

*Teaduspreemia tehnikateaduste alal tööde  
tsükli „Topoloogiat muutva juhtimisega  
innovaatilised jõuelektronikasüsteemid“ eest*

Dmitri Vinnikov (kollektiivi juht), Andrei Blinov,  
Andrii Chub, Oleksandr Husev



Foto: Birgit Püvi

## TOPOLOOGIAT MUUTVA JUHTIMISEGA INNOVAATILISED JÕUELEKTROONIKASÜSTEEMID

### **Jõuelektronika roll rohepöördes**

Möödunud sajandi edusammud on näidanud, et inimeste heaolu on otseselt seotud energiatarbimisega. Maailma energiavajadus peaks lähitulevikus koos rahvastikuga pidevalt kasvama. Oleme pikka aega kasutanud fossiilkütuseid. Eestis kasutame primaarse energiaallikana põlevkivi, kaevandades kohati üle 15 miljoni tonni aastas. See on ühelt poolt oluliselt kiirendanud Eesti majandusarengut, kuid teiselt poolt jätnud endast maha suure keskkonnajalajälje.

Saabunud on aeg, mil riigid peavad rohkem hakkama hoolitsema oma keskkonna eest, et tagada elamiskõlblikud tingimused ka järeltulevatele põlvedele. Selleks et pöörata tagasi ümbritsevatele ökosüsteemidele tekitatud kahju, on Eesti alustanud saaste järkjärgulist vähendamist alates aastast 2019, mil saavutati kasvuhoonegaaside heitkoguste kiire langus. Kõige dramaatilisem muutus toimus elektritootmise turul ning on tingitud neljakordsest tasude tõusust, mida ettevõtted peavad maksma atmosfääri CO<sub>2</sub>-ga saastamise eest. See samm on jätkusuutliku tuleviku poole püüdleva riigi jaoks loogiline. Uus ellusuhtumine nõuab, et riik pöörduks jätkusuutmatust minevikust rohelise tuleviku poole. Seda suhtumist nimetatakse rohepöördeks.

Rohepööre on seotud elektri kui peamise energialiigi kasutamisega. See on ka loogiline, kuna taastuenergiat, näiteks päikese-, tuule- või hüdroenergiat, toodetakse peamiselt elektri kujul. See on suur muutus võrreldes endiste aegade, mil põletasime fossiilkütuseid, et käitada elektritootmiseks suuri auruturbiine. Miks peaksime jätkama energia tootmist jätkusuutmatul viisil, kui areng pakub meile uusi ja puhtaid tehnoloogiaid? Meie eluviis on suurte muutuste lävel. Tänavatele on ilmunud esimesed elektrisõidukid, hooneid köetakse energiatõhusate soojuspumpade abil, lisaks võib igatüks hakata ise elektritootjaks, lisades katusele päikesepaneelid.

Alates 2019. aasta detsembrist on Eesti tegelnud riikliku energia- ja kliimakava 2030 elluviimisega. Eesmärk on vähendada Eesti kasvuhoonegaaside heitkoguseid 2030. aastaks 70% võrra. Taastuvelektri tootmisest üksi ei piisa; peame seda ka tõhusalt kasutama. Paljud meist mäletavad hõõglampe, mis muutisid 5% energiast valguseks ja ülejäänud 95% soojuseks. Tänapäeval kasutavad

paljud meist leedlampe, mis annavad sama palju valgust, kuid tarbivad kümme korda vähem elektrienergiat. Seadmete energiatõhusus näitab, kui palju need energiat tarbivad, kui neid sihtotstarbeliselt kasutada.

Kui küsida endalt, mis ühendab taastuvenergia tootmist, elektrisõidukeid, soojuspumpasid ja leedvalgustust, ei pruugi vastust esmapilgul paista. Kõik need seadmed sisaldavad jõuelektronikat e energiamuundureid. Proovige nüüd mõelda laiemalt – iga nutitelefon või sülearvuti kasutab elektrivõrgust laadimiseks jõuelektronikat. Nende sees on veel rohkem jõuelektronilisi muundureid, mis annavad toite protsessoritele, toidavad USB-porti, reguleerivad ekraani heledust jne. Mõelge oma kodumasinale – kui sageli nägite uuel A-klassi pesumasinal või külmkapil sõna „inverter“? See tähendab, et need seadmed kasutavad jõuelektronikat. Ühtlasi on jõuelektronika asendamatu vahend energiatõhususe suurendamiseks. Jõuelektronika tagab teie nutitelefoni akule pikema kestvuse ja pesumasinal energiasäästliku töö. Jõuelektronika muundurid peavad olema töökindlad ja ohutud, et meie majades oleks elekter, et meie seadmed töötaksid siis, kui neid vajame, ning et meie isiklikud elektroonikaseadmed saaksid kiiresti laetud ja akud tõhusalt kasutatud.

Kuigi elektrimuundurid on olemas praktiliselt kõigis elektriseadmetes ja jõuelektronika on juba üle 100 aasta arenenud, pole areng ka tänapäeval seiskunud. See on enamasti seotud uute, toiteallikaid tõhusamaks, kompaktsemaks ja odavamaks muutvate pooljuhtmaterjalide, nagu SiC (ränikarbiid) või GaN (galliumnitriid), ilmumisega. Neid edusamme on tööstuses juba laialdaselt kasutusele võetud ja edasine areng on aeglustumas. Seetõttu on tulevaste energiatõhususe eesmärkide saavutamiseks vaja uusi revolutsioonilisi lähenemisviise.

### **Alalisvoolupõhised nanovõrgud elamutele**

Roheenergia tootmist ja tarbimist elektri kujul nimetatakse sageli elektrifitseerimiseks. See on seadnud teadlaste ette mitmeid väljakutseid. Eelkõige piiravad taastuvenergiastüsteemide tõhusust olemasolevad vahelduvvooluvõrgud. Vahelduvvooluvõrgud on olnud peamiseks lahenduseks üle 100 aasta pärast nn „voolude sõda“ Thomas Alva Edisoni ja George Westinghouse'i vahel. Kes võidab kordusmatši tänapäeval? Oleme trolli- ja trammisüsteemides või linnalähirongides kasutanud alalisvoolutehnoloogiat aastaid, kuid selle turuosa oli väga väike. Nüüd on aga maailm alalisvooluseadmeid täis. Teie katusel olevad päikesepaneelid toodavad energiat alalisvoolu kujul, teie telefoni või elektrisõiduki akud salvestavad energiat alalisvoolu kujul ning pesumasina mootori tööle panev vaheldi (ingl *inverter*) vajab samuti oma sisendis alalisvoolu. Alalisvoolutehnoloogia on tõhusaim energia edastamise viis pikkade vahemaade taha, mistõttu on Eesti ja Soome ühendatud kahe kõrgepingelise alalisvoolu merekaabliga nimedega Estlink ja Estlink 2.

Sellel põhjal ärge alahinnake traditsiooniliste tehnoloogiate võimu. Alalisvoolutehnoloogia kiire kasutuselevõtt ei saa olla lihtne pärast 100 aastat kestnud investeeringuid vahelduvvooluliinidesse, trafodesse ja alajaamadesse. Seetõttu ei saa paljud hooned oma energiasäästupotentsiaali täielikult ära kasutada, isegi kui need on ehitatud tipptehnoloogia abil, sisaldades nt päiksepaneele ja akusid. Praeguses olukorras tuleb alalisvool esmalt muuta vahelduvvooluks. Seejärel peab energiat tarbiv seade või laadija selle uuesti alalisvooluks muutma. See põhjustab liigseid kadusid ja võib muuta vahelduvvooluelektrivõrgu ebastabiilseks. Seetõttu on üleminek alalisvoolutehnoloogiale loogiline ja soovitatav. Alalisvoolutehnoloogia laiemat kasutuselevõttu piirab lisaks ka inimeste vähene teadlikkus ja sobivate elektriseadmete puudumine.

Potentsiaalseks tulevikutehnoloogiaks hoonete energiatõhususe suurendamiseks on väikesed alalisvoolul põhinevad kohalikud elektrivõrgud, mida nimetatakse alalisvoolunanovõrkudeks. Praegu ehitatakse Eestis aktiivselt liginullenergiahooneid, järgides Euroopa Liidu regulatsioone. Järgmine samm oleks saastevabade hoonete (ingl *zero emission building*, ZEB) kasutuselevõtt alates 2030. aastast, kus välditakse fossiilkütuste, sh isegi maagaasi kohalikku kasutamist. Seega jääb üle vaid kogu tootmine ja tarbimine viia elektripõhiseks.

Kui praegused vahelduvvoolul põhinevad tehnoloogiad on juba oma parima energiatõhususe saavutanud, siis alalisvool kätkeb endiselt suurt kasutamata potentsiaali elektrisüsteemide tõhusamaks muutmiseks. TalTechi jõuelektroonika uurimisrühm oli esimeste seas, kes tegi ettepaneku alalisvoolutehnoloogia kasutamiseks elamutes. Hiljuti asutas Tallinna tehnikaülikool i<sup>3</sup>DC algatuse, et tõsta ühiskonna teadlikkust alalisvoolutehnoloogiast ja koondada huvilisi. Alates 2024. aasta aprillist avab näidishoone TalTech Residential DC Innovation Hub oma ukse kõigile, et demonstreerida alalisvoolutehnoloogiat reaalses elukeskkonnas, samal ajal kui näidishoonet pidevalt edasi arendatakse.

### **Topoloogiaid muutev juhtimine – tõhus tööriist jõuelektroonikasüsteemide jõudluse parandamiseks**

Uute energiatootmis- ja jaotuspõhimõtete kiire areng on suurendanud vajadust jõuelektroonika muundurite järele. Teisest küljest konkureerib jõuelektroonikatööstus alati ränile kui toorainele koos päikesepaneelide, arvutiprotsessorite ja graafikakaardi kiipide tootjatega. Ráni nõudlus on eriti kasvanud viimaste aastate krüptoraha kaevandamise tõttu. Tohtu nõudlus ráni järele põhjustas aastatel 2020–2023 ülemaailmse kiibipuuduse. Seda suundumust nähes mõistis meie uurimisrühm, et keerukad jõuelektroonikalahendused peavad tööstuse huvi äratamiseks kasutama vähem pooljuhtkomponente ja intelligentsemat juhtimist. Lahendusena pakkusime välja topoloogiaid muutva juhtimise (TMJ). See võib parandada paljude olemasolevate jõupooljuhtmuundurite jõudlust, uuendades lihtsalt nende juhtimistarkvara.

Meie TMJ kontseptsioon on alguse saanud pikaajalistest uuringutest galvaaniliselt isoleeritud<sup>37</sup> alalispingemuundurite alal. Need muundurid suudavad väga kõrge kasuteguriga ühildada mis tahes pingetasemeid. Nende tüüpiline ülesehitus on toodud joonisel 1. Tüüpiline galvaaniliselt isoleeritud alalispingemuundur (ingl *galvanically isolated DC-DC converter*) sisaldab kolme põhi-elementi:

- vaheldit, mis muundab alalispinge trafole sobivaks vahelduvpingeks;
- trafot, mis tõstab või langetab pinget vajaliku tasemeni üle 99% kasuteguriga ning tagab läbi galvaanilise isolatsiooni elektriohutuse väljundis;
- alaldit, mis muundab trafo sekundaarmähise vahelduvpinge tagasi alalispingeks.

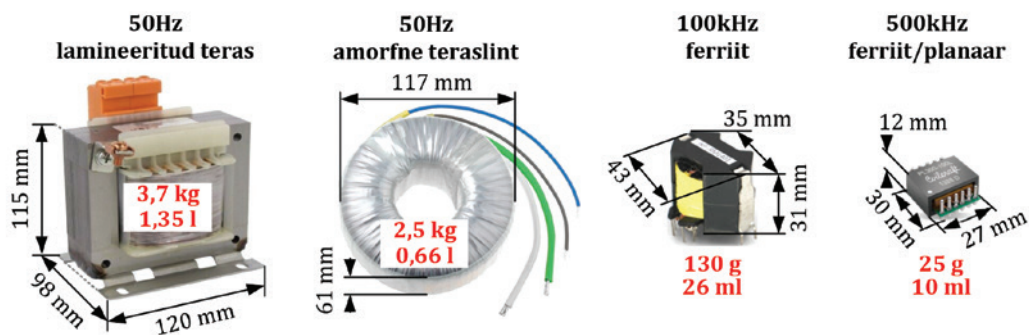
Jõuelektroonikainseneridena püüame projekteerida võimalikult kompaktsed ja tõhusaid alalispingemuundureid. Üks viis seda saavutada on trafo töösageduse suurendamine. Paljud teist teavad, et vahelduvpingevõrk töötab sagedusel 50 Hz. Selle madala sageduse tulemuseks on üsna kogukad trafod, nagu on näha joonisel 2. Seetõttu kasutame oma konstruktsioonides sageli palju kõrgemaid sagedusi, näiteks 100 kHz, mis vähendaks trafo kaalu kuni 20 korda. Muidugi saab alalispingemuunduri veelgi väiksemaks muutmiseks kasutada ka kõrgemaid sagedusi, nagu joonisel 2 näidatud 500 kHz. Liiga kõrge lülitussagedus muudab aga seadmete projekteerimise palju keerulisemaks. Teiselt poolt võib ka trafo mõõtmete vähendamine paljudes rakendustes piiratud olla, kuna vajatakse paremat isolatsiooni. Seetõttu ei piisa jõudluse suurendamiseks pelgalt riistvara parendamisest, vaid tuleb rakendada ka uuenduslikke juhtimismeetodeid nagu TMJ.



**Joonis 1.** Galvaaniliselt isoleeritud alalispingemuunduri üldistatud skeemilahendus.

<sup>37</sup> Elektrotehnikas kahe elektri ahela selline eraldamine (nt trafo abil), mis katkestab otsese vooluraja (nt juhtmeid pidi) nende ahelate vahel. Seega pole võimalik elektrilaengute vahetu liikumine ühest ahelast teise. Ka selliste ahelate potentsiaalid on teineteisest eraldatud, mistõttu nt madalpingelises osas ei pea kartma elektrilööki.





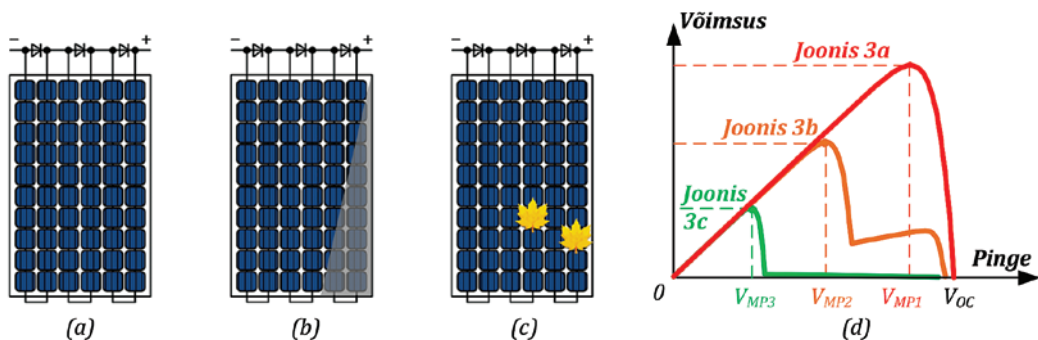
**Joonis 2.** Trafo suurus sõltub kasutatavast sagedusest ja materjalitehnoloogiast. Kõik joonisel toodud trafod on projekteeritud samale võimsusele.

TMJ problemaatika analüüs sai alguse 2017. aastal, mil alustasime ümberkonfigureeritavate alaldite tehnoloogia uurimist. Tavaliselt saab alaldi töötada ainult ühes režiimis:

- täissildalaldi: kui trafo toidab alaldit kõrgsagedusliku vahelduvpingega, mille pinge varieerub vahemikus +100 V kuni –100 V, annab see alaldi väljundpingeks 100 V;
- pinget kahekordistav alaldi: kui trafo toidab alaldit kõrgsagedusliku vahelduvpingega, mille pinge varieerub vahemikus +100 V kuni –100 V, annab see alaldi väljundpingeks 200 V;
- pinget neljakordistav alaldi: kui trafo toidab alaldit kõrgsagedusliku vahelduvpingega, mille pinge varieerub vahemikus +100 V kuni –100 V, annab see alaldi väljundpingeks 400 V.

Esiolgu otsustasime kasutada ümberkonfigureeritavat alaldit, mille tulemuseks oli uudne alalispingemuundur, millel on äärmiselt lai sisendpinge vahemik 10 V kuni 100 V (Vinnikov jt, 2018a). Tulemus oli paljutootav, kuid vajab praktilist rakendust. Samuti oli vajaminev trafo ülekandesuhe üsna kõrge, vähendades selle lahenduse praktilisust.

Järgmiseks sammuks oli tehnoloogia täiustamine ja reaalses oludes katsetamine. Otsustasime rakendada seda elamute päikeseelektrisüsteemides. Päikesepaneeli tootlikkus sõltub lisaks päikesekiirgusele ka väljundpingest, mida võib kutsuda paneeli tööpunktiks. Seda pinget saab reguleerida spetsiaalse alalispingemuunduri abil. Turul pakutakse palju muundureid, mis suudavad maksimumvõimsuse tööpunkti (MVP) otsida. Probleemid tekivad aga osaliselt varjutatud paneelide korral. Varju võivad heita puud, puulehed, korstnad, naaberhooned, lumi, lindude väljaheidet jms. Osaline varjutus moonutab päikesepaneeli

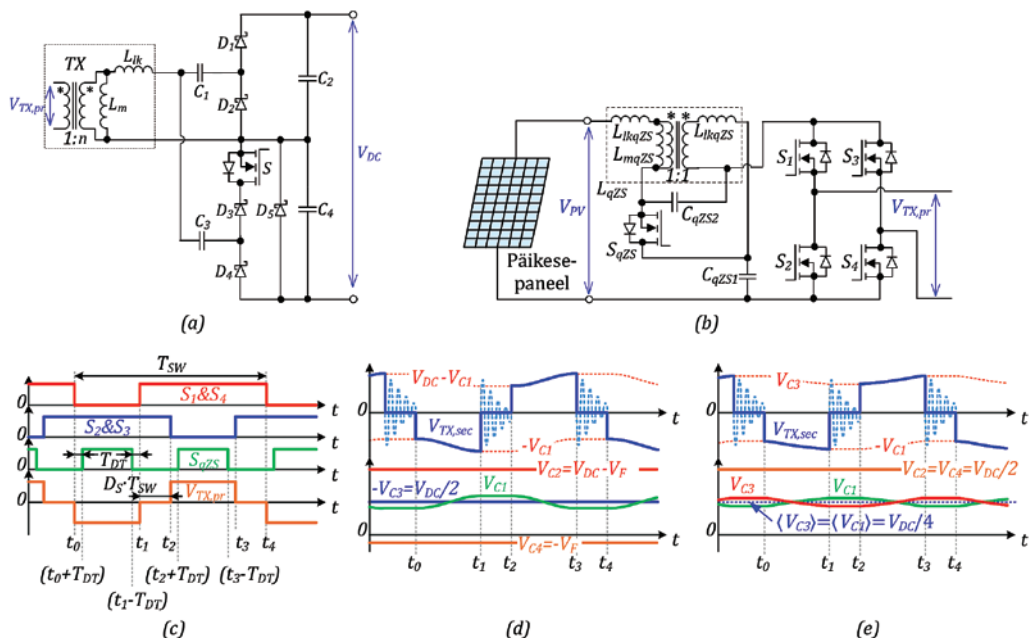


**Joonis 3.** Päikesepaneeli osalise varjutuse stsenaariumid: (a) varjutus puudub, (b) üks varjutatud alamahel, (c) kahe alamahela varjutus ja (d) varjutusest tulenevad päikesepaneeli tunnusjooned.

võimsuse-pinge tunnusjooni (joonis 3d), mistõttu võib tekkida mitu lokaalset MVP-d. Paljud turul pakutavad päikesepaneelimuundurid suudavad leida ainult esimese MVP, mistõttu jääb oluline osa paneeli võimsusest kasutamata. Näiteks ilma varjutuseta annab tüüpiline päikesepaneel välja maksimaalse võimsuse, kui ta töötab tööpunktis  $V_{MP1} = 30$  V (joonis 3d). Väikese osalise varjutuse korral, kui ainult üks paneeli alamahel on varjutatud (joonis 3b), nihkub maksimaalse võimsuse punkt pingele  $V_{MP2} = 20$  V. Kui alalispingemuundur jätkab aga tööd eelmises tööpunktis  $V_{MP1}$ , siis on tulemuseks oluliselt madalam tootlikkus. Veelgi suurema varjutuse korral võib MVP liikuda ka pingele  $V_{MP3} = 10$  V, kus tootlus on ligi kolm korda madalam teoreetilisest maksimumist. Sel puhul puuduks kahes eelmises tööpunktis tootlus üldse (joonis 3d). Seetõttu mängib jõuelektroonika päikeseneergeetikas väga olulist rolli. Päikesepaneelide muundurid peavad suutma töötada väga laias sisendpingevahemikus 10 V kuni 60 V. Sellise alalispingemuunduri ehitamine on keeruline. Aastal 2018 puudusid turul sellised muundurid. Seetõttu hakkasime arendama uudse kontseptsiooniga päikese-mikromuundurit, mille oleks võimalikult lai tööpingevahemik ja ka globaalne MVP otsimisvõimekus, st see suudaks leida tõelise MVP ka osalise varjutuse korral.

Töö tulemuseks oli uudne pinget kahe- ja neljakordistava ümberkonfigureeritava alaldiga (joonis 4a) alalispingemuundur (Vinnikov jt, 2018b). Muundur koosneb impedants-vaheldist (joonis 4b, s.o tehnoloogia, mida Tallinna tehnikaülikooli jõuelektroonika uurimisrühm on aastaid arendanud ja mis 2014. aastal pälvis riikliku teaduspreemia), trafost ja pinget kordistavast ümberkonfigureeritavast alaldist.

Impedants-vaheldi pinget tõstmiseks kasutatakse erilist lühisolekut  $D_s$ , mille teoreetiline suhteline kestus on 0...0,5 (joonis 4c). Antud rakenduses aga saab minna kuni väärtuseni 0,3, sest pärast seda hakkab kasutegur kiirelt langema. Edasiseks pinget tõstmiseks tuli leida alternatiivne meetod, mis ei mõjutaks kasutegurit. Selle ülesande lahendas pinget kordistav ümberkonfigureeritav alaldi.

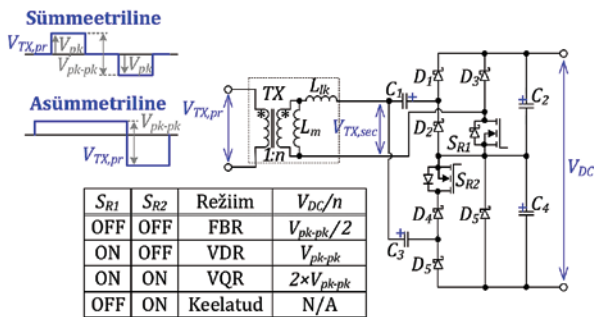


**Joonis 4.** Pinget kahe- ja neljakordistav ümberkonfigureeritava aladi: (a) aladi skeemilahendus, (b) vaheldi skeemilahendus trafo primaarpoolel, (c) primaarvaheldi tööpõhimõte, (d) ümberkonfigureeritava aladi töö pinget kordistavas režiimis ja (e) ümberkonfigureeritava aladi töötamine pinget neljakordistavas režiimis.

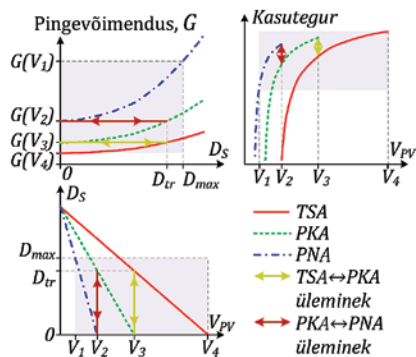
Ümberkonfigureeritava aladi rakendamine vähendab trafo nõutavat ülekandetegurit, muutes selle energiatõhusamaks. Kui sisendpinget järk-järgult vähendatakse, on alalispingemuundur sunnitud suurendama lühisolekut  $D_S$ , vähendades sellega tõhusust. Algselt töötab ümberkonfigureeritava aladi pinget kahekordistava ja ahela alumine osa on passiivne (joonis 4d). Kui sisendpinge on teatud väärtusest madalam, muudab ümberkonfigureeritava aladi oma režiimi pinget neljakordistavaks, lülitades sisse transistori  $S$ . Siis ei pea impedantsvaheldi lühisekestust  $D_S$  suurendama ebasoodsalt kõrgete väärtusteni. Tulemusena suudab ümberkonfigureeritava aladi seadme kasutegurit parandada kuni 8%, kui päikesepaneel on osaliselt varjutatud ja alalispingemuundur peab töötama alla oma nimisisendpinge.

Meie uuringud on näidanud selget lünka: enamikul tuntud ümberkonfigureeritavatel aladitel on ainult kaks režiimi, mis piiravad nende jõudlust, samas on rohkemate režiimidega aladitel piiratud pingetõstmise vahemik. Selle lünka täitis meie meeskonnas välja töötatud uudne kolmerežiimiline ümberkonfigureeritava aladi. Esmalt uued ideed patenteeriti (Chub, Vinnikov, 2018) ning seejärel esitleti uurimistöö tulemusi ja katseandmeid teaduskonverentsil IECON 2019 Portugalis Lissabonis (Chub jt, 2019). Selle aladi topoloogia ja lülitusolekud on joonisel 5a.





(a)



(b)

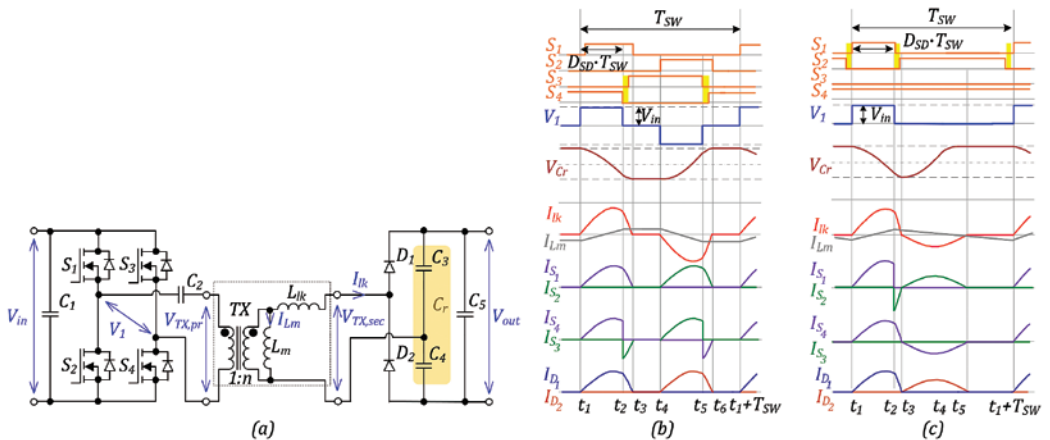
**Joonis 5.** Kolme režiimiga ümberkonfigureeritav alaldi: (a) skeemilahendus ja (b) peamine rakenduspõhimõte.

Nagu jooniselt 5b paistab, võib see alaldi hoida juhtmuutujat  $D_s$  selle maksimaalsest lubatud väärtusest  $D_{max}$  väiksemana. Alaldi iga režiim määratleb eraldiseisva väljundpinge tunnusjoone, samal ajal kui alaldi režiimi muutmine toob kaasa ka tunnusjoonte vahetumise.

Kuigi ümberkonfigureeritavad alaldid on osutunud tõhusaks, on neil ka puuduseid. Juba esialgses uurimistöös (Vinnikov jt, 2018b) täheldati, et selle tehnoloogia kasutamisel on alaldi režiimi muutmisel märgatavad olulised muutused seadme energiatõhususes. Kolmerežiimilise alaldi käitumine on näidatud jooniselt 5b.

Muunduri kasutegur hakkas langema täissild-tüüpi impedants-vaheldi tõttu. See puudus andis mõtte rakendada TMJ; antud juhul selleks, et muuta täissild poolsildvaheldiks. Meie uurimistöös (Sidorov jt, 2020) tõi välja sellise näite, kus jooniselt 6a näidatud skeemilahendusega primaarvaheldi konfigureeritakse kas täis- või poolsildvaheldiks, vahetades samal ajal ka modulatsiooni, nagu on näidatud joonistel 6b ja 6c. Selline ümberkonfigureerimise võimalus nõuab hübriidse täissild-lülituselemendiga skeemilahendust koos jadakondensaatoriga ( $C_2$ ), blokeerimaks voolu alaliskomponenti trafo primaarmähises. Märkimisväärne on, et selline ümberkonfigureerimine on väga lihtne ja seda saab teha pelgalt juhtimistarkvara muutmise abil. Ümberkonfigureerimise peamine põhimõte seisneb selles, et poolsild tagab täissillaga võrreldes kaks korda väiksema pingetõusu.

Tehniliselt võib täissildvaheldi pinget alandada rohkem kui kaks korda, kuid seda komponente läbiva voolu suurenemise arvelt. Seetõttu annaks poolsillale üleminek palju suurema kasuteguri võrreldes sellega, et täissillaga lahendust sisendpinge alandamisega üle koormata. Eelkõige näitas uuring (Sidorov jt, 2020) režiimi ülemineku hetkel kasuteguri paranemist kuni 6%. Veelgi enam,

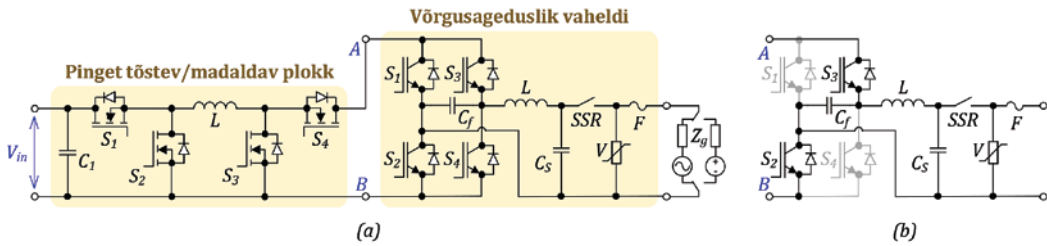


**Joonis 6.** Topoloogiat muutva juhtimisega galvaaniliselt isoleeritud alalispingemuundur (Sidorov jt, 2020): (a) skeemilahendus, juhtsignaalid (b) täis- ja (c) poolsildrežiimil.

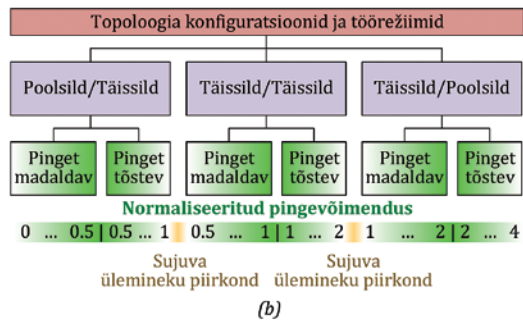
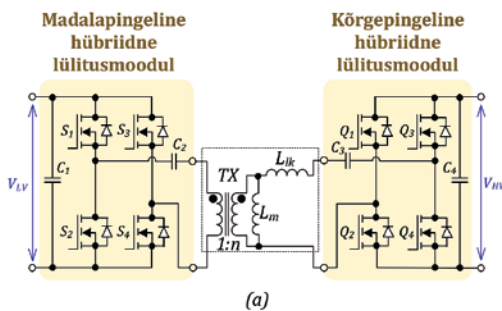
„pehmed“ üleminekud töörežiimide vahel on teostatavad juhtarkvara täiendades ilma komponente lisamata. Selle tulemusel saab vältida voolusiiretest põhjustatud häiringuid töörežiimide vahetumisel (Sidorov jt, 2021).

Alates aastast 2021 on meie ümberkonfigureeritavate vaheldite alased uuringud keskendunud universaalmuunduritele, mis suudavad töötada samaaegselt nii vahelduv- kui ka alalispingega (Sidorov jt, 2022a). Sellised muundurid koosnevad kõrgsageduslikust alalispingemuundurist ja võrgusageduslikust vaheldist (joonis 7a). Meie uuringud näitavad, et mitteinverteeriva pingetõste-langetusmuunduri kasutamine tagab parima jõudluse vahelduvvoolu rakendustes ja samas ka väga kõrge kasuteguri alalisvoolu rakendustes. Joonisel 7b on näide sellest, kuidas võrgusageduslik vaheldi toidab nanovõrku positiivse polaarsusega alalisvooluga.

Olles saanud kogemusi TMJ rakendamisest nii alaldites kui ka vaheldites eraldi, tekkis mõte rakendada TMJ ka aktiivkaksiksilla (ingl *dual active bridge*) korral, mis võimaldab samaaegselt vaheldit ja alaldit ümber konfigurereida. Selle tulemuseks oli väga mitmekülgne kuuerežiimiline alalispingemuundur (joonis 8a). See topoloogia kasutab hübriidset täissildlülitusmoodulit, mis võib töötada nii täis- kui ka poolsildkonfiguratsioonis. Tulemusena tekib kolm võimalikku topoloogiakonfiguratsiooni: poolsild/täissild, täissild/täissild, täissild/poolsild (joonis 8b). Lisaks saab iga konfiguratsiooni abil pinget nii tõsta kui ka langetada, mis annab kokku kuus erinevat töörežiimi (Sidorov jt, 2022b). See muundur demonstreerib unikaalselt suurt pinget reguleerimisvahemikku. Koos TMJ-põhise muunduriga pakub see lisakuludeta suurimat pinget reguleerimisvahemikku minimaalse keerukuse juures (Sidorov jt, 2022a).



**Joonis 7.** Vahelduv- ja alalisvooluvõrkudes universaalselt kasutatavad muundurid: (a) pinget tõstev ja langetav skeemilahendus koos võrgusagedusliku vaheldiga väljundis ja (b) näide võrgusagedusliku vaheldi tööst alalisvoolurežiimis.

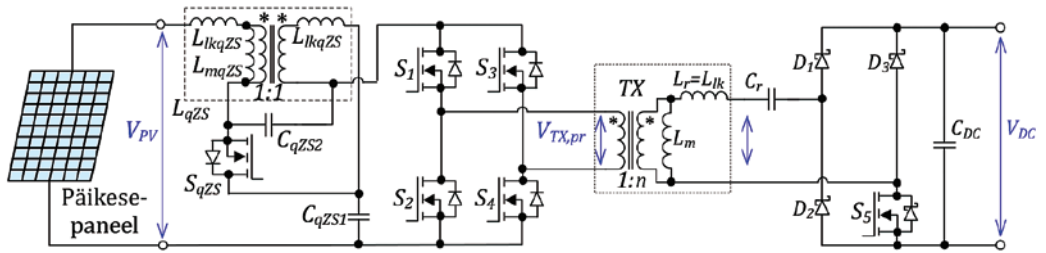


**Joonis 8.** Kuuerežiimiline alalispingemuundur koos TMJ realiseerimisvõimalusega nii vaheldis kui ka alaldis: (a) topoloogia ja (b) topoloogia konfiguratsioonid ja töörežiimid.

## TMJ-põhised jõuelektronikasüsteemid elamute alalisvoolu- nanovõrkudele OptiVerter® DC

Meie uurimisrühm on aastaid töötanud galvaaniliselt isoleeritud impedants-tüüpi alalispingemuundurite kallal, st uudse tehnoloogiaga, millel on täiustatud pingereguleerimise võimalused. Esimese sammuna töötasime välja mikromuunduri päikesepaneelidele, mida meie tööstuspartner Ubik Solutions nimetas turundusnimega OptiVerter. See oli esimene tööstuslik päikesepaneelide mikromuundur elamutele, mis tagas maksimaalse võimsusega tööpunkti ka osaliselt varjutatud päikesepaneelide korral (Vinnikov jt, 2019).

2019. aasta alguses hakkasime uurima, kuidas seda uutset muundurit kohandada elamute alalisvoolunanovõrkude jaoks. Et saavutada nõutavat pingevõimendust, asendasime tavapärase alaldi ümberkonfigureeritava alaldiga (joonis 9). Uus topoloogia sarnaneb joonisel 4 näidatud topoloogiaga. Alaldi teostuses on aga üks oluline erinevus. Loodud OptiVerter DC (alalisvoolu)tehnoloogia on peaaegu



Joonis 9. Ubik OptiVerter DC alalispingemuunduri skeemilahendus.

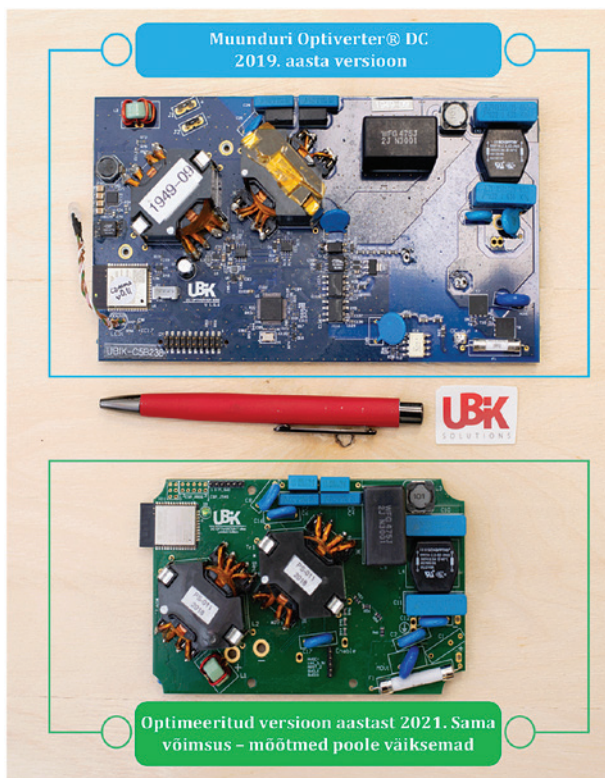
sama lihtne kui selle alusversioon. Alaldile ühe transistori lisamine muudab selle ühilduvaks elamute alalisvooluanovõrgu erinevate pingetasemetega ( $350 \pm 30$  V ja  $700 \pm 60$  V), mis on määratletud Current/OS Foundation standardis.

Uus seade OptiVerter DC kätkeb esimest katset luua universaalne päikeseliidestusmuundur elamute alalisvooluanovõrkudele. Väike muudatus lisas paindlikkust ja säilitas samas ka muunduri võime jälgida MVP-d ka osalise varjutuse korral (vt näiteid joonisel 4d). See funktsionaalsus saavutatakse tänu OptiVerteri tehnoloogia väga laiale sisendpingevahemikule (10 V kuni 60 V), mis sobib enamiku turul saadaolevate päikesepaneelidega elamutele. Teisest küljest saab seda seadet kasutada kahes kõige levinuma pingetasemega elamu alalisvooluanovõrgus ilma riistvara muutmiseta, lihtsalt muunduri tarkvara ümberkonfigureerimise teel ja transistoride juhtsignaalide muutmise kaudu.

Riistvara arenduses jõudis Ubik OptiVerteri vahelduvvoolu versioonil põhinevast optimeerimata prototüübist kõrgelt optimeeritud tööstusliku disainini, millel on minimaalsed mõõtmed ning sisseehitatud side- ja telemeetrialahendus. Joonisel 10 on kujutatud riistvara arendamisel tehtud edusamme, mis on saavutatud tihedas koostöös tööstuspartneriga. Lõplik disain on täielikult iseseisva toitega, kuna selle abiahelad, nagu sisseehitatud mikrokontroller ja telemeetria, saavad toite otse päikesepaneelist. Nende seadmete trükkplaadid monteeriti plastkorpustesse, mis olid täidetud soojust juhtiva vaiguga, et võimaldada veekindlust, elektriohutust ja korralikku jahutust. Konstruktsiooni katsetati põhjalikult Hollandis ja Belgias mitmetes elamutes ja väikestes ärihoonetes.

### Universaalne päikesepaneelide ja alalisvooluanovõrgu liidestusmuundur

Oleme uurinud ja arendanud energiat tootvaid päikesefassaade ja -katuseid paralleelselt eelmise muunduri arendamisega. Neid tehnoloogiaid nimetatakse tavaliselt hoonesse integreeritud päikeseelektrijaamadeks (HIPE). Leiti, et HIPE tooted peavad olema erineva suuruse, võimsustaseme, värvi ja sisemuses kasutatavate materjalidega. See on loogiline, kuna päikesepatareid ja



**Joonis 10.** OptiVerter DC tehnoloogia arendamise ja optimeerimise tulemused – teadusest tööstusesse.

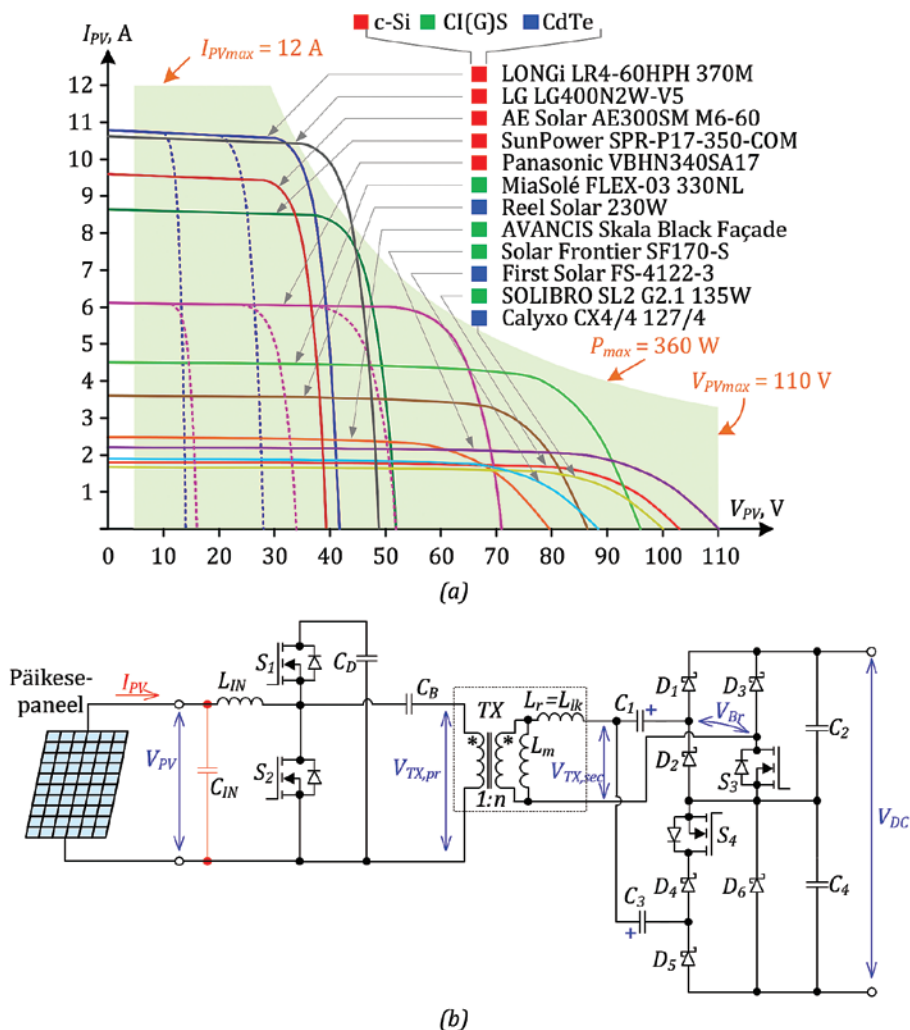
-fassaadipaneelid täidavad erinevaid funktsioone ja peavad vastama erinevatele ehitustööstuses kehtivatele standarditele. HIPE toodete põhiidee seisneb selles, et need peavad oma kaju ja konstruktsioonifunktsioonide poolest vastama olemasolevatele materjalidele, võimaldades HIPE elementide sujuvat kasutamist igas hoonedisainis. Huvitav fakt on see, et 2023. aasta seisuga asub Euroopa Liidu suurim päikesekatuseid tootev tehas Viljandis. Eesti ettevõtlusinnovaatori HIPE valdkonnas Solarstone OÜ tehase aastane toodang on 60 MW jagu paneele, millest piisab 10 000 kodu varustamiseks 6 kW päikesekatusega. Seda arvu saab võrrelda hinnanguliselt 1000 päikesekatusega, mille Tesla aastal 2022 USA-s paigaldas, et mõista selle saavutuse ulatust ja taset Eesti ja Euroopa Liidu jaoks.

Lai valik HIPE tooteid põhineb valdavalt kolmel päikesepaneelitehnoloogial: monokristalne räni, õhukesekileline kaadmiumtelluriid CdTe ja vask-indium-gallium-seleniid CIGS. Meie uuring (Chub jt, 2021) on tuvastanud, et HIPE moodulitel on nii palju erinevaid elektrilisi parameetreid, et on võimatu välja töötada tavapäraseid muundureid nende integreerimiseks hoonesisestesse alalisvooluanovõrkudesse. Lihtne ülevaade olemasolevate HIPE toodete volt-ampere-tunnusjoontest maksimaalse päikesekiirguse korral on toodud joonisel 11a. Selline lai valik elektrilisi parameetreid tekitab palju probleeme süsteemide projekteerijatele, paigaldajatele ja isegi seadmete tootjatele, kuna neil pole müügil olevaid sobivaid lahendusi, mis omakorda aeglustab oluliselt selliste tehnoloogiate kasutuselevõttu. Sellistele HIPE paneelidele sobiv universaalne liidestusmuundur peab töötama pingevahemikus 5V kuni 110 V, milleni ei küündi ükski turul saadaolevatest tiptasemel lahendustest.

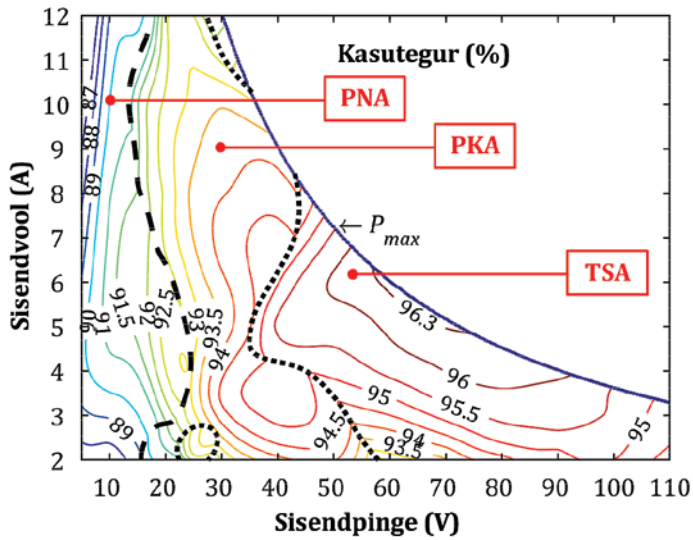
Oleme selle probleemi lahendamiseks (Chub jt, 2021) kasutanud TMJ põhimõtteid. Töötasime välja ja demonstreerisime maailma kõige laiema sisendpingeulatusega (üle 1 : 20 suhtega) päikese-mikromuunduri, mis on mõeldud räni ja amorfse kilega fotogalvaaniliste päikesepaneelide integreerimiseks alalisvooluanovõrkudesse.



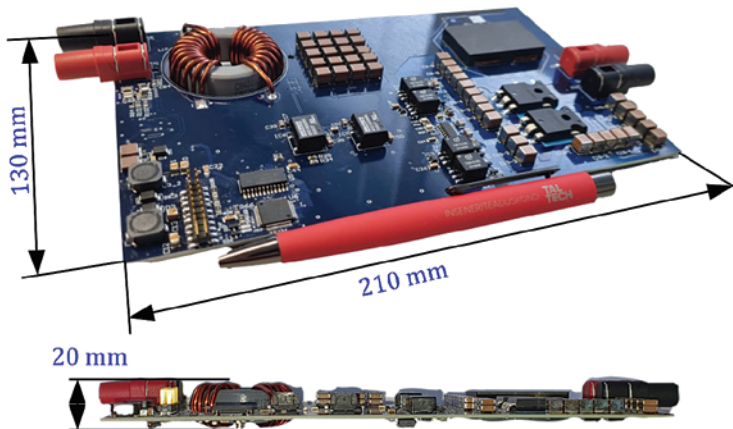
Võtsime joonisel 5a näidatud kolmerežiimilise ümberkonfigureeritava alaldi ja kohaldasime selle kõige lihtsamale alalispingemuunduri topoloogiale (joonis 11b). Leidsime, et see lähenemisviis on lihtsaim võimalik lahendus, kuna see topoloogia kasutab ainult kaht kõrgel sagedusel juhitavat transistori ja veel kaht transistori staatilises režiimis. Selle disaini optimeerimine on keeruline, kuid töö on saanud sihtotstarbelist toetust Eesti teadusagentuurilt (ETA) Andrii Chubi juhitud projekti EAG9 raames. See lähenemine võimaldas uute prototüüpidega



**Joonis 11.** HIPE toodete integreerimine elamu alalisvoolu nanovõrkudesse:  
 (a) HIPE elektriliste parameetrite varieeruvus (muunduri projekteerimisnõuded) ja  
 (b) uudsel kolmerežiimilisel alaldil põhineva universaalse HIPE liidestamismuunduri topoloogia.



(a)



(b)

**Joonis 12.** Uudse kolmerežiimilise ümberkonfigureeritava alaldiga rakendatud HIPE liidestusmuunduri disaini optimeerimise tulemused: (a) eksperimentaalne kasutegur ja (b) madala profiiliga konstruktsioon.

saavutada väga kõrge kasuteguri paljudes erinevates töörežiimides (joonis 12a). Nii kõrget kasutegurit demonstreeriti akadeemilistes ringkondades ja tööstuses esmakordselt, kuna nii lai sisendpinge ja -võimsus muudavad tavapärased lahendused ebatõhusaks ja ebapraktiliseks. Teine optimeerimise aspekt on seadme kõrguse vähendamine, et muuta see füüsiliselt kokkusobivaks päikesekatuste ja -fassaadidega. Prototüübil saavutati 20 mm kõrgus (joonis 12b).

## FlexiVerter®

Pärast päikesepaneelikesksete alalisvoolu liidestusmuundurite väljatöötamist elamute alalisvooluanovõrkude jaoks oleme uurinud seadmete suuremat kasutuspaindlikkust, mida topoloogia muutmise meetodid pakuvad. Pärast madalpinge-energiaallikate (nagu päikesepaneelide ja 24 V / 48 V akude) töönoüete analüüsi on ilmnenu, et tõenäoliselt saaks välja arendada universaalse väga mitmekülgse topoloogia muutmisel põhineva muunduri. See oli täiesti uudne kontseptsioon elamute alalisvoolu nanovõrkude rajamisel, mis järgib kõik-ühes-lähenemisviisi. Sellist liidestusmuundurit võiks nimetada tulevaste alalisvooluanovõrkude Lego ehitusplokiks. Samuti võimaldab üht tüüpi muunduri kasutamine tulevikus selliste süsteemide projekteerimist ja paigaldamist kiirendada. See lähenemisviis võib kasu saada mastaabisäästust, kui masstootmise madalad kulud muudavad täiustatud lahendused majanduslikult elujõuliseks. Samuti väheneb oluliselt personali koolitus, kui kasutatakse vähem eri tüüpi seadmeid.

Meie uuringud (Sidorov jt, 2023) näitasid, et sisendpinge vahemik 10 V kuni 60 V võib katta enamiku madalpinge kasutusjuhtudest elamu alalisvooluanovõrkudes. Teisest küljest on ülimalt oluline teha selline seade ühilduvaks nii 350 V kui ka 700 V alalisvooluanovõrkudega, et tagada selle toimimine enamikus elamute või väikeste ärihoonete alalisvooluseadmetes. Mõiste on üldistatud joonisel 13a. Selline muundur, mis ühildub nii päikesepaneelide kui ka madalpingeakudega, peab olema mitmekülgne ja kasutama intelligentset juhtimist, mis suudab ise tuvastada sisendtoiteallika tüübi.

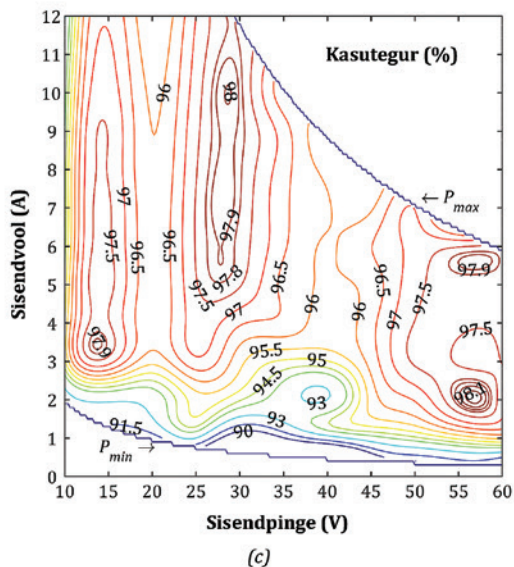
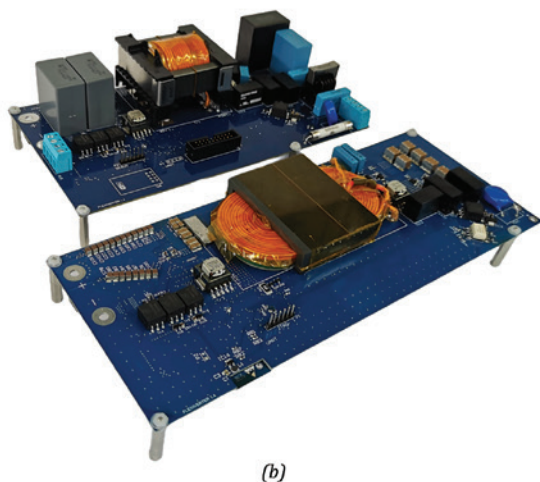
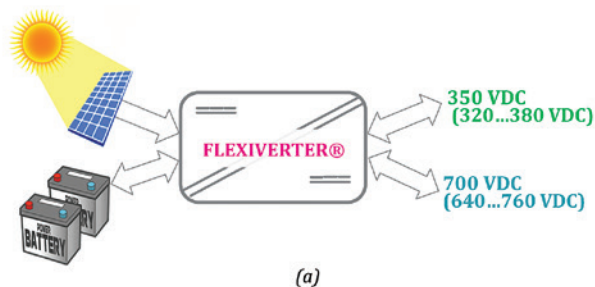
Sellist rakenduse paindlikkuse taset ei ole enne meie lahendust (Sidorov jt, 2023) veel demonstreeritud. Kasutasime joonisel 8a näidatud skeemilahendust. See kasutab kuut võimalikku töörežiimi muundurit kolme erineva konfiguratsiooni jaoks, vastamaks väga keerulistele disaininõuetele. Paljude ehitatud eksperimentaalsete prototüüpide hulgast saame eristada kahte:

- tavapärane teostus odavate kergesti kättesaadavate komponentidega on saavutanud parima hinna ja kvaliteedi suhte. Kõige tõhusam trafo on aga suhteliselt kõrge, mis piirab selle rakendatavust kompaktsust nõudvates niširakendustes;
- madala profiiliga disain, kus isolatsioonitrafo on integreeritud trükkplaadile, rakendamaks skeemilahenduse täit potentsiaali. Selle disainiga seadmed on madalamad, kuid suuremad ja nende efektiivsus on madalam.

Mõlemad prototüübid on näidatud joonisel 13b kõrvuti, et võrrelda nende mõtmeid sama, 100 kHz lülitussageduse korral.

Nagu eespool mainitud, saavutati parim efektiivsus odavaima disainilahenduse abil, mis on kavandatava tehnoloogia märkimisväärne eelis. Katseline kasutegur

on näidatud joonisel 13c. Nagu võib täheldada, on kasuteguril kolm erinevat tipp-piirkonda, mis vastavad kasutatud päikesepaneelide ja madalpingeakude kõige tõenäolisematele töövahemikele.



**Joonis 13.** FlexiVerteri tehnoloogia rakendamine: (a) põhiprintsiip, (b) tava-pärased ja madala profiiliga eksperimentaalsed prototüüpid teostused ja (c) katselisel saavutatud kasutegur.

Elamute alalisvoolu rakendustes on ülimalt soovitatav saavutada kasutegur üle 98%. Meie meeskond töötab selle tehnoloogia edasise täiustamise nimel kahes peamises suunas: võimsustiheduse parandamine lülitussageduse suurendamise ja madalpingekoormuse (nt valgustuse või USB-PD-seadmete) juhtimisega. Meie eesmärk on muuta see tehnoloogia tulevastes elamute alalisvoolulanovõrkudes veel laiemalt kasutatavaks ja levinumaks, mis omakorda hõlbustaks ka alalisvoolutehnoloogia laiemat ja kiiremat kasutuselevõttu.

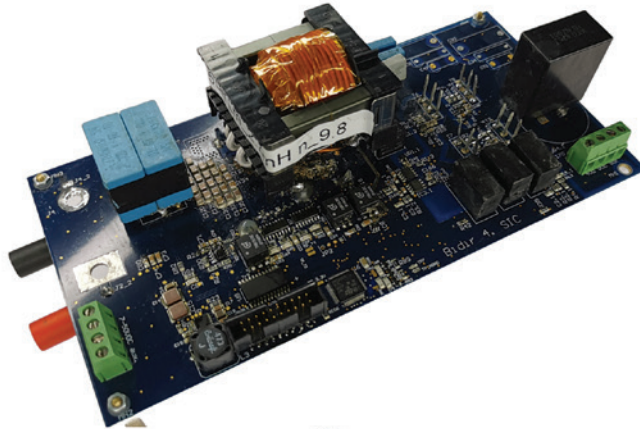
### **Iseparanev päikese-mikromuundur**

Tuginedes meie eelnevale praktilisele kogemusele päikeseelektrisüsteemidega, oleme tegelnud ka nendes kasutatavate alalispingemuundurite töökindluse parendamisega. Peamine probleem seisneb selles, et muundurid paigaldatakse eeldatavasti otse päikesepaneelide taha katusele või fassaadi sisse. Praktikas tähendab see, et seadmed peavad olema sama töökindlad kui päikesepaneelid ise. Nende ehitamisel tuleb muundurid panna ilmastiku eest kaitstud korpusesse, mis on seest täidetud spetsiaalse vaiguga, mis kaitseb elektroonikakomponente välise niiskuse ja vee kondenseerumise eest. Lisaks peab kaitsev vaik olema soojust juhtiv, et elektroonikakomponentides tekkiv soojus jõuaks konverteri pinnale ja hajuks õhus. Seetõttu ei saa muundurit remondiks avada. Ühest küljest peab muundur töötama aastaringelt nii külma kui ka väga kuuma temperatuuriga, mis muudab vajaliku töökindluse saavutamise keeruliseks. Teisest küljest võib kogu seade rikneda juba siis, kui ainult üks sadadest komponentidest tõrgub. Kuid kas suudate ette kujutada, et osa päikesekatusest või -fassaadist tuleb lahti võtta lihtsalt selle tõttu, et üks paljudest muunduritest pärast aastatepikkust eksploateerimist rikki läheb?

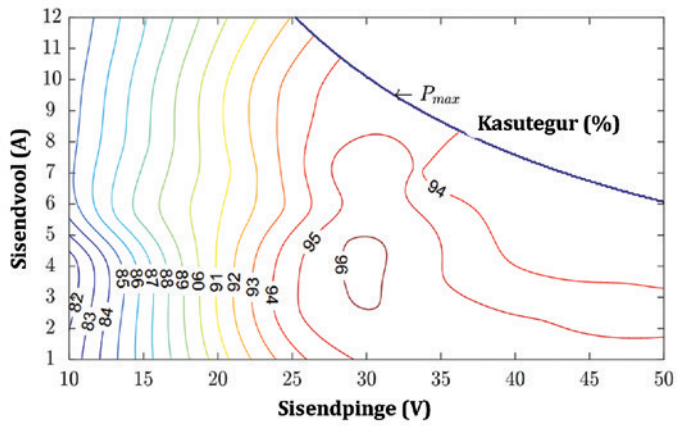
Töökindluse tagamiseks töötasime välja iseparaneva päikese-mikromuunduri. See kasutab sama skeemilahendust nagu FlexiVerter, kuid mitte sisendkarakteristiku parendamiseks, vaid muunduri töö taastamiseks pärast riket. Meie uuringud näitavad, et pooljuhtkomponendid on selle muunduri nõrgim lüli (Bakeer jt, 2024). Kuuerežiimilise muunduri skeemilahendust saab ümber konfigureerida täissildtopoloogiast poolsillaks. Kui pooljuhtlüli rikki läheb, võimaldab poolsildtopoloogia ümberkonfigureerimine jätkata seadme tööd, kasutades lihtsalt vähem lülituselemente. Selline lähenemine ei vaja täiendavaid komponente. Seega saavutatakse tõrketaluvus nullkuludega. Demonstreerisime selle lahenduse eeliseid, mis avab uusi võimalusi suuremaks töökindluseks kulutundlikes rakendustes, nagu päikeseelektrisüsteemid, kus tõrketaluvust ei peetud lisakomponentide põhjustatud kõrgete kulude tõttu varem praktiliselt rakendatavaks.

Joonisel 14a näidatud prototüüpi on integreeritud kõik abiahelad, sealhulgas odavad voolumõõteahelad rikete tuvastamiseks. Muunduri rikke tõttu lühisesse sattunud transistori saab suure tõenäosusega kasutada siiski voolu juhtiva komponendina. Prototüüp näitas kõrget kasutegurit laias pingevahemikus 10 V kuni

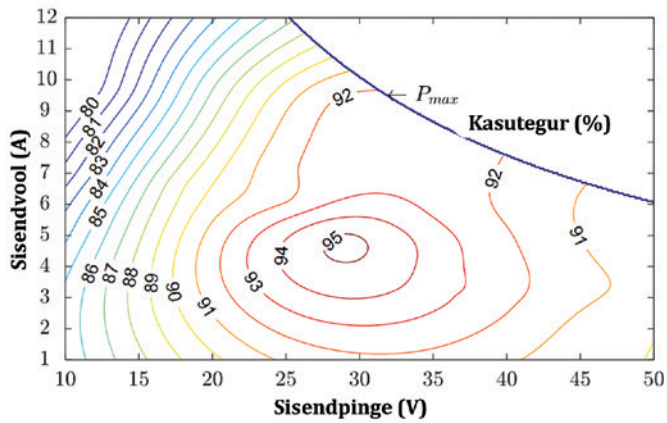




(a)



(b)



(c)

**Joonis 14.** Iseparanev päikese-mikromuundur: (a) eksperimentaalne prototüüp, (b) kasutegur enne riket ja (c) kasutegur pärast riket.

50 V, mis säilib ka pärast riket, nagu on näha jooniste 14b ja 13c võrdlemisel. Selle tehnoloogia peamiseks piiranguks on vajadus rakendada intelligentset rikkejärgset juhtimist, mis piiraks seadme väljundvõimsust. Põhjus on lihtne: allesjäänud pooljuhtlülid peavad pärast riket sama töö ära tegema. Juhtseade peab selleks piirama muunduri sisendvõimsust kõige päikesepaistelisematel tundidel. Nutikas võimsuse piirang võimaldab muunduril pärast riket töötada pea sama töökindlusega kui ennegi. Näiteks suudab antud muundur enne tõrget töödelda kuni 300 W võimsust, kuid selle töövõimsus peaks olema piiratud 200 W-ga, et tagada piisavat tööiga ka pärast riket. Praktikas ei anna see võimsuse piiramine rohkem kadu kui 12% aastas toodetud energiast, kuna meie kliima-võõndis esineb selliseid energiatootmise tipptunde harva. See on vastuvõetav kompromiss palju suurema töökindluse saavutamise nimel.

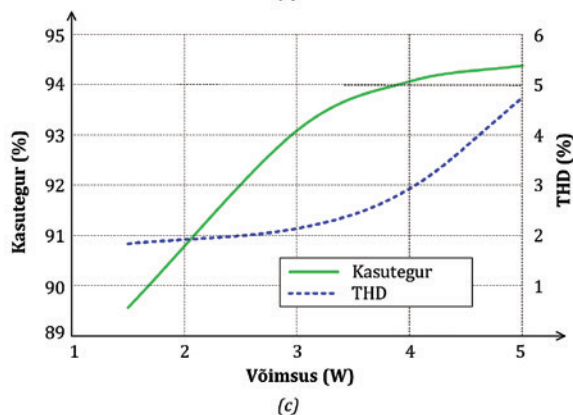
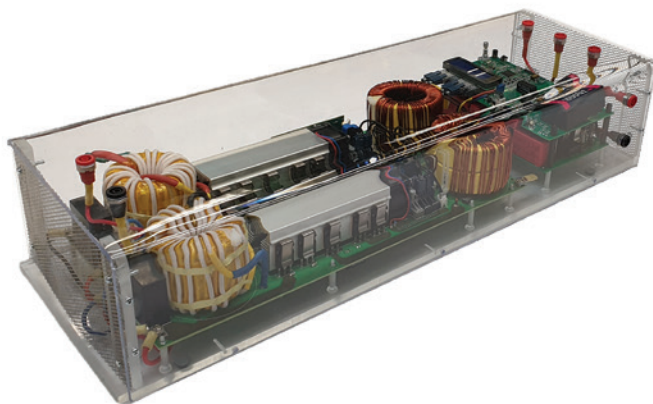
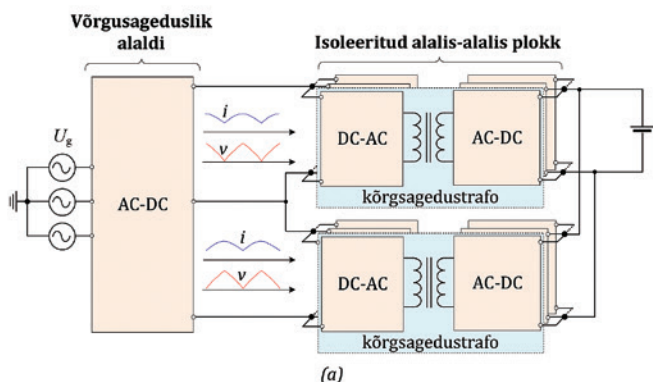
### **Elektrivõrguga isekohalduv laadija elektrisõidukitele**

Meie TMJ-põhiste süsteemide uuringud on laienenud ka elektrisõidukite laadijatele. Tänapäevases maailmas põhjustab kõrge elektrifitseerimise määr elektrivõrkude ülekoormust, st kui võrk ei suuda pakkuda või vastu võtta vajalikku võimsust. Need kasvavad probleemid on suunanud meid koostööle Daimleri ja Volkswageniga, töötamaks välja uudset elektrisõidukite laadijate tehnoloogiat. Projekt viidi ellu Euroopa jõuelektroonika keskuse koostööprogrammi (ECPE) raames. ECPE on tööstusele suunatud rahvusvaheline organisatsioon, millel on kümneid suurettevõtetest liikmeid.

Kontseptsioon põhineb meie uurimisrühmas välja töötatud suure jõudlusega alalispingemuundurite ja võrgusagedusliku vaheldi kombinatsioonil, mida on eespool mainitud ühe võtmetähtsusega TMJ kontseptsioonina. Joonisel 15a näidatud uudne laadija põhimõtteline lahendus kasutab ainult kahte alalispingemuundurit. Mõlemal on filtreeriv induktiivpool, mistõttu on see lahendus odavam kui tavalistel elektrisõidukite laadijatel, millel on kolm võrgupoolset filtreerivat induktiivpooli. Seda tehnoloogiat kasutades saame laadijaid toita ühest, kahest või kolmest elektrivõrgu faasist. Funktsiooni saab luua võrgusagedusliku vaheldi ümberkonfigureerimise ja sellega ühendatud alalispingemuunduri juhtimis-algoritmi muutmisega. Võrguga automaatne kohanemine võib olla kasulik, kui erinevates piirkondades on saadaval erinevad ühendusvõimalused (ühe- või kolmefaasiline elektrivõrk), aga ka siis, kui mõnel faasil on ülekoormus, mis on tingitud kas energia ületarbimisest või liigsest energiatootmisest lähedalasuvates päikeseelektriseadmetes.

Joonisel 15b näidatud eksperimentaalses prototüübis on kasutatud kaht paari magnetkomponente. Eespool mainitud filtreerivad induktiivpoolid moodustavad ühe paari. Eraldustrafod, mis on vajalikud elektrisõiduki laadimisel elektrihohtuse tagamiseks, moodustavad teise paari. Nagu on näha jooniselt 15c, saavutas prototüüp kasuteguri üle 94%. See on täiesti konkurentsivõimeline oma klassi

parimate kaubanduslike laadijatega, millel ei ole elektrivõrguga automaatset kohaldumisvõimet. Väärrib märkimist ka see, et see lahendus on hõlpsasti skaleeritav erinevatele laadimisvõimsustele. Samuti saab isoleeritud alalisvooluplokke muunduri väljundis ümber konfigurueerida, st laiendada selle põhimõttelise lahenduse TMJ funktsionaalsust, saavutamaks ühilduvust tüüpiliste 400 V ja uute 800 V elektrisõidukitega, nagu näiteks Hyundai Ioniq 5.



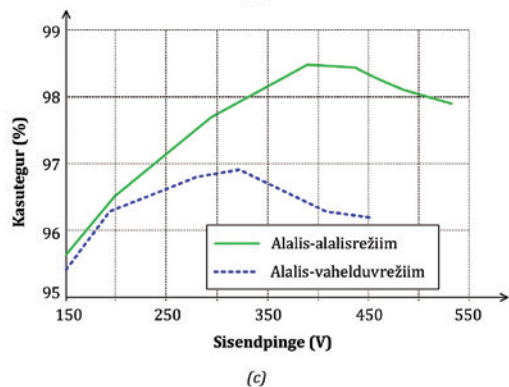
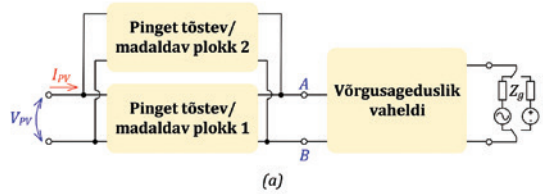
**Joonis 15.** Elektrivõrguga kohalduv elektrisõiduki laadija: (a) üldine skeemilahendus, (b) eksperimentaalne prototüüp ja (c) katseliselt määratud kasutegur ja väljundvoolu kvaliteet.

## Universaalne päikesepaneele teenindav alalis-vahelduvpingemuundur

TMJ-põhist lahendust, mis ühendab endas võrgusagedusliku vaheldi alalispingemuunduriga, kasutatakse ka elamute päikesepaneele teenindavates muundurites (joonis 16a). Sellise muunduri töötamise välja aastal 2022 (Husev jt, 2022), tuginedes joonisel 7 toodud skeemilahendusele. Topoloogias kasutatakse kahte paralleelselt töötavat alalispingemuundurit, parandamaks toitevoolu kvaliteeti. Muundur sobib päikesepaneelide integreerimiseks nii alalisvooluanovõrku kui ka tavalisse vahelduvvooluvõrku. Muunduril on kõrge kasutegur nii vahelduv- kui ka alalispingerežiimis.

Oleme seda kontseptsiooni viimastel aastatel pidevalt edasi arendanud. Tallinna tehnikaülikooli liginullenergia testhoones katsetati aktiivselt juba TRL6 taseme prototüüpi (joonis 16b). Seade rakendab TMJ lahendusel põhinevat nutikat juhtimist: muundur saab veel enne võrguga ühendamist tuvastada võrgu tüübi ja automaatselt kohaldada ka oma seadistust. Selline funktsioon avab võimalused olemasolevate hoonete moderniseerimiseks alalisvooluanovõrkudega. Seadmeid ei pea välja vahetama, mis võimaldab sujuvat üleminekut vahelduvvooluvõrkudelt elamute alalisvooluanovõrkudele. Uus muundur on ka väga tõhus. Selle mõõdetud kasutegur on üle 97% vahelduvvooluvõrku ühendatuna ja üle 98,5% alalisvooluanovõrguga ühendatuna, mis teeb selle tavaliste päikese-mikromuunduritega võrreldes vägagi konkurentsivõimeliseks (joonis 16c).

**Joonis 16.** Universaalne päikesepaneelide liidestusmuundur: (a) skeemilahendus, (b) TRL6 prototüüp, (c) alalisvoolu ja alalis-vahelduvvoolurežiimides eksperimentaalselt mõõdetud kasutegur ( $I_{PV} = 8$  A).



Kirjeldatud põhimõttelist lahendust laiendati ETag-i toel projekti EAG122 raames ka eluruumide akuenergia salvestamise süsteemidele koostöös Eesti uudsete akuenergia salvestussüsteemide arendajaga MikroMasch OÜ. See areng laiendab oluliselt eluruumide päikeseenergiasüsteemide akusalvestite koostalitlusvõimet erinevate elektrivõrkudega ja langetab seadmete maksumust, võimaldades olemasolevate elektrivõrkude oluliselt lihtsamat moderniseerimist ja lihtsat alalisvooluanovõrkudele üleminekut.

## Tulevikuplaanid

Lõpetuseks soovime tutvustada ka oma tulevikuplaane TMJ-põhiste muundurite ja nende rakenduste alal. Tallinna tehnikaülikooli jõuelektroonika uurimisrühma üks peamisi uurimissuundi on uudsete intelligentsete tehnoloogiate väljatöötamine elamute alalisvoolusüsteemide jaoks. Seetõttu asutasime hiljuti Tallinna tehnikaülikooli elamute alalisvoolu energiasüsteemide innovatsioonikeskuse (joonis 17) – euroliidu ainulaadse näidislabori, kus alalisvoolu kasutatakse iga päev kütmiseks, valgustamiseks, päikeseenergia tootmiseks, salvestamiseks jne. Olete teretulnud seda objekti külastama. Külastage ka i<sup>3</sup>DC kodulehte (<https://taltech.ee/en/i3dc-initiative>), et saada teavet elamute alalisvoolusüsteemide ja nende eeliste kohta. See uusarendus on osa Tallinna tehnikaülikooli poolt loodud laiaulatuslikumast tegevusest –i<sup>3</sup>DC algatusest, mida rakendatakse ETag-i rahastatud personaalse uurimistoetuse PRG1086 „Tulevikukindlad jõuelektroonikasüsteemid kodumajapidamiste mikro võrkudele“ raames ning uue energiatõhususe teaduse tippkeskuse ENER raames. Algatuse eesmärk on suurendada üldsuse ja tööstuse teadlikkust elamute alalisvoolutehnoloogiatest, inspireerida energiatõhususe parandamist alalisvoolutehnoloogiate kasutuselevõtu kaudu ja kiirendada uuendusi selles valdkonnas.



**Joonis 17.** TalTechi elamute alalisvoolu innovatsioonikeskus.

Fotol vasakult: Andrei Blinov, Andrii Chub ja Dmitri Vinnikov. Foto: erakogu



Veel üks uus TMJ tehnoloogia arendus on suunatud osakeste kiirendite energia-tõhususe parandamisele Euroopa tuumauuringute organisatsioonis (CERN). CERN-i tarvitav elektriline võimsus ulatub aktiivsete katsete faasis sadadesse megavattidesse. Siiski on vähe teada fakt, et osakeste kiirendi töötab tänu enam kui 6000 jõuelektronikat sisaldavale muundurile. Üht paljudest muundureid täis CERN-i ruumidest näete joonisel 18. Praeguseks oleme algatanud koostöö mitme grupiga CERN-is, et suunata neid kiirendusmähiseid toitvate alalisvoolu energiasüsteemide, muundurite ja salvestite loomisele. See kõik on vajalik, tagamaks tõhusat energiavarustust järgmise põlvkonna klüstronitele alalisvoolutoitevõrkude kaudu planeeritavas osakeste põrgutis Future Circular Collider. Samuti arendatakse ka ülitõhusat kiirguskindlat toitemuundurit, mis on vajalikud CERN-i katsetes kasutatavate paljude andurite ja mõõteseadmete toiteks. Nende teemade puhul võimaldavad meie kogemused alalisvoolu, TMJ-põhiste muundurite ja nende töökindluse alal pakkuda välja uudseid parima jõudlusega lahendusi.

Lõpuks peame oluliseks rõhutada, et TMJ-põhised jõuelektronikasüsteemid saavutavad palju parema jõudluse, kombineerides odava disaini intelligentse juhtimisega. Need omadused võimaldavad TMJ-põhiseid lahendusi käsitleda tarkvaraga määratletud jõuelektronikalahendustena, luues uue paradigma elektrienergia muundamises. Tarkvarapõhine jõuelektronika näitab suurt potentsiaali, võimaldamaks masstoota universaalseid muundureid, mis maksavad vähem kui spetsiaalsed lahendused ja lihtsustavad alalisvoolusüsteemide kasutuselevõttu. Meie motivatsioon on olla selle innovatsioonilaine esirinnas.



**Joonis 18.** CERN-i suure hadronite põrguti osakeste kiirendamise astme toiteallikad. Fotol vasakult: Dmitri Vinnikov ja Andrii Chub TalTechist ning Davide Aguglia CERN-ist. Foto: erakogu

## Tänuavaldused

Uurimistööd on finantseerinud Eesti teadusagentuur (PRG1086, EAG9 ja EAG122).

## VIITED

Bakeer, A., Chub, A.; Vinnikov, D. 2024. Self-healing photovoltaic micro-converter with zero redundancy and accurate low-cost fault detection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 71(1), 646–656, <https://doi.org/10.1109/TIE.2023.3250836>

Chub, A., Vinnikov, D. 2018-04-06. Aparaadid ja juhtimismeetodid vahelduvvoolu alaldamiseks. Patent EE201800004A.

Chub, A., Vinnikov, D., Korkh, O., Malinowski, M., Kouro, S. 2021. Ultrawide voltage gain range microconverter for integration of silicon and thin-film photovoltaic modules in DC microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(12), 13763–13778, <https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3084918>

Chub, A., Vinnikov, D., Kouro, S., Malinowski, M. 2019. Three-mode reconfigurable rectifier for DC-DC converters with wide input voltage range. – 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), 14–17 October 2019, Lisbon, Portugal. Proceedings, 4429–4435, <https://doi.org/10.1109/IECON.2019.8926994>

Husev, O., Matiushkin, O., Vinnikov, D., Roncero-Clemente, C., Kouro, S. 2022. Novel concept of solar converter with universal applicability for DC and AC microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(5), 4329–4341, <https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3086436>

Sidorov, V., Chub, A., Vinnikov, D. 2020. Efficiency improvement of step-up series resonant DC-DC converter in buck operating mode. – IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 5–7 November 2020, Riga, Latvia. Proceedings, <https://doi.org/10.1109/RTUCON51174.2020.9316574>

Sidorov, V., Chub, A., Vinnikov, D. 2021. Topology morphing control with soft transients for multimode series resonant DC-DC converter. – IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), 30 June – 4 July 2021, Souzga, the Altai Republic, Russia. Proceedings, 331–336, <https://doi.org/10.1109/EDM52169.2021.9507621>

Sidorov, V., Chub, A., Vinnikov, D. 2022b. Bidirectional isolated hexamode DC–DC converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(10), 12264–12278, <https://doi.org/10.1109/TPEL.2022.3170229>

Sidorov, V., Chub, A., Vinnikov, D., Lindvest, A. 2023. Novel universal power

electronic interface for integration of PV modules and battery energy storages in residential DC microgrids. *IEEE Access*, 11, 30845–30858, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3260640>

Sidorov, V., Chub, A., Vinnikov, D., Peng, F. Z. 2022a. Survey of topology morphing control techniques for performance enhancement of galvanically isolated DC-DC converters. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, 3, 751–777, <https://doi.org/10.1109/OJIES.2022.3225265>

Vinnikov, D., Chub, A., Liivik, E., Blaabjerg, F., Kouro, S. 2018b. Maximizing energy harvest of the impedance source PV microconverter under partial shading conditions. – *IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics, and Power Engineering (CPE-POWERENG)*, 10–12 April 2018, Doha, Qatar. Proceedings, <https://doi.org/10.1109/CPE.2018.8372556>

Vinnikov, D., Chub, A., Liivik, E., Blaabjerg, F., Siwakoti, Y. 2018a. Boost Half-Bridge DC-DC Converter with reconfigurable rectifier for ultra-wide input voltage range applications. – *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 4–8 March 2018, San Antonio, Texas, USA. Proceedings, 1528–1532, <https://doi.org/10.1109/APEC.2018.8341219>

Vinnikov, D., Chub, A., Liivik, L., Kosenko, R., Korkh, O. 2019. Solar Optiverter – A novel hybrid approach to the photovoltaic module level power electronics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(5), 3869–3880, <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2850036>

## **Dmitri Vinnikov**

Sündinud 7. aprillil 1976 Tallinnas

1999 Tallinna tehnikaülikool, energiatehnika (diplomeeritud insener)

2001 Tallinna tehnikaülikool, elektriajamid ja elektrivarustus (MSc)

2005 Tallinna tehnikaülikool, elektriajamid ja elektrivarustus (PhD)

Töötanud Tallinna tehnikaülikooli elektrotehnika instituudis alates 1999. aastast (1999–2006 teadur, 2006–2016 vanemteadur, alates 2016 juhtivteadur). Alates 2006 Tallinna tehnikaülikooli inseneriteaduskonna elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi jõuelektronika uurimisrühma juht. Ta on üks ENER-i – Eesti energiatõhususe tippkeskuse – asutajatest ja juhtivatest teadlastest. Ta oli ka külalisprofessor Riia tehnikaülikoolis (Läti) ja ITMO ülikoolis (Venemaa) ning firma Ubik Solutions OÜ teadus- ja arendusjuht. Teadusvaldkonnad, millega ta tegeleb, hõlmavad jõuelektroniliste muundurite ja juhtimissüsteemide, taastuvenergia muundamise süsteemide, impedantsiallikaga muundurite ja alalisvoolusüsteemide rakenduslikku disaini.

Pälvinud 2014 Eesti Vabariigi teaduspreemia tehnikateaduste alal ja 2016 Tšernihivi riikliku tehnikaülikooli (Ukraina), audoktori staatuse. 2017 ja 2023 Tallinna tehnikaülikooli aasta teadlane, 2021 Eesti teaduste akadeemia liige, 2023 elektri- ja elektroonikainseneride instituudi IEEE Fellow aunimetus.

### **Andrei Blinov**

Sündinud 20. juunil 1984 Tallinnas

200 Tallinna tehnikaülikool, elektriajamid ja jõuelektroonika (BSc)

2008 Tallinna tehnikaülikool, elektriajamid ja jõuelektroonika (MSc)

2012 Tallinna tehnikaülikool, elektriajamid ja jõuelektroonika (PhD)

Töötanud Tallinna tehnikaülikooli elektrotehnika instituudis alates 2011. aastast (2011–2012 teadur, 2012 vanemteadur). Täiendanud end järel doktorina Rootsi kuninglikus tehnikaülikoolis (KTH, 2013–2015). Alates aastast 2015 Tallinna tehnikaülikooli inseneriteaduskonna elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi vanemteadur. Teda huvitavad teadusvaldkonnad hõlmavad lülitavaid võimsusmuundureid, uusi pooljuhttehnoloogiaid ja energiasalvestussüsteeme.

### **Oleksandr Husev**

Sündinud 11. veebruaril 1986 Tšernihivis (Ukraina)

2007 Tšernihivi riiklik tehnikaülikool (Ukraina), elektroonika (BSc)

2008 Tšernihivi riiklik tehnikaülikool, elektroonilised süsteemid (MSc)

2012 Ukraina riikliku teaduste akadeemia elektrodünaamika instituut, pooljuht- võimsusmuundurid (PhD)

Töötanud Tallinna tehnikaülikooli elektrotehnika instituudis alates 2012. aastast (2012 inseneri ja konsultandina). Alates 2013 on ta Tallinna tehnikaülikooli inseneriteaduskonna elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi vanemteadur. Põhilised huvipakkuvad teadusvaldkonnad hõlmavad uudsete topoloogiate kavandamist, jõuelektroonika seadmete juhtalgoritme, võimsusmuundurite ja juhtimissüsteemide rakenduslikku disaini ja rakendamist ning jõupooljuhtmuundurite stabiilsuse uurimist. 2022 Tallinna tehnikaülikooli aasta noorteadlane.

## **Andrii Chub**

Sündinud 4. mail 1987 Tšernihivis (Ukraina)

2008 Tšernihivi riiklik tehnikaülikool (Ukraina), elektroonika (BSc)

2009 Tšernihivi riiklik tehnikaülikool, elektroonilised süsteemid (MSc)

2016 Tallinna tehnikaülikool, elektriajamid ja jõuelektroonika (PhD)

Töötanud Tallinna tehnikaülikooli elektrotehnika instituudis alates 2013. aastast (2013–2014 insener, 2014–2016 nooremteadur). Täiendanud end järel doktorina Kieli Christian Albrechti ülikoolis (2017, Saksamaa) ja Federico Santa Maria tehnikaülikoolis (2018–2019, Tšiili). Alates aastast 2019 Tallinna tehnikaülikooli inseneriteaduskonna elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi vanemteadur ning jõuelektroonika labori juht. Talle huvipakkuvad teadusvaldkonnad hõlmavad täiustatud alalispingemuundurite skeemilahenduste väljatöötamist, taastuvenergiast kasutatavaid elektrienergia muundamise süsteeme, energia-tõhusaid hooneid, jõuelektrooniliste muundurite töökindlust ja tõrketaluvust.