuste töötlemine

PEJ-MT10-1A: Mõõtetulemuste töötlemisel arvestatakse olulise mõjurina tulemuste juures taustamürakomponenti. Mõõtetulemuste töötlemise eesmärgiks peab olema PEJ poolt emiteeritud EM-häiringute ja taustamürasuuruste eristamine.

PEJ-MT10-1B: Mõõtetulemuste töötlemisel arvestatakse piirtasemega, mille suhtes mõõtetulemuste vastavushindamise võrdlus on eesmärgiks läbi viia.

PEJ-MT10-1C: Juhul, kui mõõtetulemuste töötlemisel osutub müratasemе mõõtetulemus vastavas sageduspunktis kõrgemaks kui -6 dB piirtaseme suhtes, märgitakse see sageduspunkt kui punkt, mille puhul vastavushindamist läbi viia ei ole võimalik.

PEJ-MT10-2 Mõõtetulemuste esitamine

PEJ-MT10-2A: Mõõtetulemuste töötlemisel pürgitakse tulemuste esitamisele sellisel viisil, et võimalikult selgelt eristada taustamürast tegeliku PEJ poolt emiteeritud häiringusuurused. Selleks tuleks kasutada kas tabeli või graafiku kujul tulemuste kajastamist.

PEJ-MT10-2B: Mõõtesuuruste töötlemisel saadud tulemuste juurde tuleb selgelt tähistatuna märkida tulemuste võrdlemise aluseks oleva piirtaseme jooned. Piirtaseme joone juurde tuleb märkida, mis on piirtaseme tähendus ja mis on selle allikas.

8 Mõõtemetoodika tuuleelektrijaamade (TEJ) EM-häiringuemissiooni mõõtmiseks

Käesolev peatükk esitab eespool esitatud kaalutlustele tuginedes mõõtemetoodika kirjelduse tuuleelektrijaamade mõõtmiseks. Rakendatavad metoodika elemendid kirjeldatakse alljärgnevas struktuuris:

1. Mõõdetavad suurused
2. Mõõteasukohtade valik
3. Mõõtetajurite ülesseadmine
4. Mõõteahelate ülesseadmine
5. Mõõtevastuvõtjate ülesseadmine
6. Mõõdetava objekti ettevalmistus
7. Mõõtmiste läbiviimise protseduur
8. Mõõtetulemuste töötlemine
9. Protseduurid piirtasemetega võrdlemiseks

Eraldiseisvalt täpsustatakse paigaldise ja süsteemi alamosa mõõtmised.

8.1 Mõõdetavad suurused

TEJ-MT1: Tuuleelektrijaamade mõõtmisel on eesmärgiks selgitada järgmised EM-häiringuemissiooni kiirgusliku emissiooni suurused:

TEJ-MT1-1: Sagedusvahemikus 150 kHz ... 30 MHz mõõdetakse magnetväljatugevuse suurused ühikutes dBµA/m.

TEJ-MT1-1A: Mõõtetulemustena esitatakse kvaasitippväärtus-detektoriga saadud mõõtetulemustele toetuvad väärtused.

- Nõue vastab IEC 61400-40 dokumendi punktile 7.3.7.
- Võimaldab tulemust võrrelda muudes CISPR-seeria ja 61000-seeria dokumentides esitatud piirtasemetega.

TEJ-MT1-1B: Mõõtetulemustena esitatakse vertikaaltasandis polariseeritud EM-häiringuväljatugevuste suurused.

- Nõue vastab IEC 61400-40 dokumendi punktile 7.3.7.

TEJ-MT1-1C: Mõõtetajuri seadistused peavad olema tagatud vastavalt punktile TEJ-MT-3.

TEJ-MT1-1D: Mõõtevastuvõtja seadistused peavad olema tagatud vastavalt TEJ-MT4-3.

TEJ-MT1-1E: Võimalusel mõõdetakse ja salvestatakse EM-häiringuemissiooni keskväärtus- ja tippväärtus-suurused.

TEJ-MT1-2: Sagedusvahemikus 30 MHz ... 1000 MHz mõõdetakse elektriväljatugevuse suurused ühikutes dBµV/m.

TEJ-MT1-2A: Mõõtetulemustena esitatakse kvaasitippväärtus-detektoriga saadud mõõtetulemustele toetuvad väärtused.

- Nõue vastab IEC 61400-40 dokumendi punktile 7.3.7.
- Võimaldab tulemust võrrelda muudes CISPR-seeria ja 61000-seeria dokumentides esitatud piirtasemetega.
- Täpsustatud seadistused vt TEJ-MT4-3

TEJ-MT1-2B: Mõõtmised sooritatakse eraldi nii horisontaal- kui vertikaaltasandis polariseeritud EM-häiringuväljatugevuste suuruste mõõtmiseks

- Nõue vastab IEC 61400-40 dokumendi punktile 7.3.7.
- Antenni suunad vt TEJ-MT1-2F.

TEJ-MT1-2C: Mõõtetajuri seadistused peavad olema tagatud vastavalt punktile TEJ-MT-3.

TEJ-MT1-2D: Mõõtevastuvõtja seadistused peavad olema tagatud vastavalt TEJ-MT4-3.

TEJ-MT1-2E: Võimalusel mõõdetakse ja salvestatakse EM-häiringuemissiooni keskväärtus- ja tippväärtus-suurused.

TEJ-MT1-2F: Mõõtmised viiakse läbi antenni kahes erisuunas

- antenni suunamisel maapinnaga samal tasandil, tuuliku torni suunas
- antenni suunamisel tuuliku gondli suunas

TEJ-MT1-3: Sagedusvahemikus 1 GHz ... 3 GHz mõõdetakse elektriväljatugevuse suurused ühikutes dBµV/m.

TEJ-MT1-3A: Mõõtetulemustena esitatakse tippväärtus-detektoriga ja keskväärtusdetektoriga saadud mõõtetulemustele toetuvad väärtused.

- Nõue tuleneb CISPR 11 esitatud nõuetest sagedusala 1 GHz kuni 6 GHz mõõtmisteks.

- Võimaldab tulemust võrrelda muudes CISPR-seeria ja 61000-seeria dokumentides esitatud piirtasemetega.

TEJ-MT1-3B: Mõõtmised sooritatakse eraldi nii horisontaal- kui vertikaaltasandis polariseeritud EM-häiringuväljatugevuste suuruste mõõtmiseks

- Nõue vastab IEC 61400-40 dokumendi punktile 7.3.7.
- Antenni suunad vt TEJ-MT1-2F.

TEJ-MT1-3C: Mõõtetajuri seadistused peavad olema tagatud vastavalt punktile TEJ-MT-3.

TEJ-MT1-3D: Mõõtevastuvõtja seadistused peavad olema tagatud vastavalt TEJ-MT4-3.

TEJ-MT1-3F: Mõõtmised viiakse läbi antenni kahes erisuunas

- antenni suunamisel maapinnaga samal tasandil, tuuliku torni suunas
- antenni suunamisel tuuliku gondli suunas

8.2 Mõõteasukohtade valik

Mõõteasukohad on TEJ ümbruses asukohad, kuhu paigutatakse väljatugevuse tuvastamiseks sobilikud tajurid.

TEJ-MT2-1: Mõõteasukohad valitakse lähtudes TEJ geomeetriast. Üksiksüsteemi mõõtmised viiakse läbi vähemalt 4 asukohas TEJ vahetus ümbruses.

TEJ-MT2-1A: Kõikides asukohtades sooritatakse mõõtmised TEJ-MT1-1, TEJ-MT1-2, TEJ-MT1-3.

TEJ-MT2-1B: Valitud mõõteasukohad peavad võimaldama TEJ-MT2-1A jaoks vajalike tajurite stabiilset ülesseadmist.

TEJ-MT2-1C: Eelistatud mõõteasukohad valitakse selliselt, et need paikneksid mõõdetavast TEJ-st ortogonaalses paigutuses.

- Nõue vastab IEC 61400-40 punktile 7.3.7 antennide asukohtade valikule.

TEJ-MT2-1D: tähelepanu pööratakse väliste seadme asukohale TEJ paigaldises. 1 mõõteasukoht valitakse selliselt, et kaugus tuulikuvälise seadme asukohast oleks 30 m, kui tuulikuvälise seadme kaugus tuuliku torni keskteljest on alla 60 m. Samuti valitakse 1 punkt vastavalt IEC 61400-40 kirjeldusele torni ukse asukohas lähedasest mõõtmisest.

- Nõue on kohandatud IEC 61400-40 punkti 7.3.7 antennide asukohtade valiku tingimuste osas.

TEJ-MT2-1E: Eelistatud kaugused mõõtmiste läbiviimiseks on ühesugused kõikides ortogonaalsetes positsioonides. Eelistatud kaugus mõõdetavast TEJ-st on 30 m TEJ keskteljest. Kauguste vahemik TEJ-st peaks olema vähemalt 10 m TEJ tarindite servast.

- Nõue on kohandatud IEC 61400-40 punkti 7.3.7 kirjeldusest, kus on nõutud 30 m mõõtekaugus. Siin on mõõtekaugus kirjeldatud eelistatuna, sest reaalse TEJ ümbruses võib 30 m tühja perimeetri leidmine olla piiratud.

TEJ-MT2-1F: Võimaluse korral kui keskkonnatingimused on täidetud, valitakse 1 mõõteasukoht mõõtekaugusel 65 m tuuliku torni teljest ja 1 mõõteasukoht mõõtekaugusel 65 m tuuliku torni teljest

- Nõue on kohandatud IEC 61400-40 punkti 7.3.7 kirjeldusest. Juhul, kui neid mõõtekauguseid ei ole praktilises olus võimalik saavutada, valitakse mõnel muul kaugusel mõõtepunkt ja kauguse valiku kriteerium dokumenteeritakse.

TEJ-MT2-2: Mõõteasukohtade valikul tagatakse mõõtetehnika ülesseadmisel takistustevaba ala, mis täidab allolevad tingimused

TEJ-MT2-2A: takistustevaba ala mõõteasukohas juures vastab CISPR 16-1-4 punktis 6.2.3 / joonis 10 kirjeldatule.

- CISPR 16-1-4 esitab üldises vaates nõude antennist mistahes suunas poole mõõtekaugusega võrdse takistusvaba ala tagamiseks.

TEJ-MT2-2B: mõõdetava TEJ paigaldise ja mõõteasukoha vahele ei tohi jääda suure mõõtmega looduslikke ega tehislikke takistusi. Juhul, kui see ei ole täidetud tuleb see selgelt märkida mõõtearuandesse.

TEJ-MT2-2C: mõõdetava TEJ paigaldise ja mõõteasukoha vahele ei tohi jääda elektrijuht-materjalidest objekte ega takistusi. Juhul, kui see ei ole täidetud tuleb see selgelt märkida mõõtearuandesse.

TEJ-MT2-2D: mõõteasukohast vaadelduna ei tohi mõõdetava TEJ paigaldise taha jääda suurte mõõtmetega elektrijuht-materjalidest objekte ega takistusi. Juhul, kui see ei ole täidetud tuleb see selgelt märkida mõõtearuandesse.

TEJ-MT2-3: Mõõteasukohad kogu paigaldise mõõtmiseks valitakse lähtudes TEJ paigaldise ülesehitusest ja selle lähiümbruses olevatest looduslike ja tehiskeskkonna objektidega määratud tingimustest.

TEJ-MT2-3A: Paigaldise mõõtmised viiakse läbi vähemalt 2 asukohas TEJ vahetus ümbruses, kui tegemist on vähem kui 1 km pikkuse küljepikkusega paigaldisest ja 4 asukohas muul juhul.

TEJ-MT2-3B: Juhul, kui TEJ on ühendatud õhuliiniga ja see õhuliin on vähem kui 300 m kaugusel TEJst, valitakse täiendavalt 1 mõõteasukoht 30 m kaugusel sellest õhuliinist ja 30 m kaugusel sellest asukohast, kus keskpingeliinile toide on ühendatud (nt keskpingeliini lõpumast, milles on kaabelliinile üleminek).

TEJ-MT2-3C: Kõikides asukohtades sooritatakse suuruste TEJ-MT1-1, TEJ-MT1-2, PEJ-MT1-3 mõõtmised.

TEJ-MT2-3D: Valitud mõõteasukohad peavad võimaldama TEJ-MT2-3C jaoks vajalike tajurite stabiilset ülesseadmist.

TEJ-MT2-3E: Eelistatud mõõteasukohad valitakse selliselt, et need paikneksid mõõdetavast paigaldisest ortogonaalses paigutuses.

- Nõue vastab punktis eelnevalt punktis 6.7.3 kirjeldatud ettepanekutele.

TEJ-MT2-3F: Eelistatud kaugused mõõtmiste läbiviimiseks on ühesugused kõikides valitud ortogonaalsetes positsioonides. Eelistatud kaugus mõõdetavast PEJ-st on 100 m ... 300 m tuuleelektrijaama välisperimeetrist.

- Välisperimeetrina arvestatakse kas elektrijaama piirdeaeda või mõnda konstruktiivset komponenti, mis on seotud TEJ elektrilise talitlusega, või neid ühendavaid mõttelisi sirgjooni.

TEJ-MT2-4: TEJ kogu paigaldise mõõteasukohtade valikul tagatakse mõõtetehnika ülesseadmisel takistustevaba ala, mis täidab allolevad tingimused

TEJ-MT2-4A: takistustevaba ala mõõteasukohas juures vastab CISPR 16-1-4 punktis 6.2.3 / joonis 10 kirjeldatule.

- CISPR 16-1-4 esitab üldises vaates nõude antennist mistahes suunas poole mõõtekaugusega võrdse takistusvaba ala tagamiseks. Juhul, kui see ei ole võimalik, peab mõõteantenni ümber olema vähemalt 30 m ulatuses takistuste vaba ala.

TEJ-MT2-4B: mõõdetava TEJ paigaldise ja mõõteasukoha vahele ei tohi jääda suure mõõtmega looduslikke ega tehislikke takistusi. Juhul, kui see ei ole täidetud tuleb see selgelt märkida mõõtearuandesse.

TEJ-MT2-4C: mõõdetava TEJ paigaldise ja mõõteasukoha vahele ei tohi jääda elektrijuht-materjalidest objekte ega takistusi. Juhul, kui see ei ole täidetud tuleb see selgelt märkida mõõtearuandesse.

TEJ-MT2-4D: mõõteasukohast vaadelduna ei tohi mõõdetava TEJ paigaldise taha jääda suurte mõõtmetega elektrijuht-materjalidest objekte ega takistusi. Juhul, kui see ei ole täidetud tuleb see selgelt märkida mõõtearuandesse.

8.3 Mõõtetajurite valik ja ülesseadmine

TEJ-MT3-1: Mõõtmiste sooritamiseks valitud mõõtetajurid peavad vastama CISPR 16-1-4 nõuetele

TEJ-MT3-1A: Mõõtetajurid sagedusvahemikus 150 kHz ... 30 MHz mõõtmiste sooritamiseks peavad vastama CISPR 16-1-4 punkti 4.4.2 nõuetele.

- IEC 61400-40 esitab magnetvälja mõõtmise antennile esitatavate nõuete viite dokumendile CISPR 11, mis omakorda viitab CISPR 16-1-4 silmusantenni spetsifikatsioonile.

TEJ-MT3-1B: Mõõtetajurid sagedusvahemikus 30 MHz ... 1 GHz mõõtmiste sooritamiseks peavad vastama CISPR 16-1-4 punkti 4.5 nõuetele.

- IEC 61400-40 esitab elektriväljatugevuse mõõtmise antennile esitatavate nõuete viite dokumendile CISPR 11, mis omakorda viitab CISPR 16-1-4 spetsifikatsioonile.

TEJ-MT3-1C: Mõõtetajurid sagedusvahemikus 1 GHz ... 3 GHz mõõtmiste sooritamiseks peavad vastama CISPR 16-1-4 punkti 4.5 nõuetele.

- IEC 61400-40 selles sagedusvahemikus mõõtmisi ei kirjelda, kuid muudes osades viitab CISPR 11 põhimõtetele. Viimane omakorda viitab antenni spetsifikatsioonis CISPR 16-1-4 spetsifikatsioonile

TEJ-MT3-2: Mõõteahelate ülesseadmisel tuleb arvestada tingimustega, mis on kirjeldatud punktis TEJ-MT2-2.

TEJ-MT3-3: Mõõtetajurite kinnitamiseks kasutatavad tarindid peavad täitma järgmised nõuded:

TEJ-MT3-3A: mõõtetajuri fikseerimiseks kasutatav tarind peab olema mõõtetajuri juures elektrijuhtidest komponente mitte omavad.

TEJ-MT-3-3B: Antenni kinnitamiseks kasutatava tarindi juhtivad komponendid peavad paiknema vähemalt aktiivosa suurima pikkuse võrra kaugemal antenni aktiivosa mistahes osast.

TEJ-MT-3-3C: Tarind peab tagama mõõtetajuri mõõtepolarisatsioonitasandi pööramist võimaldav (vähemalt horisontaal- ja vertikaaltasandid).

- Tingimus tuleneb TEJ-MT1-2B, TEJ-MT1-3B, TEJ-MT1-4B sooritamise vajadusest.

TEJ-MT-3-3D: Tarind peab tagama mõõtetajuri seadistamise selliselt, et tajur (mõõteantenn) suunatakse tuuliku gondlile.

- Tingimus vastab IEC 61400-40 punktis 7.3.7 esitatud spetsifikatsioonile.

TEJ-MT3-4: mõõtetajurid seadistatakse maapinnast kõrgusele:

TEJ-MT3-4A: üksiksüsteemi mõõtmisel silmusantenni kasutamisel seadistatakse selle madalaim punkt vertikaal-polariseeritud asendis kõrgusele 1,0 m maapinnast (vt IEC 61400-40 ja CISPR 16-2-5).

- Tingimus vastab IEC 61400-40 punktis 7.3.7 esitatud spetsifikatsioonile.
- Tingimus vastab CISPR 16-2-5 punktiks 6.3.4 esitatud spetsifikatsioonile.

TEJ-MT3-4B: üksiksüsteemi mõõtmisel logoperioodilise või bikoonilise antenni kasutamisel seadistatakse selle efektiivne keskpunkt maapinnast 2,0 m kõrgusele (vt IEC 61400-40 ja CISPR 16-2-5).

- Tingimus vastab IEC 61400-40 punktis 7.3.7 esitatud spetsifikatsioonile.
- Tingimus vastab CISPR 16-2-5 punktiks 6.3.3 esitatud spetsifikatsioonile. Selles nimetatakse 30 m mõõtekaugusel kõrguste vahemikuks 2 ... 6 m maapinnast ja 10 m mõõtekaugusel maapinnast 1 ... 4 m.

TEJ-MT3-4C: kogu paigaldise mõõtmisel silmusantenni kasutamisel seadistatakse selle madalaim punkt vertikaal-polariseeritud asendis

c) kõrgusele 1,0 m kõrgusele paigaldise asukohas maapinnast kõige kõrgemale ulatuvat punkti läbiva tasandi suhtes, kui mõõteantenni kõrgus mõõteasukohas ei ületa 4,0 m;

d) kõrgusele 4,0 m maapinnast muul juhul.

TEJ-MT3-4D: kogu paigaldise mõõtmisel logoperioodilise või bikoonilise antenni kasutamisel seadistatakse selle efektiivne keskpunkt

c) kõrgusele 4,0 m kõrgusele paigaldise asukohas maapinnast kõige kõrgemale ulatuvat punkti läbiva tasandi suhtes, kui mõõteantenni kõrgus mõõteasukohas ei ületa 6,0 m;

d) kõrgusele 6,0 m maapinnast muul juhul.

- Tingimus vastab IEC 61400-40 punktis 7.3.7 esitatud spetsifikatsioonile.
- Tingimus vastab CISPR 16-2-5 punktiks 6.3.3 esitatud spetsifikatsioonile. Selles nimetatakse 30 m mõõtekaugusel kõrguste vahemikuks 2 ... 6 m maapinnast ja 10 m mõõtekaugusel maapinnast 1 ... 4 m.

TEJ-MT3-5: mõõtetajuriga seotud abiahelad peavad täitma järgmised tingimused:

TEJ-MT3-5A: Mõõtetajuriga seotud abiahelad peavad olema galvaaniliselt lahti sidestatud mõõtetajuriga mitteseotud maandusahelatest.

TEJ-MT3-5B: Mõõtetajuriga seotud abiahelad peavad tagama tühise mõõtetulemuste mõjutamise. See peab olema saavutatud abiahelate komponentide valikutega ja abiahelatega seotud ahealte ülesehituse ja paigutusega.

8.4 Mõõtevastuvõtjate ülesseadmine

TEJ-MT4-1 Mõõtetulemuste registreerimiseks kasutatavad mõõtevastuvõtjad peavad vastama järgmistele tingimustele

TEJ-MT4-1A: mõõtmised tuleb sooritada CISPR 16-1-1 vastava mõõtevastuvõtjaga.

- Kohandatud, IEC 61400-40 spetsifikatsioon punktis 7.3.7 nõuab üksnes alamosa CISPR 16-1-1 esitatud tingimuste tagamist.

TEJ-MT4-1B: mõõtevastuvõtja peab võimaldama seadistada mõõtesagedus-vahemikku, mõõteribalaiust vastavalt CISPR 16-1-1 lisa H tabelile H.1**.**

- Kohandatud, IEC 61400-40 spetsifikatsioon punktis 7.3.7 nõuab üksnes mõõte-ribafiltrite laiuste tuge, samas ei spetsifitseeri kvaasitipp-detektori tingimusi.

TEJ-MT4-1C: mõõtevastuvõtja peaks eelistatult omama kiirel Fourier' teisendusel põhinevat mõõtmisfunktsionaalsust.

- Sobilik funktsionaalsus on kirjeldatud CISPR 16-1-1 punktis 4.1.

TEJ-MT4-1D: Mõõtevastuvõtja indikeeritud müratase peaks olema parem, kui -155 dBm/Hz

- Nõue tuleneb mõõteahela suutlikkuse analüüsist vt käesoleva aruande lisa P, millega tagada piirsuuruste kontrolliks vajalik dünaamiline mõõteulatus.

TEJ-MT4-2 Mõõtevastuvõtja kasutamisele eelnevalt peab olema edukalt läbitud käivitusjärgne sisemine kontroll (i.k *self-test*) ja joondamine (i.k *alignment*).

TEJ-MT4-3 Mõõtevastuvõtja häälestatakse mõõtmiste läbiviimiseks alljärgnevalt

	TEJ-MT4-3A	TEJ-MT4-3B	TEJ-MT4-3C
Sagedusvahemik	150 kHz ... 30 MHz	30 MHz ... 1000 MHz	1 GHz ... 3 GHz
Mõõteribafiltri laius (RBW)	9 kHz	120 kHz	1 MHz
Sageduspunkti mõõteaeg, min	4000 ms *	4000 ms *	4000 ms *
Sagedussamm	2,25 kHz	30 kHz	250 kHz
Mõõtedetektorid	Keskväärtus, tippväärtus, kvaasitippväärtus**	Keskväärtus, tippväärtus, kvaasitippväärtus**	Keskväärtus, tippväärtus,

- Kohandatud, IEC 61400-40 spetsifikatsioon punktis 7.3.7 nõuab üksnes RBW väärtuse tagamist ja sagedussammu, mille suurus on 2 korda suurem tabelis esitatust.
- Kvaasitippväärtuste mõõtmisel sooritatakse pidev-kvaasitippväärtus-mõõtmine ainult juhul, kui mõõtevastuvõtja toetab reaalajalist DFT-baasil kvaasi-tippväärtusanalüüsi. Juhul, kui sellist funktsionaalsust ei ole võimalik kasutada, tuleb valida kvaasitippväärtus-analüüsiks spetsiifilised eelselekteeritud sageduspunktid ja korrata mõõtmisi.
- Sageduspunkti mõõteaeg on spetsifitseeritud lähtudes tuuliku laba 1/3 perioodi käiku arvestades, eeldades pöörlemissagedust 5 p/min. Kui pöörlemissagedus on sellest erinev, tuleb muuta mõõteaega selliselt, et see vastaks 1/3 turbiini ühe pöörde tegemise ajale.

8.5 Mõõteahelate koostamine ja ettevalmistus

TEJ-MT5-1 Mõõteahelate koosseisus peavad olema kvaliteetsed komponendid, sh ühendusvahendid ja madala sumbuvusteguriga kaablid, mis võimaldavad tagada küllaldase mõõtesuuruste registreerimise dünaamilise ulatuse.

TEJ-MT5-1A: Mõõteahelate koosseis tuleb dokumenteerida üksikasjalikult kõikide komponentide osas, mis mõõteahelasse on kaasatud tajuri ja ülekandeahela korrektseks tööks. Kirjeldada tuleb komponentide tüüp, olulised parameetrid (nt kaablite pikkus, atenuaatorite summutustegur jm) ja registreerimisnumber (seerianumber või laborisisene identifikaator).

TEJ-MT5-2 Mõõteahelate soovituslikud põhiskeemid peavad olema alljärgnevad

TEJ-MT5-2A: silmusantenniga mõõtmisel

TEJ-MT5-2B: logoperioodilise antenniga mõõtmisel

TEJ-MT5-3 Mõõteahelate koostamise järel peab olema läbi viidud esmane ahela korrasoleku kontroll.

8.6 Katsetatava TEJ ettevalmistamine

TEJ-MT6-1 Katsetatava TEJ paigaldise kohta tuleb fikseerida selles talitlevate võtmekomponentide andmed, ühendusviisid ja teostusskeem.

TEJ-MT6-1A: Fikseerida tuleb TEJ ehituse aluseks olev dokumentatsioon, sh projektdokumentatsioon, paigaldise elektriskeem, kasutatud juhtide ja kaablite tüübid jms. Mõõtmiste protokollis fikseeritakse viited konkreetsed projekti dokumentatsiooni failidele, joonistele vmt, millest antud info on üheselt leitav.

TEJ-MT6-1B: Veenduda tuleb paigaldise teostuses vastavalt ehitusprojektile ja teostus dokumentatsioonile. Kõik leitud olulised kõrvalekalded tuleb eraldi välja tuua.

TEJ-MT6-2 Katsetatava paigaldise võtmekomponendid tuleb täpsustatult registreerida

TEJ-MT6-2A: Kirjeldada tuleb paigaldises elektrienergia tootmisega seotud ahealte koosseisus olevad komponendid, sh tuuliku tüüp ja nimiandmed.

TEJ-MT6-2B: Fikseerida tuleb potentsiaalsete EM-häiringuemissiooni allikatena toimivad TEJ komponendid, sh täiturseadmete tüübid ja selle tootjad, seerianumbrid. Eraldi tuleb välja märkida, millistele elektromagnetilise ühilduvuse normdokumentidele vastavust iga seadme puhul deklareeritakse.

TEJ-MT6-2C: Fikseerida tuleb inverterseadme riist-, püsivara ja tarkvaraversioonid, mille seade väljastab või mis on muul moel teada. Samuti tarkvaraliselt teotatavad seadistused, mis lahknevad tehaseseadistustest (juhul, kui on seadistused on loetavad).

TEJ-MT6-2D: Fikseerida tuleb muundurseadmete seadistamiseks kasutatavad tarkvaralised juhtimisvõtted ja nendega seotud parameetrite vahemik.

TEJ-MT6-3 Üksiksüsteemi mõõtmisel tuleb teostada TEJ väljundparameetrite ja võimalusel vahelülide talitlus parameetrite registreerimise mõõteseadmete ühendamine.

TEJ-MT6-3A: Mõõdetavate talitlussuuruste registreerimine peab tagama minimaalselt võrku antava tegeliku võimsuse registreerimise.

TEJ-MT6-3B: Mõõtmiste käigus registreeritavate soovitatavate suuruste hulgas on pingetase vahelduvtoitevõrgus, vahelduvtoitevõrgu toitekvaliteedi suurused vastavalt IEC 61000-4-30, tuulekiirus, tuuliku rootori pöörlemissagedus, temperatuur tuulikust väljas ja tuulikus sees.

TEJ-MT6-3C: Olekusuuruste registreerimise ajaline intervall ei tohi olla suurem kui 1 min. Antud ajavahemikus suuruste koondtöötlus toimub aritmeetilise keskmistamise teel.

TEJ-MT6-4 Kogu paigaldise mõõtmisel tuleb teostada paigaldise kohta summaarse talitlusinfo kogumine.

TEJ-MT6-4A: Mõõdetavate talitlussuuruste registreerimine peab tagama võrku antava tegeliku võimsuse registreerimise.

TEJ-MT6-4B: Mõõtmiste käigus registreeritavate soovitatavate suuruste hulgas on pingetase vahelduvtoitevõrgus, vahelduvtoitevõrgu toitekvaliteedi suurused vastavalt IEC 61000-4-30, tuulekiirus, välistemperatuur.

TEJ-MT6-4C: Olekusuuruste registreerimise ajaline intervall ei tohi olla suurem kui 1 min. Antud ajavahemikus suuruste koondtöötlus toimub aritmeetilise keskmistamise teel.

8.7 Mõõtmiste läbiviimise protseduurid

TEJ-MT7-1 Mõõtmiste alustamisel tuleb teostada mõõteahelate korrasoleku ja ühenduvuse kontroll. Sobilik protseduur on näiteks mõõtevastuvõtja mõõtetulemuse kuvalt keskkonna taustamüra iseloomustavate spektrikomponentide leidmine.

TEJ-MT7-2 Mõõteasukohas esineva EM-taustamüra mõõtmine

TEJ-MT7-2A: Taustamüra mõõtmine viiakse läbi selliselt, et võimalikult vähe EM-häiringusuurusi emiteerivaid süsteeme ja seadmeid oleks paigaldise juures töös.

Üksiksüsteemi mõõtmisel mõõdetavas osas TEJ juures olev energiatootmisseadmete ahel peab olema võrgust lahutatud.

TEJ-MT-7-2B: Taustamüra mõõtmine viiakse läbi samades sagedusribades ja samadel tingimustel, kui on kirjeldatud punktis TEJ-MT1. Selliselt saavutatakse parim vastavus taustamüramõõtmiste ja katsetatava paigaldise mõõtetulemuste vahel.

TEJ-MT7-3 EM-häiringuemissiooni tasemete mõõtmine TEJ kindlal väljundvõimsuse tasemel talitlusel

TEJ-MT7-3A: TEJ juhtimiseks kindlasse talitlusolekusse kasutatakse asjakohaseid tehnilisi meetmeid või ilmastikuolude eripärasid. TEJ juhtimiseks osalise koormusega talitlusse saab rakendada näiteks turbiini labade pööramist.

- Tingimus on esitatud IEC 61400-40 dokumendis punktis 7.3.8 katsetatava seadme koormustalitluse kohta.

TEJ-MT7-3B: TEJ väljundvõimsuse taseme hindamine toimub läbi reaalse jaotusvõrku edastatud võimsuse mõõdetud suuruse alusel.

TEJ-MT7-3C: TEJ talitlussuuruste registreerimisel tuleb kirjeldada vähemalt madalpinge- jaotusvõrgu pingetase kõikides faasides, millega inverterseade on jaotusvõrguga ühendatud.

TEJ-MT7-3D: Keskkonnasuurustest tuleb registreerida keskkonnatemperatuur ja tuulekiirus mõõtmiste ajal.

8.8 Üksiksüsteemi mõõtmise katsete läbiviimise käik

TEJ-MT8-1 Iga üksiksüsteemi mõõtmiseks viiakse katsed läbi sellistel talitlusviisidel, millised iseloomustaksid oodatavalt TEJ seadmete kõige intensiivsema EM-häiringuemissiooni esinemist.

TEJ-MT8-1A: Mõõtmine viiakse läbi vähemalt kolme talitlusviisi korral, mis on kirjeldatud punktides **TEJ-MT8-1B, TEJ-MT8-1C ja TEJ-MT8-1D.**

TEJ-MT8-1B: Mõõtmine TEJ seadmete ooteolekus toimub selliselt, et tagatud oleks TEJ sisemiste ahelate töö, kuid katkestatud oleks energiamuundusseadmete poolt võrku elektrilise võimsuse andmine (väljundvõimsus 0).

TEJ-MT8-1C: Mõõtmine TEJ seadmete väikesel väljundvõimsusel toimub selliselt, et tagatud on energiamuundusseadmete talitlus võrku võimsuse edastamisega.

Väikese võimsuse vahemikuks on talitlusvõimsus TEJ nimivõimsusega võrreldes tasemel 20% kuni 50%.

TEJ-MT8-1D: Mõõtmine TEJ seadmete suurel väljundvõimsusel toimub selliselt, et tagatud on energiamuundusseadmete talitlus võrku võimsuse edastamisega. Suure võimsuse vahemikuks on talitlusvõimsus TEJ nimivõimsusega võrreldes tasemel üle 50%.

TEJ-MT8-1E: Väikese võimsusega talitluse ala ja suure võimsusega talitluse ala vaheline talitlusvõimsuse erinevus peab olema vähemalt 20%.

TEJ-MT8-1F: Üksiksüsteemi mõõtmisel on ülejäänud TEJ üksused väljalülitatud olekus või valdavas osas ooteolekus.

- Juhul, kui ülejäänud tuuleelektrijaamas olevate tuulikute pingetustamine ei ole võimalik, peaksid kogu üksiksüsteemi mõõtmise ajal olema mõõdetava asukoha lähedal (100 m raadiuses) olema ülejäänud TEJ ahelad välja lülitatud.
- Kaugemal, kui 100 m raadiuses olevad mistahes energiatootmise või ülekandmise ahelas olevad seadmed peavad olema ooteolekus või välja lülitatud.

TEJ-MT8-2 Taustamüra mõõtmine toimub TEJ võimalikult ulatuslikus välja lülitatud olekus iga kahe TEJ-MT8-1 nimetatud talitlusviisi mõõtmise vahel.

PEJ-MT8-2A: Juhul, kui ülejäänud päikeseelektrijaama pingetustamine ei ole võimalik, peaksid kogu üksiksüsteemi mõõtmise ajal olema mõõdetava asukoha lähedal (100 m raadiuses) olema ülejäänud PEJ ahelad välja lülitatud.

PEJ-MT8-2B: Kaugemal, kui 100 m raadiuses olevad energiatootmisahelas olevad seadmed peavad olema ooteolekus või välja lülitatud.

TEJ-MT8-3 Soovituslik katsete läbiviimise kava on esitatud vt Tabel 8-1.

Tabel 8-1. Soovituslik katsete läbiviimise järjestuse loetelu üksiku TEJ süsteemi mõõtmiseks.

Katse tähistus	Katse läbiviimine	Kirjeldus	Märkused
TEJ-TAUST1-V	**TEJ-MT7-2**	Taustamüra mõõtmine, vert. polarisatsioon	Taustamüra 1, TEJ välja lülitatud, võrgust lahutatud

Katse tähistus	Katse läbiviimine	Kirjeldus	Märkused
TEJ-TAUST1-H	**TEJ-MT7-2**	Taustamüra mõõtmine, hor. polarisatsioon	Taustamüra 1, TEJ välja lülitatud, võrgust lahutatud
TEJ-STBY-V	**TEJ-MT8-1B**	TEJ seadmed ooteolekus, vert. polarisatsioon	TEJ väljundvõimsus 0
TEJ-STBY-H	**TEJ-MT8-1B**	TEJ seadmed ooteolekus, hor. polarisatsioon	TEJ väljundvõimsus 0
TEJ-TAUST2-V	**TEJ-MT7-2**	Taustamüra mõõtmine, vert. polarisatsioon	Taustamüra 2, TEJ välja lülitatud, võrgust lahutatud
TEJ-TAUST2-H	**TEJ-MT7-2**	Taustamüra mõõtmine, hor. polarisatsioon	Taustamüra 2, TEJ välja lülitatud, võrgust lahutatud
TEJ-PMIN-V	**TEJ-MT8-1C**	TEJ seadmed madalal võimsusel, vert. polarisatsioon	TEJ väljundvõimsus 20%–50% nimivõimsusest
TEJ-PMIN-H	**TEJ-MT8-1C**	TEJ seadmed madalal võimsusel, hor. polarisatsioon	TEJ väljundvõimsus 20%–50% nimivõimsusest
TEJ-TAUST3-V	**TEJ-MT7-2**	Taustamüra mõõtmine, vert. polarisatsioon	Taustamüra 3, TEJ välja lülitatud, võrgust lahutatud
TEJ-TAUST3-H	**TEJ-MT7-2**	Taustamüra mõõtmine, hor. polarisatsioon	Taustamüra 3, TEJ välja lülitatud, võrgust lahutatud
TEJ-PMAX-V	**TEJ-MT8-1D**	TEJ seadmed suurel võimsusel, vert. polarisatsioon	TEJ väljundvõimsus 20%–50% nimivõimsusest
TEJ-PMAX-H	**TEJ-MT8-1D**	TEJ seadmed suurel võimsusel, hor. polarisatsioon	TEJ väljundvõimsus 20%–50% nimivõimsusest
TEJ-TAUST4-V	**TEJ-MT7-2**	Taustamüra mõõtmine, vert. polarisatsioon	Taustamüra 4, TEJ välja lülitatud, võrgust lahutatud
TEJ-TAUST4-H	**TEJ-MT7-2**	Taustamüra mõõtmine, hor. polarisatsioon	Taustamüra 4, TEJ välja lülitatud, võrgust lahutatud

8.9 Kogu paigaldise katsete läbiviimise käik

TEJ-MT9-1 kogu paigaldise summaarse emissiooni mõõtmiseks viiakse katsed läbi sellistel talitlusviisidel, millised iseloomustaksid oodatavalt TEJ seadmete kõige intensiivsema EM-häiringuemissiooni esinemist.

> **TEJ-MT9-1A:** Mõõtmine viiakse läbi vähemalt kahe energiatootmis-talitlusviisi korral, mis on kirjeldatud punktides **TEJ-MT9-1B ja TEJ-MT9-1C.**
>
> **TEJ-MT9-1B:** Mõõtmine TEJ seadmete väikesel väljundvõimsusel toimub selliselt, et tagatud on inverterseadmete talitlus võrku võimsuse edastamisega. Väikese võimsuse vahemikuks on talitlusvõimsus inverterseadmete nimivõimsusega võrreldes tasemel 20% kuni 60% (NB! eeldada suuremat vahemikku, kui üksiksüsteemidel, kuivõrd tegelikku võimsusvahemikku kogu pargis on keeruline tagada)
>
> **TEJ-MT9-1C:** Mõõtmine TEJ seadmete suurel väljundvõimsusel toimub selliselt, et tagatud on inverterseadmete talitlus võrku võimsuse edastamisega. Suure võimsuse vahemikuks on talitlusvõimsus inverterseadme nimivõimsusega võrreldes tasemel üle 60%. (NB! eeldada suuremat vahemikku, kui üksiksüsteemidel, kuivõrd tegelikku võimsusvahemikku kogu pargis on keeruline tagada)
>
> **TEJ-MT9-1D:** Väikese võimsusega talitluse ala ja suure võimsusega talitluse ala vaheline talitlusvõimsuse erinevus peab olema vähemalt 20%.

TEJ-MT9-2 Taustamüra mõõtmine toimub TEJ ooteolekus, kui terve päikeseelektrijaama pingetuks viimine ja taaspingestamine nõuab liiga suurt ajakulu.

> **TEJ-MT9-2A:** Taustamüra mõõtmine sooritatakse vähemalt katsete alguses ja katsete lõpus.
>
> **TEJ-MT9-2B:** Tagatud peab olema taustamüra mõõtmiste planeering kogu paigaldise mõõtmisel selliselt, et kahe taustamüra-mõõtmise vaheline ajavahe ei ole suurem, kui 2 h.

TEJ-MT9-3 Soovituslik kogu paigaldise katsete läbiviimise kava on esitatud vt Tabel 8-2.

Tabel 8-2. Soovituslik katsete läbiviimise järjestuse loetelu kogu paigaldise mõõtmiseks.

Katse tähistus	Katse läbiviimine	Kirjeldus	Märkused
TEJ-TAUST1P-V	**TEJ-MT7-2**	Taustamüra või ooteolekus mõõtmine, vert. polarisatsioon	Taustamüra 1, TEJ paigaldisena ooteolekus

Katse tähistus	Katse läbiviimine	Kirjeldus	Märkused
TEJ-TAUST1P-H	**TEJ-MT7-2**	Taustamüra või ooteolekus mõõtmine, hor. polarisatsioon	Taustamüra 1, TEJ paigaldisena ooteolekus
TEJ-PMINP-V	**TEJ-MT9-1B**	TEJ seadmed madalal võimsusel, vert. polarisatsioon	Inverterseadme väljundvõimsus 20%–50% nimivõimsusest
TEJ-PMINP-H	**TEJ-MT9-1B**	TEJ seadmed madalal võimsusel, hor. polarisatsioon	Inverterseadme väljundvõimsus 20%–50% nimivõimsusest
TEJ-PMAXP-V	**TEJ-MT9-1C**	TEJ seadmed suurel võimsusel, vert. polarisatsioon	Inverterseadme väljundvõimsus üle 50% nimivõimsusest
TEJ-PMAXP-H	**TEJ-MT9-1C**	TEJ seadmed suurel võimsusel, hor. polarisatsioon	Inverterseadme väljundvõimsus üle 50% nimivõimsusest
TEJ-TAUST2P-V	**TEJ-MT7-2**	Taustamüra mõõtmine, vert. polarisatsioon	Taustamüra 1, TEJ paigaldisena ooteolekus
TEJ-TAUST2P-H	**TEJ-MT7-2**	Taustamüra mõõtmine, hor. polarisatsioon	Taustamüra 1, TEJ paigaldisena ooteolekus

8.10 Mõõtetulemuste töötlemine

TEJ-MT9-1 Üldine mõõtetulemuste töötlemine

TEJ-MT9-1A: Mõõtetulemuste töötlemisel arvestatakse olulise mõjurina tulemuste juures taustamürakomponenti. Mõõtetulemuste töötlemise eesmärgiks peab olema TEJ poolt emiteeritud EM-häiringute ja taustamürasuuruste eristamine.

TEJ-MT9-1B: Mõõtetulemuste töötlemisel arvestatakse piirtasemega, mille suhtes mõõtetulemuste vastavushindamise võrdlus on eesmärgiks läbi viia.

TEJ-MT9-1C: Juhul, kui mõõtetulemuste töötlemisel osutub müratasemе mõõtetulemus vastavas sageduspunktis kõrgemaks kui -6 dB piirtaseme suhtes, märgitakse see sageduspunkt kui punkt, mille puhul vastavushindamist läbi viia ei ole võimalik.

TEJ-MT9-2 Mõõtetulemuste esitamine

TEJ-MT9-2A: Mõõtetulemuste töötlemisel pürgitakse tulemuste esitamisele sellisel viisil, et võimalikult selgelt eristada taustamürast tegeliku TEJ poolt emiteeritud häiringusuurused. Selleks tuleks kasutada kas tabeli või graafiku kujul tulemuste kajastamist.

TEJ-MT9-2B: Mõõtesuuruste töötlemisel saadud tulemuste juurde tuleb selgelt tähistatuna märkida tulemuste võrdlemise aluseks oleva piirtaseme jooned. Piirtaseme joone juurde tuleb märkida, mis on piirtaseme tähendus ja mis on selle allikas.

9 Piirsuurused ja nõutava mõõtevõime taseme definitsioon

IEC 61400-40 poolt esitatud häiringuemissiooni piirtasemetena on kirjeldatud varasemalt CISPR 11 poolt esitatud piirsuuruseid tööstusseadmetele. Need piirtasemed on kirjeldatud kvaasitipp-suurustega sagedusvahemikus 150 kHz – 1 GHz. Tuulikute kontekstis ei ole loetletud täiendavaid erisusi antud piirtasemete rakendamiseks. Kuivõrd CISPR 11:2025 kajastab ka nõudeid sagedusvahemikule 1 GHz ... 6 GHz, võib CISPR 11 piirtasemeid samas sagedusvahemikus pidada ka TE-süsteemide kontekstis asjakohasteks.

Kuigi võrdlusmeede piirtasemete suhtes on rangelt diskreetne protseduur (ületab taset või ei ületa), tuleb arvestada keskkonna ja mõõteahelas olevate komponentide omadustega ja varuga, mille abil kindlustada protsessi usaldusväärsus. Kriitiline asjaolu siin tuleneb mõõtevahendite (eeskätt häiringute kontrollvastuvõtja) sisendi dünaamilisest ulatusest ja madalaima mõõtevõime nivoost.

9.1 Nõuded mõõteahelatele

Absoluutsuuruse mõõteulatuse madalaima piiri määrab teoreetilises plaanis mõõteahelas oleva analüsaatori müratase, mis on töödeldud rakendatava mõõteantenni antenniteguriga c_{ANT}, millest on lahutatud atenuatsioonitegur k_{ATT}, kaabli ülekandetegur c_{KAAB}, ja mõõteahela üldine määramatus e_{AHEL}.

$$E_{min} = U_{min} + c_{ANT} - k_{ATT} - c_{KAAB} - e_{ahel}$$

Märkus: siin arvutusseoses on eeldatud logaritmiliste suuruste kasutamist.

Praktilistes mõõteahelates ei ole sellist eristuspiiri võimalik rakendada, sest igas keskkonnas esinev EM-taustamüratase eri sagedustel märkimisväärselt varieeruda. Sel juhul saab kehtivat mõõteulatust vaadelda alles kõrgematel tasemetel võrreldes keskkonna enda müratasemega. Selleks, et sooritada pädev vastavushinnang mõõtetulemustele, on üldiste soovituste järgi nõutud baasmüra-mõõtesuuruse marginaal minimaalsest müratasemest otsustusülesannetes vähemalt

- 3 dB (CISPR 37),
- 6 dB (CISPR 16-2-3, tegelikus asukohas mõõtmisel),
- 10 dB (ITU-T SM.1753),
- 20 dB jälgitavate mõõtetulemuste kontekstis mõõteanalüsaatorite spetsifikatsioonile tuginevalt (tüüpiline spetsifikatsiooni väärtus, näiteks R&S seadmete puhul).

See tähendab, et sageduspunktis saadud mõõtetulemus on võrdlusotsuseks juhul, kui mürasuuruse tase mõõtmisel ei ole kõrgem kui

$$E_N = E_{PIIR} - E_{NMAR}$$

kus E_{PIIR} on võrdlus-piirtaseme suurus ja E_{NMAR} on väljatugevuse suuruse jaoks oleva mürasuuruse marginaal.

Mürasuuruseks võib olla nii keskkonnas esinev tasutamüra kui ka mõõteahelate enda termilisest mürast tingitud müratase. Tehnilised piirid mõõteulatuse minimaalsele tasemele seab termiline müra. Seega, vastavusotsuse teostamiseks peaks termilisest mürast tingitud analüsaatori sisendi müratase olema suurusega

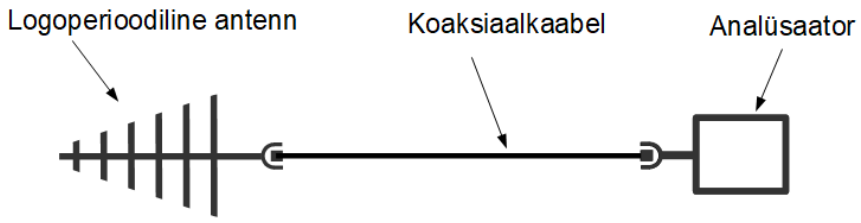
$$U_{min} \leq E_{PIIR} - E_{NMAR} + c_{ANT} + k_{ATT} - c_{KAAB} - e_{ahel}$$

EM-taustamüra kontekstis töötamisel tuleb arvestada, et ülihea tundlikkus EM-väljasuuruse mõõtmisel võib kaasa tuua ülekoormuse ja küllastumise tugeva taustamüra olukorras.

Suure dünaamilise mõõteulatuse saavutamiseks tuleks silmas pidada järgmiseid kaalutlusi:

- Võimalikult vähe mõõteahela komponente, kuna iga aktiivkomponent suurendab mürategurit;
- Mõõteanalüsaatoris eelvõimendite rakendamist mõõteülesannete sooritamisel;
- Täiendava võimendi vajaduse korral, välise madala mürateguriga eelvõimendi rakendamist.

Mõõteahel dokumenteeritakse selgelt ja tuuakse välja kõik selles olevad komponendid. Mõõteahela näidisskeem on esitatud alloleval joonisel (vt Joonis 9-1) ja selle komponentide nimekirja näide on esitatud allolevas tabelis (vt Tabel 9-1).



Joonis 9-1. Näide mõõteahela ülesehituse skeemist.

Tabel 9-1. Näide mõõteahelas rakendatud vahendite loetelust.

Komponent	Kirjeldus	Identifikaator ja lisainfo
Logoperioodiline antenn	Rohde & Schwarz HL562	S/N: 100354, kalibr. 23.09.2024
Koaksiaalkaabel	Messi & Paoloni Hyperflex 10	ID: KAB-10F
Häiringute mõõtevastuvõtja	Rohde & Schwarz ESR7	S/N: 100851, kalibr. 03.11.2024

9.2 Mõõtevahendite spetsifitseeritud suutlikkus mürasuuruste mõõtmisel

Analüsaatorite dokumentides on esitatud kuvatava keskmise müratasemе väärtused (ik *DANL* – displayed average noise level), $P_{DANL,dBm}$ mis esitavad sisendis oleva mürasuuruse võimsuse väärtuse ühikutes W või logaritmilisel skaalal ühikutes dBm. Suurused on antud taandatuna 1 Hz kohta, mis põhimõtteliselt kajastab müra võimsustihedust. DANL ise mürasuuruse töötlemise järel kuvatav numbriline väärtus, mis on (5966-4008, 2021)

- logaritmilisele töötlemisele iseloomulikult alahinnatud taseme 2,51 dB võrra,
- filtri pääsuriba töötluse tulemusena ülehinnatud 0,24 dB võrra.
- vajadusel lisandub sh mõõtesagedusriba korrektsioon

$$k_{\Delta fRBW1R} = 10log\frac{\Delta f_{RBW1}}{\Delta f_{RBW,REF}} \quad (9\text{-}1)$$

kus Δf_{RBW1} on mõõte-ribafiltri pääsuriba laius DANL mõõtmisel (kui see ei ole 1 Hz-le taandatud) ja $\Delta f_{RBW,REF}$ on DANL kirjeldamiseks kasutatud ribalaius (tavaliselt 1 Hz).

Analüsaatori sisendi müravõimsus on arvutatav kasutades

$$P_{AN,min,dBm} = P_{DANL,dBm} + 2{,}51 - 0{,}24 - k_{\Delta fRBW1R} \quad (9\text{-}2)$$

ja arvestades 1 Hz taandatud väärtuste kasutamist, võib lihtsustada

$$P_{AN,min,dBm} = P_{DANL,dBm} + 2 \quad (9\text{-}3)$$

Selliselt esitatud väärtuse alusel saab leida sisendi mürapinge suuruse, milleks on

$$U_{AN,min} = \sqrt{R \cdot P_{AN,min}} \quad (9\text{-}4)$$

Suhtelisel logaritmilisel skaalal, võimsusühiku 1 mW -> 0 dBm ja 1 µV -> 0 dBµV suhtes esituses tuleb arvestada, et

$U_{AN,min,dB\mu V} = P_{AN,min,dBm} + 90 + 20log\sqrt{R}$	(9-5)

Juhul, kui takistuse väärtuseks on 50 Ω,

$U_{AN,min,dB\mu V} = P_{AN,min,dBm} + 107$	(9-6)
$U_{AN,min,dB\mu V} = P_{DANL,dBm} + 109$	(9-7)

Viimane seos kehtib juhul, kui $U_{AN,min,dB\mu V}$ esitatakse samas sagedusribas kui $P_{DANL,dBm}$.

Näiteks sisendi müravõimsuse $P_{DANL,dBm}$ = –162 dBm korral on sisendi pinge $U_{AN,min,dB\mu V}$ = –53 dBµV. Sisendis mõõdetud pinge on ühtlasi praktilisem suurus, analüsaatorite mõõtetulemuse indikatsioon toimub kasutades pingesuuruseid, mitte võimsussuuruseid.

Vastuvõtja sisendi mürategur $k_{NF,AN}$ on leitav kui

$k_{NF,AN} = P_{DANL,dBm} - k_{\Delta fRBW1R} - 172$	(9-8)

Mõõtevahendite parameetrite esitusviiside juures tuleb jälgida esitatud suuruste juures osutatud pääsufiltri ribalaiuseid Δf_{RBW}. Näiteks

- Rohde & Schwarz ESR-7 vastuvõtjate DANL väärtused on esitatud mõõtmisel Δf_{RBW} = 1000 Hz korral, mis on mürasuuruste puhul taandatud väärtusele sagedusvahemikule 1 Hz, kuid sisendpinge mürataseme esituses on suurused siiski ribalaiusele 1 kHz.
- Keysight esitab DANL suuruse taandatuna 1 Hz ribalaiusele ühikuga dBm, pingespetsifikatsiooni näidates mõõteribalaiuse.
- Anritsu esitab dokumentatsioonis DANL suuruse ühikuga dBm/Hz, kuid ei esita sellele vastavat sisendpinge väärtust. Väljavõte tootjate pakutavate kõrgema suutlikkusega analüsaatorite ja ka kirjandusallikates leitavate EM-taustamüra uuringute analüsaatorite suutlikkusest on esitatud allolevas tabelis Tabel 9-2.
-

Tabel 9-2. Valik EMI-vastuvõtjate ja spektrianalüsaatorite parameetreid. Suurused on esitatud analüsaatorite kõrgeima tundlikkuse valikus (integreeritud eelvõimendi aktiveeritud).

Analüsaator	Spetsifikatsioon	$P_{DALN,dBm}$ taandatuna Δf_{RBW} = 1 Hz	$U_{AN,min,dB\mu V}$ esitatud,	Δf_{RBW} esitatud $U_{AN,min,dB\mu V}$ korral	$U_{AN,min,dB\mu V}$ taandatuna Δf_{RBW} = 1 kHz
	Sagedusvahemik	dBm	dBµV	kHz	dBµV
Keysight N9038B	2 MHz - 30 MHz	-158	-20	9	-30
	30 MHz - 600 MHz	-159	-8	120	-29
	600 MHz - 800 MHz	-157	-8	120	-29

Analüsaator	Spetsifikatsioon	$P_{DALN,dBm}$ taandatuna Δf_{RBW} = 1 Hz	$U_{AN,min,dB\mu V}$ esitatud,	Δf_{RBW} esitatud $U_{AN,min,dB\mu V}$ korral	$U_{AN,min,dB\mu V}$ taandatuna Δf_{RBW} = 1 kHz
	Sagedusvahemik	**dBm**	**dBµV**	**kHz**	**dBµV**
	800 MHz - 1 GHz	-158	-9	120	-30
	1 GHz – 2 GHz	-156	+3	1000	
Rohde & Schwarz ESR-7	2 MHz - 30 MHz	-165	-18	9	-28
	30 MHz - 1 GHz	-165	-7	120	-28
	1 GHz – 3 GHz	-162	5	1000	-25
Anritsu MS2850	(1 MHz) [1]	-156	-	-	-17 [2]
	30 MHz - 1 GHz	-165	-	-	-27 [2]
Rohde & Schwarz FPL1003 (Gärdin, 2020)	3 MHz - 10 MHz	-155	-	-	-16 [2]
	10 MHz - 2 GHz	-163	-	-	-24 [2]
Rohde & Schwarz FSV3030	10 MHz – 50 MHz	-158			-19 [2]
	50 MHz – 3 GHz	-162			-23 [2]
Rohde & Schwarz ESMB (Lossmann, 2011)	100 kHz - 30 MHz	-158 [4]			-23 [4]

[1] Ühes sageduspunktis esitatud suurus esitatud informatiivsena.

[2] Arvutatud spetsifikatsioonis esitatud P_{DANL} suurusest.

[3] Arvutatud spetsifikatsioonis esitatud $U_{AN,min}$ suurusest.

[4] Arvutatud mürateguri k_{NF} suurusest, mis on esitatud spetsifikatsioonis.

Ülaltoodud suuruste kaudu on võimalik iseloomustada mõõtevastuvõtjate ja analüsaatorite termilise müra pinge suurus sisendis mõõdetaval sagedusribal, kasutades

$$U_{AN,min}(\Delta f_{RBW}) = U_{AN,min}(\Delta f_{REF}) \cdot \sqrt{\frac{\Delta f_{RBW}}{\Delta f_{REF}}} \quad (9\text{-}9)$$

$$U_{AN,min,dB\mu V}(\Delta f_{RBW}) = U_{AN,min,dB\mu V}(\Delta f_{REF}) \cdot 10\ log \frac{\Delta f_{RBW}}{\Delta f_{REF}}$$

Valik analüsaatorite sisendpinge oodatavaid minimaalse mürapinge tasemed CISPR 11 (ühtlasi IEC 61400-40) kontekstis kasutatavatel mõõteribalaiustel on esitatud allolevas tabelis (Tabel 9-3).

Tabel 9-3. Mõõtevastuvõtjate oodatavad mürapingete suurused

Mõõtevastuvõtja	Sagedusvahemik	Mõõte-ribalaius	Sisendi mürapinge	Märkused
R&S ESR-7	150 kHz – 30 MHz	9 kHz	-30	
Keysight N9038B			-20	Kõrgeim väärtus vahemikus
R&S FSV3030			-14	
R&S ESR-7	30 MHz – 1 GHz	120 kHz	-7	
Keysight N9038B			-8	
R&S FSV3030			-3	
R&S ESR-7	1 GHz – 3 GHz	1 MHz	+5	
Keysight N9038B			+2	Kõrgeim väärtus vahemikus
R&S FSV3030			+7	

9.3 Antennitegurid

CISPR 16-1-4 tingimustele vastavad mõõteantennid on kujundatud normatiivalustele vastavate kontrollmõõtmiste läbiviimiseks sobilikule kujuga suunadiagrammiga. E-välja antennide suunadiagrammi laiuseks võib arvestada u. 19 – 23° (CISPR 37). Igal mõõteantennil on oma individuaalne parameeter antennitegur, mis iseloomustab, kui suurt väljatugevust on vaja antenni väljundis ühikulise pingega (1 V) väljundi saavutamiseks. Antennitegur kirjeldatakse 50 Ω väljundi sobitust eeldades.

Antennitegurite väärtused on selgitatavad kalibreerimisdokumentidest, või nende puudumisel pakuvad tootjad välja ka tüüpilisi antennitegurite karakteristikuid. Katsete läbiviimisel on vajalik suurema täpsusega kaablitegurite väärtuste kasutamine, seetõttu tuleb kasutada kalibreerimisandmetest teadaolevaid antennitegureid.

Silmusantenni näide

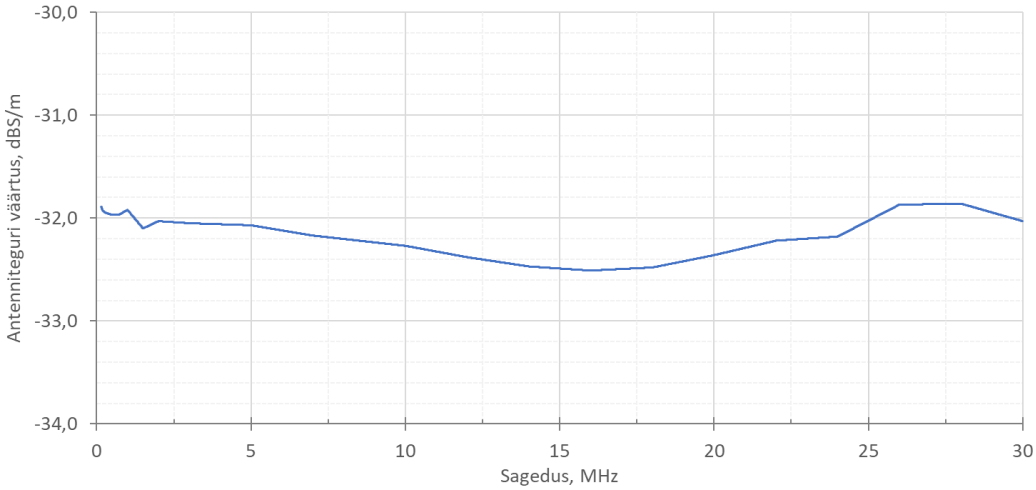
Rohde&Schwarz HFH-Z2E on aktiiv-silmusantenn mõõte-sagedusvahemikuga 9 kHz ... 30 MHz. Antenn vastab CISPR16-1-4 nõuetele magnetväljatugevuse mõõtmiste läbiviimiseks. Antud mõõteantenni sisemiste aktiivahelate toitepinge on 24 V, mis edastatakse samas koaksiaalkaabli kaudu, millega edastatakse väljund-mõõtesuurus. Aktiivosa toitepinge sisestamiseks on kasutusel spetsiaalne toitesisestaja (tüüp: IN600).

Rohde&Schwarz HFH-Z2E silmusantenni antenniteguri väärtus sagedusvahemikus 150 kHz ... 30 MHz on esitatud alloleval graafikul (vt Joonis 9-2).

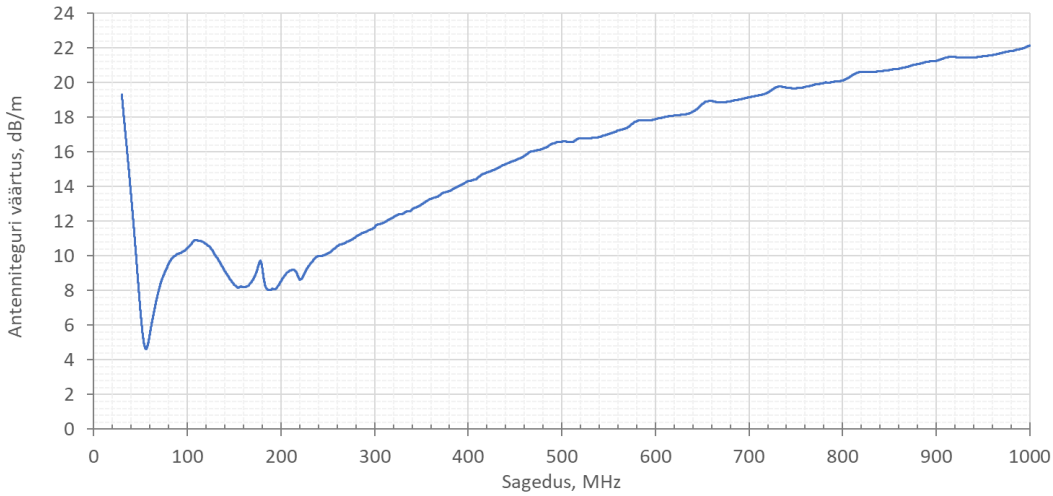
Logoperioodilise antenni näide

Rohde&Schwarz HL562 on passiivne logoperioodiline antenn mõõte-sagedusvahemikuga 30 MHz ... 3 GHz. Antenn vastab CISPR16-1-4 nõuetele elektriväljatugevuse mõõtmiste läbiviimiseks.

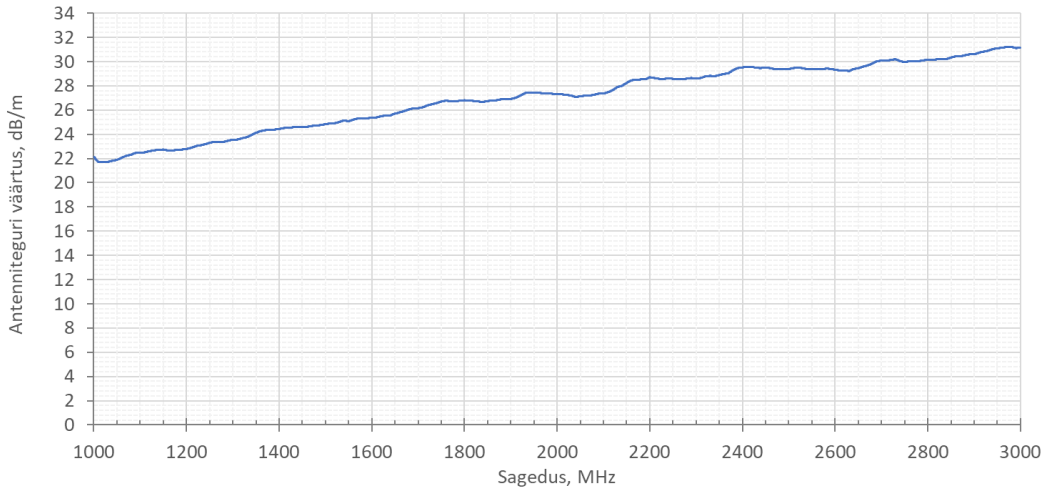
Rohde&Schwarz HL562 silmusantenni antenniteguri väärtus sagedusvahemikus 30 MHz ... 3 GHz on esitatud alloleval graafikul (vt Joonis 9-2).



Joonis 9-2. Mõõteantenni HFH2-Z2E antennitegurite väärtused (sisemine atenuaator välja lülitatud).



Joonis 9-3. Mõõteantenni HL562 antennitegurite väärtused sagedusvahemikus 30 MHz ... 1 GHz.



Joonis 9-4. Mõõteantenni HL562 antennitegurite väärtused sagedusvahemikus 1 GHz ... 3 GHz.

9.4 Kaablite ülekandetegurid

Mõõtesuuruse (antenni poolt väljastatud pinge) ülekandmiseks analüsaatorisse kasutatakse koaksiaalkaableid, mille ülekandetegur on sagedussõltuva iseloomuga. Valik kaablite ülekandetegurite väärtuseid erinevatel sagedustel on esitatud allolevas tabelis (vt Tabel 9-4).

Tabel 9-4. Kaablitegurite näited koaksiaalkaablite 100 m pikkustele lõikudele eri sagedustel.

Kaabli tüüp	Sumbuvustegur, dB/100 m				
	1 MHz*	10 MHz	100 MHz	1000 MHz	3000 MHz
Times LMR-400	0,4	1,3	4,1	13,5	24,5
Belden 9913F7	0,6	2,0	4,9	16,4	32,2
Eupen EC600	0,3	0,8	2,5	8,4	15,4
M&P-Hyperflex 10 /.400"	0,4	1,3	3,9	13,4	24,6

* Sagedusel 1 MHz on esitatud interpoleeritud tulemus

Kaablite sumbuvustegur logaritmilistes ühikutes on leitav üldise valemiga[1]

$$k_{KKAAB}(f) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \sqrt{f} + \alpha_2 \cdot f$$

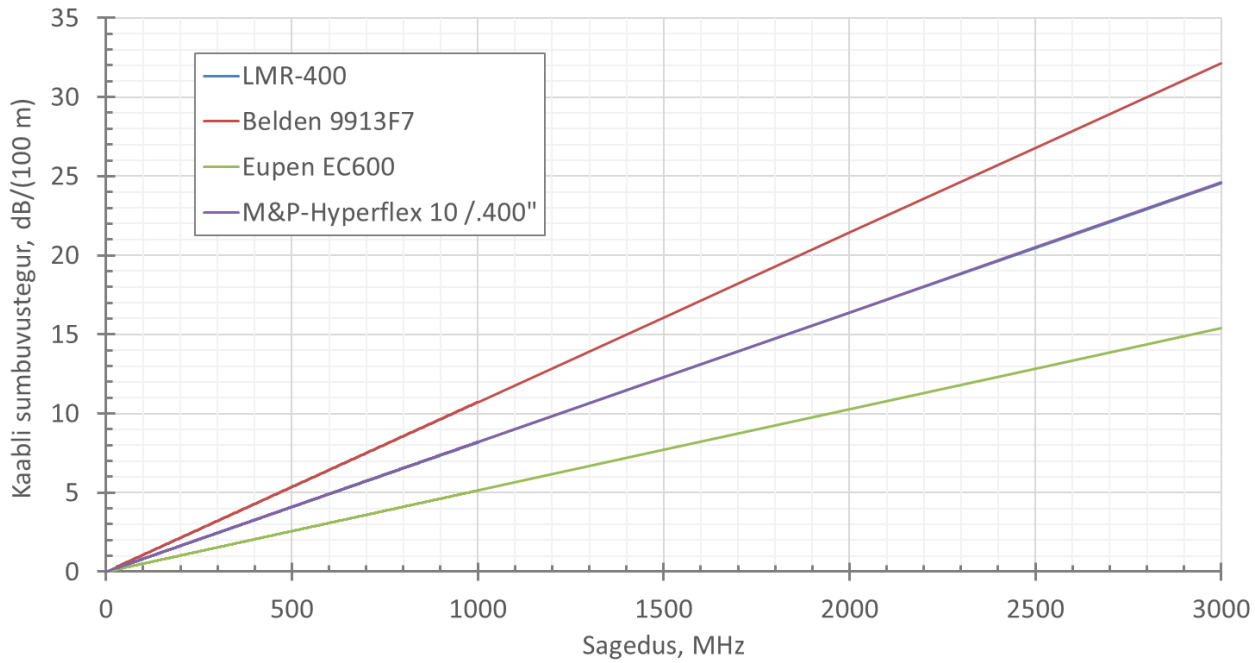
kus f on vaadeldav sagedus ja koefitsiendid α_0, α_1 ja α_2 on kaablile iseloomulikud kordajad. Sageli on konstantne kordaja α_0 väärtusega 0.

[1] Wellhausen, H. W.: Dämpfung, Phase und Laufzeiten bei Weitverkehrs–Koaxialpaaren. Frequenz 31, S. 23-28, 1977

Samade näitekaablite sumbuvusteguri kordajad on esitatud allolevas tabelis (vt Tabel 9-5) ning kaablite sumbuvustegurid 100 m kohta erinevatel sagedustel on esitatud alloleval graafikul

Tabel 9-5. Näide sumbuvusteguri kordajatest koaksiaalkaablitele.

Kaabli tüüp	α_1	α_2
Times LMR-400	0,000017	0,0082
Belden 9913F7	0,000120	0,0107
Eupen EC600	0,000014	0,0051
M&P-Hyperflex 10 /.400"	0,000028	0,0082



Joonis 9-5. Valik koaksiaalkaablite sumbuvustegureid.

10 Taustamüra oodatavad suurused

Kohapeal välitingimustes mõõtmisel on oodatav suur taustamüra komponentide roll. Sellised tulemused võivad oluliselt mõjutada mõõtmiste läbi viimist ja piirtasemete suhtes võrdluse korrektset läbiviimist. Potentsiaalsed probleemid ja riskid kõrgendatud tasutamüra taseme tõttu on:

- Taustamürasuuruste poolt antenni aktiivosa ja analüsaatori sisendi üle koormamine ja küllastusse viimine; sellisel juhul tekkiv ülekoormus võib aktiveerida kaitseahelad, mis piiravad üleüldse mõõtesuuruse korrektse mõõtmise funktsioonid.
- Taustamüra kõrge tase võib ületada oluliselt EM-häiringuemissiooni piirtasemeid. Sellisel juhul on tuvastatav normatiivalusel esitatud piirtaseme ületamine, kuid ei ole võimalik eristada, kas selle põhjuseks oli seadme enda EM-häiringuvoo intensiivsus või siis oli tegemist mingi välise osapoole või teenuse poolt tekitatud väljatugevusega.
- Taustamüra intensiivsus konkreetses sageduspunktis võib märgatavalt varieeruda ka lühikese ajavahemiku jooksul, lisaks on oodata, et EM-taustamüra esinemine ja varieeruvus on pigem juhuslik suurus. Sellisel juhul võidakse tõlgendada mõnda taustamüra juhuslikku intensiivset tippu hoopis mõõdetavast paigaldisest emiteeritud häiringuvälja suurusena.

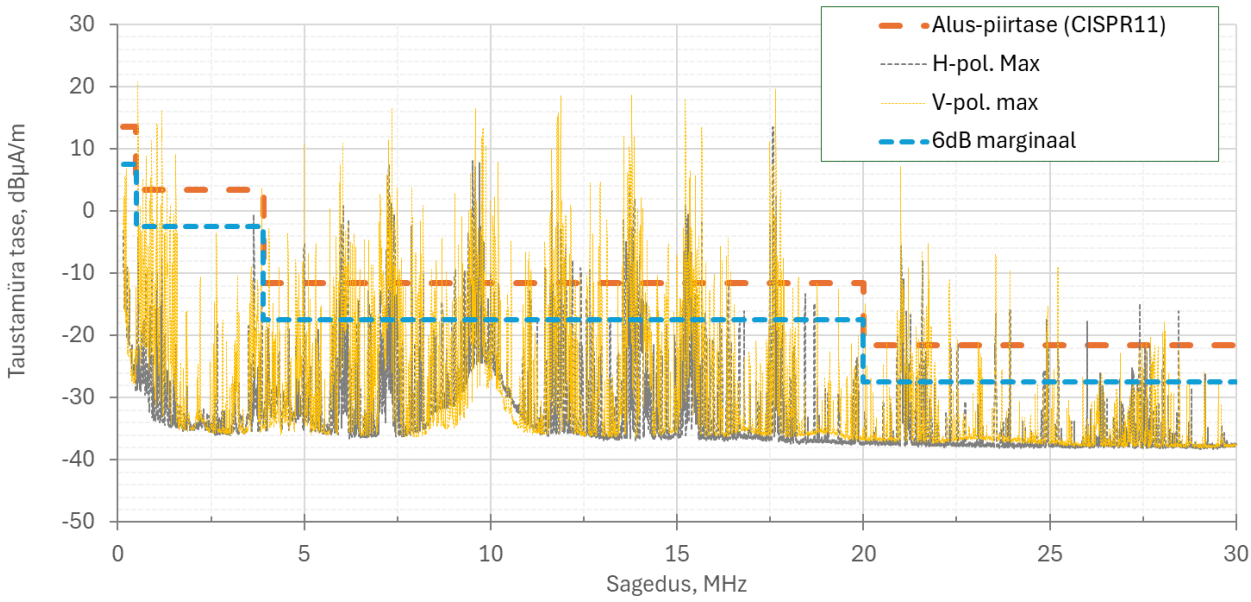
Informatiivsed näited EM-taustamüra suurustest on esitatud allolevatel graafikutel (vt Joonis 10-1 ja Joonis 10-2).

Taustamüra tingimustes piirtasemele vastavuse otsuse tegemisel on vajalik mõningane marginaal taustamüratugevuse suhtes, mille alusel saavutatakse varu enne piirtasemele jõudmise osutamist. Sobilikuks marginaaliks on näiteks 6 dB (vt ptk 9.1 Nõuded mõõteahelatele). See tähendab, et

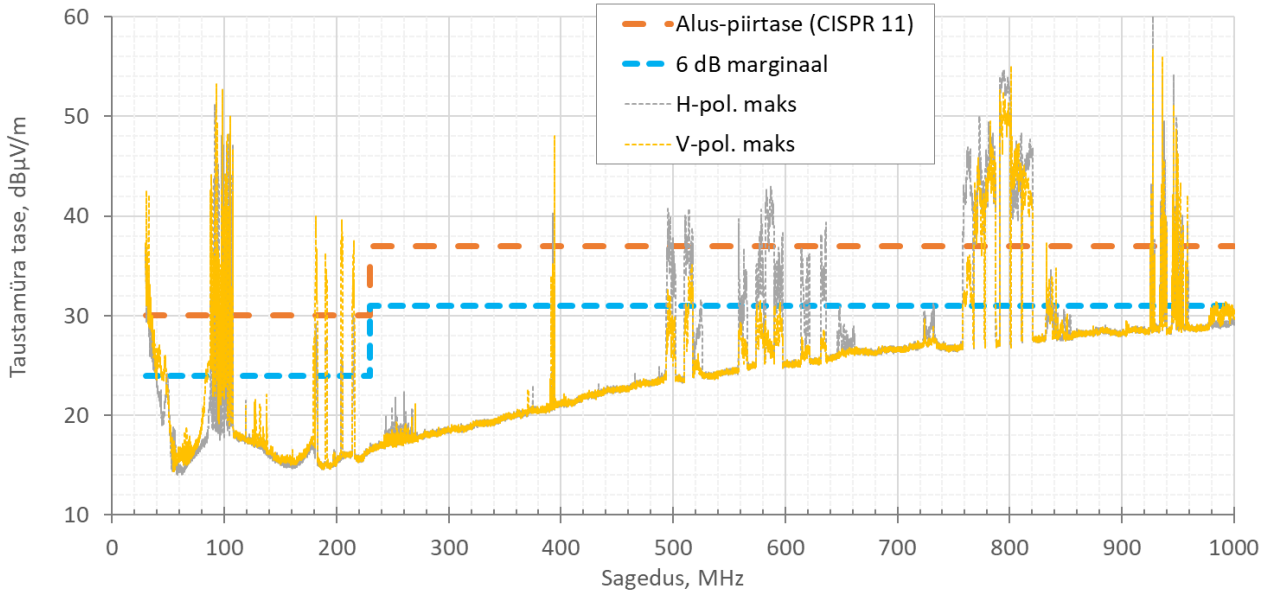
- Mõõtetulemusest saab kinnitada, et taustamüra tase sageduspunktis on 6 dB alla normatiivis märgitud piirtaseme.
- Juhul, kui antud sageduspunktis ulatub katsetatava seadme poolt emiteeritud väljatugevuse suurus lähemale, kui 6 dB nõutud piirtasemest, on see selgelt eristatav.
- 6 dB marginaal tagab sh mõõtemääramatuse poolt võimaliku varu arvestamise.

Süsteemi üldise mõõtevõime tagamine peab seetõttu lähtuma asjaolust, et kui marginaali (6 dB) võrra piirtasemest madalamal tasemel ei ole võimalik taustamüra taset saavutada, ei saa selles sageduspunktis piirtasemele vastavuse otsust sooritada. Selliste alade kohta tuleb selgelt eristatav märge graafikule lisada.

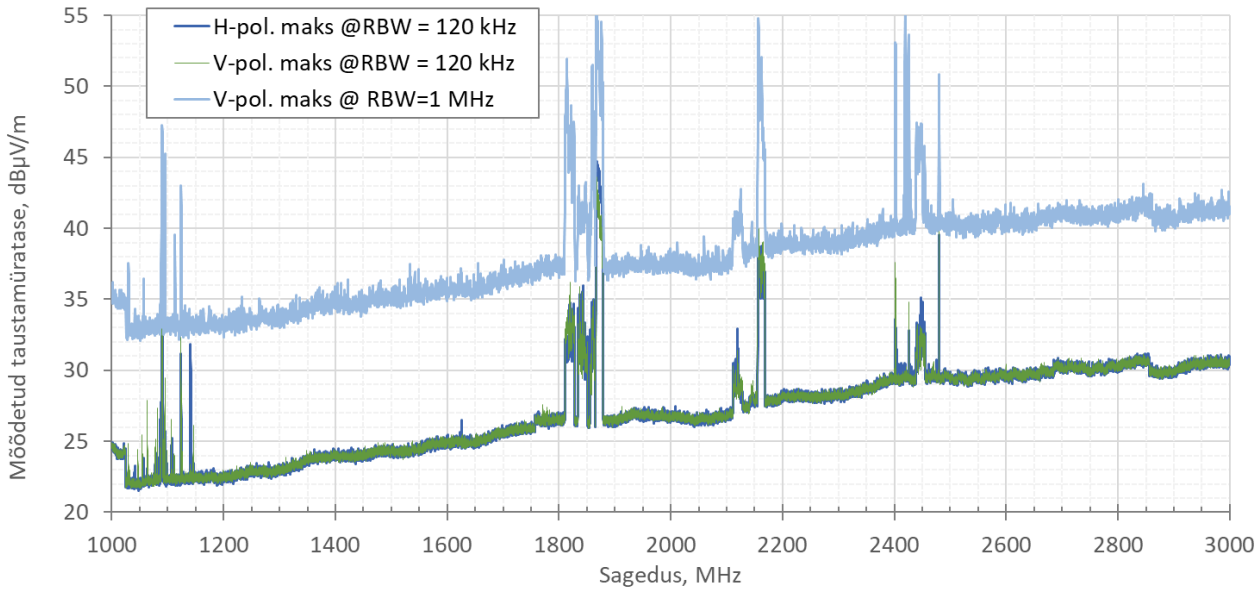
Taustamüra graafikutel (vt Joonis 10-1 ja Joonis 10-2) on allolevalt esitatud informatiivne taustamüra oodatava maksimaalse taseme keskväärtus ja samuti CISPR 11 alusel esitatud piirväärtused. Piirväärtused CISPR 11:2025 tabelist 20 kajastavad 30 m mõõtekauguse kohta esitaud piirtasemeid.



Joonis 10-1. Vaade taustamüra potentsiaalsetele tasemetele sagedusvahemikus 150 kHz ... 30 MHz. Mõõte-ribafiltri laius 9 kHz.



Joonis 10-2. Vaade taustamüra potentsiaalsetele tasemetele sagedusvahemikus 30 MHz ... 1 GHz. Mõõte-ribafiltri laius 120 kHz.



Joonis 10-3. Vaade taustamüra potentsiaalsetele maksimaalsetele tasemetele sagedusvahemikus 1 GHz ... 3 GHz. Tulemused esitatud nii mõõte-ribafiltri laiuse 120 kHz kui 1 MHz sättega mõõtes.

Taustamüra tasemete informatiivsed graafikud (vt Joonis 10-1, Joonis 10-2 ja Joonis 10-3) osutavad üldisele mõõtevõime väljakutsele. Taustamüra tasemete hinnang nendel graafikutel võtab arvesse antennitegurid ja kaablitegurid.

1 – 3 GHz sagedusvahemikus on CISPR 11 alusel mõõtmisel kasutuses mõõte-ribafiltri laiuse säte 1 MHz. Ribafiltri laiusest oleneb kuvatav müratase märgatavalt ja 120 kHz ribalaiusega mõõteribafiltri rakendamisel on mõõteanalüsaatori sisendis mõõdetav baasmüravõimsuse tulemus oluliselt madalam.

11 Piirtasemete arvutus eri mõõtekaugustel

IEC 61400-40 kohaselt tuleb TEJ vastavushinnangu jaoks esitada võrdlus piirtasemega, mis on kirjeldatud CISPR 11:2015 tabelis 16. See tabel on uuemas normatiivi versioonis CISPR 11:2025 tabel 20. Viidatud tabel loetleb piirväärtused klass A grupp 1 seadmetele, s.o tööstuskeskkonna emissiooninõudeid täitvatele seadmetele. Esitatud piirtasemed on kehtestatud sagedusvahemikus 0,15 ... 1000 MHz ja on loetletud allolevas tabelis (vt Tabel 11-1).

Tabel 11-1. CISPR 11 emissiooni piirtasemed koha peal katsetuste korral klass A seadmetele sagedusvahemikus 150 kHz ... 30 MHz. Piirtasemed on esitatud mõõtekauguse 30 m korral.

Sagedusvahemik	Elektriväljasuurus Kvaasitipp-väärtus dBµV/m	Magnetväljasuurus Kvaasitipp-väärtus dBµA/m
0,15 ... 0,49 MHz	-	13,5
0,49 ... 3,95 MHz	-	3,5
3,95 ... 20 MHz	-	–11,5
20 ... 30 MHz	-	–21,5
30 ... 230 MHz	30	-
230 ... 1000 MHz	37	-

Kuigi IEC 61400-40 normdokumendis esitatud viited piirmäärade alustabelis puuduvad viited emissiooni piirtasemetele üle 1 GHz sageduspiiri, saab CISPR 11 dokumendis sätestatud põhimõtteid kanda ka TEJ paigaldiste hindamiseks muudel tingimustel ja sagedusvahemikes. CISPR 11:2025 loetleb tabelis 11 üldised tingimused klass A seadmete häiringuemissiooni piirtasemetele 1 ... 6 GHz sagedusvahemikus.

Tabel 11-2. CISPR11 emissiooni piirtasemed koha peal katsetuste korral klass A seadmetele sagedusvahemikus 1 GHz ... 6 GHz. Piirtasemed on esitatud mõõtekauguse 3 m korral. Klass B seadmetele on samad piirtasemed 6 dB madalamad.

Sagedusvahemik	Elektriväljasuurus Tippväärtus dBµV/m	Elektriväljasuurus Keskväärtus dBµV/m
1 ... 3 GHz	76	56
3 ... 6 GHz	80	60

IEC 61400-40 kohaselt on põhiline mõõtekaugus 30 m TEJ keskteljest, kuid viidatakse ka muudele mõõtekaugustele (65 m, 100 m). Tabelis esitatud kaugusest erinevatel kaugustel sooritatud mõõtmiste tasemete kontroll võib käia 2 viisil:

1) Taandades mõõtetulemuse piirtaseme esitatud mõõtekaugusele
2) Taandades piirtaseme kauguse jaoks, millel mõõtmised tegelikult läbi viidi

Nende meetmete üldine tulemus on sama, kuid esinduslikkuse ja andmetöötluse ühtlustamiseks on mõnevõrra efektiivsem taandada piirtase tegeliku mõõtekauguse jaoks.

Alla 30 MHz on seoses lainelevi tingimuste keerukuse kasvuga vaja rakendada keerulisemaid üleminekutegurite süsteeme. Sellised süsteemid on esitatud näiteks alusdokumentides CISPR TR 16-4-4:A1:2017 ja CISPR pr 37:2023, kusjuures suuruse üleviimise alussuurused on nendes mõnevõrra erinevad.

- CISPR TR 16-4-4:A1:2017 esitab piirtasemete üleminekutegurid kaugustele 3 m <-> 10 m; 10 m <-> 30 m; 3 m <-> 30 m.
- CIPSR pr 37:2023 esitab ülekandetegurid laiemas vahemikus lähtudes alus-mõõtekaugusest 10 m.

NB! Ülekandetegurid / ekstrapoleerimistegurid on kummalgi juhul ka sisuliselt erinevad, kuigi nendes esitatud piirtasemete osas ja mõõtesuuruse saamise viiside vahel ei ole olulisi erinevusi.

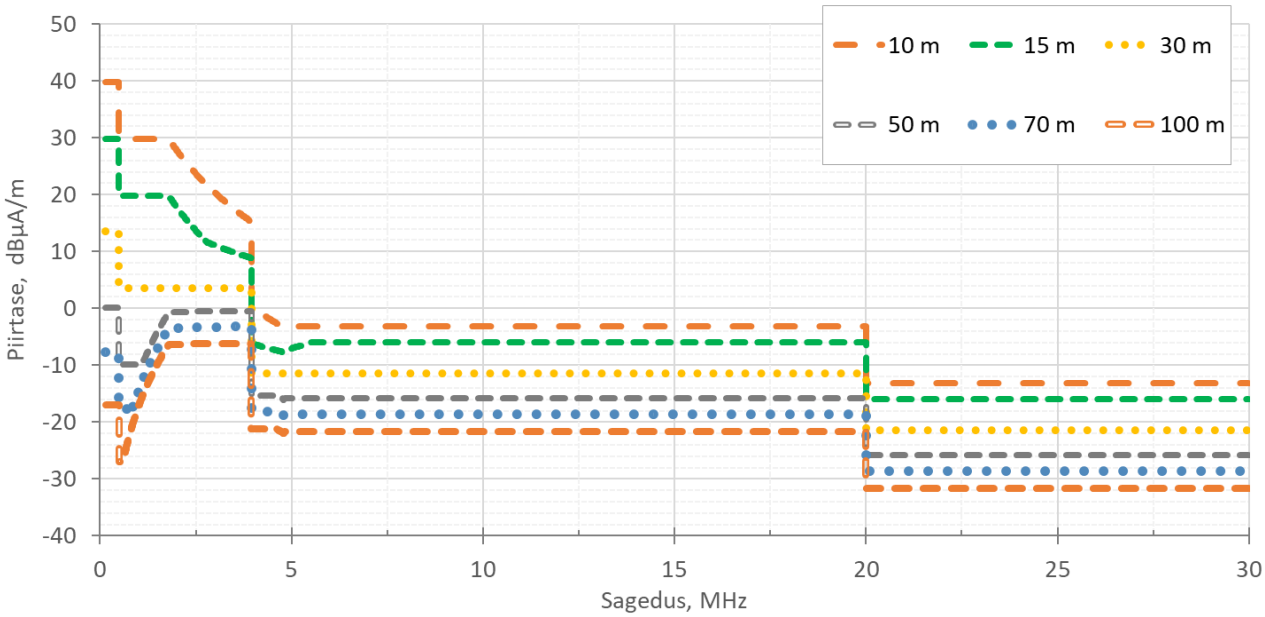
$$k_{EPH,DX}(f) = k_{EPH,D1}(f) + \left[k_{EPH,D2}(f) - k_{EPH,D1}(f)\right] \cdot \frac{D_X - D_1}{D_2 - D_1}$$

kus $k_{EPH,DX}$ on magnetvälja tulemuste ülekandetegur mõõtekaugusel D_X, ning $k_{EPH,D1}$ ja $k_{EPH,D2}$ on ülekandeteguri väärtused teadaolevatel kauguste D_1 ja D_2, kus D_1 ja D_2 on allolevas tabelis olevad määratud mõõtekaugused kaugused, mis on lähimad D_X-le ja $D_2 \geq D_X \geq D_1$. Ülekandeteguri arvutamise reegel tugineb ülekandefunktsiooni nurgakoha sagedusele (f_1 ja f_2), millest madalamal sagedusel on ülekandetegur väärtusega k_{EP01}, sageduste f_1 ja f_2 vahel tasemel k_{EP12} ja sagedusest f_2 kõrgemal väärtusega k_{EP23}. Arvutusteks vajalikud tegurid on välja toodud alloleval tabelil (vt Tabel 11-3) ja esitatud graafiliselt vt Joonis 11-1.

Tabel 11-3. Ülekandetegurid magnetväljasuuruste taandamiseks teisele mõõtekaugusele CISPR 37 alusel.

Mõõte-kaugus, m	Alumine sageduspunkt, f_1, MHz	Ülemine sageduspunkt, f_2, MHz	Alumine ülekandetegur k_{EP01} (150 kHz ... f_1)	Ülekandeteguri k_{EP12} arvutuskäik sagedusvahemikus f_1 ... f_2	Ülemine ülekandetegur k_{EP23} (f_2 ... 30 MHz)
3	5,5	14,4	26,6	58,8-43,5*log(f)	8,4
4	5	11,5	21	48,9-40,0*log(f)	6,4
5	5	9,8	15,4	40,9-36,4*log(f)	4,8
6	4,5	8,6	11,9	31,2-29,5*log(f)	3,6
7	4,5	7,8	8	23,2-23,2*log(f)	2,5

Mõõte-kaugus, m	Alumine sageduspunkt, f_1, MHz	Ülemine sageduspunkt, f_2, MHz	Alumine ülekandetegur k_{EP01} (150 kHz ... f_1)	Ülekandeteguri k_{EP12} arvutuskäik sagedusvahemikus f_1 ... f_2	Ülemine ülekandetegur k_{EP23} (f_2 ... 30 MHz)
8	4	7,3	5,3	14,0-14,5*log(f)	1,6
9	3,8	6,8	2,5	6,7-7,2*log(f)	0,7
15	2,8	5,5	-10	-20,7+24*log(f)	-2,9
20	2,4	5,1	-16,7	-30,3+35,6*log(f)	-5,1
25	2	4,9	-22,4	-34,3+39,8*log(f)	-6,9
30	1,8	4,8	-26,3	-37,1+42,5*log(f)	-8,4
50	1,1	4,6	-39,7	-41,5+43,3*log(f)	-12,7
70	0,8	4,6	-47,5	-44,4+43,6*log(f)	-15,5
100	0,6	4,6	-56,7	-47,1+43,1*log (f)	-18,6



Joonis 11-1. Näited CISPR 11:2025 tabel 20 alusel ja selle dokumendi Tabel 11-3 tegurite abil selgitatud piirtasemed eri mõõtekaugustele. Alus-joon on 30 m mõõtekauguse jaoks kehtiv piirjoon.

Mõõtekauguse muutumisel võrreldes alus-mõõtekauguse suurusega saab sagedusvahemikus üle 30 MHz üle viia tehtega (CISPR pr37 alusel)

$$M_{DX} = M_{DREF} + 20\log\left(\frac{D_X}{D_{REF}}\right)$$

kus *Dx* on tegelik kaugus, M_{DX} suuruse tase kaugusel *Dx* ja M_{DREF} on suuruse tase aluskaugusel D_{REF}.

Selline seos kehtib vähemalt kuni 6 GHz sageduspiirini esitatud piirtasemete korral.

Esitatud seosega tuletatud piirtasemete esitus on kirjeldatud allolevas tabelis (vt Tabel 11-4).

Tabel 11-4. Piirtasemete esitus valikul mõõtekaugustel CISPR 11:2025 alusel klass A seadmetele sagedusvahemikus 30 MHz ... 6 GHz. Mõõteribafiltri laius alla 1 GHz sagedustel on 120 kHz ja sagedusvahemikus 1 GHz ... 6 GHz on 1 MHz.

Sagedusvahemik	**Baas-piirsuurus ja mõõtekaugus**	**Elektrivälja-piirsuurus dBµV/m**				
		10 m	**15 m**	**30 m**	**65 m**	**100 m**
30 MHz ... 230 MHz	30 dBµV/m (30 m) Kvaasitipp-väärtus	40	36	30	23	20
230 MHz ... 1 GHz	37 dBµV/m (30 m) Kvaasitipp-väärtus	47	41	37	30	27
1 ... 3 GHz	76 dBµV/m (3 m) Maksimumväärtus	66	62	56	49	46
3 ... 6 GHz	80 dBµV/m (3 m) Maksimumväärtus	70	66	60	53	50