



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

## DISTANTSKAITSETE TESTIMINE OMICRONI JA RTDS SIMULAATORIGA

TESTING OF DISTANCE PROTECTIONS WITH OMICRON AND RTDS

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Siim Laidvee

Üliõpilaskood: 153419AAVM

Juhendajad: dotsent Jako Kilter,  
doktorant Marko Tealane

Tallinn, 2018.a.

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” ..... 201.....

Autor: .....  
/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 201.....

Juhendaja: .....  
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....  
/ nimi ja allkiri /

# Lõputöö kokkuvõte

<i>Autor:</i> Siim Laidvee	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> Distantkaitsete testimine Omicroni ja RTDS simulaatoriga	
<i>Kuupäev:</i> 23.05.2018	83 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendajad:</i> dotsent Jako Kilter, doktorant Marko Tealane	
<i>Töö konsultandid:</i> Andrus Reinson, Tanel Sarnet	
<i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Käesoleva lõputöö eesmärgiks on uurida erinevate distantkaitse käitumist elektrivõrkudes toimuvate protsesside raamistikus, kasutades selleks reaajasimulaatorit RTDS ja releede testseadet Omicron CMC 256. Testi objektideks on kaks erineva tootja digitaalset distantkaitset ning reaajasimulaatorisse integreeritud distantkaitse funktsioon.</p> <p>Töös tutvustatakse lühidalt elektrivõrgu releekaitse valdkonda ja keskendutakse täpsemalt distantkaitsele. Arvutatakse distantkaitsetele sätteid ning uuritakse, mida hõlmab releekaitse testimine – millised on nõuded ja kuidas viiakse seda läbi Eesti põhivõrgus. Tutvustatakse reaajasimulaatorit RTDS ja testseadet Omicron ning modelleeritakse testimise jaoks vajalik osa Eesti ülekandevõrgu 330kV süsteemist.</p> <p>Töös keskendutakse detailsemalt distantkaitse funktsioonile ja testseadmete omavahelisele võrdlemisele testide alusel. Testimine toimub TTÜ elektrisüsteemide arenduslaboris kasutades reaajasimulaatorit RTDS, testseadet Omicron CMC 256 ja kahte realselt elektrivõrgus kasutatavat distantkaitset.</p> <p>Töö tulemustest selgub, et testitud distantkaitsed käitusid ootuspäraselt ja korrektselt. Kõige kiirema toimega olid üldjuhul RTDS simulaatori sisene distantkaitse ja Tootja1 distantkaitse. Testide käigus ilmnisid reaajasimulaatori eelised võrreldes teise testseadmega.</p>	
<i>Märksõnad:</i> distantkaitse, releekaitse, releede testimine, Eesti ülekandevõrk, Omicron, RTDS simulaator.	

# Summary of the Diploma Work

<i>Author:</i> Siim Laidvee	<i>Type of the work:</i> Master's Thesis
<i>Title:</i> Testing of Distance Protections with Omicron and RTDS	
<i>Date:</i> 23.05.2018	83 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Tutor(s) of the work:</i> Associate Professor Jako Kilter, PhD student Marko Tealane	
<i>Consultant(s):</i> Andrus Reinson, Tanel Sarnet	
<p><i>Abstract:</i></p> <p>The aim on this thesis is to study distance protection relays behavior in the processes occurring in the power grid using real-time digital simulator RTDS and protection relay testing device Omicron CMC 256. Two digital distance protection relays from different manufactures and distance protection function integrated into the RTDS are used as the test objects.</p> <p>This thesis briefly introduces the field of electrical relay protection and focuses more specifically on distance protection. Necessary calculation of distance protection settings are made and testing of relay protection is studied – what are the requirements and how is it done in the Estonian transmission grid. Real-time digital simulator RTDS and protection relay testing device Omicron are also introduced. Necessary part of the 330kV transmission system is modeled for testing.</p> <p>This thesis focuses on distance protection function and comparison of test equipment. Testing is carried out in TUT electrical systems development laboratory using real-time digital simulator RTDS, protection relay testing device Omicron CMC 256 and two distance protection relays used in the transmission grid.</p> <p>As a result of this thesis it can be concluded that the distance protections operated correctly and as expected. In general the fastest protections were the RTDS integrated distance protection function and Manufacturer1 distance relay. Benefits of testing with RTDS simulator became evident compared with the other test set.</p>	
<i>Keywords:</i> distance protection, relay protection, testing of protection relays, Estonian National Grid, Omicron, RTDS, real-time digital simulator.	

# Sisukord

<b>Lõputöö ülesanne.....</b>	<b>6</b>
<b>Eessõna .....</b>	<b>8</b>
<b>Sissejuhatus.....</b>	<b>9</b>
<b>1. Releekaitse.....</b>	<b>11</b>
1.1. Releekaitse mõiste .....	11
1.2. Releekaitse põlvkonnad .....	12
1.3. Releekaitse tüübid.....	17
<b>2. Distantkaitse.....</b>	<b>19</b>
2.1. Distantkaitse toime põhimõte .....	19
2.2. Rakendusarakteristik ja astmed.....	20
2.3. Sätete arvutamise põhimõtted .....	22
2.4. Testitava skeemi sätete arvutused .....	24
2.5. Nõuded distantkaitsetele Eesti ülekandevõrgus .....	28
2.6. Kaitsereleede testimisprotseduur .....	30
2.6.1 <i>Distantkaitsete testimise standard</i> .....	30
2.6.2 <i>Vastavustestid</i> .....	31
2.6.3 <i>Vastuvõtutestid</i> .....	31
2.7. Distantkaitse funktsiooni testimine .....	32
<b>3. Modelleerimine ja testimine .....</b>	<b>34</b>
3.1. Simulaator ja testseade.....	34
3.1.1 <i>RTDS ja RSCAD</i> .....	35
3.1.2 <i>Omicron CMC</i> .....	36
3.2. Testitav skeem ja parameetrid.....	37
3.3. Teostatavad testid.....	39
3.3.1 <i>Liin K-H testid</i> .....	40
3.3.2 <i>Liin B-E testid</i> .....	41
3.3.3 <i>Liin B-A testid</i> .....	41
3.4. Tulemuste analüüs .....	42
3.4.1 <i>Liin K-H testide tulemused</i> .....	43
3.4.2 <i>Liin B-E testide tulemused</i> .....	46
3.4.3 <i>Liin B-A testide tulemused</i> .....	53
3.4.4 <i>1.-2. tsooni piiril teostatud testide tulemused</i> .....	57
<b>Kokkuvõte.....</b>	<b>70</b>
<b>Lisad .....</b>	<b>76</b>
<b>L.1. Töötsoonides teostatud testide tulemused .....</b>	<b>77</b>
<b>L.2. Esimese ja teise tsooni piiril teostatud testide tulemused .....</b>	<b>83</b>

# Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	<b>Distantkaitsete testimine Omicron ja RTDS simulaatoriga</b>
Üliõpilane:	<b>Siim Laidvee, 153419AAVM</b>
Eriala:	<b>Elektroenergeetika</b>
Lõputöö liik:	Magistritöö
Lõputöö juhendaja:	Jako Kilter, Marko Tealane
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	Detsember 2018
Lõputöö esitamise tähtaeg:	<b>Mai 2018</b>

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Instituudi direktor (allkiri)

## Teema põhjendus:

Teema valiti seoses üliõpilase töötamisega automaatika spetsialistina, mistõttu tekkis laiem huvi releekaitse seadmete käitumist uurida ja testida.

Eesti ülekandevõrgus tehakse alajaamade vastuvõtmisel releekaitse testid peamiselt Omicron CMC testseadmetega. Testseadmed annavad välja ideaalse kujuga pinget ja voolu, kuid reaalse lühise korral on olukord erinev, seega tekib küsimus, kas Omicroniga tehtud testide tulemused on usaldusväärsed ja sobilikud hindamiseks releede käitumist tegelikus elektrivõrgus.

RTDS simulaatoriga on võimalik tekitada reaalsusele vastavaid olukordi ning seetõttu on võimalik laboris võrrelda ja analüüsida, kas Omicroni baasil tehtud testid on samaväärsed või mis on erinevused. Katsete ja analüüside abil on võimalik hinnata, kas praegu Eesti põhivõrgus kasutatav lähenemisviis on mõistlik ja kas midagi on tarvis muuta.

## Töö eesmärk:

Töö eesmärgiks on uurida distantkaitse käitumist elektrivõrkudes toimuvate protsesside raamistikus, kasutades sisendina mõõtesignaale elektrisüsteemi reaajasimulaatorist RTDS ja releede testseadmest Omicron ning hinnata releede testimisprotseduure Eesti põhivõrgus.

## **Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:**

- Uuritava elektrisüsteemi konfiguratsiooni määratlemine ja mudeli koostamine RSCAD tarkvaras;
- Testida ja määratleda, kuidas käitub distantskaitse testimisel RTDS simulaatori ja Omicroniga;
- Erinevuste tekkimisel määrata ja hinnata erinevaid mõjutegureid ja nende ulatust;
- Erinevate tootjate releede käitumise testimine ja hindamine;
- Eesti põhivõrgu releede testimisprotseduuri hindamine ja analüüs.

## **Lähteandmed:**

Teoreetiline info leitakse vastavatest kirjandusallikatest ja seadmete juhenditest. Elektrivõrgu koostamiseks vajalikud andmed saadakse Eleringi andmebaasist. Mudeli koostamisel ja sätete arvutamisel saadakse infot juhendajatelt ja konsultantidelt.

## **Lõputöö konsultandid:**

Andrus Reinson – releekaitse konsultatsioon

Tanel Sarnet – RTDS mudeli koostamine ja testimine

---

Andrus Reinson (allkiri, kuupäev)

---

Tanel Sarnet (allkiri, kuupäev)

## Eessõna

Käesoleva magistritöö teema pakuti välja AS Eleringi releekaitse ja automaatika talitluse juhataja Andrus Reinsoni poolt. Lõputöö teema valik oli seotud autori tööalase huviga automaatika spetsialisti ametikohal, mistõttu tekkis soov releekaitse seadmete käitumist uurida ja testida. Vajalikud võrgu parameetrid ja andmed sai töö autor AS Eleringi geoinfosüsteemist ja CAPE võrgumudelist. Autor tänab lõputöö juhendajat Marko Tealast, kes võimaldas tööks vajaliku informatsiooni hankida ja modelleerimisel tekkivaid probleeme lahendada. Samuti olid lõputöö valmimisel suureks abiks juhendaja Jako Kilter ning lõputöö konsultandid Andrus Reinson ja Tanel Sarnet, kes nõustasid autorit töö valmimise vältel.

Adress: Pöörise 22-43, Tallinn, 12618

Telefon: +372 5909 8668

E-mail: SiimLaidvee@gmail.com

Töökoht: AS Elering, tehnoloogia osakond, automaatika spetsialist



# Sissejuhatus

Releekaitse ja automaatika roll elektrisüsteemi toimimisel jääb tavaliselt märkamata ning selle tähtsust alahinnatakse. Releekaitse ja automaatika süsteemid vastutavad selle eest, et rikke ilmnemisel võrgus jääksid tuled kodudes põlema ja igapäevaelu saaks jätkuda tavapäraselt. Releekaitse tagab süsteemi töökindluse ja minimeerib inimesele ning seadmetele tekkivat ohtu. Releekaitse ei saa ära hoida riket, kuid selle eesmärk on rike võimalikult kiirelt ja selektiivselt kõrvaldada. Distantkaitse puhul on tegemist kõrgepingevõrgus ühe enam kasutatava ja tähtsaima releekaitseadmega, mistõttu antud kaitsetüübi jaoks sätete arvutamine, seadistamine ja viimaks ka testimine on äärmiselt vastutusrikas protsess. Kaitsete mittetöötamine või liigne töötamine kujutab tõsist ohtu süsteemi töökindlusele.

Käesoleva töö eesmärgiks on uurida erinevate distantkaitse toimimist elektrivõrkudes toimuvate protsesside raamistikus. Antud teema on oluline selgitamiseks välja, kas releede testimise ja hindamise protsessid Eesti põhivõrgus on asjakohased. Lisaks annab magistritöö praktiline osa sisendinfot Euroopa Liidu poolt korraldatava Horizon 2020 raames toimuvale MIGRATE (*Massive InteGRATion of power Electronic devices*) projektile, milles Tallinna Tehnikaülikool ja Eesti ülekandevõrgu operaator Elering osalevad. MIGRATE projekti eesmärk on uurida probleeme, mis tekivad suurel hulgal taastuvelektrijaamade liitumisel võrguga. Taastuvelektrijaamad liituvad võrku läbi konverterite ning pöörlevate generaatorite osakaal süsteemis jääb üha väiksemaks, mis omakorda raskendab releekaitset tuvastada ja seda kiirelt kõrvaldada.

Antud lõputöö käigus soovitakse leida vastuseid mitmetele küsimustele. Kas releede aktsepteerimise ja testimise protseduur Eesti ülekandevõrgus on asjakohane või tuleks midagi muuta? Millised on erinevused testimisel reaajasimulaatori ja releede testseadmega? Kuidas käituvad erinevate tootjate kaitseleed mitmesuguste testimisstsenaariumite korral? Saadud vastuste põhjal analüüsitakse, mis võib olla erinevuste tekkimise põhjuseks. Vajalik info modelleerimiseks saadakse Eleringi andmebaasidest.

Käesoleva magistritöö esimene peatükk juhatab lühidalt sisse releekaitse valdkonda. Selles peatükis kirjeldatakse releekaitse olemust ja eesmärki. Defineeritakse releekaitse mõiste ja kirjeldatakse releekaitse toime põhimõtteid. Kirjeldatakse releekaitse arengut läbi erinevate põlvkondade ja seadmete ning selgitatakse iga põlvkonna eeliseid ja puudusi. Lisaks tuuakse

välja erinevaid releekaitse tüüpe, kuidas neid liigitada ning millised on erinevate kaitsetüüpide peamised rakendusvaldkonnad.

Antud töö teises peatükis süvenetakse detailsemalt distantskaitse valdkonda. Kirjeldatakse distantskaitse toime põhimõtet, meetodikat ja rakendamise võimalusi. Selgitatakse erinevat tüüpi distantskaitsete karakteristikute eeliseid ja puudusi ning kuidas distantskaitse loogikat aja jooksul arendatud on. Keskendutakse distantskaitse sätete arvutuse meetodikale ning kirjeldatakse sätete ja tsoonide määramist distantskaitisel. Töö teises jaotises tuuakse välja antud lõputöö jaoks vajalikud sätete arvutused kasutades CAPE võrgumudelit. Samuti kirjeldatakse teises peatükis Eesti ülekandevõrgu poolt esitatavaid nõudeid distantskaitsetele, selgitatakse releede testimisprotseduure ja kirjeldatakse, milliseid teste peavad releed, eelkõige distantskaitseid, läbima. Selgitatakse distantskaitse funktsiooni testimist ja uuritakse, mida sätestab distantskaitsete testimise standard.

Kolmandas ehk viimases peatükis kirjeldatakse lõputöö testimise osa. Kolmanda jaotise esimeses pooles keskendutakse RSCAD tarkvaraga modelleerimise, RTDS simulaatori ja Omicroni testseadmega testide teostamise selgitamisele. Ühtlasi kirjeldatakse täpsemalt eelnimetatud seadmeid ja nende tarkvarasid. Kolmandas peatükis on välja toodud ka lõputöö testitav skeem, skeemi valikukriteeriumid ja skeemi parameetrid. Selgitatakse lahti teostavate testide loogika ja põhimõtted. Kolmanda peatüki teises pooles kirjeldatakse, mida testide käigus võrreldakse ja keskendutakse detailsemal tulemuste analüüsile.

# 1. Releekaitse

Releekaitseks nimetatakse seadet või seadmete kogumit, mille ülesanne on elektrivõrgus mistahes rikkest tekkinud avariolukord likvideerida. Releekaitse eesmärgiks on võimalikult kiirelt ja selektiivselt rike elektrivõrgus eraldada, vältides sellega ohtu inimestele ja seadmetele ning takistades avarii laienemist üle võrgu. Releekaitse seadmeid liigitatakse peamiselt põlvkondade ja tüüpide järgi.

## 1.1. Releekaitse mõiste

Releekaitse eesmärk ei ole rikke ära hoidmine. Avastades rikke, annab kaitse käsu võimsuslülititele rikkis element võrgust välja lülitada. Releekaitse seadmete puhul peab tagatud olema kiirus, selektiivsus ja töökindlus. Kaitsetel on viis põhiomadust, mis on ka üheks liigituse aluseks [1]:

- tunnussuurus;
- toimekiirus;
- selektiivsus;
- rakendumise ajaline järgnevus;
- tunnussuuruse muutumise suund kaitse mõõteosa rakendumisel.

Releekaitse avastab rikkeid tunnussuuruse põhjal. Tunnussuurus on füüsikaline suurus, millele kaitse mõõteosa reageerib. Ühel kaitse seadmel võib olla ka mitu tunnussuurst. Tunnussuursi on kahte liiki: elektrilised ja mitteelektrilised. Mitteelektrilisteks tunnussuursteks on näiteks valgus, temperatuur, rõhk, gaasi- ja vedelikunivoo jne. Elektrilisteks tunnussuursteks on vool, pinge, sagedus, faaside vaheline nurk, takistus, võimsus, lisaks veel elektriliste suuruste funktsioonid ja suuruste erinevused kaitseobjekti otstes ja rööpahelates. [1]

Releekaitse toimekiirust nimetatakse rakendusajaks. Kaasaegsed releedel võimaldavad tagada alla ühe millisekundi jäävat rakendusaega. Toimekiiruse järgi liigitatakse kaitse hetk- ja viitkaitseteks [1]. Nagu nimi ka ütleb, siis hetkkaitse puhul rakendub kaitse koheselt ja rakendumiskiirust jäävad piirama vaid tehnilised võimalused. Viitkaitse puhul aeglustatakse rakendumist tahtlikult, kui olukord seda ette näeb. Mida kiiremini suudetakse rike välja lülitada, seda väiksemad on vigastused seadmetele ning seda kindlamini saab tagada võrgus stabiilsuse [2]. Tahtliku viite tekitamisega tagatakse kaitsete omavaheline selektiivsus.

Selleks, et rikkekoht võrgust võimalikult väikese arvu elementide väljalülitamisega eraldada, peab kaitse olema selektiivne ehk valiv. Selektiivsuseks nimetataksegi kaitse võimet tuvastada rikke täpne asukoht, eristatakse absoluutset ja suhtelist selektiivsust [1]. Esimese puhul on tegu kaitsega, mis toimib elektriliste suuruste võrdlemisega objekti otstes. Kaitsetsooniks on sellise kaitse puhul kogu vaadeldavasse objekti kuuluv seadmete kogum. Seda tüüpi kaitse on näiteks diferentsiaalkaitse. Absoluutselt selektiivne kaitse on üldjuhul üheastmeline [1]. Suhteliselt selektiivse kaitse selektiivsus ja toimimine sõltuvad elektriliste suuruste mõõtmisel objekti ühest otsast. Seda tüüpi kaitse on näiteks distants- või volukaitse. Suhteliselt selektiivne kaitse on üldjuhul mitmeastmeline ja võib toimida ka väliste objektide reservkaitsena [1].

Kaitsed jagatakse rakendumise ajalise järgnevuse järgi põhi- ja reservkaitseteks. Põhikaitse on rikke eraldamisel prioriteetseks kaitseks. Tähtsamate objektide kaitseks kasutatakse sageli ka mitut põhikaitset. Selleks, et tõsta releekaitse töökindlust, kasutatakse reservkaitset. Reservkaitse on üldiselt viitega kaitse ja rakendub, kui etteantud aja jooksul ei ole põhikaitse rikut kõrvaldanud. [1]

Kaitse rakendumist põhjustava tunnussuuruse muutumissuuna järgi eristatakse üle- ja alakaitseid. Üle- ehk liigkaitse rakendub tunnussuuruse kasvul üle lubatud väärtuse ja ala- ehk minimaalkaitse rakendub tunnussuuruse vähenemisel alla lubatud väärtuse. Liigkaitseteks on näiteks diferentsiaal-, ülepinge- ja rõhukaitse ja minimaalkaitseteks distants-, alasagedus- ja alapingekaitse. [1]

## **1.2. Releekaitse põlvkonnad**

Releekaitse võib jagada riistvara poolest ja ajalooliselt kolme põlvkonda [3]:

- elektromehaanilised releed;
- staatilised releed;
- mikroprotsessorkaitse.

Traditsioonilised ehk elektromehaanilised releed on esimese põlvkonna kaitserleed. Tänapäeval enam seda tüüpi releesid ei paigaldata ja nende osakaal elektrisüsteemis väheneb kiirelt, kuid teatud piirkondades Eestis ja ka mujal maailmas on neid siiski veel arvestataval hulgal kasutusel. Elektromehaanilise relee põhiosaks on ankrust ja ikkest koosnev magnetahel ja magnetahelat ümbritseb vähemalt üks mähis [3]. Takistusmoment relees tekitatakse üldjuhul vedruga ja töömoment vooluga, mis tekitab magnetvoo ning relee rakendub, kui töömoment ületab takistusmomendi ja hõõrdemomendi summa [3]. Relee rakendumisel muudab ankur

füüsiliselt oma asendit ruumis ja kontakti liikuv osa on ankruga mehaaniliselt seotud, seega relee rakendumine tähendab kontaktide avanemist või sulgumist [3]. Relee tagastub, kui töömomendi ja hõõrdemomendi summa muutub väiksemaks kui takistusmoment [3]. Elektromehaanilised releed on kujutatud joonisel 1.1.



*Joonis 1.1 Elektromehaanilised releed alajaamas*

Elektromehaanilisi releesid saab tömomendi tekitamise viisi järgi liigitada veel omakorda [3]:

- elektromagnetilised releed;
- elektrodünaamilised releed;
- induktsioonidünaamilised releed;
- induktsioonreleed;
- magnetelektrilised releed;
- polariseeritud releed;
- keelreleed.

Teise põlvkonna seadmed on staatilised releed, mis said alguse releekaitse mõõteosade võrdlusskeemidest [3]. Need seadmed võimaldasid võrrelda mooduleid ja faase [3]. Staatilised releed koosnevad pooljuht automaatikaseadmetest (diodid, transistorid) ja suurtest integraallülitusseadmetest (aktiivelemendiks on operatsioonivõimendi) [3]. Staatilised releed olid küll kiirema toimeajaga kui neile eelnenud elektromehaanilised releed, kuid suureks puuduseks oli nende madal töökindlus. Võrreldes elektromehaaniliste releedega, suurenes staatiliste releede puhul oluliselt üksikelementide arv, kuid releedel puudus automaatkontrolli teostamise võimalus. Staatilised releed Eestis ülekandevõrgus puuduvad, sest elektromehaaniliste releede kõrvale kasutusele neid ei võetud ja 1990ndate lõpul hakati kasutusele võtma juba mikroprotsessorkaitseid. Staatilised releed olid üsna levinud lääneriikides, kuid viimase releekaitse põlvkonna tulekuga on hakatud neid samuti hoogsasti välja vahetama. Teise põlvkonna distantskaitse releed on kujutatud joonisel 1.2



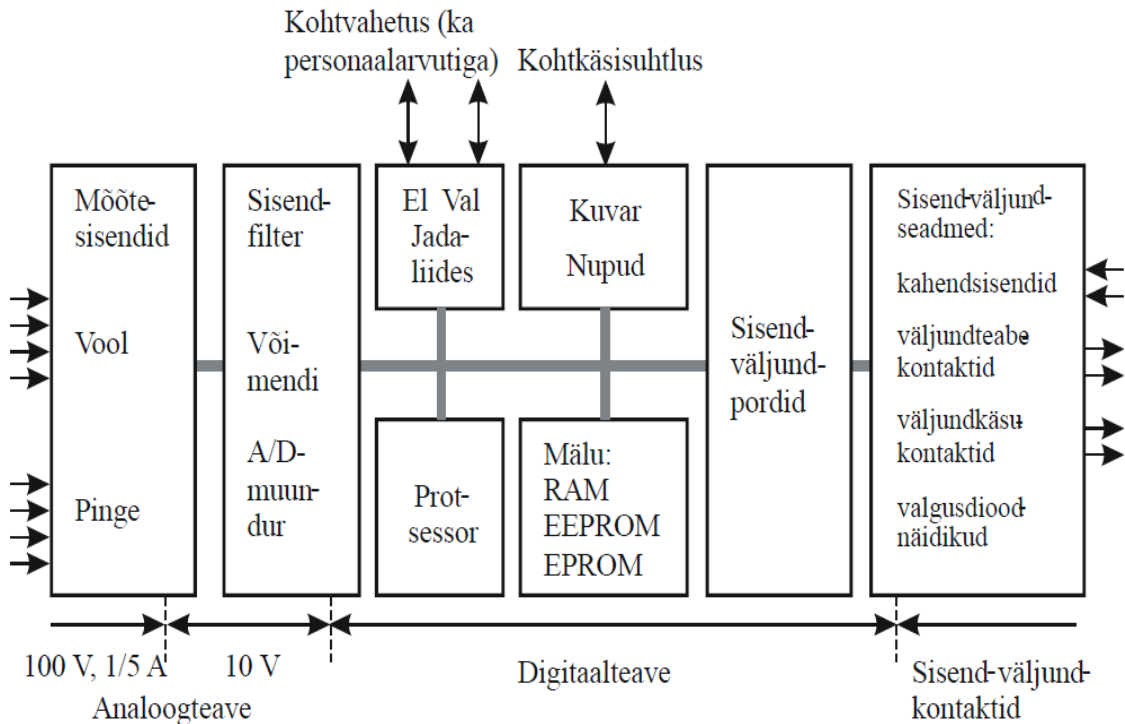
Joonis 1.2 Staatiline distantkaitse releed [4]

Kolmanda ehk viimase põlvkonna releekaitset nimetatakse mikroprotsessorkaitseks, sest tegu on mikroprotsessoritel põhinev kaitserelega. Kasutatakse ka nimetusi digitaalne ja numbriline kaitserelee. Võrreldes eelnevate põlvkondade kaitsereleedega, on mikroprotsessorkaitse kiirem, töökindlam, kompaktsem ja võimekam. Sel kaitisel puuduvad liikuvad osad ning rele teostab ise pidevalt automaatkontrolli. Mikroprotsessorkaitseid peetakse lausa nii töökindlaks, et neil sisuliselt puudub vajadus perioodilise hoolduse järele. Lisaks kaitsetoimingutele on mikroprotsessorkaitisel automaatika, andmehõive ja andmeedastuse funktsioonid. Kaasaegsed mikroprotsessorkaitse suudavad ühes seadmes omada mitut erinevat kaitsefunktsiooni, näiteks üks mikroprotsessorkaitse võib samal ajal omada nii distantskaitse kui ka volukaitse funktsiooni, olles samal ajal veel lahtris olevate seadmete juhtimisterminal. Mikroprotsessorkaitseid on kujutatud joonisel 1.3.



*Joonis 1.3 Mikroprotsessorkaitseid [5]*

Mikroprotsessorikaitseid töötati välja juba 1980ndatel, kuid laiemalt hakati neid kasutusele võtma 1990ndate teises pooles. Sellest ajast alates on toimunud tohutu areng ja mikroprotsessorikaitseid on järk-järgult välja vahetamas eelmiste põlvkondade releekaitseseadmeid. Mikroprotsessorikaitse funktsionaalne plokk skeem on toodud joonisel 1.4.



**Joonis 1.4 Mikroprotsessorikaitse plokk skeem** [3]

Mõõtesisendite plokis isoleeritakse galvaaniliselt kaitseobjektide mõõtetrafodelt saadavad pinged ja voolud kaitseahelast. Muundurplokis toimub pinge- ja voolukõverate filtreerimine, võimendamine ja digitaliseerimine. Digitaliseerimine põhineb diskreetimisel, kus fikseeritakse 2...40 väärtust voolu- või pingekõvera kohta ühes perioodis. Mida suurem on diskreetimissagedus, seda täpsem on tulem. Muundurploki väljundist saadakse mõõtesuuruste arvvaartused. Erinevate liideste ja kuvari kaudu käib teabevahetus. Liides võib olla nii elektriline kui ka optiline. Mikroprotsessorikaitse on vähemalt üks protsessor, mida täiuslikum on kaitse, seda enam on ka protsessoreid. Mäluplokk koosneb muutmälust (*RAM*), programmeeritavast elekterkustutusega püsिमälust (*EEPROM*) ja programmeeritavast püsिमälust (*EPROM*). Kasutajal on ligipääs muutmälule, mis sisaldab käidu- ja rikkeandmeid. Spetsiaalse tarkvaraga on näiteks seadistamisel ka ligipääs programmeeritaval püsिमälule, kuhu sisestatakse sätteid ja tehakse vajalikud konfiguratsioonid. *EEPROM*-mälus paikneb kaitse tarkvara. Andmete säilimise tagab patareitoide. Sisend- ja väljundpordid võimaldavad nelja liiki teabevahetust: [3]



- kahendsisend on mõeldud sama kaitseobjekti muude kaitsete teabe sisestamiseks;
- väljundteabekontaktid toimivad kaitse rakendumisel ja tõrke tuvastamisel;
- väljundkäsukontaktid annavad võimsuslülititele väljalülituskäsu;
- valgusdiodnäidikud teatavad kaitse rakendumisest või tõrkest.

### 1.3. Releekaitse tüübid

Releekaitse puhul võib rääkida kolmest põhiklassist ja nimetada neid järgnevalt [3]:

- elemendikaitse – elektrisüsteemi elemendi individuaalkaitse (kahe rööpelemendi puhul ka ühiskaitse), mida mõistetaksegi tavapärasel mõttes releekaitseks;
- süsteemikaitse – elektrisüsteemi elementide kogumi, süsteemi osa või tervet süsteemi hõlmav kaitse;
- sisselülitusautomaadid – alajaama kommutatsiooniseadmete lülitamiseks mõeldud automaadid, mis on määratletud vastavalt programmile.

Releekaitse võib tüüpide kaupa liigitada nelja rühma:

- voolukaitse;
- distantskaitse;
- diferentsiaalkaitse;
- muud kaitsed.

Voolukaitse on üks lihtsamaid ja levinumaid kaitsetüüpe. Voolukaitsed leiavad kasutust alates madalpingevõrgust kuni ülikõrgepingevõrguni. Tegemist on suhteliselt selektiivse kaitsega. Voolukaitse tunnussuuruseks on ahelat läbiv voolumoodul või voolumoodul ja voolufaas [3]. Voolukaitseteks on näiteks liigvoolukaitse, kereühenduskaitsed, faasidevaheliste lühiste kaitse, maalühiskaitse, neutraalivoolukaitse ja neutraalnihkekaitse, lisaks veel madal- ja keskpingel kaitseautomaadid ning sulavkaitsmed [3]. Madal- ja keskpingel kasutatakse voolukaitset üldiselt põhikaitsena, kõrgepingevõrkudes pigem reservkaitsena. Vajadusel saab voolukaitset täiendada ka pingeloaga [3].

Distantskaitse on kõrgepingevõrkudes levinuim põhikaitse. Keskpingel on samuti kasutusel, kuid mitte nii laialdaselt kui kõrgepingel, madalpingel ei kasutata üldse. Distantskaitse tunnussuuruseks on takistus, enamasti näivtakistus, vahel ka reaktiiv- ja aktiivtakistus [3]. Kasutatakse nii faasidevaheliste lühiste kui ka maalühiskaitsena [3]. Distantskaitse puhul on tegu suhteliselt selektiivse minimaalkaitsega. Kasutatakse põhikaitsena, kui ei ole täiuslikuma

kaitse võimalust (diferentsiaalkaitse). Sõltuvalt vajadusest on distantskaitse kas hetk- või viitkaitse. Distsantskaitse on astmeline kaitse, astmete arvu võimalus sõltub tootjast ja seadmest, kuid üldiselt kasutatakse kuni viit astet. Distsantskaitse on võimeline tagama selektiivsust mistahes konfiguratsiooniga võrgus ning kaitsetsoonid on konkreetselt piiritletud [3]. Tegemist on ühe kõige keerulisema releekaitsega. Distsantskaitse on võimalik muuta absoluutselt selektiivseks kaitseks lisades sidekanali kaitstavale objektile [3].

Diferentsiaalkaitse puhul on tegemist täielikult selektiivse kaitsega. Diferentsiaalkaitset jagunevad omakorda kaheks: pikidiferentsiaalkaitse (ja võrdluskaitse) ning põikidiferentsiaalkaitse [3]. Pikidiferentsiaalkaitse tunnussuuruseks on voolumoodulite või voolumoodulite ja –faaside või elektrilise suuruse suuna erinevus kaitseobjekti otstes [1]. Lihtsustatult öeldes peab kaitseobjekti ühest otsast sisenev ja väljuv vool olema võrdne. Põikidiferentsiaalkaitse tunnussuuruseks on voolu kaitseobjekti rööpahelate vahel jagunemise erinevus [1]. Diferentsiaalkaitset kasutatakse põhiliselt kõrgepingevõrkudes ja tegemist on alati viiteta põhikaitsega. Vajadusel kasutatakse sidekanalit, näiteks liinide puhul. Üldjuhul on tegemist üheastmelise kaitsega, kuid vajadusel ka kaheastmeline [1]. Diferentsiaalkaitse on tööpõhimõttelt suhteliselt lihtne kaitse.

Viimane releekaitse rühm ehk muud kaitset sisaldab ülejäänud kaitsetüüpe, mis võivad olla nii elemendi-, kui ka süsteemikaitset [1] [3]:

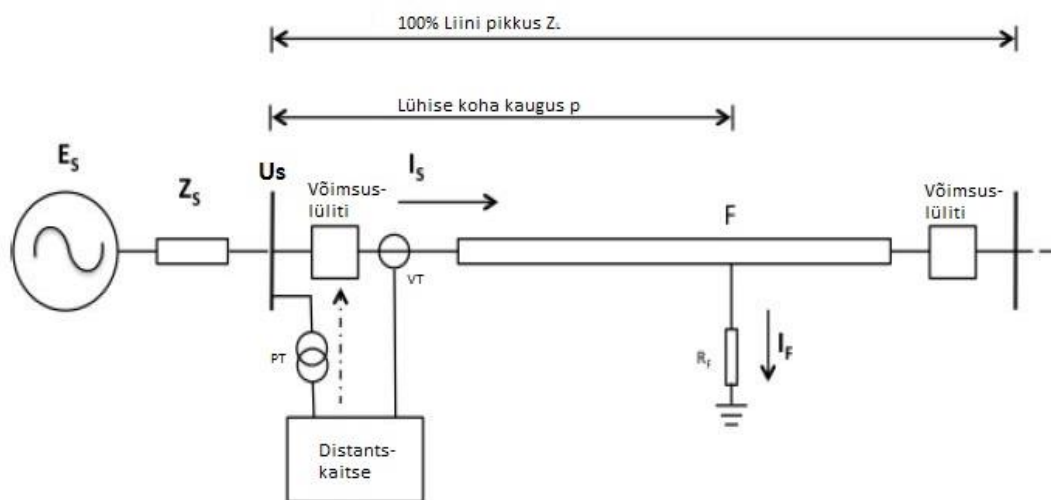
- pingekaitse – tunnussuurus on faasidevaheline pinge või vastujärgnevuspinge;
- sageduskaitse – tunnussuurus on sagedus (nt alasageduskaitse koormusvähendusautomaatikana või ülesageduskaitse süsteemi jaotuskaitse);
- liigvookaitse – tunnussuurus on pinge ja sageduse suhe või 5. harmoonik;
- sünkronismikaotuskaitse – tunnussuurus on aktiivvõimsusvoogude järsk muutus, ülekande faasinurk või asünkroontalitluse algus;
- võimsuslüliti tõrkekaitse – lüliti tõrke tunnuseks on lühise pikk kestvus;
- elektriakaarekaitse – tunnussuuruseks on valgusimpulss;
- gaasikaitse (Buchholzi rele) – tunnussuurus on gaasimaht ja õlinivoo kiirus. Kasutatakse ka trafo ühe põhikaitse;
- termokaitse – tunnussuurus on kaitseobjekti temperatuur või faasivoolu ruutintegraali aja järgi;
- rõhukaitse – tunnussuurus on rõhu väärtus.

## 2. Distantkaitse

Distantkaitse on kõrgepingevõrgus üks levinumaid põhikaitseid. Distantkaitse tunnussuuruseks on takistus. Tegu on suhteliselt selektiivse kaitsega ehk mõõtmine toimub kaitseobjekti ühest otsast. Distantkaitse on võimeline tagama selektiivsust mistahes konfiguratsiooniga võrgus, kuid tegu on üsna keeruka kaitsetüübiga [3]. Distantkaitset kasutatakse nii faasidevaheliste- kui maalühiskaitsena [3]. Distantkaitset kasutatakse liinide ja trafode kaitseks.

### 2.1. Distantkaitse toime põhimõte

Distantkaitse tuvastab rikkeid mõõtes pinget ja voolu kaitseobjekti ühes otsas ning antud parameetrite põhjal arvutatakse takistus. Saadud takistust võrreldakse pidevalt etteantud sätetega ning selle põhjal relee otsustab kas ja millal saata väljalülituskäsk [6]. Kui saadud takistus on väiksem etteantud sätetest, siis on tegemist rikkega ja relee rakendub [6]. Distantkaitse puhul ei ole tegu elemendipõhise kaitsega ja distantkaitse töötab mitme astmelisena. Distantkaitse üheks suureks eeliseks ongi teiste kaitseobjektide reservkaitsena töötamine [7]. Distantkaitse toime põhimõtte skeem on toodud joonisel 2.1.



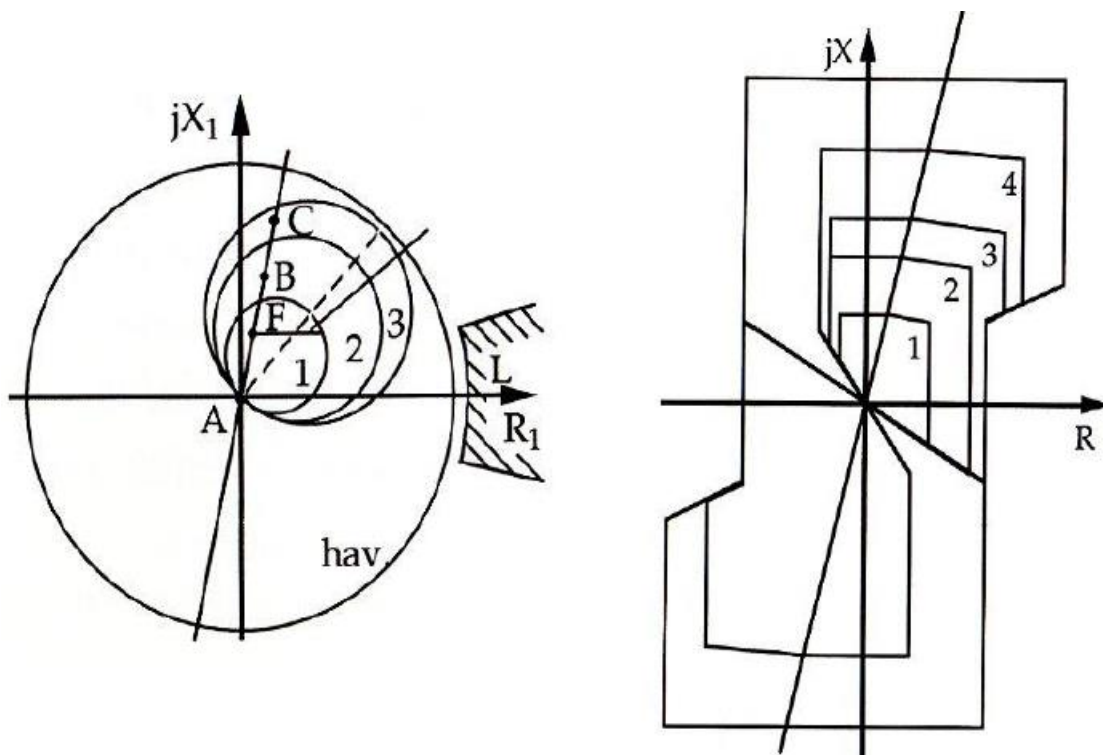
Joonis 2.1 Distantkaitse töö põhimõte [6]

Distantkaitse mõõteelemendiks on takistusrelee, mis reageerib liini  $Z$ ,  $X$  või  $R$  takistusele. Liini faasitakistused relee paigalduskohast kuni lühisekohani on proportsionaalsed vastava liini osa pikkusega. Järelikult sõltub takistusrelee toimimine lühisekoha kaugusest. Selleks, et selektiivsust tagada, configureeritakse distantkaitse üldjuhul suunatud ja mitmeastmelise kaitsena [2]. Samasuunaliste astmete selektiivsuse tagamiseks kasutatakse viiteid.

Distantskaitsete seadistamise põhimõtted on võrguettevõtetel erinevad, kuna elektrivõrgud ei ole identsed ja lisaks on mõne võrguhalduri kaitsete filosoofia konservatiivsem kui teisel. Eesti ülekandevõrk on võrdlemisi lihtne, sest puuduvad väga pikad- ja paralleelliinid. Seetõttu on Eesti põhivõrgus lähenemine kasutada distantskaitseid nelja- või viieastmelistena, millest kolm on suunatud kaitstava objekti poole ja ülejäänud astmed vaatavad seljataha. Väga keeruka võrgu puhul võib olla kolmanda astme selektiivsuse tagamine äärmiselt keeruline.

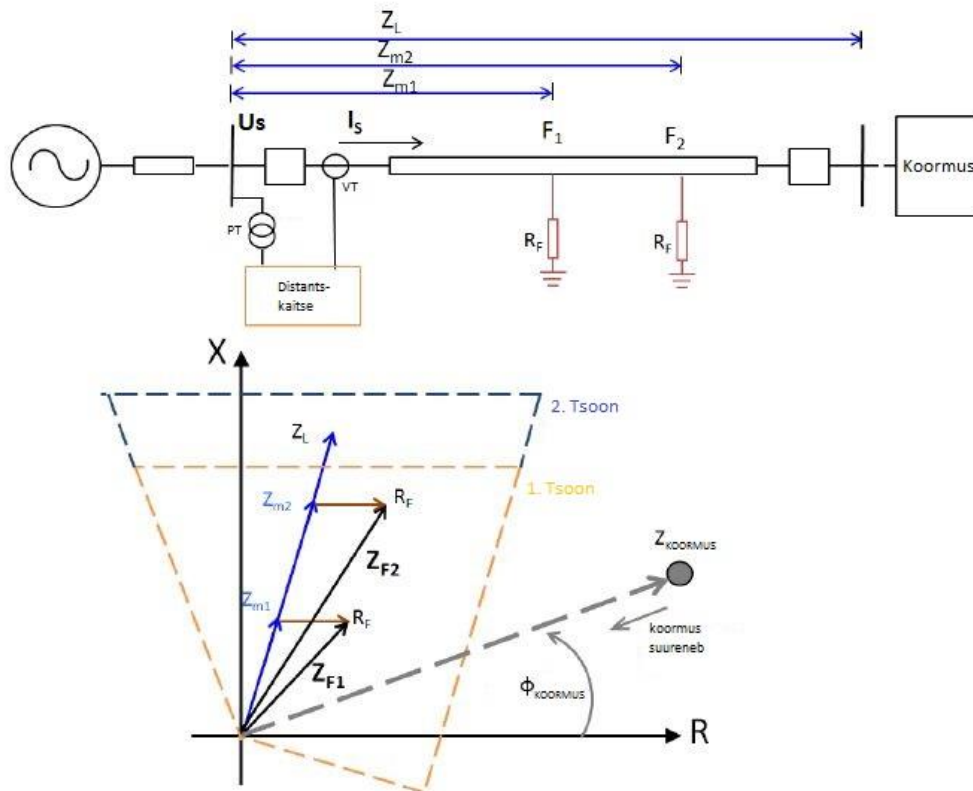
## 2.2. Rakenduskarakteristik ja astmed

Tänapäevased mikroprotsessorikaitseid kasutavad üldjuhul hulknurkse karakteristikuga distantsreleed, sest see võimaldab kõige optimaalsemalt määratleda kaitsetsooni. Mõned tootjad on releedesse jätnud võimaluse kasutada ka ringikujulist (nn. MHO) karakteristikut, mis pärineb elektromehaanilistelt releedelt. MHO ringikujuline karakteristik on tingitud elektromehaanilise relee liikuvatest osades. MHO karakteristik puuduseks on asjaolu, et seal ei ole võimalik määrata  $X$  ja  $R$  väärtusi eraldi kaitsetsoonide piiridel nii, nagu seda võimaldab hulknurkne karakteristik. Mitmed võrguhaldurid on traditsioonilise lähenemise tõttu jäänud endiselt MHO karakteristikute juurde, kuigi see kitsendab mikroprotsessoril põhineva distantskaitse võimekust. Joonisel 2.2 on illustreeritud MHO ja hulknurkse karakteristikuga distantsreleesid.



Joonis 2.2 MHO karakteristik ja hulknurkne karakteristik [3]

Hulknurkne karakteristik võimaldab sisestada releesse aktiiv- ning reaktiivtakistuse väärtused eraldi. Lisaks võimaldab hulknurkse karakteristikuga kasutamine vajadusel tsooni piirist n-ö tüki välja lõigata, et vältida suurel koormusel liigset rakendumist. Kui tegu ei ole väga pikkade liinidega, kasutatakse üldjuhul reaktiivtakistuse releed, sest see tagab selektiivsema ja kiirema töötamise [7]. Reaktiivtakistuse rele ei ole mõjutatud aktiivtakistusest ehk ei sõltu kaaretakistusest, mis võib teatud juhtudel olla küllaltki suur võrreldes liini näivtakistusega.



**Joonis 2.3 Rakenduskarakteristik  $X - R$  tasapinnal [6]**

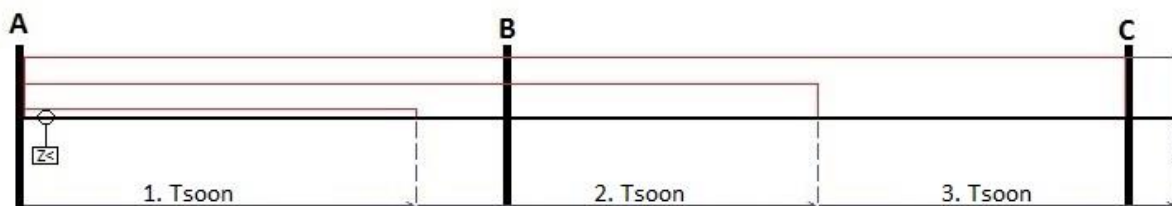
Joonisel 2.3 on kujutatud hulknurkse rakenduskarakteristikuga distantskaitse toime põhimõte. Normaaltalitusel vastab rele mõõdetav väärtust koormuse näivtakistusele  $Z_{\text{koormus}}$ . Koormuse suurenedes väheneb näivtakistus, seega peavad astmed ehk distantskaitse tsoonid olema valitud selliselt, et maksimaalse koormuse korral ei oleks näivtakistus väiksem kui tsooni säte. Pinge ja voolu vaheline nurk  $\Phi_{\text{koormus}}$  sõltub aktiiv- ja reaktiivvõimsuse suhtest.  $Z_L$  kujutab kogu liini näivtakistust. Lühise korral muutub näivtakistus järsult väiksemaks, sattudes distantskaitse tsooni. Joonisel 2.3 on näha, et lähemal asuva lühise  $F_1$  korral mõõdab rele väiksema tulemuse kui kaugema lühise  $F_2$  korral. Elektriakaare, maapinna või muu lühiseahela aktiivtakistus  $R_f$  liitub samuti ja tulemuseks on lühise näivtakistus  $Z_{F1}$  või  $Z_{F2}$  [7].

Hulknurkse karakteristikuga distantsrelee reaktiivtakistuse  $X$  ja aktiivtakistuse  $R$  sätted seatakse vastavalt kaitstavate liini parameetritele. Töötsooni määramisel arvestatakse ka liini näivtakistuse nurka, seetõttu ei ole rakenduskarakteristik rööpkülliku kujuline. Joonisel 2.3 on distantskaitse esimene tsoon piiritletud oranži hulknurgaga ja teine tsoon sinise hulknurgaga. Nagu on jooniselt näha, siis esimene tsoon ulatub 85-90% liini pikkuseni ja teine tsoon üle kaitstava liini pikkuse.

Teoreetiliselt on võimalik distantskaitse esimesse tsooniga hõlmata 100% liini pikkusest, kuid praktikas pole tegemist väga mõistliku lahendusega. Arvestada tuleb relee ja voolutrafo mõõteveaga ning liinilõigu takistuse ebatäpsusega, mis leitakse üldjuhul arvutuslikult, mitte mõõtes [7]. Nendest teguritest tingituna võivad tekitada olukorrad, kus kaitse selektiivsus pole enam tagatud ja kaitse rakendub liigselt. Varutegur (10-15%) arvestatakse seetõttu tahtlikult esimese tsooni tööalasse, mistõttu ulatub distantskaitse esimene tsoon 85-90% liini pikkuseni [7]. Teine tsoon jääb vahemikku 120% kaitstava liini takistusest kuni 72% üleulatuva liini takistuseni [7]. 72% on tingitud samuti varutegurist ( $0,85 \cdot 0,85 = 0,72$ ) ehk vaadeldava liini teine tsoon ei tohiks ulatuda kaugemale, kui üleulatuva liini esimene tsoon.

### 2.3. Sätete arvutamise põhimõtted

Antud töös tehakse sätete arvutamisel teatud lihtsustusi. Vaadeldakse ainult kolme ette poole ehk kaitstava objekti poole suunatud tsooni, taha ehk kaitstavast objektist eemale suunatud tsoone antud töös ei kasutata. Sätted arvutatakse reaktiivtakistuse  $X$  põhjal ja aktiivtakistus  $R$  määratakse tinglikult kahekordne reaktiivtakistuse väärtus. Aktiivtakistus valitakse üldjuhul suhteliselt suur, et kaitsetsoon võimaldaks kaitsta suure üleminekutakistuse eest. Viited valitakse esimesele astmele 0 s, teisele astmele 0,4 s ja kolmandale astmele 0,7 s. Antud viited on valitud tinglikult sellised, et joonisel 2.4 kujutatud liini A-B kaitse teine ja kolmas tsoon ei hakkaks liigselt reageerima liinil B-C toimuvatele lühistele, lubades eelnevalt liini B-C kaitset tööta ja tagades sellega kaitsete selektiivsuse.



Joonis 2.4 Distantskaitse tsoonide ulatus

Joonisel 2.4 on illustreeritud distantskaitset alajaamas A liini A-B jaoks kolme tsooni tööpiirkonda. Nagu eelnevas punktis mainitud, siis esimese tsooni ulatuseks määratakse tavaliselt 85-90% liini pikkusest tingituna varutegurist, sellest suurem väärtus toimiks ebaselektiivselt. Distantskaitse esimene aste on üldjuhul hetkkaitse ja töötab ilma viiteta [3]. Esimese astme reaktiivtakistus leitakse avaldisega:

$$X_{Z1} = 0,85 * X_{AB} \quad (2.1)$$

Kus

$X_{Z1}$  - distantskaitse esimese astme reaktiivtakistuse säte;

$X_{AB}$  - liini A-B reaktiivtakistus.

Distantskaitse teine aste peab täielikult ära kaitsma vaadeldava liini. Seega peab teise tsooni ulatus olema vähemalt 120% liini A-B pikkusest ehk 100% liini pikkust korda varutegur 1,2. Samas ei tohi liini A-B teine tsoon ulatuda kaugemale, kui 72% järgmise liini B-C pikkusest, et tagada kooskõla liini B-C kaitse astmetega. Lisaks tuleb arvestada ka voolu jagunemisega. Et liini A-B teine aste töötaks selektiivselt liini B-C põhikaitse esimese astmega, kasutatakse viidet. Teise astme viide on üldjuhul vahemikus 250-400 ms, sõltuvalt releekaitse- ja primaarseadmete tehnilisest võimekusest. Teise astme reaktiivtakistus leitakse vastavalt avaldisele:

$$1,2 * X_{AB} < X_{Z2} < 0,85 * (0,85 * X_{BC}) * I_j + X_{AB} \quad (2.2)$$

Kus

$X_{Z2}$  - distantskaitse teise astme reaktiivtakistuse säte;

$I_j$  – voolu jagunemistegur;

$X_{AB}$  - liini A-B reaktiivtakistus;

$X_{BC}$  - liini B-C reaktiivtakistus.

Distantskaitse kolmas aste peab ulatuma vähemalt järgmise liini kaugema latini C ehk eesmärk on täielikult ära kaitsta liini B-C. Arvestada tuleb ka voolude jagunemisega ja varuteguriga. Kolmanda astme viide määratakse üldjuhul vahemikus 600-1000 ms, sõltuvalt releekaitse- ja primaarseadmete tehnilisest võimekusest. Kolmanda astme reaktiivtakistus leitakse avaldisega:

$$X_{Z3} > (X_{AB} + X_{BC} * I_j) * 1,2 \quad (2.3)$$

Kus

$X_{Z3}$  - distantkaitse kolmanda astme reaktiivtakistuse säte;

$I_j$  – voolu jagunemistegur;

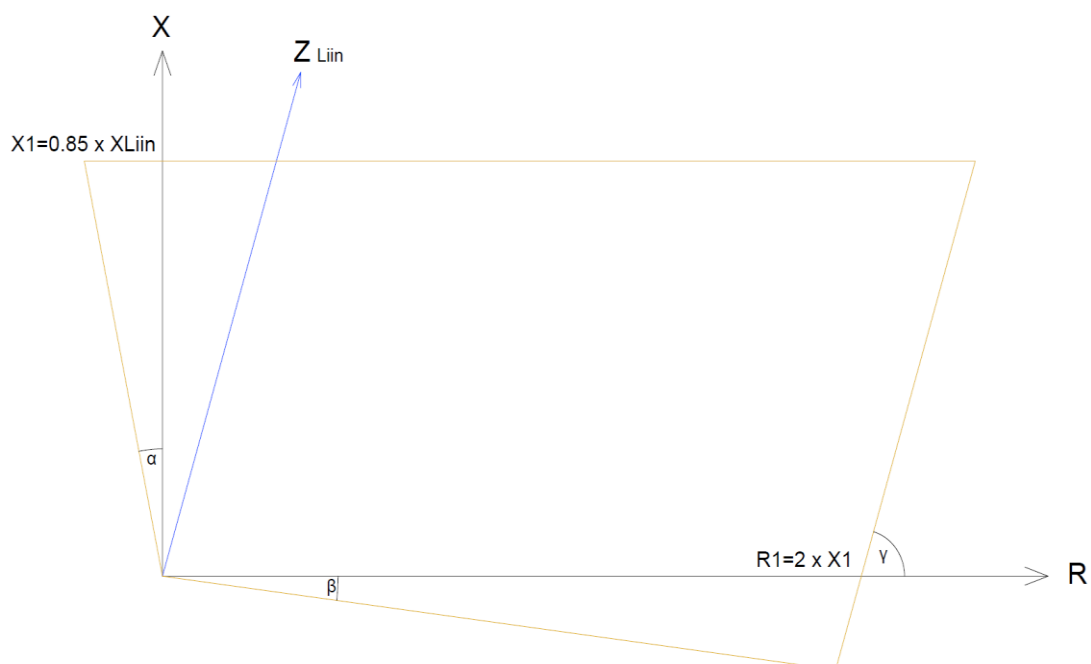
$X_{AB}$  - liini A-B reaktiivtakistus;

$X_{BC}$  - liini B-C reaktiivtakistus.

Lisaks kaitstava liini poole suunatud astetele võimaldab distantkaitse töötada ka taha poole suunatult ehk kaitstavast objektist eemale. Taha poole suunatud tsooni eesmärk ongi üldjuhul kaitsta ainult alajaama latte, mistõttu hõlmab kaitse suhteliselt väikse ala.

## 2.4. Testitava skeemi sätete arvutused

Eelnevas peatükis kirjeldatud sätete arvutamise meetodika põhjal arvutatakse testitavatele liinidele sätted. Testitakse kahe erineva tootja distantkaitseid, mis nõuavad oma eripärade tõttu maalühiste jaoks sätete arvutamisel natuke erinevat lähenemist. All toodud arvutused on teostatud liini K-H põhjal. Teiste testitavate liinide jaoks, liin B-A ja liin B-E, leitakse sätted analoogselt kasutades tabelarvutusprogrammi Microsoft Excel. Testitav võrguskeem on toodud joonisel 3.4. Arvutustulemused on koondatud tabelisse 2.1. Sätted on esmalt arvutatud primaarpoole väärtuste põhjal ja hiljem teisendatud sekundaarpoolele. Arvutamiseks vajalikud liinide parameetrid ja alajaamade ekvivalendid on leitavad tabelites 3.1 ja 3.2.



Joonis 2.5 Distantkaitse esimese tsooni rakenduskarakteristik



Esmalt arvutatakse liini tõusunurk ja moodul avaldistega 2.4–2.6. Liini tõusunurga järgi määratakse ka joonisel 2.5 kirjeldatud tsooni tõusunurk  $\gamma$ . Tsooni laiendusnurkade  $\alpha$  ja  $\beta$  eesmärk on laiendada kaitsetöötsooni, et kaitsta mõõtmisel tekkivate ebatäpsuste, häiringute ja suurte üleminekutakistuste eest. Kuna antud töös üleminekutakistusi ei käsitleta, siis laiendusnurkade sätteid reledes ei muudeta.

$$Z = R + jX = 0,48 + j5,05 \rightarrow 5,08 \ \Omega \ \angle 84,54^{\circ} \quad (2.4)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{0,48^2 + 5,05^2} = 5,08 \ \Omega \quad (2.5)$$

$$\tan \varphi = \frac{5,05}{0,48} = 84,54^{\circ} \quad (2.6)$$

Avaldise 2.1 järgi arvutatakse liini K-H distantskaitse esimese astme reaktiivtakistuse säte. Aktiivtakistus R säte määratakse tinglikult kahekordne reaktiivtakistuse väärtus ja leitakse avaldisega 2.7.

$$X_{Z1} = 0,85 * X_{KH} = 0,85 * 5,05 = 4,30 \ \Omega \quad (2.1)$$

$$R_{Z1} = 2 * X_{Z1} = 2 * 4,30 = 8,60 \ \Omega \quad (2.7)$$

Tootja1 distantskaitse puhul kasutatakse maalühiste arvutamisel nulljärgnevuse kompenseerimistegurit  $K_0$  mis on mis on leitav avaldisega 2.8. Arvutused tehakse esmalt kompleksarvude kujul ja hiljem leitakse nurk ja moodul.

$$K_0 = \frac{Z_0 - Z_1}{3 * Z_1} \quad (2.8)$$

$$K_0 = \frac{(3,26 + j14,89) - (0,48 + j5,05)}{3 * (0,48 + j5,05)} = \frac{2,78 + j9,84}{1,45 + j15,16} = \frac{(4,03 + 149,18) + j(14,26 - 42,10)}{2,10 + 229,89} = 0,66 - j0,12$$

$$K_0 = 0,67 \ \Omega \ \angle -10,31^{\circ}$$

Tootja2 distantskaitse puhul kasutatakse maalühiste arvutamisel kompenseerimistegureid  $K_{RS}$  ja  $K_{XS}$  mis on leitavad avaldistega:

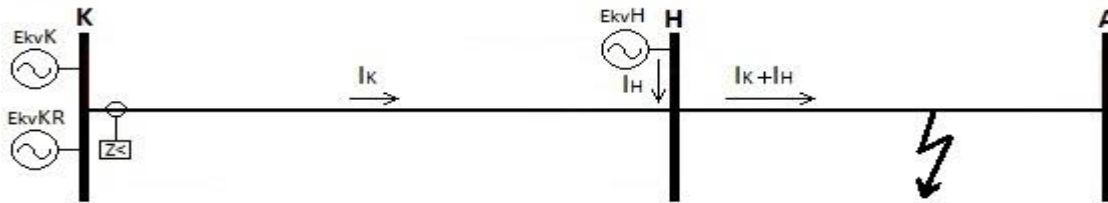
$$K_{RS} = \frac{R_0}{R_1} * 100\% = \frac{3,26}{0,48} * 100\% = 675\% \quad (2.9)$$

$$K_{XS} = \frac{X_0}{X_1} * 100\% = \frac{14,89}{5,05} * 100\% = 295\% \quad (2.10)$$

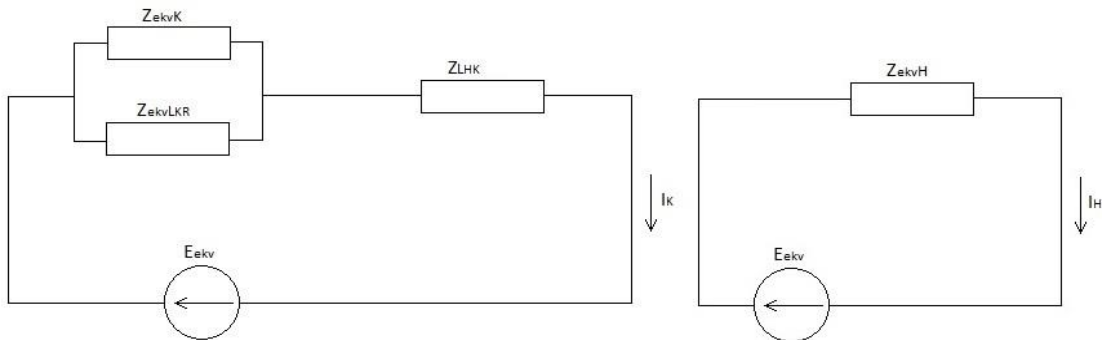
Kasutades avaldist 2.2, leitakse liini K-H distantskaitse teise astme reaktiivtakistuse sättevahemik. Liinide K-H ja H-A reaktiivtakistused on teada ning on leitavad tabelist 3.1. Voolu jagunemisteguri  $I_j$  leidmiseks koostatakse joonisel 2.6 toodud aseskeeme. Aseskeemi koostamiseks ühendatakse süsteemiekvivalentide takistused omavahel lähteskeemi järgi [8].

Voolu jagunemisteguri põhjal arvestatakse, kuidas releed näevad kaugemate liinide takistusi. Joonisel 2.6 on selgitatud voolude jagunemist. Kuna alajaamade ekvivalendid on erinevad, on lühisvoolud samuti erinev. Joonisel 2.7 toodud vasakpoolse aseskeemiga leitakse lühisvool alajaamast K ja parempoolse aseskeemiga leitakse lühisvool alajaamast H. Alajaamade ekvivalendid on toodud tabelis 3.2, liini K-R poolt tulev lühisvool leitakse CAPE mudelist.

$$1,2 * X_{KH} < X_{ZZ} < 0,85 * (0,85 * X_{HA}) * I_j + X_{KH} \quad (2.2)$$



**Joonis 2.6 Voolude jagunemine**



**Joonis 2.7 Aseskeemid lühisvoolude leidmiseks**

Lühisvoolu  $I_K$  leidmiseks on teada liini K-H takistus, alajaama K ekvivalent ja liini K-R poolt tulev lühisvool. Liini K-R lühisvoolu järgi leitakse selle takistuse avaldisega 2.11. Takistuste põhjal leitakse omakorda lühisvool  $I_K$  ja lühisvool  $I_H$  avaldistega 2.12–2.13. Voolu jagunemistegur leitakse avaldisega 2.14.

$$Z_{ekvLKR} = \frac{U}{I} = \frac{330kV/\sqrt{3}}{3,02kA} = 63,02 \ \Omega \quad (2.11)$$

$$I_K = \frac{U}{Z} = \frac{190,5}{26,93} = 7,07 \text{ kA} \quad (2.12)$$

$$I_H = \frac{U}{Z} = \frac{190,5}{67,10} = 2,84 \text{ kA} \quad (2.13)$$

$$I_j = \frac{I_\Sigma}{I_K} = \frac{7,07+2,84}{7,07} = 1,4 \quad (2.14)$$

Kasutades avaldist 2.2, leitakse liini K-H kaitse teise astme reaktiivtakistuse sätte vahemik.

$$1,2 * 5,05 < X_{Z2} < 0,85 * (0,85 * 12,8) * 1,4 + 5,05 \quad (2.2)$$

$$6,06 \Omega < X_{Z2} < 18,00 \Omega$$

Teades, et reaktiivtakistuse säte peab jääma vahemikku 6,06  $\Omega$  kuni 18,00  $\Omega$ , valitakse sätteks 15,00  $\Omega$  ning tulenevalt avaldisest 2.7 on aktiivtakistuse teise astme säte 30,00  $\Omega$ . Kuna kompenseerimistegurid on juba esimese astme sätete arvutustega leitud, siis neid enam arvutada tarvis pole. Tootja2 kaitsel tuleb ka 2-3 tsooni maalühise puhul kompenseerimistegurit kasutades leida aktiivtakistuse väärtus, see on leitav avaldisega 2.16. Avaldisega 2.14 leitakse esmalt liini nurga ja arvutatud reaktiivtakistuse kaudu vastava tsooni nulljärgnevustakistus, mis avaldises 2.16 liidetakse valitud üleminekutakistusele.

$$R_{0Z2} = \left[ X_{Z2} * \cot\left(\frac{\text{liini}\angle * \pi}{180}\right) \right] * \frac{K_{RS}}{100} = \left[ 15,00 * \cot\left(\frac{84,54 * \pi}{180}\right) \right] * \frac{675}{100} = 9,66 \Omega \quad (2.15)$$

$$R_{Reach}^{Z2G} = \frac{R_{0Z2} + R_{Z2}}{1 + \left(\frac{K_{RS} - 100}{300}\right)} = \frac{9,66 + 30,00}{1 + \left(\frac{675 - 100}{300}\right)} = 13,60 \Omega \quad (2.16)$$

Kolmanda astme reaktiivtakistus sätte leidmiseks kasutatakse avaldist 2.3.

$$X_{Z3} > (5,05 + 12,8 * 1,4) * 1,2 \quad (2.3)$$

$$X_{Z3} > 27,56 \Omega$$

Teades, et reaktiivtakistuse säte peab olema suurem kui 27,56  $\Omega$ , valitakse sätteks 32,00  $\Omega$  ning sellest tulenevalt aktiivtakistuse sätteks 64,00  $\Omega$ . Nagu ka teise tsooni puhul, leitakse avaldise 2.15 ja 2.16 kasutades kolmanda astme aktiivtakistus maalühisel.

$$R_{0Z3} = \left[ X_{Z3} * \cot\left(\frac{\text{liini}\angle * \pi}{180}\right) \right] * \frac{K_{RS}}{100} = \left[ 32,00 * \cot\left(\frac{84,54 * \pi}{180}\right) \right] * \frac{675}{100} = 20,61 \Omega \quad (2.15)$$

$$R_{Reach}^{Z3G} = \frac{R_{0Z3} + R_{Z3}}{1 + \left(\frac{K_{RS} - 100}{300}\right)} = \frac{20,61 + 64,00}{1 + \left(\frac{675 - 100}{300}\right)} = 29,01 \Omega \quad (2.16)$$

Mõõtetrafode ülekandeid teades saab sätteid primaarpoolelt sekundaarpoolele teisendada kasutades avaldist 2.17.

$$X_{Z1}'' = \frac{X_{Z1}' * VT_{\text{ülekanne}}}{PT_{\text{ülekanne}}} = \frac{4,30 * \left(\frac{1000}{1}\right)}{\left(\frac{330000}{100}\right)} = 1,30 \Omega \quad (2.17)$$

Antud näidisarvutuste puhul on kasutatud vaid kolmefaasilise lühise väärtusi. Tuleb silmas pidada, et sätteid peab arvutama lisaks ka ühefaasiliste lühiste puhul. Kasutades tabelarvutusprogrammi Microsoft Excel, kontrolliti, et valitud sätted oleks kooskõlas ka ühefaasilise lühise puhul.

**Tabel 2.1 Kaitsete sätted**

Liini nimetus	K - H	B - E	B - A
VT ülekanne	1000 A / 1 A		
PT ülekanne	330 kV / 100 V		
Liini tõusunurk	84,54 °	83,87 °	84,85 °
$K_0$	0,67 $\angle$ -10,31 °	0,72 $\angle$ -8,97 °	0,59 $\angle$ -14,25 °
$K_{RS}$	675 %	628 %	756%
$K_{XS}$	295 %	310 %	268%
1. astme viide	0 s		
$X_{Z1}'   X_{Z1}''$	4,3 $\Omega$   1,30 $\Omega$	5,7 $\Omega$   1,72 $\Omega$	52,3 $\Omega$   15,85 $\Omega$
$R_{Z1}'   R_{Z1}''$	8,6 $\Omega$   2,60 $\Omega$	11,3 $\Omega$   3,43 $\Omega$	104,6 $\Omega$   31,71 $\Omega$
2. astme viide	0,4 s		
$X_{Z2}'   X_{Z2}''$	15,0 $\Omega$   4,55 $\Omega$	30,0 $\Omega$   9,09 $\Omega$	76,0 $\Omega$   23,03 $\Omega$
$R_{Z2}'   R_{Z2}''$	30,0 $\Omega$   9,09 $\Omega$	60,0 $\Omega$   18,18 $\Omega$	152,0 $\Omega$   46,06 $\Omega$
$R_{ReachZ2G}'   R_{ReachZ2G}''$	13,6 $\Omega$   4,12 $\Omega$	29,1 $\Omega$   8,81 $\Omega$	63,9 $\Omega$   19,37 $\Omega$
3. astme viide	0,7 s		
$X_{Z3}'   X_{Z3}''$	32,0 $\Omega$   9,70 $\Omega$	125,0 $\Omega$   37,88 $\Omega$	120,0 $\Omega$   36,36 $\Omega$
$R_{Z3}'   R_{Z3}''$	64,0 $\Omega$   19,39 $\Omega$	250,0 $\Omega$   75,76 $\Omega$	240,0 $\Omega$   72,73 $\Omega$
$R_{ReachZ3G}'   R_{ReachZ3G}''$	29,0 $\Omega$   8,79 $\Omega$	121,15 $\Omega$   36,71 $\Omega$	100,9 $\Omega$   30,57 $\Omega$

## 2.5. Nõuded distantkaitsetele Eesti ülekandevõrgus

Eesti põhivõrgus ehitatakse alajaamad võtmed kätte meetodil ning põhivõrguettevõtte määrab ehitustingimused ja nõuded alajaama seadmetele. Releekaitse ja automaatika osas tuleb töövõtjatel valida põhivõrgu poolt aktsepteeritud seadmete vahel. Keelatud ei ole kasutada ka mõnda muud seadet, kuid sel juhul peab töövõtja tõestama dokumenteeritult, et pakutav seade vastab Eesti põhivõrgu esitatud nõuetele ja standarditele. Lisaks tuleb uute seadmete puhul tuua referentse antud seadmete kasutuse kohta teistes põhivõrguettevõtetes, informeerida tugiteenuste kättesaadavuse, tootmise, tootearenduse kohta jne. Samuti on kohustus koolitada põhivõrgu personali uusi seadmeid käsitlema, hankida vajalik tarkvara ja kasutuslitsentsid. Detailsed nõuded ja vajalikud protseduurid on kirjeldatud toovõtjatele kättesaadavas hankedokumentatsioonis.

330kV võrgus liinidistantskaitsele esitatavad tehnilised miinimumnõuded [9]:

- 4 voolusisendit (1/5 A) ja 4 pingesisendit (100 V);
- 17 binaarsisendit ja 27 binaarväljundit.

Distantiskaitse peab omama minimaalselt järgnevaid põhifunktsioone [9]:

- faasituvastusega distantiskaitse, mis on suuteline tuvastama kõiki tüüpi lühiseid;
- viieastmeline distantiskaitse funktsioon ( $Z1$  ja  $Z2$  puhul eraldi taimerid faas-faas ja faas-maa lühiste jaoks);
- kaheastmeline suunamata voolukaitse funktsioon;
- kaheastmeline suunamata maalühiskaitse funktsioon;
- üheastmeline ülepingekaitse funktsioon;
- nelja sättegrupi võimalus;
- pendeldamise tuvastus ja blokeeringu funktsioon;
- pingetu liini tuvastuse funktsioon;
- lühisele lülitamise kaitse funktsioon;
- kommunikatsiooniga üle- ja alalautusloa funktsioon;
- paralleelliini kompenseerimise võimalus;
- vooluahelate kontrolli funktsioon;
- lühisekoha määraja funktsioon;
- $I_{L1-N}$ ,  $I_{L2-N}$ ,  $I_{L3-N}$ ,  $3I_0$ ,  $U_{L1-N}$ ,  $U_{L2-N}$ ,  $U_{L3-N}$ ,  $3U_0$ ,  $f$  otsene mõõtmine;
- $U_{L1-L2}$ ,  $U_{L2-L3}$ ,  $U_{L3-L1}$ ,  $\pm P$ ,  $\pm Q$ ,  $\cos \varphi$  mõõtmine läbi arvutuste;
- häiresalvesti (COMTRADE formaadist);
- sündmuste logi;
- automaatkontroll;
- välise GPS seadmega sünkroniseeritav sisemine kell;
- ühe- ja kolmefaasilise väljalülituskäsu funktsioon;
- vähemalt 14 vabalt programmeeritavad LED indikatsiooni;
- sisemise rikke ja relee töötamise LED indikatsioonid;
- esimese tsooni toimeaeg ei tohi ületada 30 ms (mõõdetuna relee väljundkontaktidelt);
- võimsuslüliti tõrkekaitse funktsioon;
- taaslülitusautomaatika funktsioon;
- automaatne pingevaliku loogika funktsioon;
- sätete eksportimine .RIO formaati.

## 2.6. Kaitsereleede testimisprotseduur

Kaitsereleede testimine on tähtis ja vastutusrikas protsess. Testimise võib tinglikult jaotada mitmesse etappi, alates kaitsete arendamise faasis teostavatest testidest ja kaitsete nõuetele vastavuse kinnitamise testidest kuni vastuvõtutestideni ja hoolduse käigus teostavate testideni [10]. Funktsionaalseid teste teostatakse üldjuhul spetsiaalselt releedele mõeldud testseadmetega, millega saab võrdlemisi lihtsalt voolu ja pinget kaitsele sisestades selle toimeid testida. Spetsiifilisemate ja detailsemat analüüsi nõudvate testide jaoks kasutatakse simulaatoreid, mis annavad võimaluse erinevaid juhtumeid ja protsesse paremini läbi testida.

Kaitsete arendustegevuse käigus on peamiseks kriteeriumiks töökindlus ja häiringukindlus, et tagada seadme korrektne töötamine mistahes olukordades. Kaitsete vastavustestidel kontrollitakse kaitse tööd üldjuhul standardiseeritud testidega. Nimetatud teste kirjeldab standard EVS-EN 60255-121:2014 *Measuring relays and protection equipment*. Vastuvõtutestidel kontrollitakse kaitse toimeid vastavalt etteantud nõuetele ja sätetele ning hoolduse käigus korratakse analoogseid teste perioodiliselt.

### 2.6.1 Distantkaitsete testimise standard

Distantkaitsete testimist kirjeldab eelmainitud standard EVS-EN 60255-121: 2014 *Measuring relays and protection equipment – Part 121: Functional requirements for distance protection* [11]. Uus standard asendab 1982. aastal välja antud standardit EVS-EN 60255-16 *Electrical relays – Part 16: Impedance measuring relays*. Eelnev standard ei defineerinud piisavalt täpselt distantkaitsete testimise meetodikat, mistõttu kasutasid erinevad tootjad releede tüüptestimiseks erinevaid teste [12]. See tekitas omakorda segadusi releede omavahelisel võrdlemisel ja tellijal relee valimisel.

Standardi EVS-EN 60255-121: 2014 põhjal saab distantkaitsete testimise jagada kaheks osaks: täpsustestid ja dünaamilised testid [6]. Täpsustestide eesmärk on analüüsida distantkaitse toimimist ja karakteristikute piire stabiilsetel olukordadel. Dünaamiliste testide eesmärk on analüüsida kaitse tööd mitmesugustes lühiseolukordades ja võrgukonfiguratsioonides [6]. Dünaamilisi teste teostatakse kolme erineva konfiguratsiooniga võrgu puhul: ühepoolse toitega võrk, kahepoolse toitega võrk ja paralleelliiniga võrk [11]. Kõike teste teostatakse erineva pikkusega liinude puhul täies liini ulatuses. Kuna antud standardis kirjeldatud testid käsitlevad võrdlemisi lihtsa konfiguratsiooniga võrku, siis antud lõputöö raames teste standardis kirjeldatud põhimõtete järgi ei teostatud.

## 2.6.2 Vastavustestid

Vastavustestide näol on tegemist testidega, mis teostatakse kaitserleedele nõuetele ja standardile vastavaks kinnitamisel. Samuti on osad võrguoperaatorid võtnud endale nõudeks testida kõiki uusi paigaldatavaid releetüüpe ja tarkvareversioone vastavustestidega, et veenduda nende sobivuses ja töökindluses. Seda praktikat kasutavad näiteks Hispaania ja Prantsuse põhivõrgu operaatorid. Vastavusteste teostatakse üldjuhul reaalajasimulaatoriga, nagu seda on näiteks RTDS. Võimalik on koostada ka digitaalne simulatsioon, salvestada virtuaalne test ja releede testseadmega antud testi läbi viia. Releede tootjatele on vastavusteste soovitatav teostada EVS-EN 60255-121: 2014 standardis toodud metoodika põhjal ja võrguoperaatorid saavad soovi korral saavad ise endale vajalikke lisa testistsenaariumeid koostada, mille alusel kaitserleede sobivust hinnata. Standardis ei määrata testide tulemustega ära, kas relee läbis või ei läbinud testi, vaid kirjeldatakse ühise põhimõttega teste, mille alusel saab erinevate tootjate seadmeid võrrelda [12]. Vastavustesti teostamine ei kaota vajadust vastuvõtutesti teostamise järele. Vastavustesti põhjal on võimalik hinnata, kuidas relee toimis standardiseeritud testidel ning kas saab võrguoperaatori poolt heaks kiidetud. Eesti ülekandevõrguoperaator oma võrku lubatavaid releesid eraldi vastavustestidega ei testi.

## 2.6.3 Vastuvõtutestid

Vastuvõtutestide puhul on tegu testidega, mida teostatakse releede seadistamise ja tellijale üleandmise käigus, kui ehitatakse näiteks uut alajaama. Vastuvõtutestide eesmärk on kontrollida releede korrektset toimimist ehk kontrollida testseadmega, kas relee konfiguratsioon, loogika, sisestatud sätted, toimed ja blokeeringud vastavad sellele, mida tellija on nõudnud [13]. Vastuvõtu teste teostatakse tavaliselt releede prooviseadmetega, nagu seda on näiteks Omicroni CMC 256. Prooviseadmega sisestatakse releede mõõtesisendisse faasivoolud ja –pinged ja imiteeritakse rikkeolukordasid [14]. Seejärel vaadatakse, kas kaitserlee toimed on ootuspärased ja kas relee on seadistatud vastavalt nõuetele. Vastuvõtutestid viiakse tavaliselt läbi FATi ehk *Factory Acceptance Testi* või SATi ehk *Site Acceptance Testi* käigus. FATi käigus toimuvad testid üldjuhul releepaneelide koostamise tehases, kus primaarseadmeid füüsiliselt kohal pole ja need asendatakse mõne imiteerimiseseadmega. FATi eeliseks on see, et selle käigus ilmnunud puudused saab kõrvaldada enne seadmete alajaama viimist, mis aitab tööprotsessis aega kokku hoida. Puuduseks on selle keerukus, kuna ajutised releede omavahelised sidumisahelad, toiteahelad jms nõuab palju tööd. SATi käigus teostatakse teste juba alajaamas, kui kõik seadmed on oma kohale lõplikult paigaldatud ja ühendatud. SATi

eeliseks on korraga reaalse ühenduse ja toimete testimise võimalus, kuid seejuures tuleb kõik testimise käigus ilmevad vead kiirelt kõrvaldada, mis tiheda ajagraafiku puhul on teinekord keeruline. Eesti ülekandevõrgus teostatakse vastuvõtuteste SATi käigus.

## **2.7. Distantkaitse funktsiooni testimine**

Tänapäevased digitaalsed kaitsereled ei sisalda kunagi ainult ühte kaitsefunktsiooni. Tuues näiteks liini distantkaitse, siis sisaldub selles üldjuhul veel põhi- või reservkaitse funktsioon ning muud automaatika funktsioonid [15]. Tavaliselt sisaldab kaitserelee, mille põhifunktsiooniks on distantkaitse, lisaks veel voolukaitse funktsiooni, üle- ja alapingekaitse funktsiooni, kommunikatsiooni funktsiooni, pendelduse blokeerimise funktsiooni ja pingehelate kontrolli funktsiooni [16]. Võimalikke funktsioone on palju ja täpsed soovid paneb paika tellija. Vastavalt tellija soovile komplekteeritakse sobiva riistvaraga kaitserelee ning funktsioonid on tarkvaras konfigureeritavad. Tänapäeval võimaldavad paljud tootjad komplekteerida kaitserelee mis sisaldab sisuliselt kõikide erinevate kaitsete funktsionaalsusi ühes seadmes.

Eelmainitud asjaolust tulenevalt ei ole näiteks vastuvõtukatsetel mõistlik testida distantkaitse funktsiooni eraldiseisvalt, kuna reaalses situatsioonis on töös kõik kaitseseadmes olevad funktsioonid. Distantkaitse kompleksne testimine toob kõige suurema tõenäosusega esile kaitseseadme konfigureerimisel ja sätete arvutamisel tehtud vead [16]. Eraldiseisvalt distantkaitse funktsiooni testimine annab samas detailsema ülevaate selle funktsiooni käitumisest ilma teiste funktsioonide sekkumiseta. Antud lõputöös keskenduti ainult distantkaitse funktsiooni testimisele, et saada aimu erinevustest eri tootjate distantkaitse funktsiooni loogikast. Komplektsed testid nõuaksid muude funktsioonide tarvis sätete arvutamist ja releede põhjalikku konfigureerimist. Lisaks oleks tarvis kommunikatsiooni skeemide testimiseks liini teise otsa täiendavaid kaitsereleesid.

Distantkaitse funktsioon sõltub mitmest mõõteorganist: rikketsilmuse valiku organ (faasidevaheline või maaga lühis), suuna valiku organ, faasivaliku organ ja takistuse mõõtmise organ [17] [18]. Testimine algab releele ebasümmeetriliste faasipingete ja – voolude sisestamisega, et veenduda ülekandeteguri, faasijärjestuse ja polaarsuse õigsuses [13]. Vastasel juhul arvutab relee takistusi valedes faasisilmustes ja vale polaarsuse puhul töötavad suunatud distantkaitse tsoonid vastupidiselt. Digitaalse distantkaitse testimiseks kasutatakse tänapäeval dünaamilist testimist. Erinevalt elektromehaaniliste- ja staatiliste releede testimisest, kus hoiti pinget või voolu konstantsena ning vastavalt sellele suurendati või vähendati teist väärtust,



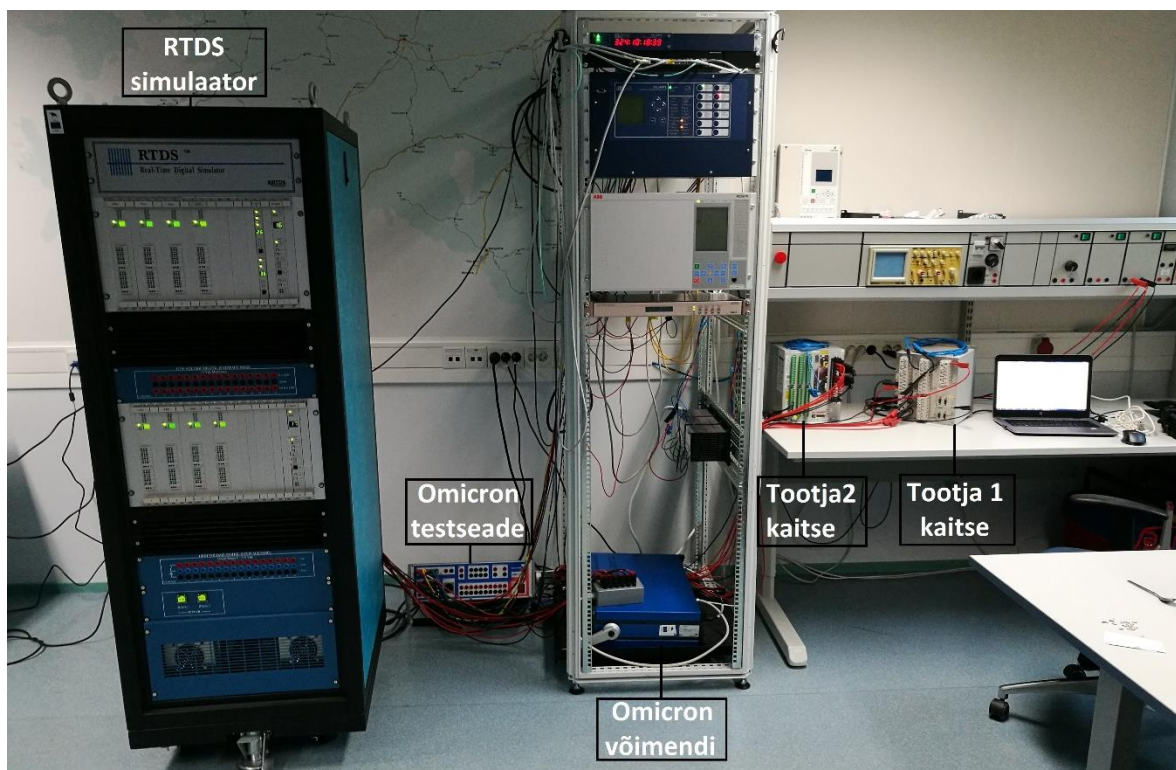
muudetakse dünaamilise testimise käigus mõlemat parameetrit. Dünaamiline testimine imiteerib täpsemalt reaalselt lühise olukorda võrgus, kus muutuvad vigase faasi puhul nii voolu kui ka pinge amplituud ja nurk [13].

Testimiseks on tarvis simuleerida lühise eelne normaalolukord, seejärel imiteerida lühist ning viimaks taastada normaalolukord või lülitada välja pinge ja vool. Lühise eelset normaalolukord on distantskaitsele tarvis, et salvestada mällu referentspinge ja normaalolukorra tagastamine annab relele märku, et lühis on kõrvaldatud [14]. Testide raport peaks sisaldama infot distantskaitse tsooni valiku, vigase faasi valiku, lühise kestuse ja lühiskoha kauguse kohta. Antud info põhjal saab järeldada, kas kõik distantskaitse funktsioonis sisalduvad organid toimivad korrektselt.

Tänapäevaste mikroprotsessoritel põhinevate distantskaitsete testimine nõuab põhjalikke teadmisi distantskaitsete nii funktsionaalsusest, üksikelementide tööpõhimõtetest kui ka kogu kaitserelle tööpõhimõttest [13]. Digitaalseid kaitseid on soovitatav testida alustades üksikute funktsioonidega ning lõpetades kogu kaitse loogika ja funktsionaalsuse testimisega [13].

### 3. Modelleerimine ja testimine

Distsantskaitsete testimiseks koostatakse mudel, kasutades Eesti ülekandevõrgu parameetreid. Esmalt modelleeritakse testitava võrgu mudel ja seejärel kasutatakse reaajasimulaatorit selle testimiseks. Releede testseadmega testimisel mudelit tarvis pole. Võimalikult täpsete tulemuste saavutamiseks kasutatakse antud töös releekaitse valdkonnas väga levinud ja tunnustatud reaajasimulaatorit RTDS ja releede testseadet Omicron. Testitavateks kaitseteks on kaks erineva tootja digitaalset distantskaitset ja osaliselt ka RTDS simulaatorisse integreeritud distantskaitse. Joonisel 3.1 on kujutatud antud töös kasutatud testseadmed ja testitavad releed.



Joonis 3.1 Testimiseks kasutatud seadmed ja releed

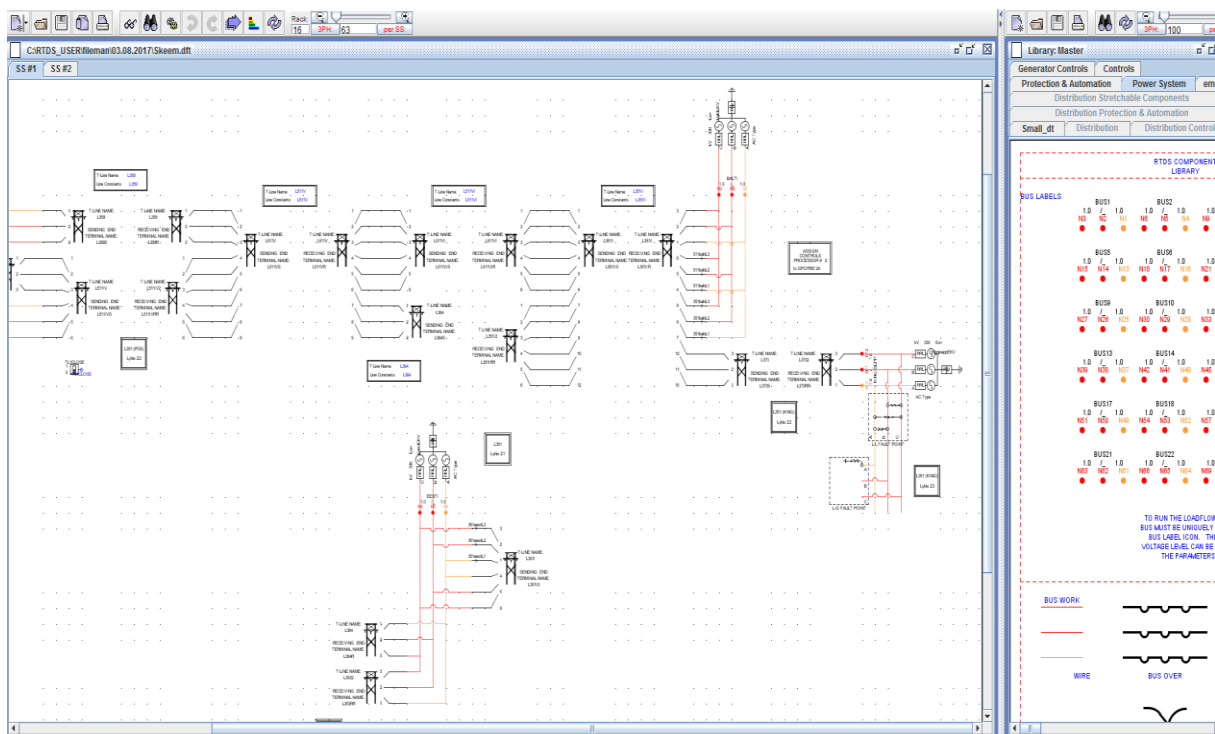
#### 3.1. Simulaator ja testseade

Antud töös kasutatakse simulatsioonide teostamiseks Tallinna Tehnikaülikooli elektrisüsteemide labori *Real Time Power System Digital Simulator* ehk RTDSi. Reaajasimulaatori mudeli koostamiseks ja testimiseks kasutatakse spetsiaalset tarkvara RSCAD. Lisaks kasutatakse RTDS simulaatori ja releede vahel lisavõimendit Omicron CMS 356. Simulaatori väljundid võimaldavad välja anda maksimaalselt 10V ning muundatakse võimendi abil releedele sobilikeks voolu ja pinge väärtusteks, milleks on 1A ja 100V. Releede testseadmena kasutatakse Eesti ülekandevõrgu Omicron CMC 256.

### 3.1.1 RTDS ja RSCAD

*Real Time Power System Digital Simulator* töötati välja 1989. aastal Manitoba HVDC uurimiskeskuses ja selle näol on tegemist maailma esimese täisdigitaalse reaalajasimulaatoriga [19]. RTDS on suuteline simuleerima keerulisi võrgumudeleid 25-50 mikrosekundilise ajasammuga, tagades täpsed mõõtetulemused alalispingest kuni 3 kHz sagedusvahemikuni [19]. RTDS simulaatori riistvara on tootja poolt vabalt konfigureeritav, vastavalt tellija soovidele, alustades protsessorite arvust kuni sisend- ja väljundkaartide arvuni. RTDS koosneb eelmainitud riistvarast ja tarkvarast RSCAD. RSCADi puhul on tegemist n-ö kõik-ühes tarkvaraga, mis võimaldab koostada skeeme, jooksutada simulatsioone, jälgida ja analüüsida simulatsiooni tulemusi [19]. Joonisel 3.2 on kujutatud RSCADi modelleerimise keskkonnas koostatud võrgumudeli osa.

RTDSi näol on tegu reaalajasimulaatoriga, seega koostades võimalikult detailse mudeli elektrivõrgust, on RTDS võimeline võrdlemisi täpselt reaalajas imiteerima võrgus tekkivaid olukordi. See annab omakord võimaluse ohutult testida ning analüüsida elektrivõrgus toimuvaid protsesse ja seadmete käitumist. RTDS simulaatorit kasutavad teadusasutused, võrguettevõtted ning lisaks ka enamus suuri kaitseraleede tootjad, kes testivad ja arendavad oma tooteid RTDS simulaatorit kasutades.

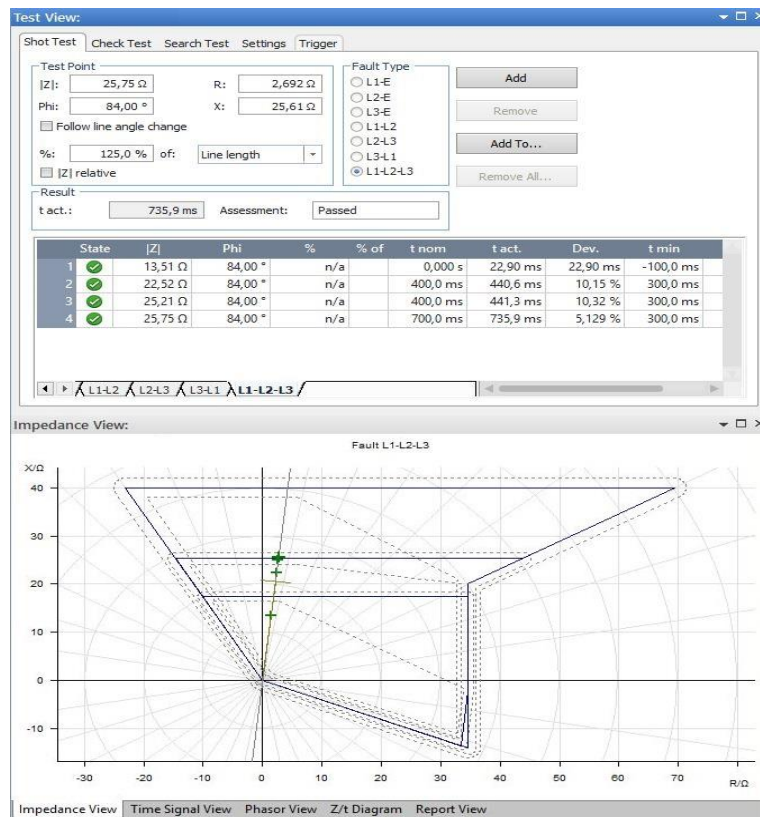


Joonis 3.2 RSCADi modelleerimise keskkond

### 3.1.2 Omicron CMC

Omicron on Austrias baseeruv ettevõte, mis asutati rohkem kui 30 aasta tagasi [20]. Omicron toodab ja arendab kompaktsid ning kõrge täpsusklassiga testseadmeid kaitserleede, mõõteseadmete ja primaarseadmete testimiseks ning analüüsimiseks. Omicroni tooteid kasutatakse enam kui 150 riigis [20]. Omicroni CMC seeria on mõeldud kaitserleede testimise tarbeks. Omicron CMC 256 testseadmel on 6 vooluväljundit ja 4 pingeväljundit, mille mõõteviga on väiksem kui 0,015% [20]. Lisaks on võimalik kasutada 4 binaarväljundit ja 10 binaarsisendit [20]. Tänu kõrgele täpsusklassile, on CMC 256 testseadet võimalik kasutada ka mõõteseadmete kalibreerimiseks, nagu näiteks 0.2S täpsusklassiga arvestid, mõõtemuundurid, kvaliteedianalüsaatorid ja PMUd [20]. Testseadet juhitakse läbi arvuti.

Omicroni seadmed kasutavad testimise ja analüüsimise tarbeks Test Universe tarkvara, millega on testseadet lihtne käsitleda ja hiljem tulemusi analüüsida. Joonisel 3.3 on kujutatud Test Universe distantkaitsete testimise moodulit, Advanced Distance, millega antud töös releesid testiti. Omicron CMC seeria testseadmed on maailmas laialdaselt kasutusel releede testimisel ja seadistamisel. Eesti ülekandevõrk ja enamuse Eesti ülekandevõrgu töövõtjatest kasutavad samuti Omicron CMC seeria testseadmeid releede seadistamisel, vastuvõtutestidel ja hooldusel.

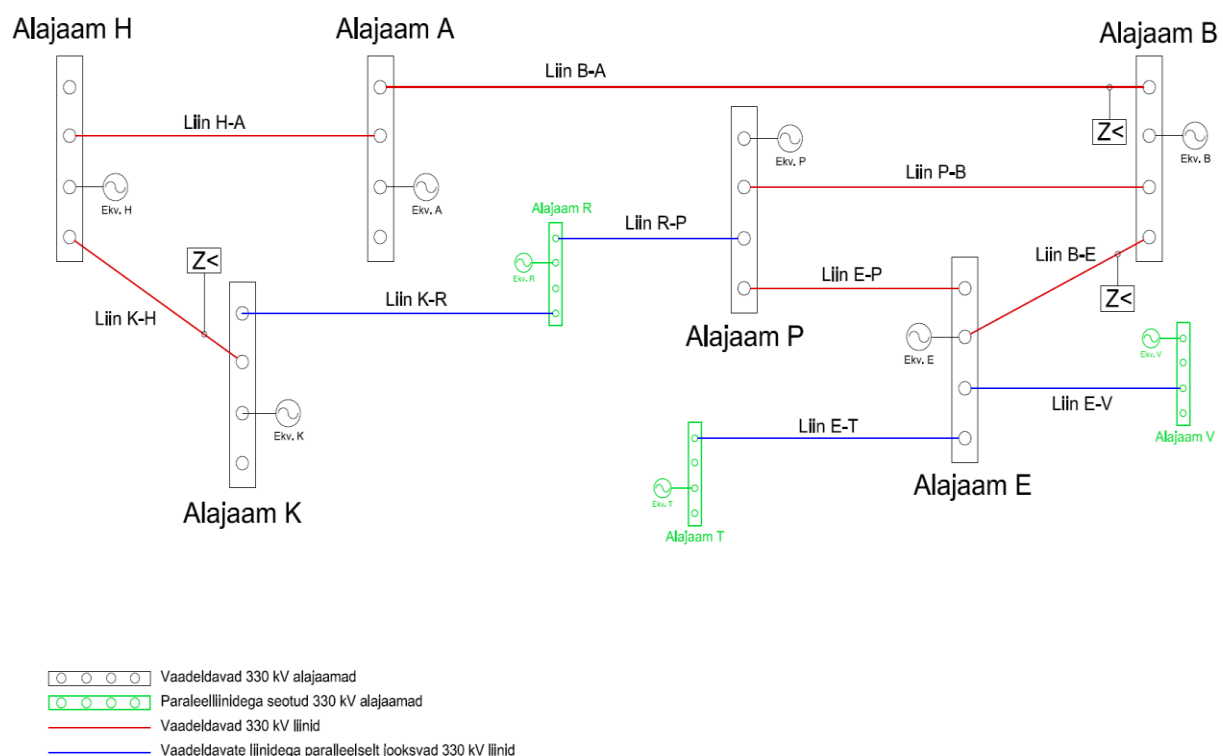


Joonis 3.3 Omicroni Test Universe distantkaitsete testimise moodul

### 3.2. Testitav skeem ja parameetrid

Testimiseks valiti skeem, mis koosneb osaliselt Eesti 330kV ülekandevõrgust. Vaatluse all on kuus suuremat sõlmalaama ja neid ühendavad ülekande liinid. Lisaks on skeemil ka vaadeldavate liinidega paralleelselt asetsevad liinid ja mõned vaadeldavatest liinidest järgnevad liinid, et testida distantskaitse kaugemaid astmeid. Paralleelliinid on modelleeritud põhjusega, et tagada võimalikult realistlik võrgumudel ja näha vastastikuse sidestamise mõju kaitsereleedele. Joonisel 3.4 on näidatud lihtsustatud kujul testitav võrguskeem. Alajaamad H, K ja A asuvad üksteisest 50km raadiuses ja asuvad peamise tarbimiskeskuse ümbruses. Alajaamad P, E ja B asuvad samuti üksteisest 50km raadiuses, paiknevad peamiste tootmiseüksuste läheduses.

Konkreetne skeem valiti põhjusel, et oleks võimalik võrrelda distantskaitse toimimist erinevatel stsenaariumitel, muutmata skeemi ülemäära keeruliseks. Mustaga on kujutatud vaadeldavad alajaamad, roheline on kujutatud paralleelliinide või mõne järgneva liiniga seotud alajaam. Punasega on kujutatud vaadeldavad liinid ja sinisega paralleel- või järgnevad liinid. Tingmärk „Z<“ tähistab distantskaitsete asukohta testitavatel liinidel. Tabelites 3.1 ja 3.2 on toodud võrguskeemi alajaamade ja ülekandeliinide parameetrid.



Joonis 3.4 Testitav skeem

Modelleerimine lihtsamaks tegemise eesmärgil tehti mudelis mõningaid mööndusi. Vaatluse all olid vaid 330kV liinid, ühegi madalama pingega liini mõju võrgule selles mudelis ei arvestatud. Paralleelsed liinid modelleeriti ainult juhtudel, kui need paiknesid vaadeldavatele liinide lähemal kui 50m. Mastide tüübid mudelis ei vasta 100 % ulatuses reaalsusele. Tehti lihtsustus, et kogu liini pikkuses kasutatakse sel liinil enim kasutatavat kandemasti. Lisaks faasijuhtide transponeerimine teostatud mudeli poolt automaatselt, mis ei pruugi olla vastavuses reaalse olukorraga.

Liinide pikkused, kaugused teineteisest, faasijuhtmete tüübid ja võrgu ekvivalendid alajaamades on modelleeritud täpseid andmeid kasutades. Kõik vajalikud andmed pärinevad Eleringi geoinfosüsteemist ja CAPE võrgumudelist.

**Tabel 3.1 Liinide parameetrid**

Liini nimetus	Alguspunkt	Lõpppunkt	Pikkus (km)	Faasijuhe (mm <sup>2</sup> )	R <sub>1</sub> (Ω)	X <sub>1</sub> (Ω)	R <sub>0</sub> (Ω)	X <sub>0</sub> (Ω)
Liin B-E	Alajaam E	Alajaam B	21,7	2 x 500	0,72	6,66	4,49	20,64
Liin K-H	Alajaam H	Alajaam K	18,8	3 x 400	0,48	5,04	3,26	14,89
Liin B-A	Alajaam A	Alajaam B	209,7	3 x 400	5,55	61,55	41,94	164,88
Liin P-B	Alajaam P	Alajaam B	68,0	3 x 400	1,77	19,73	13,54	48,37
Liin E-P	Alajaam P	Alajaam E	57,2	3 x 400	1,40	15,92	12,20	44,23
Liin H-A	Alajaam H	Alajaam A	47,0	3 x 400	0,98	12,82	8,09	36,29
Liin E-T	Alajaam T	Alajaam E	243,3	2 x 400	10,07	81,16	53,08	287,02
Liin R-P	Alajaam R	Alajaam P	56,6	2 x 300	2,77	17,95	12,28	51,21
Liin E-V	Alajaam E	Alajaam V	61,7	2 x 500	2,03	18,91	13,87	60,63
Liin K-R	Alajaam K	Alajaam R	108,1	2 x 300	5,34	34,15	32,41	109,14

**Tabel 3.2 Alajaamade parameetrid**

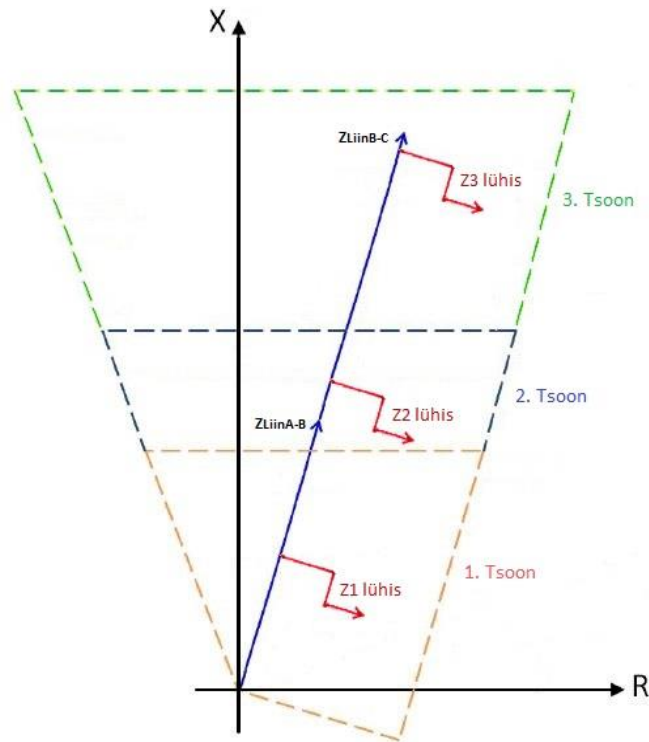
Alajaama nimetus	Väljuvate liinide arv	Ekvivalendid			
		R <sub>1</sub> (Ω)	X <sub>1</sub> (Ω)	R <sub>0</sub> (Ω)	X <sub>0</sub> (Ω)
Alajaam A	2	27,58	104,95	1,47	49,98
Alajaam B	3	1,84	15,11	1,20	14,45
Alajaam E	4	0,46	12,83	0,16	4,46
Alajaam H	2	11,22	66,15	1,03	47,96
Alajaam K	2	7,50	32,58	3,09	30,55
Alajaam P	3	9,87	61,41	0,62	18,22
Alajaam R	2	52,42	209,61	11,95	134,59
Alajaam T	1	4,75	36,46	7,48	55,61
Alajaam V	1	1,38	11,74	2,65	17,64

### 3.3. Teostatavad testid

Joonisel 3.4 kujutatud võrguskeemi koostamisel oli üheks peamiseks eesmärgiks testida kaitsete käitumist erinevat tüüpi liinidel. Testitavad liinid on liin B-E alajaama B poolt vaadatuna, liin B-A alajaama B poolt vaadatuna ja liin K-H alajaama K poolt vaadatuna. Liin B-E puhul on tegemist lühikese liiniga, mis asub tootmisüksustele väga lähedal, liin K-H on samuti lühike liin, kuid asub tootmisüksustest kaugel ja tarbimiskeskuse läheduses. Liin B-A on pikk transiitliin, mille üks ots asub peamiste tootmiseüksuste läheduses ja teine ots peamise tarbimiskeskuse juures. Iga liini puhul testitakse distantskaitset liini ühest otsast vaadatuna. Distantskaitsete paigutus liini otsas on valitud juhuslikult ega oma testimise seisukohalt tähtsust.

Testiti kaitstava objekti ehk liini poole suunatud distantskaitse kolm astet. Sätete arvutamise meetodikast ja testimise jaoks vajalike sätete arvutamistest on kirjutatud peatükkides 2.3 ja 2.4. Kaitsetsoonide testimisel valiti punktid, kus lühis peaks paiknema kindlalt tsoonis sees. Esimese tsooni lühiste asukohad valiti tahtlikult erinevad, et võrrelda releede käitumisi erinevatel tingimustel. Lühiseid imiteerides testiti liini reaktiivtakistuse sätte ulatust, üleminekutakistust antud töös ei käsitleta ning aktiivtakistuse piire ei testita. Vaatluse all olid eraldi 1-faasilised ja 3-faasilised lühised. Eraldi testina vaadeldi ka kaitsete käitumist esimese ja teise tsooni piiril. Joonisel 3.5 on illustreeritud distantskaitse kolme tsooni ja lühiste ligikaudseid asukohti tsoonide piirkonnas.

Testitavaid distantskaitseid on kokku kolm: Tootja1 digitaalne distantskaitse, Tootja2 digitaalne distantskaitse ja RTDS simulaatoriga testides ka simulaatori sisene distantskaitse. Digitaalsetel kaitserleedel oli töösse viidud ainult distantskaitse funktsioon, et vältida olukorda, kus mõni teine kaitsefunktsioon töötab kiiremini või takistab distantskaitse korrektset töötamist. Testimist alustati RTDS simulaatoriga, millega oli võimalik kõike kolme kaitset samaaegselt testida. Omicroniga korraldi teste sama põhimõtte järgi, see tähendab, et katsepunktide valik lähtus sellest, kus tehti teste RTDS simulaatoriga ehk määrati sama katsepunkt. Katsepunktide aluseks valiti lühisekoha kaugus vaadeldaval liinil ehk kaugus distantskaitsest näiteks 15% või 120 % liini pikkusest ehk ahela takistusest arvestamata voolude jagunemise ja vastastikuse induktiivsuse mõju. Omicroniga testimisel ei olnud võimalik kasutada RTDSi sisest distantskaitset ja kaitseid ei olnud võimalik testida samaaegselt. Tsoonide sees teostatavaid teste korraldi iga testi puhul kümme korda ja 1.-2. tsooni piiril teostatavaid teste kolm korda, et saadud andmed oleks võimalikult täpsed.



**Joonis 3.5 Lühiste asukohad distantkaitse tsoonides**

### 3.3.1 Liin K-H testid

Liin K-H puhul on tegemist lühikese liiniga (18,8 km), mis ühendab võrgu kahte suurimat sõlmalajaama peamise tarbimiskeskuse läheduses, kuid samas asub võrgu suurimatest tootmisüksustest suhteliselt kaugel. Distantkaitse „paigaldatakse“ alajaama K ehk distantkaitset testitakse alajaama K poolt vaadatuna. Esimese tsooni lühis jääb vaadeldava liini algusesse, teise tsooni lühis teostatakse vastas otsa alajaamast ainsa väljuva liini alguses ehk liinil H-A ja kolmanda tsooni lühis järgneva liini teises otsas ehk alajaamas A latil. Liiniga K-H jookseb peaaegu täies pikkuses (alajaama H poolt vaadatuna 16,0km) paralleelselt liin H-A (liinid samadel mastidel). Alajaamast H läheb välja veel lisaks ainult üks liin, liin H-A, seega kaugemate tsoonide arvutamisel ja testimisel saab lähtuda vaid sellest.

Liinil K-H testitud stsenaariumid:

- test 1.1 – lühis distantkaitse esimeses tsoonis (15%);
- test 1.2 – lühis distantkaitse teises tsoonis (liini H-A alguses);
- test 1.3 – lühis distantkaitse kolmandas tsoonis (alajaama A latil, liini H-A lõpus);
- test 4.1 – lühis distantkaitse esimeses ja teise tsoonis piiril (ca 85% liinil).



### 3.3.2 Liin B-E testid

Liin B-E puhul on tegemist lühikese liiniga (21,6km), mis ühendab võrgu kahte suurimat tootmisüksust ehk asub toiteallikale väga lähedal. Distantskaitse „paigaldatakse“ alajaama B ehk distantskaitset testitakse alajaama B poolt vaadatuna. Esimese tsooni lühis jääb vaadeldava liini keskpaika, teise tsooni lühis teostatakse vastas otsa alajaamast välja minevate liinide alguses ehk liinidel E-P, E-T ja E-V ning kolmanda tsooni lühis nimetatud liinide teises otsas ehk alajaamade P, T ja V lattel. Liiniga B-E jookseb täies pikkuses paralleelselt liin E-V (liinid samadel mastidel). Lisaks jooksevad veel paralleelselt liinid B-A ja P-B 8,6km alajaama B poolses otsas. Kuna liini B-E vastas otsa alajaamast E läheb välja mitu liini, siis teise ja kolmanda tsooni puhul tuleb arvestada sätete arvutusel ja testimisel kõikide liinidega.

Liinil B-E testitud stsenaariumid:

- test 2.1 – lühis distantskaitse esimeses tsoonis (40% liinil);
- test 2.2 – lühis distantskaitse teises tsoonis (liini E-P alguses);
- test 2.3 – lühis distantskaitse teises tsoonis (liini E-T alguses);
- test 2.4 – lühis distantskaitse teises tsoonis (liini E-V alguses);
- test 2.5 – lühis distantskaitse kolmandas tsoonis (alajaama P lattel, liini E-P lõpus);
- test 2.6 – lühis distantskaitse kolmandas tsoonis (alajaama T lattel, liini E-T lõpus);
- test 2.7 – lühis distantskaitse kolmandas tsoonis (alajaama V lattel, liini E-V lõpus);
- test 4.2 – lühis distantskaitse esimeses ja teise tsoonis piiril (ca 85% liinil).

### 3.3.3 Liin B-A testid

Liin B-A puhul on tegemist pika liiniga (208,9 km), mis on n-ö transiitliiniks tootmisüksuste ja tarbimiskeskuse vahel. Distantskaitse „paigaldatakse“ alajaama B (genereerimise poolne ots) ehk distantskaitset testitakse alajaama B poolt vaadatuna. Esimese tsooni lühis jääb vaadeldava liini teise poolde, teise tsooni lühis teostatakse vastas otsa alajaamast ainsa välja mineva liini alguses ehk liinil H-A ja kolmanda tsooni lühis järgneva liini teises otsas ehk alajaamas H lattel. Liiniga B-A paralleelselt hulga liine erinevatel lõikudel: liin K-H, liin K-R, liin R-P, liin P-B, liin E-P, liin B-E ja liin E-V.

Liinil B-A testitud stsenaariumid:

- test 3.1 – lühis distantskaitse esimeses tsoonis (65%);
- test 3.2 – lühis distantskaitse teises tsoonis (liini H-A alguses);
- test 3.3 – lühis distantskaitse kolmandas tsoonis (alajaama H lattel, liini H-A lõpus);
- test 4.3 – lühis distantskaitse esimeses ja teise tsoonis piiril (ca 85% liinil).

### 3.4. Tulemuste analüüs

Distantskaitsete võrdlemisel vaadeldi kaitsete toimeaegasid ning esimese ja teise tsooni piiril tehtud testidel vaadeldi ka kaitsetest välja loetud häiresalvestite ostsillogramme. Tsoonide sees teostatud teste korrati iga testi puhul kümme korda ja järgmistes peatükkides esitatavad tulemused on nende testide keskmised. Esimese ja teise tsooni piiril teostatud teste tehti iga testi kohta kolm tükki ja võrdlemiseks võeti esimene teostatud test. Kõikide testide tulemused on toodud lisades L.1 ja L.2.

RTDSiga testimisel mõõdeti digitaalsete distantskaitsete toimekiirus järgnevalt: simulaatoris imiteeriti lühise olukorda, RTDSi binaarväljundist saadetakse pidevalt voolu ja pinge väärtusi Omicroni vahevõimendisse, mis konverteerib pinge ja voolu rele jaoks sobivaks ning saadab releesse, rele distantskaitse algoritm kalkuleerib pidevalt ning lühise tuvastamise korral saadab rele binaarväljundi kaudu väljalülitusinfo RTDSi sisendisse. Rele toimekiirust mõõdetakse lühise tekitamise hetkest RTDSis kuni tagasiside infoni jõudmisena RTDSi binaarsisendis.

Omicron CMC 256 testseadmega toimus toimekiiruste mõõtmine sarnase loogika järgi. Testseadmega imiteeriti lühiseid, mis otse testseadme voolu- ja pingeväljunditest sobiva suurusena releesse saadeti, relees algoritm kalkuleerib, kas tegu on rikkeolukorraga või mitte, ja lühise korral saadab rele väljundkontaktist väljalülitus käsu testseadme binaarsisendisse. Toimekiirust mõõdetakse testseadmega lühisingimuste imiteerimise alghetkest kuni tagasiside info jõudmiseni testseadme binaarsisendisse.

Tootja1 ja Tootja2 distantskaitsete testimisel piiranguid ei olnud, kuid RTDSi integreeritud distantskaitset sai kasutada vaid RTDSiga testimisel, Omicroniga testimisel see võimalus puudus. Lisaks võimaldas reaalajasimulaatori distantskaitse seadistada maksimaalselt vaid kahte liini poole suunatud kaitseastet. RTDSi sisese distantskaitse testimisel silmas pidada, et tegemist on simulaatori sisese distantskaitse funktsiooniga, ühtegi füüsilist ahelat ega väljundkontakti see ei oma.

Testide tulemustest saab järeldada, et üldiselt käituvad testitud distantskaitsed võrdlemisi ühtlaselt ja stabiilselt, sest sama tüüpi katsete puhul oli tulemuste varieerumine marginaalne. Teatud tingimustes on samas kaitsete töötamise kiirustes vahed märkimisväärsed, mida järgnevates punktides detailsemalt kirjeldatakse. Lisaks kaitsete käitumisele võrreldi ka RTDS simulaatoriga ja releede testseadmega Omicron CMC 256 testimise erinevusi. RTDSi ja Omicroniga testimisel tulid samuti välja erinevad nüansid, mida tuleb kaitsete sätete arvutamisel ja testimisel silmas pidada.

### 3.4.1 Liin K-H testide tulemused

Liini K-H pikkus on 18,8 km ja induktiivtakistus 5,04  $\Omega$ . RTDS simulaatori ja Omicroni testseadmega teostati kümme 1-faasilist ja kümme 3-faasilist lühist liini alguses ehk 14,9 % liini pikkusest. Lühisekoha kaugus kaitsest on arvutuslikult 2,8 km ja arvutuslik induktiivtakistus on 0,75  $\Omega$ . Esimese tsooni säte antud liinil on 4,3  $\Omega$  ehk 85 % liini pikkusest. Jooniselt 3.6 on näha kõikide liini K-H esimese tsooni testide puhul kaitsete reageerimisaegade keskmised tulemused.

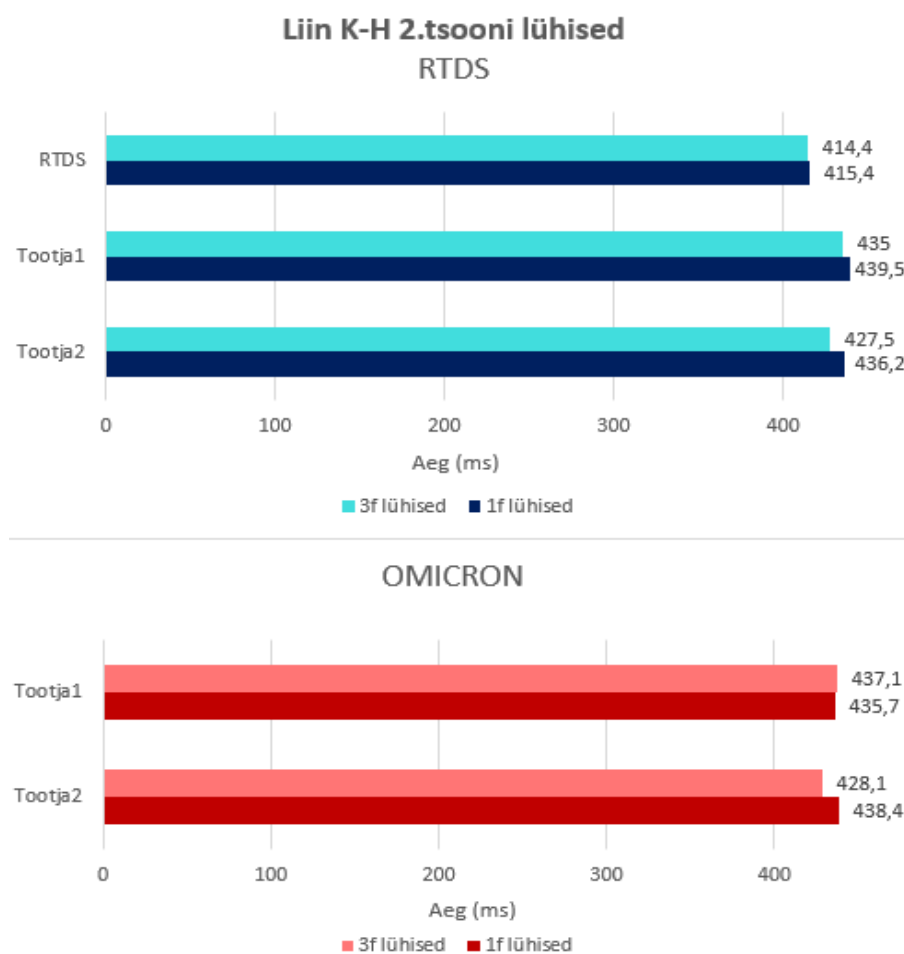


**Joonis 3.6 Liin K-H 1. tsooni testide tulemused**

Tulemustest saab järeldada, et kõik kaitseid töötasid ootuspäraselt ja stabiilselt ning reageeris ka soovitud töötsoon. Antud katse puhul on näha, et selgelt kõige kiiremini töötab Tootja1 distantSKaitse, sõltumata sellest, kas tegu on 1-faasilise või 3-faasilise lühisega, seda nii RTDS simulaatoriga kui ka Omicroniga testides. Tootja2 relee on selle katse puhul kõikidel juhtumitel oluliselt aeglasem ning samuti on märkimisväärne vahe 1- ja 3-faasilistele lühistele

reageerimise aja puhul, mis Tootja1 ja RTDSi sisesel distantskaitsetel ei avaldu. 1-faasilise lühise tulemust mõjutab kindlasti kompenseerimistegur, mis kalkuleeritakse mõlema tootja rele puhul erinevate meetoditega. Mõlema rele puhul kompenseerimistegurite sätted on kalkuleeritud vastavalt tootja soovitudele. Tulemustest järeldub, et suured erinevused ei ole tingitud testseadmetest, sest ühe kaitse puhul töötab see RTDS simulaatoriga testides kiiremini, teise kaitse puhul töötab Omicroniga testides kiiremini. Lisaks väärib mainimist asjaolu, et kuna esimese tsooni viide on 0 s, siis 41 ms lühise kestus võrrelduna 15 ms lühise kestusega on märkimisväärselt pikem aeg.

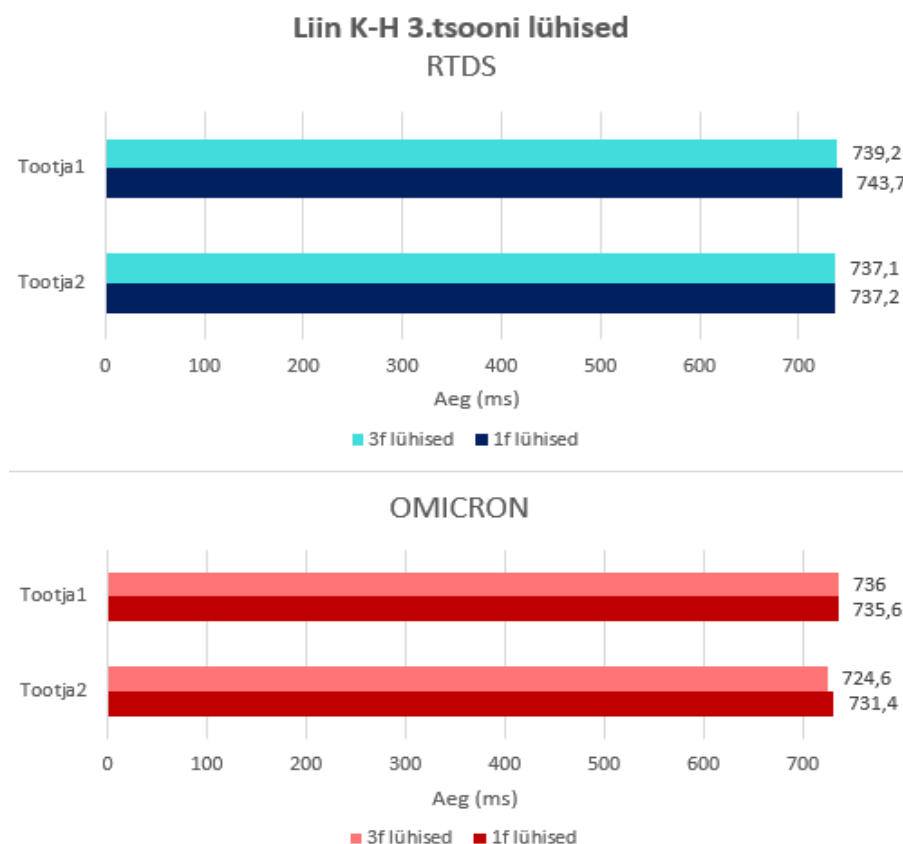
Liini K-H pikkus on 18,8 km ja induktiivtakistus 5,04  $\Omega$  ning liini teise otsa alajaamast H järgmine väljuv liin on H-A. Liini H-A pikkus on 47,0 km ja induktiivtakistus 12,82  $\Omega$ . RTDS simulaatori ja Omicroni testseadmega teostati kümme 1-faasilist ja kümme 3-faasilist lühist liini H-A alguses (alajaama H latil) ehk 100 % testitava liini K-H pikkusest. Lühisekoha kaugus kaitsest on arvutuslikult 18,8 km ja arvutuslik ahela induktiivtakistus 5,04  $\Omega$ . Teise tsooni säte antud liinil on 15,0  $\Omega$ . Joonisel 3.7 on näha kõikide liini K-H teise tsooni testide tulemused.



**Joonis 3.7 Liin K-H 2. tsooni testide tulemused**

Tulemustest selgub, et kõik kaitsed töötasid ootuspäraselt ja stabiilselt ning reageeris ka soovitud töötsoon. Antud katse puhul on näha eelmise katsega vastupidist tulemust, kõige aeglasemalt töötab see kord Tootja1 distantskaitse. Kõige kiiremini reageerib lühisele RTDSi sisene distantskaitse, sõltumata sellest, kas tegu on 1-faasilise või 3-faasilise lühisega. Tasub silmas pidada, et teise tsooni puhul ei mängi 10 ms pikem või lühem kaitse viide suurt rolli, kuna teise tsooni viite säte on iseenesest 400 ms. Samuti on näha erinevusi Tootja1 ning Tootja2 digitaalsetel releedel 1- ja 3-faasilistele lühistele reageerimise aja puhul. 1-faasilise lühise tulemust mõjutab kompenseerimistegur, mida 3-faasilite lühiste puhul relee eraldi kalkuleerima ei pea. Tulemustest saab järeldada, et mõlema testseadmega töötavad releed üsna sarnaselt.

Liini K-H pikkus on 18,8 km ja induktiivtakistus 5,04  $\Omega$  ning liini teise otsa alajaamast H järgmine väljuv liin on H-A. Liini H-A pikkus on 47,0 km ja induktiivtakistus 12,82  $\Omega$ . RTDS simulaatori ja Omicroni testseadmega teostati kümme 1-faasilist ja kümme 3-faasilist lühist liini H-A lõpus (alajaama A latil) ehk 350 % testitava liini K-H pikkusest. Lühisekoha kaugus kaitsest on arvutuslikult 65,8 km ning ahela arvutuslik induktiivtakistus 17,87  $\Omega$ . Kolmanda tsooni säte antud liinil on 32,0  $\Omega$ . Joonisel 3.8 on liini K-H kolmanda tsooni testide toimeaegade tulemused.



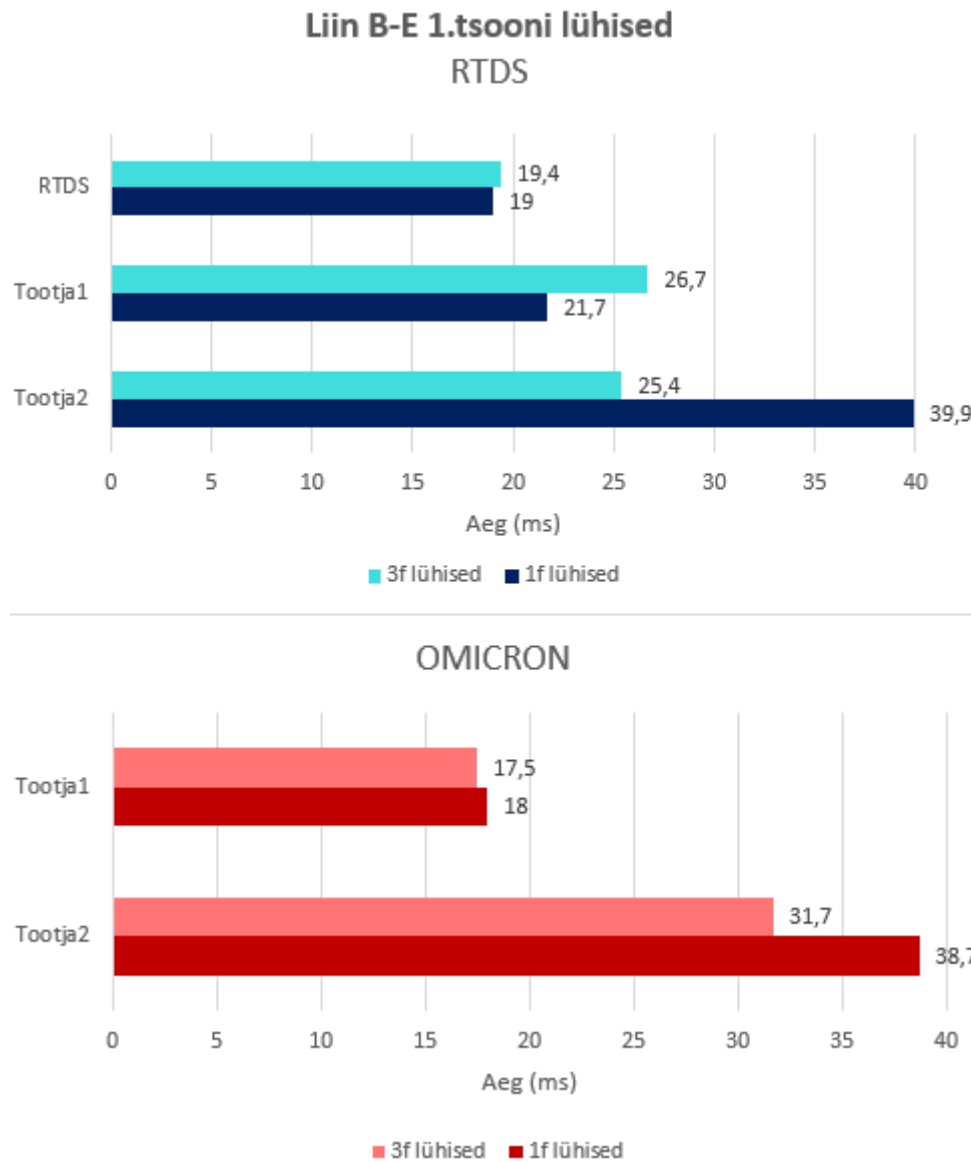
**Joonis 3.8 Liin K-H 3. tsooni testide tulemused**

Tulemustest selgub, et kõik kaitsed töötasid ootuspäraselt ja stabiilselt ning reageeris ka soovitud töötsoon. Antud katse puhul saab võrrelda vaid Tootja1 ja Tootja2 distantsskaitseid ning sarnaselt teise tsooni testiga on näha, et Tootja2 distantsskaitse töötab natuke kiiremini. Tasub jällegi silmas pidada asjaolu, et ka kolmanda tsooni puhul ei mängi 10 ms pikem või lühem kaitse toime suurt rolli, kuna kaugemad astmed on mõeldud töötama viitega reservkaitsetena. Samuti on näha mõningat varieerumist 1- ja 3-faasilistel lühistel, seda RTDSiga testides Tootja1 puhul ja Omicroniga testides Tootja2 relee puhul. Kuigi antud tulemustest saab järeldada, et mõlema testseadmega töötavad releed üsna sarnaselt, siis RTDSiga testides oli antud juhul märgata, millist mõju hakkab avaldama vastastikune sidestus ja voolude jagunemine alajaamades. Kui arvutuslik liiniahela induktiivtakistus kaitsest alajaama A latini on  $17,87 \Omega$ , siis kaitse mõõdab alajaama A latil induktiivtakistuseks  $23,65 \Omega$ . Kuna kolmanda tsooni sätte piir on  $32,0 \Omega$ , siis sel juhtumil kaitse ulatusega probleeme ei tekkinud.

### **3.4.2 Liin B-E testide tulemused**

Liini B-E pikkus on 21,7 km ja induktiivtakistus  $6,66 \Omega$ . RTDS simulaatori ja Omicroni testseadmega teostati kümme 1-faasilist ja kümme 3-faasilist lühist esimese tsooni keskpaigas ehk 39,6 % liini pikkusest. Lühisekoha kaugus kaitsest on arvutuslikult 8,6 km ja arvutuslik induktiivtakistus kaitsest  $2,64 \Omega$ . Esimese tsooni sätte antud liinil on  $5,7 \Omega$  ehk 85 % liini pikkusest. Jooniselt 3.9 on näha kõikide liini B-E esimese tsooni testide toimeaegade tulemused.

Tulemustest saab järeldada, et kõik kaitsed töötasid ootuspäraselt ja stabiilselt ning reageeris ka soovitud töötsoon. Antud katse puhul on näha, et RTDS simulaatoriga testides töötas kõige kiiremini RTDS simulaatorisse integreeritud distantsskaitse. Omicroniga testides töötas Tootja1 distantsskaitse veelgi kiiremini ja 3-faasilise lühise puhul ligi 10ms kiiremini kui RTDSiga testides. Tootja2 distantsskaitse oli mõlemal juhul aeglasem ning märkimisväärselt aeglasem 1-faasilistel lühistel. Nagu eelnevalt mainitud, siis on see tingitud tõenäoliselt 1-faasilise lühise arvutamise kompenseerimistegurist. Kuigi Tootja1 relee puhul on selgelt näha, et Omicroniga testides on relee toimeajad märksa kiiremad, siis Tootja2 puhul sama järeldada ei saa. Omicroniga teostatud testide põhjal on näha, et Tootja1 kaitse on kiirem, kuid RTDS simulaatoriga 3-faasiliste lühiste puhul reageerib Tootja2 relee jällegi kiiremini. 1-faasiliste lühiste puhul on Tootja2 relee ligi kaks korda aeglasem, mis esimese tsooni puhul on juba küllalt suur erinevus.

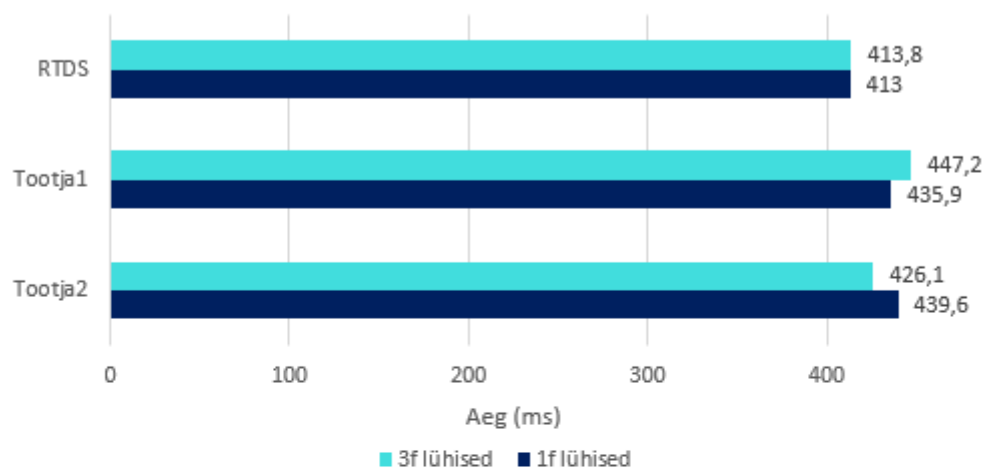


**Joonis 3.9 Liin B-E 1. tsooni testide tulemused**

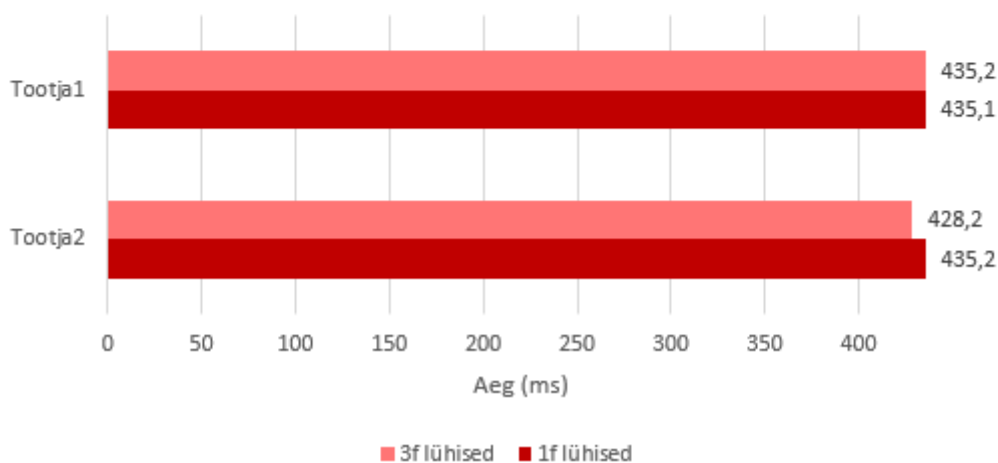
Liini B-E pikkus on 21,7 km ja induktiivtakistus 6,66  $\Omega$  ning liini teise otsa alajaamast E esimene väljuv liin on E-T. Liini E-T pikkus on 243,3 km ja induktiivtakistus 81,16  $\Omega$ . RTDS simulaatori ja Omicroni testseadmega teostati kümme 1-faasilist ja kümme 3-faasilist lühist liini E-T alguses (alajaama E latil) ehk 100 % testitava liini B-E pikkusest. Lühisekoha kaugus kaitsest on arvutuslikult 21,7 km ja ahela arvutuslik induktiivtakistus on 6,66  $\Omega$ . Teise tsooni säte on 30,0  $\Omega$ . Joonisel 3.10 on näha kõikide liini B-E teise tsooni testide (liinil E-T) toimeaegade tulemused.

### Liin B-E 2.tsooni lühised (liinil E-T)

#### RTDS



#### OMICRON

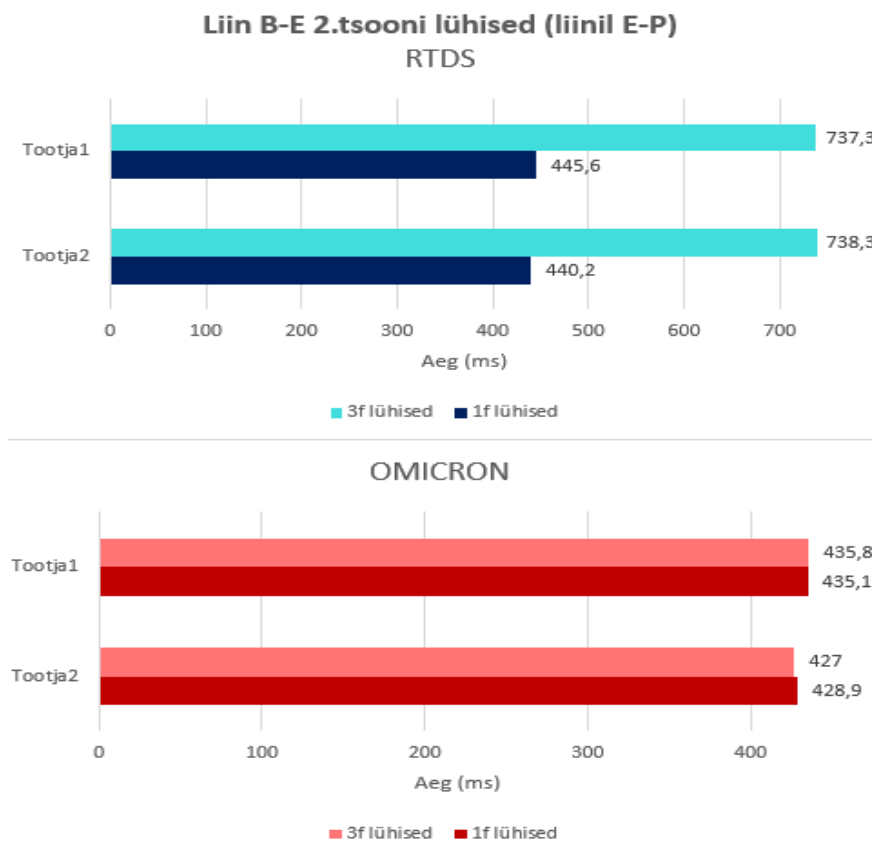


#### Joonis 3.10 Liin B-E 2. tsooni testide tulemused (liinil E-T)

Tulemustest selgub, et kõik kaitsed töötasid ootuspäraselt ja stabiilselt ning reageeris ka soovitud tsootsoon. Antud katse puhul on näha, et kõige kiiremini töötab RTDS simulaatori sisene distantkaitse ja mõlemal juhul on kõige aeglasemalt Tootja1 distantkaitse. Tasub mainida, et teise tsooni puhul ei mängi 10 ms pikem või lühem kaitse toime suurt rolli, kuna teise tsooni säte on 400 ms. Samuti on näha erinevusi Tootja1 ning Tootja2 digitaalsetel releedel 1- ja 3-faasilistele lühistele reageerimise puhul. Kui Tootja1 rele reageerib 1-faasilistele lühistele märksa kiiremini kui 3-faasilistele, siis Tootja2 rele jällegi aeglasemini. Tulemustest saab järeldada, et mõlema testseadmega töötavad releed üsna sarnaselt, kuigi Tootja1 rele toime on Omicroniga testides natuke kiirem.



Liini B-E pikkus on 21,7 km ja induktiivtakistus 6,66  $\Omega$  ning liini teise otsa alajaamast E teine väljuv liin on E-P. Liini E-P pikkus on 57,2 km ja induktiivtakistus 15,92  $\Omega$ . RTDS simulaatori ja Omicroni testseadmega teostati kümme 1-faasilist ja kümme 3-faasilist lühist liini E-P keskpäigas ehk 245 % testitava liini B-E pikkusest. Lühisekoha kaugus kaitsesest on arvutuslikult 56,0 km ja ahela arvutuslik induktiivtakistus on 17,19  $\Omega$ . Teise tsooni säte on 30,0  $\Omega$ . Joonisel 3.11 on kujutatud kõikide liini B-E teise tsooni testide (liinil E-P) toimeaegade tulemused.

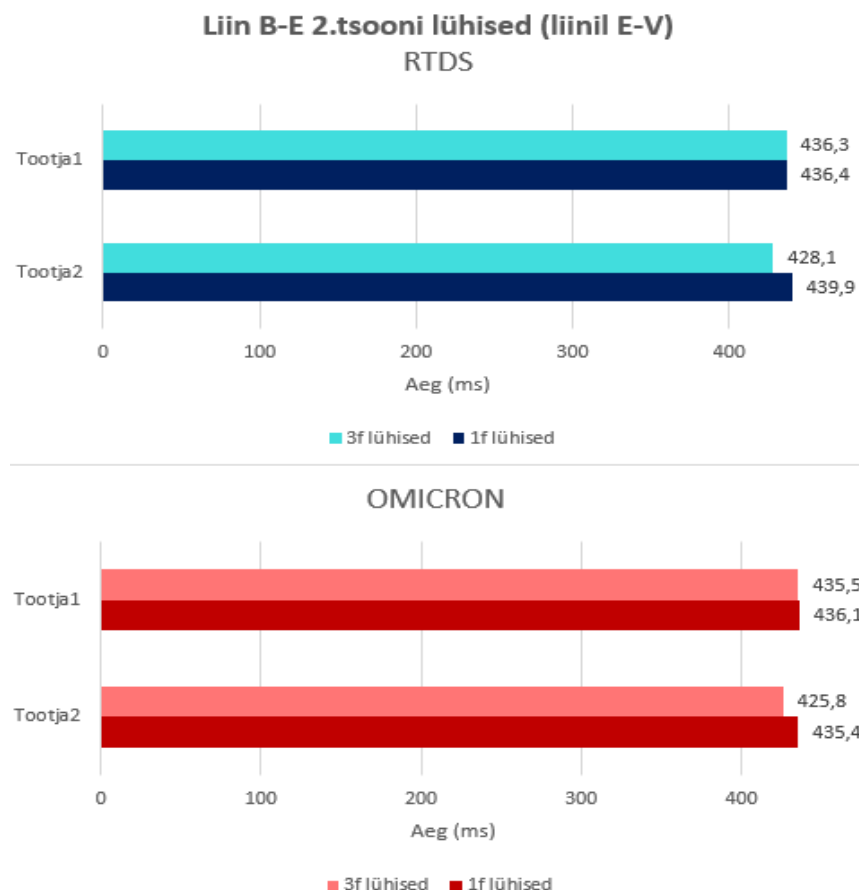


**Joonis 3.11 Liin B-E 2. tsooni testide tulemused (liinil E-P)**

Tulemustest järeldub, et kuigi kaitses töötasid õigesti, ei reageerinud need ootuspäraselt. Kuigi kaitses töötasid stabiilselt, reageeris RTDS simulaatoriga testides 3-faasilistel lühistel vale tsoonis. Esiõigsel testimisel RTDSiga reageeris ka 1-faasilistel lühistel kolmas tsoon, kuna releede jaoks oli antud punktis takistust 82,7  $\Omega$ , mis on sättest ligi kolm korda suurem. Selle tingib olukord, kus osa lühisvoolust hakkab käima läbi P-B liini, kuna see ahel on lühem ja väiksema takistusega. Selle vältimiseks tehti kaskaadne lühis ehk liini E-P lülitati ühendati alajaama P juurest lahti ja korrati teste. Tulemustest selgub, et isegi see ei parandanud täielikult olukorda ning 3-faasiliste lühiste puhul mõõdavad releed antud punktis takistuseks 36,5  $\Omega$ , mis on ahela takistusest kaks korda suurem ja ületab teise tsooni sätet 6,5  $\Omega$  võrra. Olukord on tingitud sellest, et alajaamas E toimub suur voolude jagunemine ning paralleellinide

vastastikune induktiivsus avaldab samuti suurt mõju. Tulemuse parandamiseks tuleks antud liinil sätete arvutused uuesti üle kontrollida. Omicroniga sama testi läbi viies probleeme ei tekkinud, kuna Omicron taustsüsteemi ei arvesta ja testimise aluseks võeti protsent liini pikkusest. Mõlemad kaitsed käitusid üsna sarnaselt ja Omicroniga testimise puhul on näha, et Tootja2 distantskaitse reageeris märksa kiiremini. Tulemustest selgub, et simulaatoriga testimise eelis: RTDS arvestab võrgus toimuvaid protsesse, voolude jagunemine sõlmedes ja liinide vastastikune induktiivsus, mille mõju testseadmega testides ei avaldu.

Liini B-E pikkus on 21,7 km ja induktiivtakistus 6,66  $\Omega$  ning liini teise otsa alajaamast E kolmas väljuv liin on E-V. Liini E-V pikkus on 61,7 km ja induktiivtakistus 18,90  $\Omega$ . RTDS simulaatori ja Omicroni testseadmega teostati kümme 1-faasilist ja kümme 3-faasilist lühist liini V-E keskpäigas ehk 199,5 % testitava liini B-E pikkusest. Lühisekoha kaugus kaitsest on arvutuslikult 43,3 km ja arvutuslik induktiivtakistus on 13,27  $\Omega$ . Teise tsooni säte on 30,0  $\Omega$ . Joonisel 3.12 on näha kõikide liini B-E teise tsooni testidel (liinil E-V) toimeaegade tulemused.



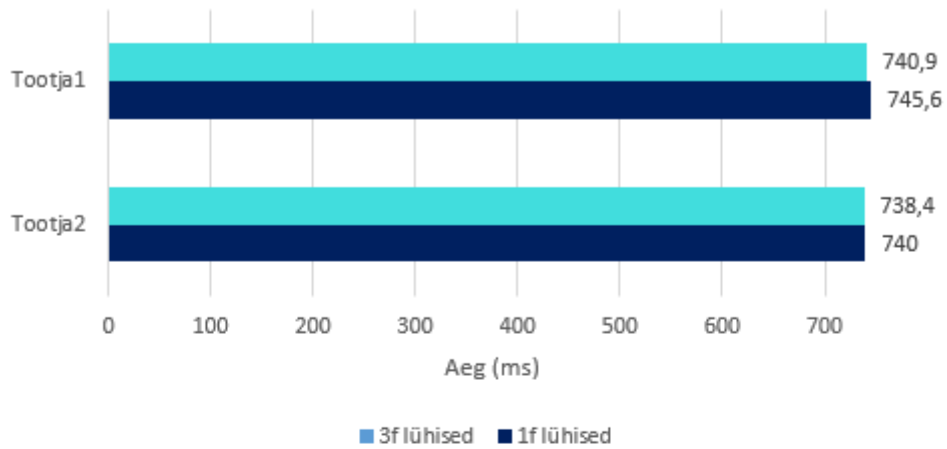
**Joonis 3.12 Liin B-E 2. tsooni testide tulemused (liinil E-V)**

Tulemustest selgub, et kõik kaitsed töötasid ootuspäraselt ja stabiilselt ning reageeris ka soovitud tõesoon. Antud katse puhul on näha, et Tootja2 distantskaitse töötab üldjuhul natuke kiiremini, välja arvatud RTDSiga 1-faasilisi lühiseid imiteerides. Jällegi tasub mainida, et teise tsooni puhul ei mängi natuke pikem viide suurt rolli, kuna teise tsooni säte on üsna pikk. Kuigi antud tulemustest saab järeldada, et mõlema testseadmega töötavad releed üsna sarnaselt, siis RTDSiga testides oli märgata paralleelliinide vastastikuse sidustatuse ja voolude jagunemise mõju. Kui arvutuslik liiniahela induktiivtakistus kaitse jaoks lühisekohas on  $13,27 \Omega$ , siis mõõdab kaitse antud punktis takistuseks  $23,45 \Omega$ . Kuna teise tsooni säte on  $30,0 \Omega$ , siis sel juhtumil tsooni ulatusega probleeme ei tekkinud.

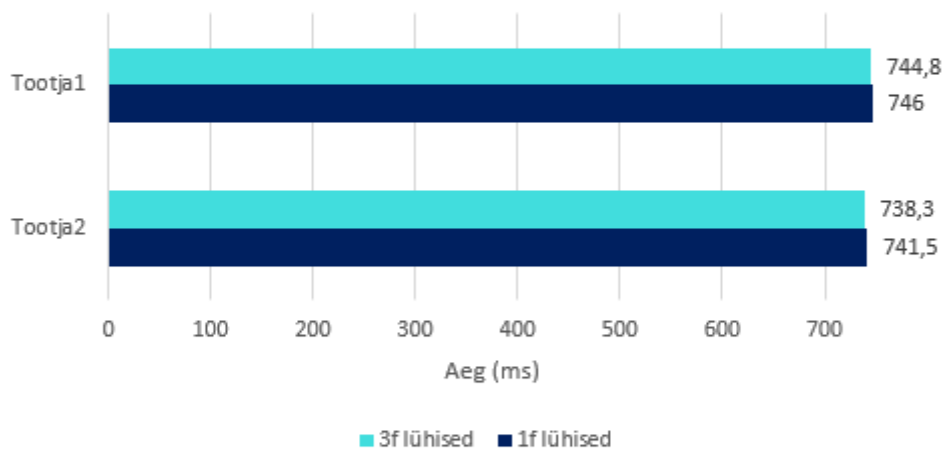
Liini B-E teise otsa alajaamast E väljub kokku kolm liini – liin E-T pikkusega  $243,3 \text{ km}$ , liin E-P pikkusega  $57,2 \text{ km}$  ja liin E-V pikkusega  $61,7 \text{ km}$ . Kolmas tsoon arvutatakse üldjuhul kõige pikema liini järgi ehk vastava liini teise otsa lattiideni. Kuna antud juhul on liin E-T teistest oluliselt pikem, siis tingituna selle liini suurest takistusest ja alajaamas E toimuvast voolude jagunemisest, tuleks selle järgi valides kolmanda tsooni säte teiste liinide jaoks liiga suur. See tähendab, et sätte ulatus teistes alajaamades oleks liiga pikk ja selektiivsus poleks tagatud. Selle vältimiseks on võimalik arvutada liini E-T jaoks eraldi vaheaste, mis on pikema viitega, ja kolmanda tsooni säte valitakse pikkuselt järgmise liini järgi. Kuna antud töö põhieesmärk pole sätete arvutamine, siis olukorra lihtsustamise eesmärgil jäetakse liini E-T kaitsmine kõrvale ja valitakse kolmanda tsooni säte liini E-V põhjal. 3. tsooni teste teostatakse seetõttu vaid alajaamade V ja P lattidel.

RTDS simulaatori ja Omicroni testseadmega teostati kümme 1-faasilist ja kümme 3-faasilist lühist liini E-V lõpus (alajaama V latil) ja liini E-P lõpus (alajaama P latil) ehk vastavalt  $384,3 \%$  ja  $363,6 \%$  testitava liini B-E pikkusest. Lühisekoha kaugused kaitsest on arvutuslikult  $83,4 \text{ km}$  ja  $78,9 \text{ km}$  ning ahelate arvutuslikud induktiivtakistused on  $25,56 \Omega$  ja  $22,58 \Omega$ . Kolmanda tsooni säte on  $125,0 \Omega$ . Joonisel 3.13 on liini B-E kolmanda tsooni testide tulemused. Tulemused on toodud RTDSiga testides eraldi alajaama P latil ja alajaama V latil, Omicroniga testides valiti kolmandas tsoonis paiknev punkt. Alajaamas P tuli 3 tsooni lühist testida kaskaadse lühisega, sest vastasel juhul hakkas kogu lühisvool läbi liini P-B käima.

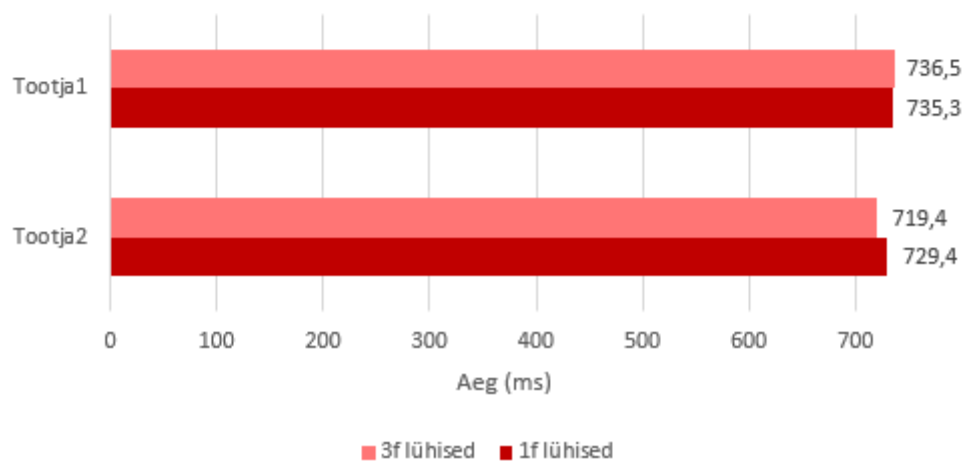
### Liin B-E 3.tsooni lühised (latil P) RTDS



### Liin B-E 2.tsooni lühised (latil V) RTDS



### OMICRON



Joonis 3.13 Liin B-E 3. tsooni testide tulemused

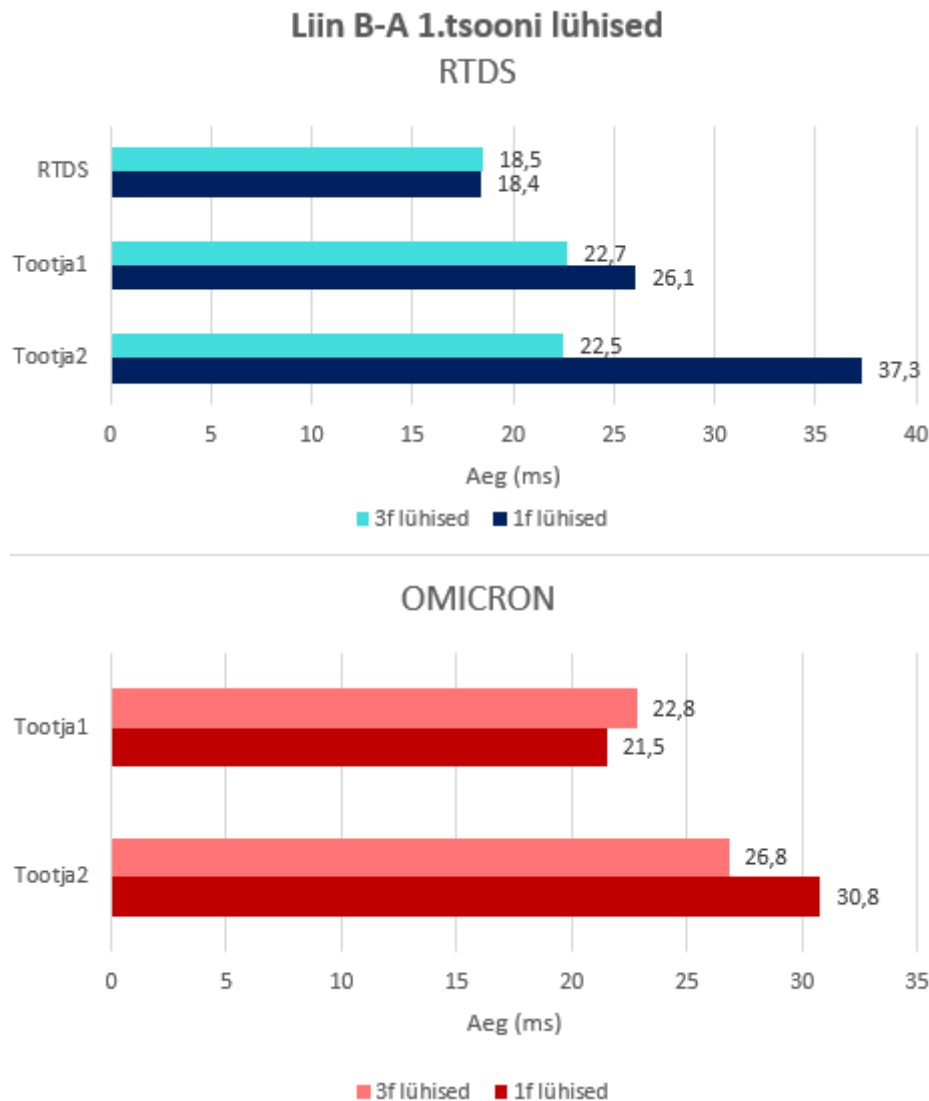
Tulemustest selgub, et kõik kaitsed töötasid ootuspäraselt ja stabiilselt ning reageerisid ka soovitud tõesoonid. Antud katse puhul saab võrrelda vaid Tootja1 ja Tootja2 distantskaitseid ning sarnaselt teise tsooni testiga on näha, et Tootja2 distantskaitse töötab natuke kiiremini. Tasub jällegi silmas pidada, et ka kolmanda tsooni puhul ei mängi 10 ms pikem või lühem kaitse viide suurt rolli, kuna tsooni säte on iseenesest juba võrdlemisi pikk - 700 ms. Samuti on näha mõningast varieerumist Omicroniga testimisel Tootja2 releel 1- ja 3-faasilistel lühistel, muudel juhtudel on ajad peaaegu võrdsed. Kuigi antud tulemustest saab järeldada, et mõlema testseadmega töötavad releed üsna sarnaselt, siis RTDSiga testides oli näha eelnevalt mainitud vastastikuse induktiivsuse ja voolude jagunemise mõju. Kui arvutuslik liinilõigu induktiivtakistus kaitse jaoks alajaama P latil on 24,21  $\Omega$  ja alajaama V latil on 25,60  $\Omega$ , siis kaitse näeb antud punktides takistusi vastavalt 56,30  $\Omega$  ja 52,80  $\Omega$ . Kuna kolmanda tsooni säte on valitud varuga üsna suur ehk 125,0  $\Omega$ , siis kummalgi juhul probleeme ei tekkinud. Omicroniga testides tekkis olukord, kus liini pikkuse järgi alajaama P ja V lattide sätted sattusid teise tsooni, kuna mõlemad olid alla teise tsooni sätte ehk alla 30,0  $\Omega$ . Kolmanda tsooni testimiseks valiti juhuslik punkt, mis oleks üle teise tsooni sätte ehk üle 33,5  $\Omega$ .

### **3.4.3 Liin B-A testide tulemused**

Liini B-A pikkus on 209,7 km ja induktiivtakistus 61,55  $\Omega$ . RTDS simulaatori ja Omicroni testseadmega teostati kümme 1-faasilist ja kümme 3-faasilist lühist esimese tsooni lõpu poole ehk 65,6 % liini pikkusest. Lühisekoha kaugus kaitsest on arvutuslikult 137,6 km ja arvutuslik induktiivtakistus on 40,32  $\Omega$ . Esimese tsooni säte antud liinil on 52,3  $\Omega$  ehk 85 % liini pikkusest. Jooniselt 3.14 on kujutatud kõikide liini B-A esimese tsooni testidel kaitsete reageerimisaegade tulemused.

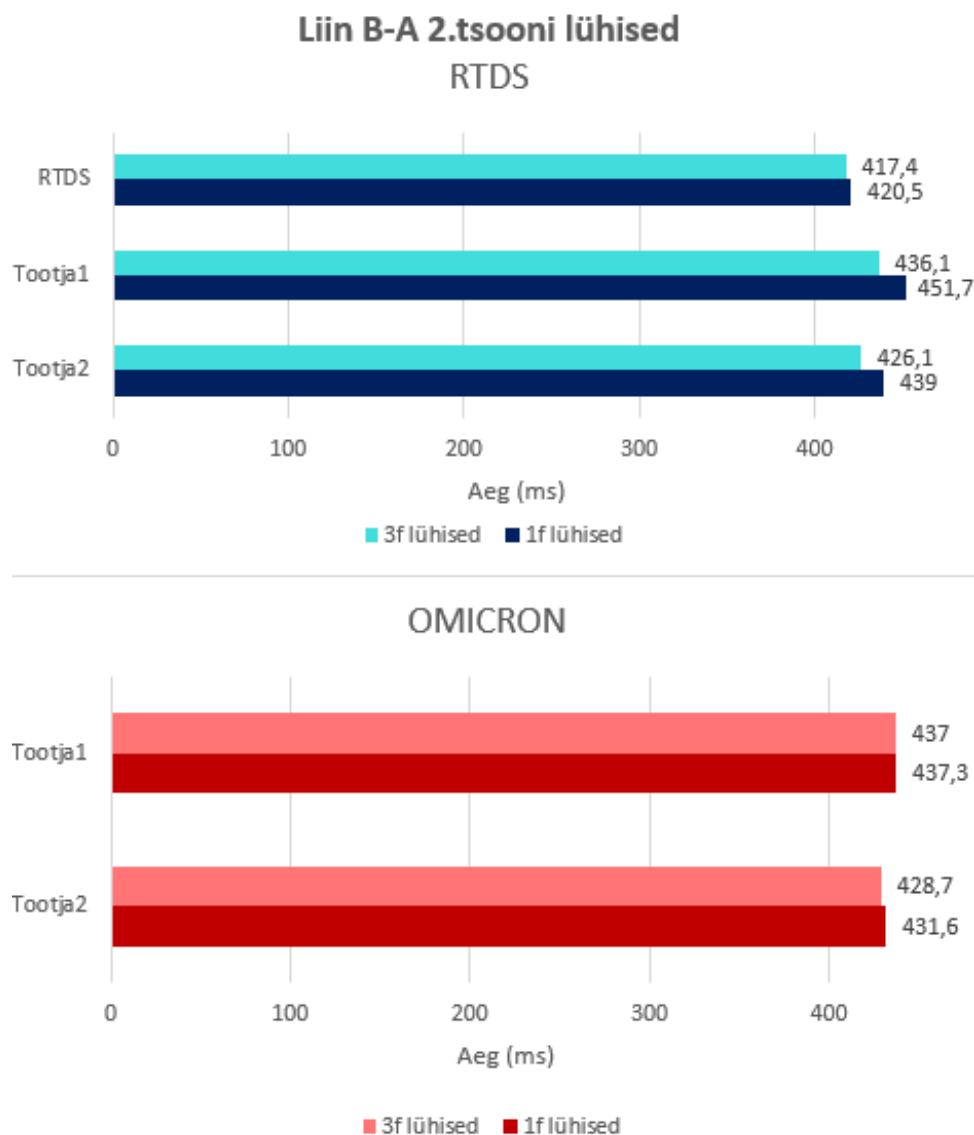
Tulemustest selgub, et kõik kaitsed töötasid ootuspäraselt ja stabiilselt ning reageeris ka soovitud tõesoon. Antud katse puhul on näha, et selgelt kõige kiiremini töötab RTDS simulaatorisse integreeritud distantskaitse, sõltumata sellest, kas tegu on 1- või 3-faasilise lühisega. Tootja2 releel on selle katse puhul kõige aeglasem, eriti jääb see silma 1-faasiliste lühiste puhul. Kuigi RTDS simulaatoriga testides on ka Tootja1 kaitse 1-faasilise lühise puhul märksa aeglasem kui 3-faasilise puhul, siis Omicroniga testides on tulemus hoopis vastupidine. Tootja2 kaitse 3-faasilise lühise aeg muutub Omicroniga testides pikemaks, aga samas muutub 1-faasilise lühise aeg jällegi lühemaks. 1-faasilise lühise tulemust mõjutab nulljärgnevustakistustest sõltuv kompenseerimistegur, mis antud pika liini puhul on võrdlemisi suured. Lisaks on liinil B-A hulk paralleelselt kulgevaid liine, millede vastastikune induktsioon

omab samuti mõju. Tulemustest võib järeldada, et erinevused 1-faasilistel lühistel on tingitud asjaolust, et RTDSi mudelis on rohkem infot süsteemi ja paralleelahelate kohta, kuid Omicroniga testides seda simuleerida ei saa.



**Joonis 3.14 Liin B-A 1. tsooni testide tulemused**

Liini B-A pikkus on 209,7 km ja induktiivtakistus 61,55  $\Omega$  ning liini teise otsa alajaamast A järgmine väljuv liin on H-A. Liini H-A pikkus on 47,0 km ja induktiivtakistus 12,82  $\Omega$ . RTDS simulaatori ja Omicroni testseadmega teostati kümme 1-faasilist ja kümme 3-faasilist lühist liini H-A keskaigas ehk 109,3 % testitava liini B-A pikkusest. Lühisekoha kaugus kaitsest on arvutuslikult 229,1 km ja ahela arvutuslik induktiivtakistus on 66,85  $\Omega$ . Teise tsooni säte on 76,0  $\Omega$ . Joonisel 3.15 on liini B-A teise tsooni testide toimeaegade tulemused.



***Joonis 3.15 Liin B-A 2. tsooni testide tulemused***

Esiatsel teise tsooni testimisel tekkis olukord, kus arvutatud säte 1-faasilisel maalühisel ei ulatunud piisavalt kaugele. CAPEga kontrollides oli tulemuseks, et 3-faasilise lühise põhjal arvutatud säte 76 Ω, mis peaks ulatama liinil H-A 71%-ni, ulatus 1-faasilise lühise puhul vaid 41%-ni, tingituna vastastikusel induktiivsusest paralleelliniil. Testimiseks muudeti lühise asukoht kaitsele lähemale. Tulemustest selgub, et sel juhul töötasid kõik kaitse ootuspäraselt ja stabiilselt ning reageeris ka soovitud töötsoon. Kõige kiiremini reageerib lühisele RTDSi sisene distantskaitse, sõltumata sellest, kas tegu on 1-faasilise või 3-faasilise lühisega. Kõige aeglasemini toimib Tootja1 distantskaitse. Tasub silmas pidada, et teise tsooni puhul ei mängi 10 ms pikem või lühem kaitse viide suurt rolli, kuna tegu on reserveeriva viitkaitsega. Omicroniga testides toimivad mõlema tootja releed 1- ja 3-faasiliste lühiste puhul suhteliselt

samaaegselt, kuid RTDSiga testides on erinevused märgatavad. Nagu ka esimese tsooni lühise puhul, siis antud pikal liinil tuleb hästi välja, et erinevused 1-faasilistel lühistel on tingitud asjaolust, et RTDSi mudelis on rohkelt infot võrgu ja paralleelahelate kohta, mille tõttu saab tõenäoliselt reaalsemad tulemused.

Liini B-A pikkus on 209,7 km ja induktiivtakistus 61,55  $\Omega$  ning liini teise otsa alajaamast A järgmine väljuv liin on H-A. Liini H-A pikkus on 47,0 km ja induktiivtakistus 12,82  $\Omega$ . RTDS simulaatori ja Omicroni testseadmega teostati kümme 1-faasilist ja kümme 3-faasilist lühist liini H-A lõpus (alajaama H latil) ehk 122,4 % testitava liini B-A pikkusest. Lühisekoha kaugus kaitsesest on arvutuslikult 256,7 km ja ahela arvutuslik induktiivtakistus on 74,40  $\Omega$ . Kolmanda tsooni säte antud liinil on 120,0  $\Omega$ . Joonisel 3.16 on kujutatud liini B-A kolmanda tsooni testide toimeaegade tulemused.



**Joonis 3.16 Liin B-A 3. tsooni testide tulemused**



Tulemustest selgub, et kõik kaitsed töötasid ootuspäraselt ja stabiilselt ning reageeris ka soovitud töötsoon. Antud katse puhul saab võrrelda vaid Tootja1 ja Tootja2 distantskaitseid ja sarnaselt teise tsooni testiga on näha, et Tootja2 distantskaitse töötab natuke kiiremini. Tasub jällegi silmas pidada, et ka kolmanda tsooni puhul ei mängi natuke pikem kaitse viide suurt rolli, kuna tsooni säte on võrdlemisi pikk - 700 ms. Samuti on näha varieerumist 1- ja 3-faasilistel lühistel. Kuigi antud tulemustest saab järeldada, et mõlema testseadmega töötavad releed üsna sarnaselt, siis RTDSiga testides oli näha vastastikuse induktiivsuse ja voolude jagunemise mõju. Kui arvutuslik liinilõigu induktiivtakistus kaitse jaoks alajaama H latil on 74,40  $\Omega$ , siis kaitse mõõdab antud punktis takistuseks 80,10  $\Omega$ . Kuna kolmanda tsooni säte on valitud 120,0  $\Omega$ , siis probleeme ei tekkinud. Omicroniga testides tekkis olukord, kui liini pikkuse järgi alajaama H lati säte sattus teise tsooni, kuna 74,4  $\Omega$  jääb veel teise tsooni sätte piiri (76,0  $\Omega$ ). Kolmanda tsooni testimiseks valiti juhuslik punkt, mis oleks üle teise tsooni sätte ehk 83,3  $\Omega$ .

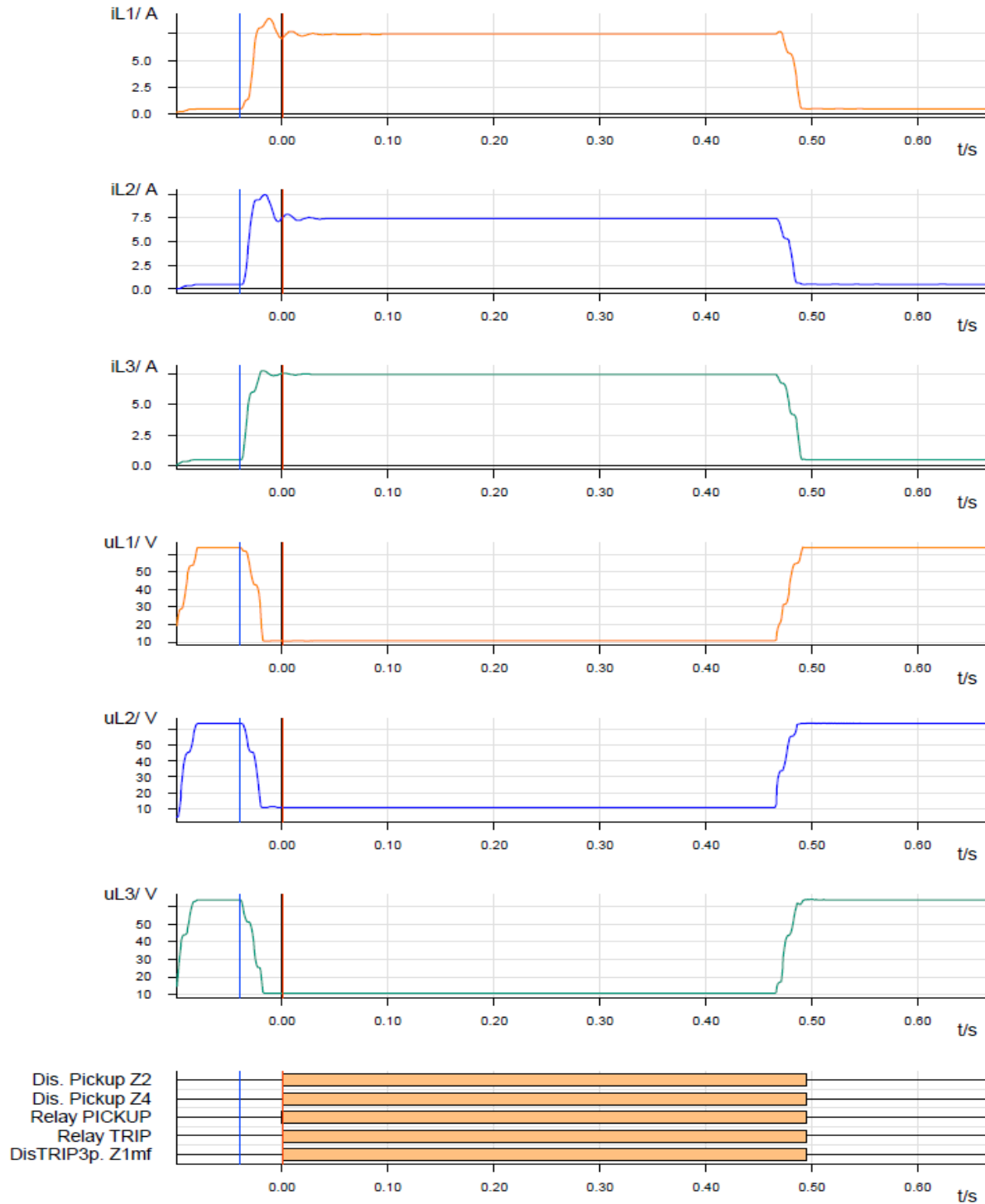
#### **3.4.4 1.-2. tsooni piiril teostatud testide tulemused**

Distantskaitse esimese ja teise töötsooni piiril testiti vaid Tootja1 ja Tootja2 digitaalseid distantskaitseid. Iga liini puhul teostati kolm testi RTDS simulaatoriga ja kolm testi Omicroni testseadmega. Teste tehti vaid 3-faasiliste lühistega ja testpunkt valiti täpselt esimese tsooni lõpu ja teise tsooni alguse piirile ehk 85,1% liini pikkusest. Tulemusena fikseeriti kaitsete toimekiirused ja kaitsete häiresalvestid, mille ostsillogramme võrreldi. Antud peatükis tuuakse välja iga liini puhul kõige esimese katse tulemused, ülejäänud katsete tulemused on toodud lisas L.2.

Testide tulemustest saab järeldada, et digitaalsetel distantskaitsetel on täpselt töötsooni piiril keeruline otsustada, mis lühisega tegu on, ja väljalülituskäsk tuleb üldjuhul pika viitega. Tulemustest on näha, et tsoonis sees tehtud testidel olid esimese tsooni väljalülitused keskmiselt 25 ms viitega, siis tsooni piiril kumbki kaitse alla 35 ms ei töötanud. Markantsemate näidete puhul reageerisid kaitsed 0 s viite asemel 100-200 ms viitega.

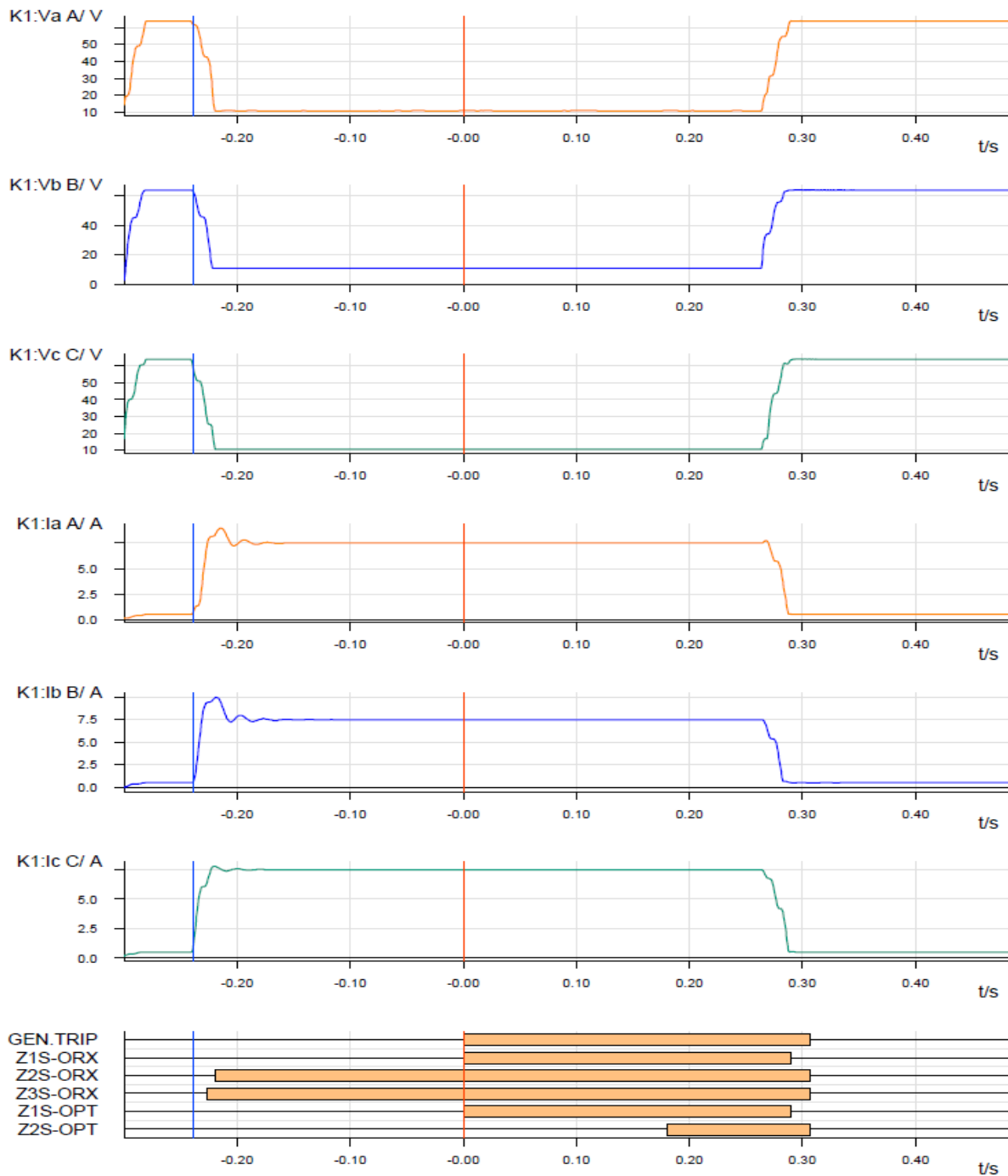
Ostsillogrammide põhjal on samuti võimalik analüüsida kaitsereleede väljundkontakti toimeaega. Testseadmed fikseerivad kaitse toime lühise imiteerimise hetkest kuni releel väljalülituskäsuni, aga ostsillogramm võimaldab näha ajavahet lühise alguse hetkest kuni releel väljalülituskäsu otsuseni. Testseadmetega mõõdetud aja ja ostsillogrammilt mõõdetud aja vahe on kaitsereleel väljundkontakti toimeaeg. Tulemustest järeldub, et Tootja1 releel on väljundkontakti toimeaeg 4-7 ms ja Tootja2 releel 6-8 ms.

Joonisel 3.17 on kujutatud RTDSiga liinil K-H testides Tootja1 kaitserellee häiresalvesti. Jooniselt on näha, et relee tuvastab lühise suhteliselt ruttu ja otsustab 1. tsooni väljalülituskäsu kohe saata. RTDS simulaator registreeris kaitse toimeajaks 45,4 ms ja ostsillogrammilt mõõtes kulub voolu ja pinge muutuse algthetkest kuni väljalülituskäsuni 39,5 ms. Väljundkontakti viiteks on antud juhul 5,9 ms.



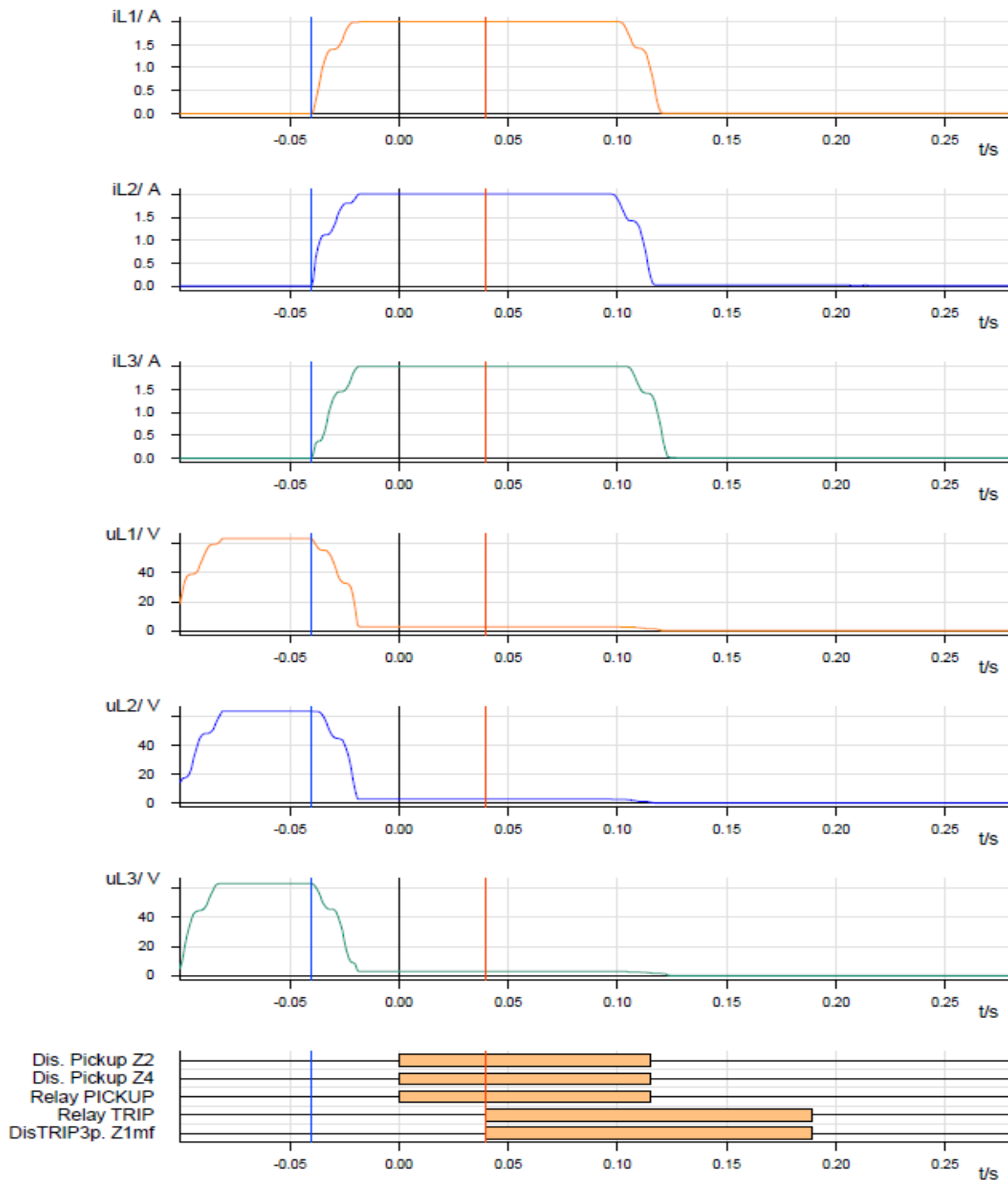
**Joonis 3.17 Tootja1 häiresalvesti liin K-H 1-2. tsooni püripealsel lühisel RTDS**

Joonisel 3.18 on kujutatud RTDSiga liinil K-H testides Tootja2 kaitserellee häiresalvesti. Jooniselt on näha, et releer tuvastab esialgu lühise kolmandas ja teises tsoonis ning jääb ootama teise tsooni viidet 400 ms, kuid 240 ms juures reageerib esimene tsoon ja saadetakse väljalülituskäsk. RTDS simulaator registreeris kaitse toimeajaks 247,3 ms ja ostsilogrammilt mõõtes kulub voolu ja pinge muutuse alghetkest kuni väljalülituskäsuani 239,9 ms. Väljundkontakti viiteks on antud juhul 7,4 ms.



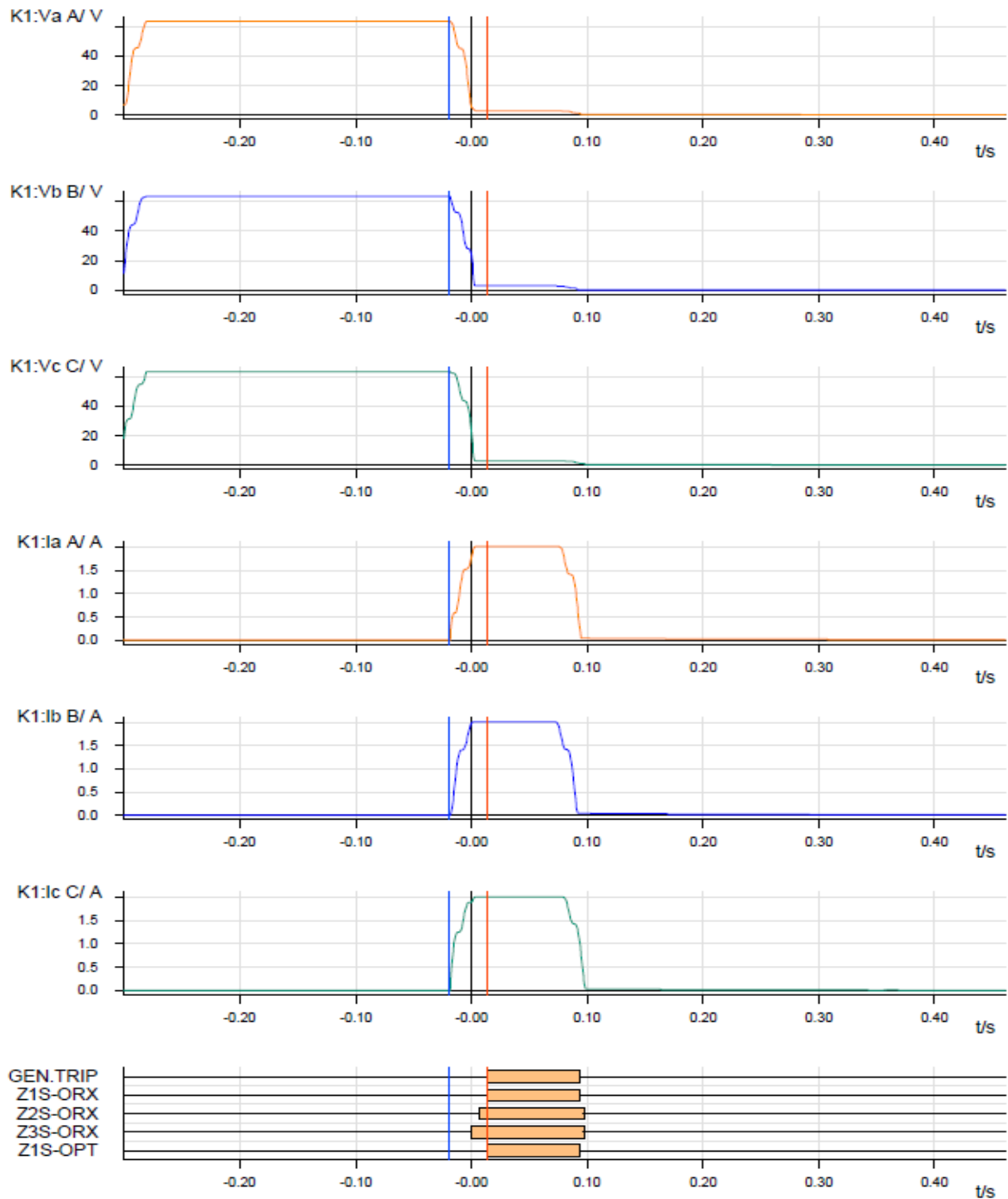
**Joonis 3.18 Tootja2 häiresalvesti liin K-H 1-2. tsooni piiripealsel lühisel RTDS**

Joonisel 3.19 on kujutatud Omicroniga liinil K-H testides Tootja1 kaitserellee häiresalvesti. Jooniselt on näha, et releetuvastab lühise 40 ms möödudes, esialgu teises tsoonis ja jääb ootama teise tsooni viidet 400 ms, kuid 40 ms hiljem reageerib esimene tsoon ja saadetakse väljalülituskäsk. Omicron registreeris kaitse toimeajaks 84,7 ms ja ostsillogrammilt mõõtes kulub voolu ja pinge muutuse alghetkest kuni väljalülituskäsuni 80,0 ms. Väljundkontakti viiteks on antud juhul 4,7 ms.



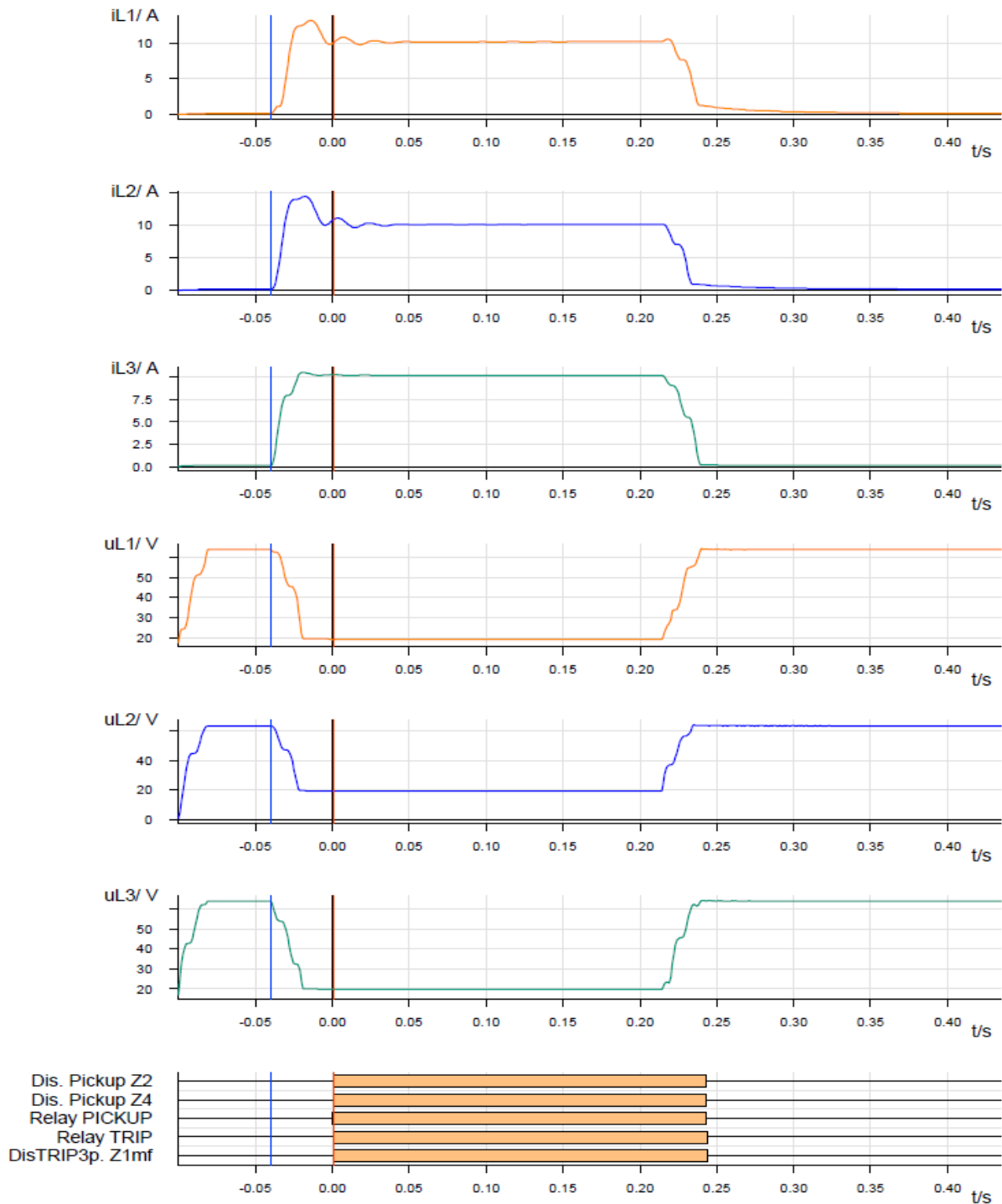
**Joonis 3.19 Tootja1 häiresalvesti liin K-H 1-2. tsooni piiripealsel lühisel Omicron**

Joonisel 3.20 on kujutatud Omicroniga liinil K-H testides Tootja2 kaitserellee häiresalvesti. Jooniselt on näha, et rele tuvastab lühise esialgu kolmandas tsoonis, siis teises tsoonis ja lõpuks esimeses tsoonis ning saadetakse kohe väljalülituskäsk. Omicron registreeris kaitse toimeajaks 37,4 ms ja ostsilogrammilt mõõtes kulub voolu ja pinge muutuse alghetkest kuni väljalülituskäskuni 32,2 ms. Väljundkontakti viiteks on antud juhul 5,2 ms.



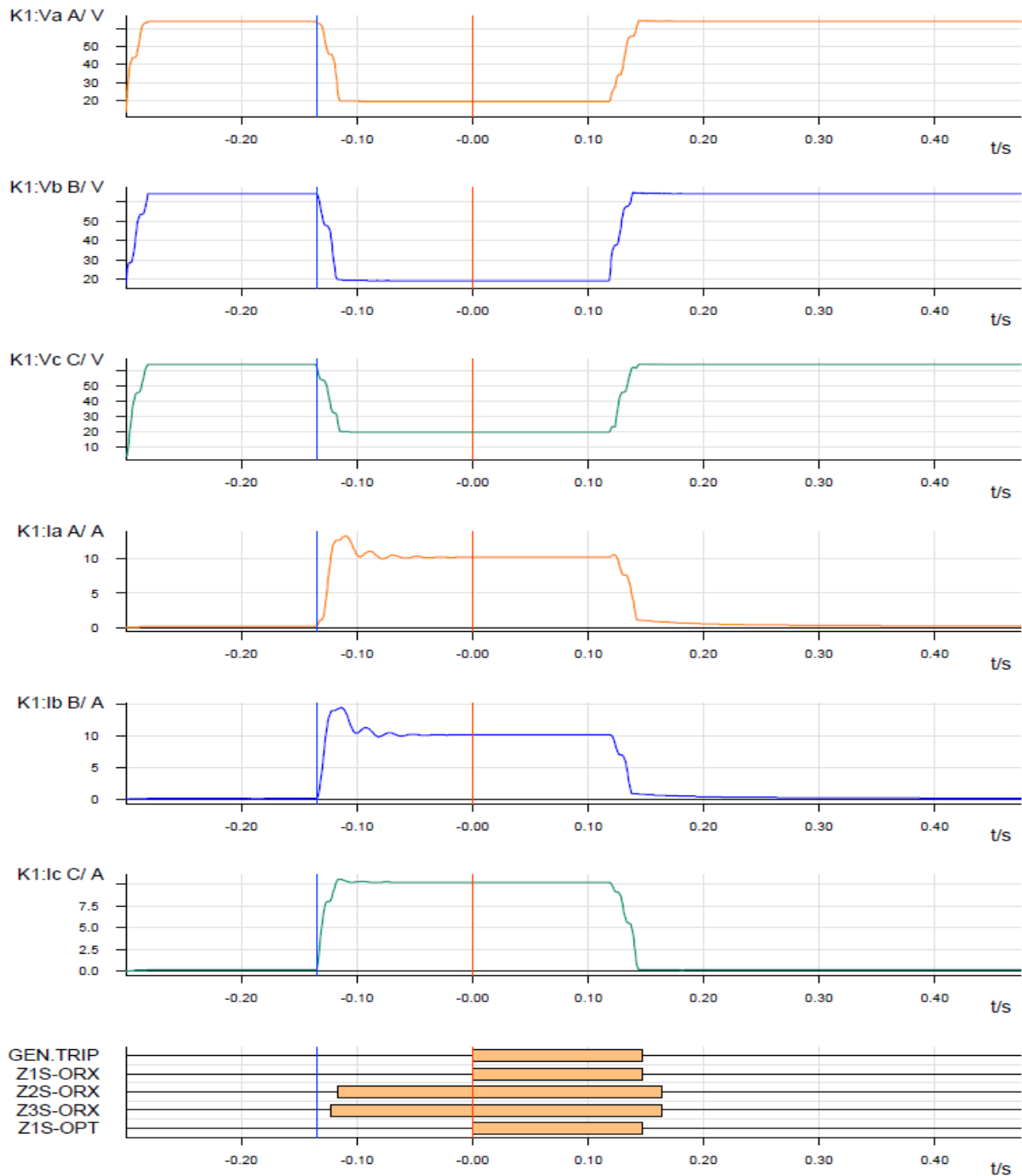
*Joonis 3.20 Tootja2 häiresalvesti liin K-H 1-2. tsooni püripealsel lühisel Omicron*

Joonisel 3.21 on kujutatud RTDSiga liinil B-E testides Tootja1 kaitserelee häiresalvesti. Jooniselt on näha, et relee tuvastab lühise suhteliselt ruttu ja otsustab 1. tsooni väljalülituskäsu kohe saata. RTDS simulaator registreeris kaitse toimeajaks 45,7 ms ja ostsillogrammilt mõõtes kulub voolu ja pinge muutuse alghetkest kuni väljalülituskäsuneni 40,7 ms. Väljundkontakti viiteks on antud juhul 5,0 ms.



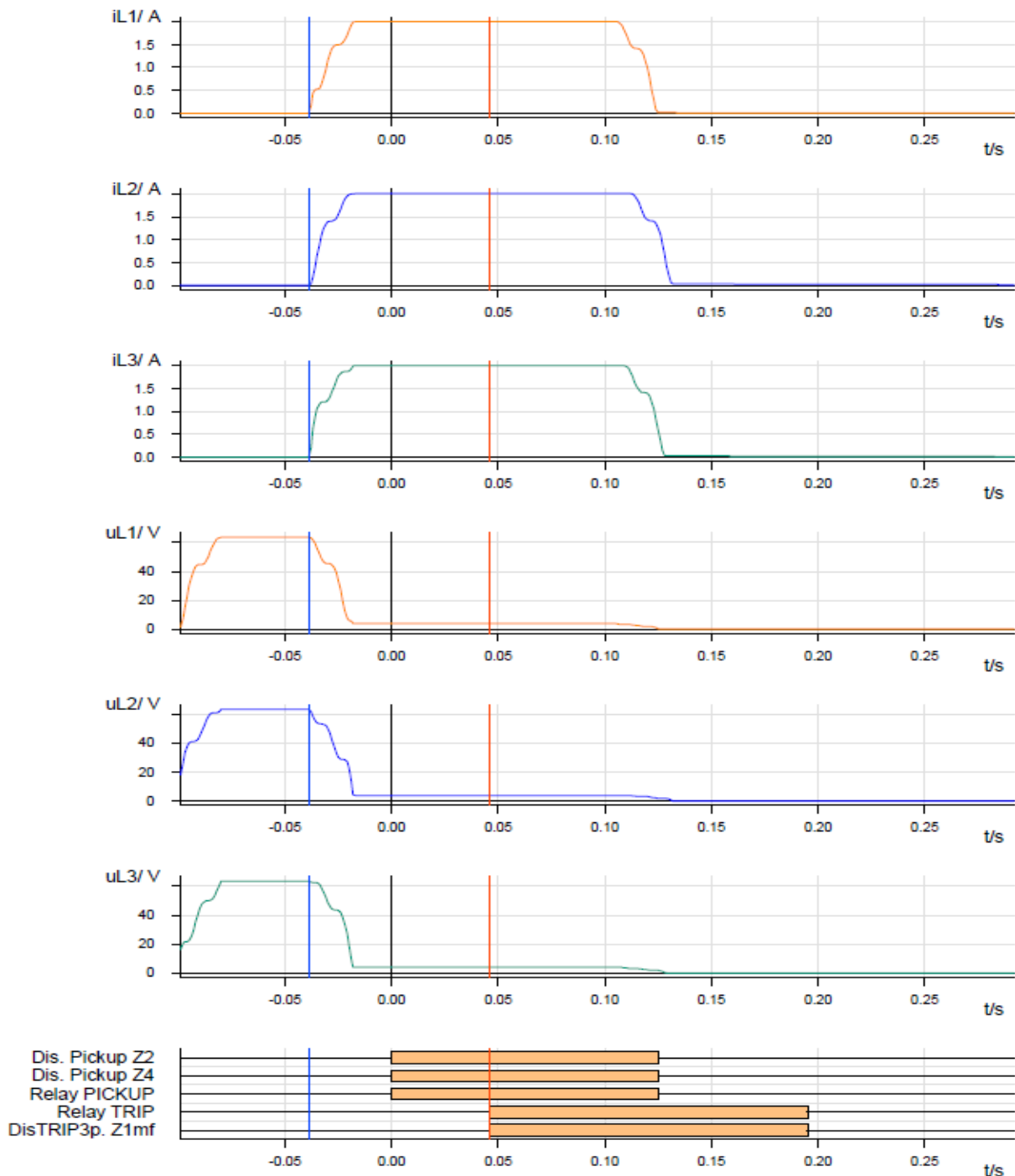
**Joonis 3.21 Tootja1 häiresalvesti liin B-E 1-2. tsooni piiripealsel lühisel RTDS**

Joonisel 3.22 on kujutatud RTDSiga liinil B-E testides Tootja2 kaitserelee häiresalvesti. Jooniselt on näha, et relele tuvastab esialgu lühise kolmandas ja teises tsoonis ja jääb ootama teise tsooni viidet 400 ms, kuid 140 ms juures reageerib esimene tsoon ja saadetakse väljalülituskäsk. RTDS simulaator registreeris kaitse toimeajaks 142,4 ms ja ostsillogrammilt mõõtes kulub voolu ja pinge muutuse alghetkest kuni väljalülituskäsuani 135,7 ms. Väljundkontakti viiteks on antud juhul 6,7 ms.



**Joonis 3.22 Tootja2 häiresalvesti liin B-E 1-2. tsooni piiripealsel lühisel RTDS**

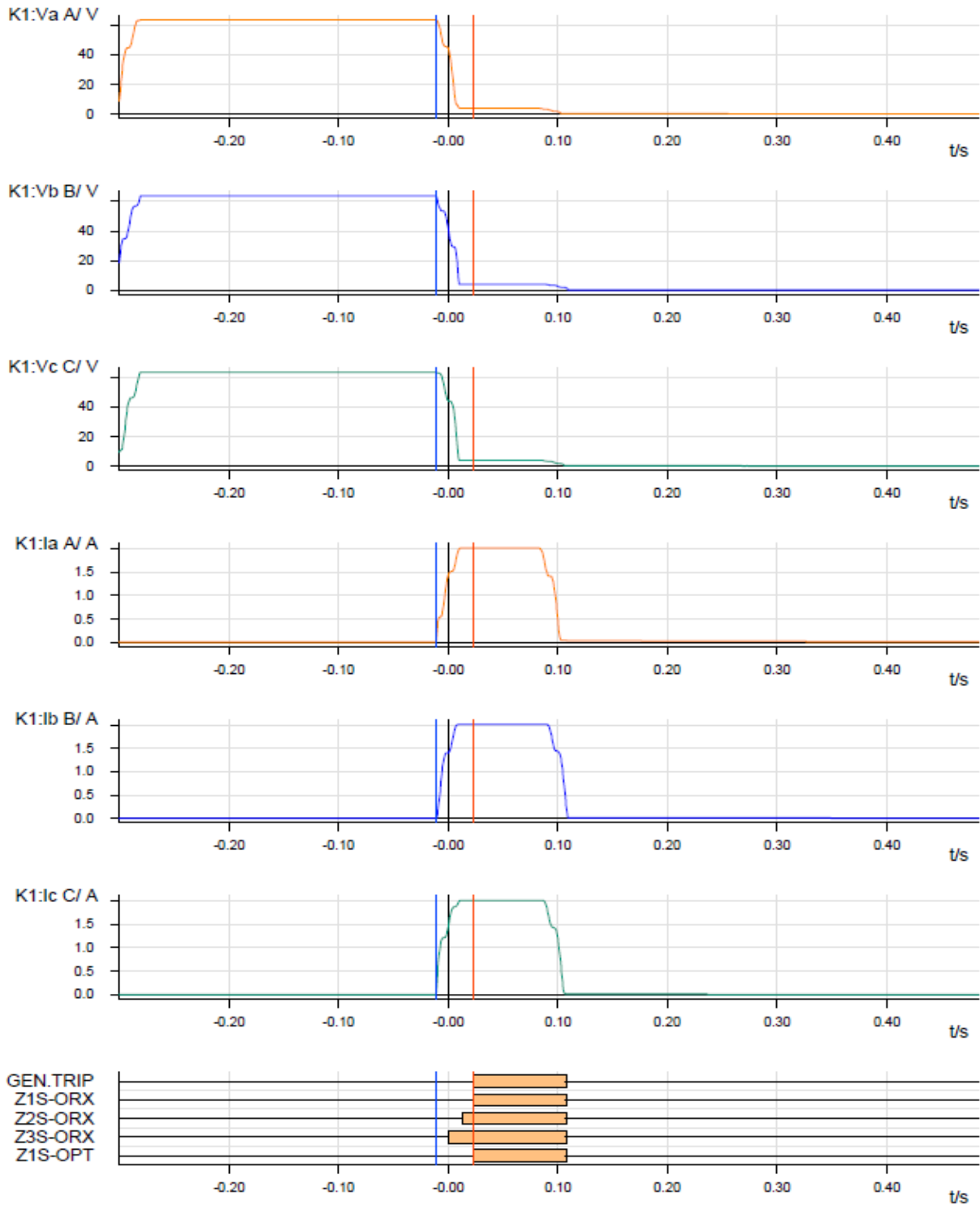
Joonisel 3.23 on kujutatud Omicroniga liinil B-E testides Tootja1 kaitserellee häiresalvesti. Jooniselt on näha, et releetuvastab lühise 40 ms möödudes, esialgu teises tsoonis ja jääb ootama teise tsooni viidet 400 ms, kuid 50 ms hiljem reageerib esimene tsoon ja saadetakse väljalülituskäsk. Omicron registreeris kaitse toimeajaks 90,9 ms ja ostsillogrammilt mõõtes kulub voolu ja pinge muutuse alghetkest kuni väljalülituskäsuni 85,0 ms. Väljundkontakti viiteks on antud juhul 5,9 ms.



**Joonis 3.23 Tootja1 häiresalvesti liin B-E 1-2. tsooni piiripealsel lühisel Omicron**

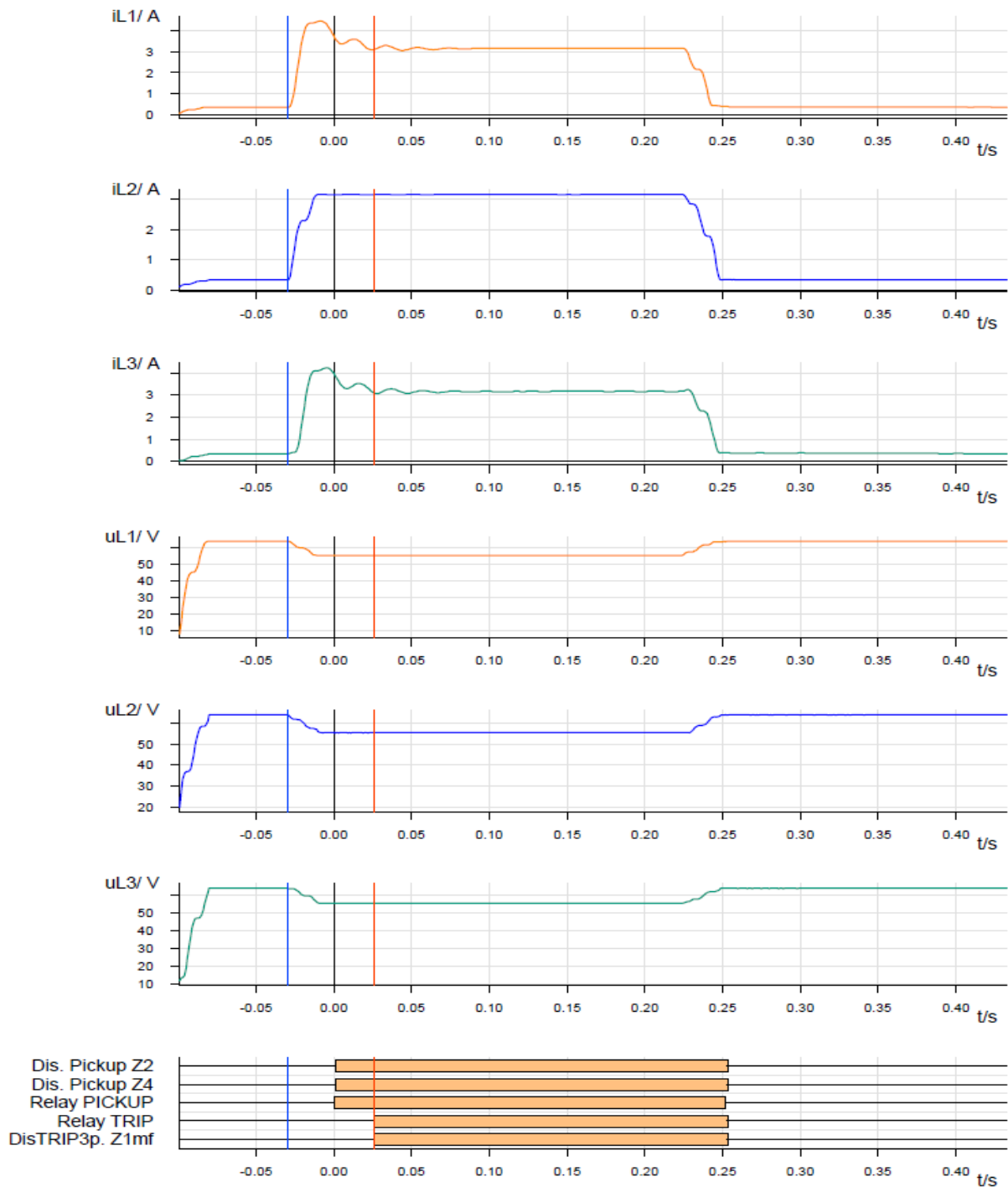


Joonisel 3.24 on kujutatud Omicroniga liinil B-E testides Tootja2 kaitserelee häiresalvesti. Jooniselt on näha, et rele tuvastab lühise esialgu kolmandas tsoonis, siis teises tsoonis ja lõpuks esimeses tsoonis ja saadetakse kohe väljalülituskäsk. Omicron registreeris kaitse toimeajaks 40,6 ms ja osttilogrammilt mõõtes kulub voolu ja pinge muutuse alghetkest kuni väljalülituskäskuni 34,6 ms. Väljundkontakti viiteks on antud juhul 6,0 ms.



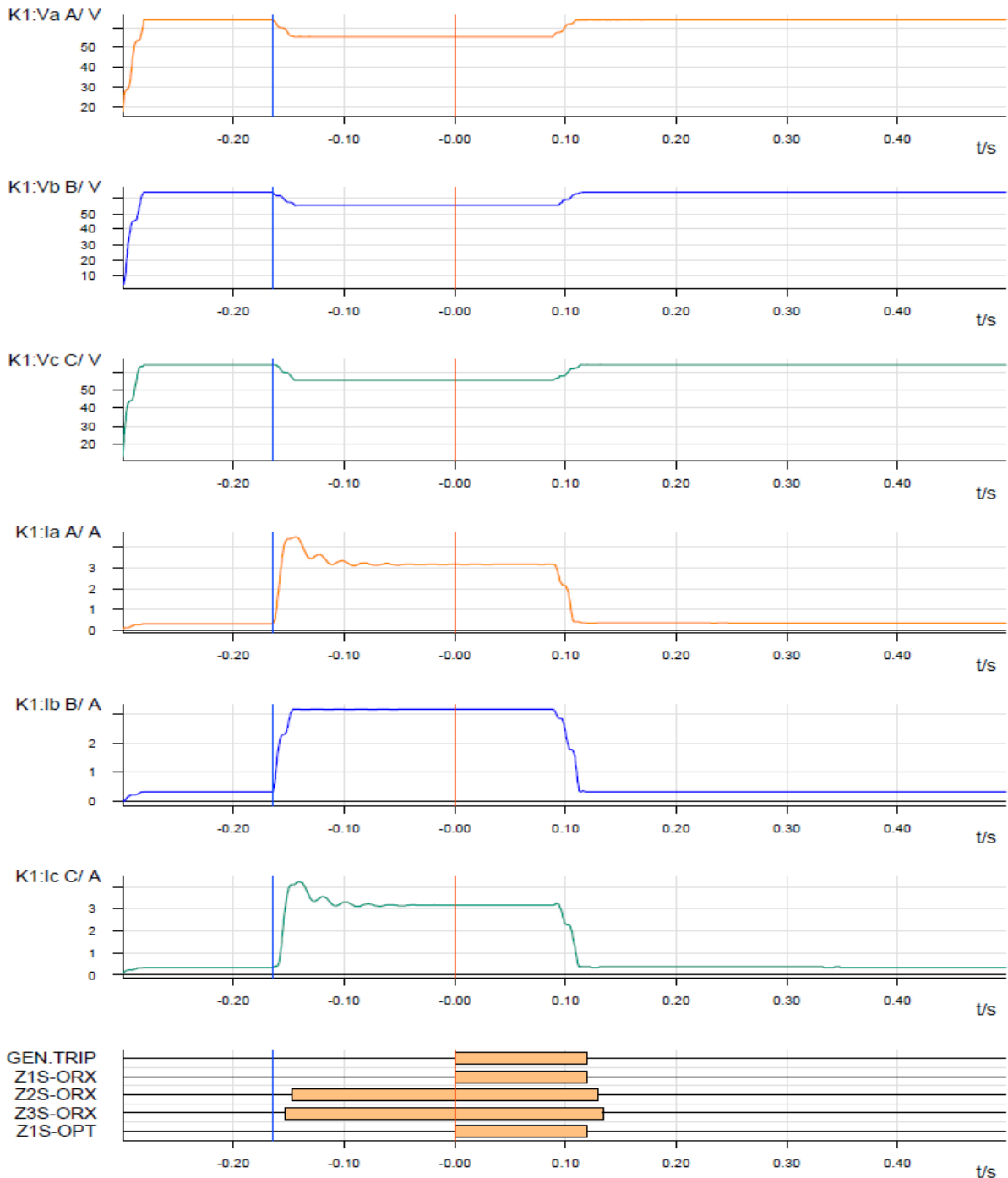
**Joonis 3.24 Tootja2 häiresalvesti liin B-E 1-2. tsooni piiripealsel lühisel Omicron**

Joonisel 3.25 on kujutatud RTDSiga liinil B-A testides Tootja1 kaitserelle häiresalvesti. Jooniselt on näha, et rele tüvestab lühise 30 ms möödudes, esialgu teises tsoonis ja jääb ootama teise tsooni viidet 400 ms, kuid 30 ms hiljem reageerib esimene tsoon ja saadetakse väljalülituskäsk. RTDS registreeris kaitse toimeajaks 61,4 ms ja ostsillogrammilt mõõtes kulub voolu ja pinge muutuse alghetkest kuni väljalülituskäskuni 55,5 ms. Väljundkontakti viiteks on antud juhul 5,9 ms.



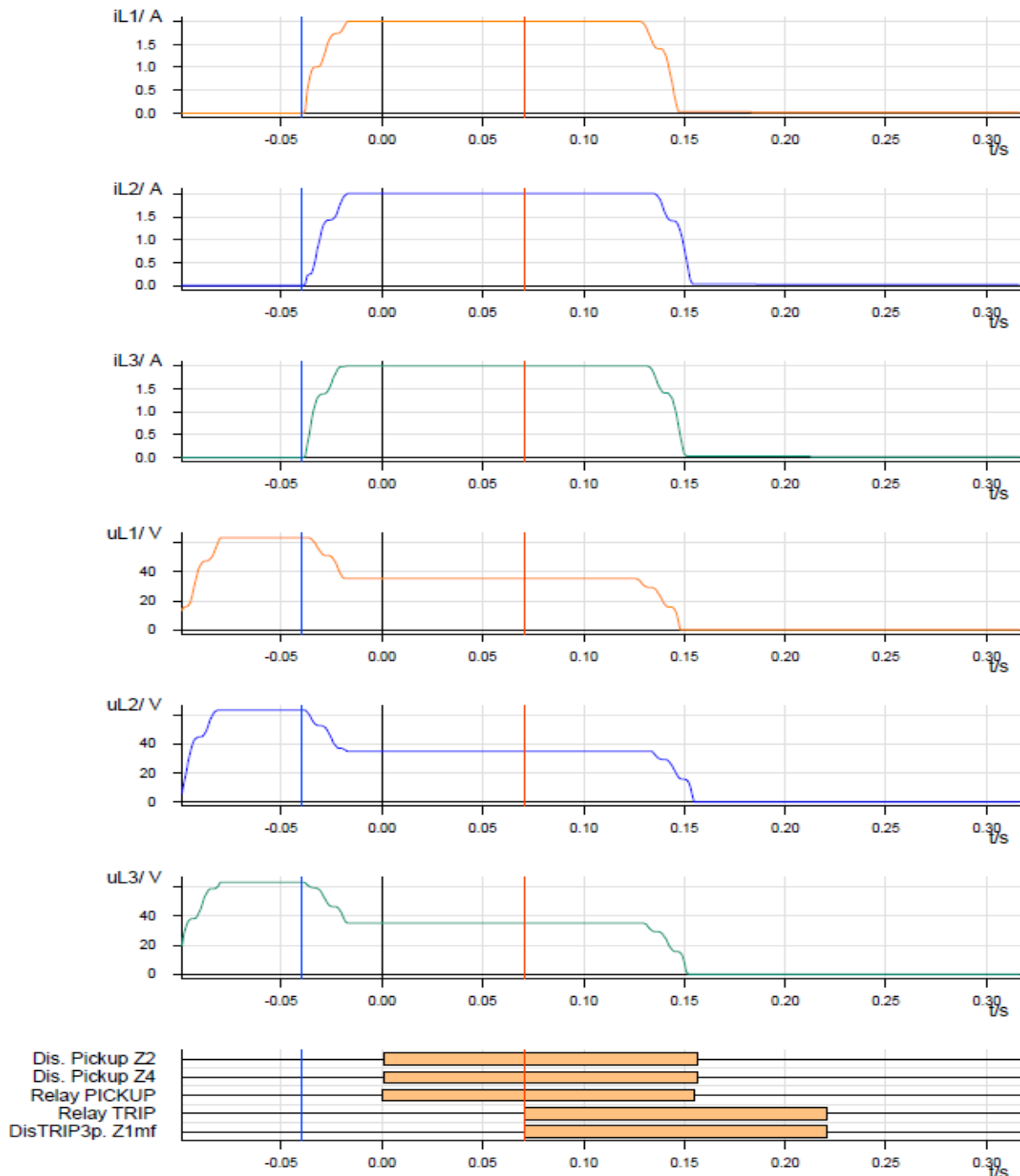
**Joonis 3.25 Tootja1 häiresalvesti liin B-A 1-2. tsooni piiripealsel lühisel RTDS**

Joonisel 3.26 on kujutatud RTDSiga liinil B-A testides Tootja2 kaitserelee häiresalvesti. Jooniselt on näha, et rele tekitab esialgu lühise kolmandas ja teises tsoonis ja jääb ootama teise tsooni viidet 400 ms, kuid 170 ms juures reageerib esimene tsoon ja saadetakse väljalülituskäsk. RTDS simulaator registreeris kaitse toimeajaks 171,7 ms ja ostsillogrammilt mõõtes kulub voolu ja pinge muutuse alghetkest kuni väljalülituskäskuni 164,6 ms. Väljundkontakti viiteks on antud juhul 7,1 ms.



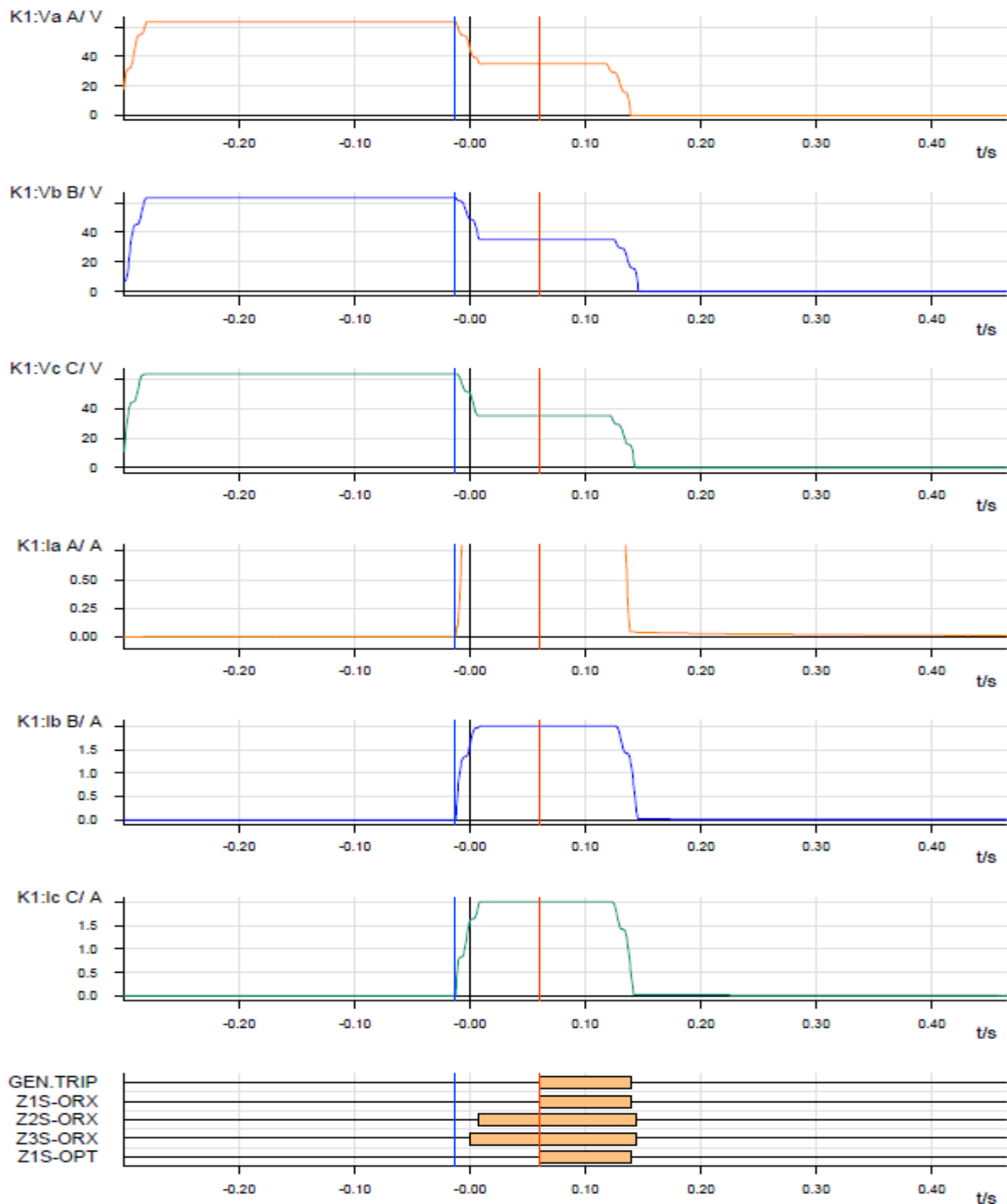
**Joonis 3.26 Tootja2 häiresalvesti liin B-A 1-2. tsooni püripealsel lühisel RTDS**

Joonisel 3.27 on kujutatud Omicroniga liinil B-A testides Tootja1 kaitserelee häiresalvesti. Jooniselt on näha, et releetuvastab lühise 40 ms möödudes, esialgu teises tsoonis ja jääb ootama teise tsooni viidet 400 ms, kuid 70 ms hiljem reageerib esimene tsoon ja saadetakse väljalülituskäsk. Omicron registreeris kaitse toimeajaks 114,3 ms ja ostsillogrammilt mõõtes kulub voolu ja pinge muutuse alghetkest kuni väljalülituskäsuni 110,5 ms. Väljundkontakti viiteks on antud juhul 3,8 ms.



**Joonis 3.27 Tootja1 häiresalvesti liin B-A 1-2. tsooni piiripealsel lühisel Omicron**

Joonisel 3.28 on kujutatud Omicroniga liinil B-A testides Tootja2 kaitserellee häiresalvesti. Jooniselt on näha, et releed tuvastab esialgu lühise kolmandas ja teises tsoonis ja jääb ootama teise tsooni viidet 400 ms, kuid 70 ms juures reageerib esimene tsoon ja saadetakse väljalülituskäsk. Omicron registreeris kaitse toimeajaks 78,9 ms ja ostsillogrammilt mõõtes kulub voolu ja pinge muutuse alghetkest kuni väljalülituskäsuni 71,7 ms. Väljundkontakti viiteks on antud juhul 7,2 ms.



**Joonis 3.28 Tootja2 häiresalvesti liin B-A 1-2. tsooni püripealsel lühisel Omicron**

# Kokkuvõte

Käesoleva lõputöö eesmärgiks oli uurida erinevate distantskaitse käitumist elektrivõrkudes toimuvate protsesside raamistikus, kasutades selleks reaajasimulaatorit RTDS ja releede testseadet Omicron CMC 256. Testi objektideks olid kaks erineva tootja digitaalset distantskaitset ja reaajasimulaatorisse integreeritud distantskaitse funktsioon.

Antud töö esimeses osas tehti lugejale lühike sissejuhatus releekaitse valdkonnast, kirjeldati releekaitse üldist olemust ja eesmärki. Selgitati releekaitse toime põhimõtet ja arengut erinevate põlvkondade vältel, jõudes tänapäevaste digitaalsete kaitserleedeni, mida ka antud töös vaadeldakse. Lisaks kirjeldati erinevaid kaitsetüüpe ja nende põhilisi rakendusvaldkondi, et lugejal oleks ülevaade erinevate tüüpide eelistest ja puudustest.

Järgnevas peatükis kirjeldati lugejale distantskaitset, kui ühte releekaitse tüüpi, detailsemalt ja selgitati süvitsi distantskaitse rakendamise võimalusi, toime põhimõtet ning meetodikat. Sissejuhatuses antud töö sätete arvutamisele, liiguti distantskaitse sätete arvutuse meetodika selgitamisele ja kirjeldati, kuidas sätete ja tsoonide määramine distantskaitse puhul käib. Seejärel keskenduti antud lõputöö jaoks vajalike sätete arvutustele ja toodi välja kõikide testiobjektide arvutuste tulemused. Teine peatükk jätkus Eesti ülekandevõrguhalduri poolt sätestatud distantskaitsete nõuete kirjeldamisega. Viimaks selgitati releede testimisprotseduure ja kirjeldati, milliseid teste peavad releed ja eelkõige distantskaitsete läbima enne kasutusele võttu. Kirjeldati, mida näeb ette distantskaitse testimise standard ja kuidas käib distantskaitse funktsiooni testimine.

Viimases ehk kolmandas peatükis kirjeldati lõputöö testimise osa. Peatüki esimeses pooles keskenduti RSCAD tarkvaraga modelleerimise ja RTDS simulaatori ning Omicroni testseadmega testide läbiviimise selgitamisele ja testitava skeemi kirjeldamisele. Seejärel selgitati lahti teostavate testide põhimõtte. Testimiseks valiti kolm erinevat tüüpi liini: liin B-E, liin B-A ja liin K-H. Liin B-E puhul on tegemist lühikese liiniga, mis asub tootmisüksustele väga lähedal, liin K-H on samuti lühike liin, kuid asub tootmisüksustest kaugel ja tarbimiskeskuse läheduses. Liin B-A on pikk transiitliin, mille üks ots asub peamiste tootmisüksuste läheduses ja teine ots peamise tarbimiskeskuse juures. Iga liini puhul testiti distantskaitset ühest liiniotsast vaadatuna. Teste teostati iga liini puhul kolmes distantskaitse tütsoonis ning eraldi veel 1. ja 2. tütsooni piiiril.

Kaitsete omavahelise võrdlusena saab testide tulemustest järelda järgnevat:

- Kõik kaitsed töötasid tsoonide sees testides ootuspäraselt ja stabiilselt. Esimese, teise ja kolmanda tsooni sees teostatud testide puhul toimusid kaitsed stabiilselt, kui testi tingimused olid korrektsed. Ei esinenud olukordi, kus kaitsed ei suutnud valida õiget tsooni või oleks töötanud ebamäärase viitega.
- Kõige kiiremini toimis enamikel juhtudel RTDS simulaatori distantkaitse. Kaitsete omavahelise võrdluse tulemustest selgus, et ootuspäraselt reageeris enamikel juhtudel kõige kiiremini RTDS simulaatorisse integreeritud distantkaitse. Kuna RTDS simulaatori distantkaitse on puhtalt programmisene funktsioon, puuduvad sel füüsilised ahelad ja väljundkontaktid, mis teiste testitavate releede puhul viidet tekitasid. Samuti ei ole RTDSi distantkaitsele esitatavad töö- ja häiringukindluse nõuded ilmselt nii kõrged, kui seda on reaalsete releede puhul. See tähendab, et reaalsedel distantkaitsetel võib distantkaitse funktsioonis arvutada korraka mitu algoritmi, mis võtab küll rohkem aega, kuid garanteerib suurema tõenäosusega kaitse õige töö.
- Kahe tootja vahelises võrdluses toimis üldjoontes paremini Tootja1 distantkaitse. Tootja1 ja Tootja2 kaitseseadmeid võrreldes töötas Tootja1 kaitse märgatavalt kiiremini esimeses tsoonis, kus kiire reageerimisaeg on kõige olulisem. Eriti suured erinevused tulid välja lühikestel liinidel ja just 1-faasiliste lühiste puhul. Kõige paremini avaldus see lühikesel liinil K-H esimese tsooni alguses testides, kus Tootja1 kaitse suutis töötada isegi kiiremini, kui RTDSi sisene distantkaitse, samas Tootja2 relee oli ligi kaks korda aeglasem.
- Tootja2 distantkaitse töötas kiiremini tagumistes tsoonides. Tootja2 relee oli peaaegu iga testi korral teises ja kolmandas tsoonis Tootja1 releest kiirema reageerimisajaga, kuid tagumistes tsoonides, mis on viitega reservkaitsed, ei oma enam kümme millisekundit kiirem reaktsiooniaeg suurt tähtsust.
- 1-faasiliste lühiste puhul toimusid kaitsed erinevalt. 1-faasilistel lühistel võib määravaks saada kompenseerimistegur, mis erinevatel tootjatel kalkuleeritakse erinevalt. Siit saab järeldada, et algoritmid ja loogika on Tootja1 ja Tootja2 seadmete puhul kindlasti erinevad.
- Esimese ja teise tsooni piiril muutub kaitse töötamine oluliselt aeglasemaks ja ettearvamatumaks. Esimese ja teise tsooni piiril teostatud testidest saab järeldada, et tsooni piiril muutub kaitse töötamine märkimisväärselt aeglasemaks ja õiget tsooni on releel raske määrata. Tootja1 kaitse muutus keskmiselt kaks korda aeglasemaks ja mõningatel juhtudel ka 4-5 korda aeglasemaks. Tootja2 kaitse muutus RTDS simulaatoriga testides enamustel kordadel

märkimisväärselt ehk üle 10 korra aeglasemaks, kuid Omicroniga testides esines jällegi Tootja1 releest paremini.

- Ostsillogrammide ja testseadmete põhjal saab järeldada, et releede väljundkontaktid töötavad tootja poolt lubatud vahemikus.

Ostsillogrammidelt mõõdetud ja testseadmete poolt fikseeritud väljalülitusaegasid võrreldes oli võimalik mõõta releede väljundkontaktide toimeajad. Mõlema kaitse puhul jäid viited 4-8 ms vahemikku, mis on samas suurusjärgus tootjate lubatud väärtustele. Et saavutada veel kiiremaid väljalülitusaegasid, pakuvad tänapäeval nimekamad tootjad ülikiirete väljundkontaktidega releesid, mille viide on alla 1 ms.

Reaalajasimulaatori RTDS ja testseadme Omicron omavahelisel võrdlusel tulevad selgelt välja kummagi eelised ja puudused:

- Omicroni CMC seeria testseadmed on igati võimekad ja kompaktsed seadmed, mida on näiteks vastuvõtutestidel äärmisel mugav ja lihtne kasutada.
- Reaalajasimulaator RTDS on vastupidiselt Omicronile suur seade, mida kasutatakse peamiselt ainult statsionaarselt laboritingimustes.
- Omicroni testimise keskkond on võrdlemisi lihtne ja kergesti kasutatav, kuid puudub sisse ehitatud simuleerimise võimalus.
- RTDS simulaatori eeliseks on selle kõik ühes modelleerimis-, simuleerimis- ja testikeskkond, millega on võimalik koostada keerukaid mudeleid, käitada simulatsioone reaalajas ning analüüsida tulemusi.
- RTDS simulaatoriga testides on selgelt näha, missugust mõju avaldab liinide vastastikune sidustus ja voolude jagunemine alajaamades.
- Omicroniga testides puudub info taustsüsteemi kohta, mistõttu saab ilma eelsalvestatud simulatsioonita sellega teostada vaid funktsionaalseid teste.

Kirjanduse põhjal võib järeldada, et Eesti ülekandevõrguoperaatori releede testimise ja aktsepteerimise meetod on igati asjakohane. Nõuded uutele kaitseseadmetele on küllaltki ranged ning eelnevalt uuritakse pakutavaid seadmeid ja tootjaid põhjalikult. Testimisprotseduur, mida teostatakse alajaamade vastuvõtul, hõlmab releede mitmekülgset testimist, mis näitab releede funktsionaalset toimimist ja sätetele vastavust.

Eesti ülekandevõrgus kasutatakse peamiselt kolme erineva tootja kaitseseadmeid. Testitud releed kuuluvad nende kolme peamise tootja releede hulka. Töö jätkuna tuleks ära testida ka kolmanda tootja kaitse ja tulemusi võrrelda. Saadud tulemuste põhjal on tulevikus võimalik



uusi releetüüpe samade testidega katsetada ja tulemusi võrrelda. Tulemustest parema ülevaate saamiseks tuleks samasid releesid testida ka distantkaitsete testimise standardis kirjeldatud tüüptestidega ning võrrelda, kas saadud tulemused ja erinevused kattuvad. Lisaks tekiks juhul, kui mudelisse lisatakse kogu Eesti ülekandevõrk, võimalus keerukamate liinide sätete toimimist või uute ühenduste testimist reaajasimulaatoris proovida. Käesoleva töö käigus testiti ainult releede distantkaitse funktsiooni, kuid soovituslikult on kogu relee funktsionaalsuses veendumiseks vaja põhjalikult testida reaajasimulaatoriga nii uute releede kui uute releede tarkvaraversioonide korral kõiki seal olevaid funktsioone. Sel viisil on võimalik saada arusaam konkreetse relee tüübi käitumisest ja selle seadistamise eripäradest.

# Kirjandus

- [1] M. Meldorf, H. Tammoja, T. Ülo ja J. Kilter, Jaotusvõrgud, Tallinn: TTÜ, 2007.
- [2] Working Group B5.15, „Modern Distance Protection Functions and Applications,“ CIGRE, 2008.
- [3] H. Tammoja, Automaatika ja releekaitse, Tallinn, 2013.
- [4] „SouthWest Virginia Surplus,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.swvasurplus.com/products/gec-alstom-quadramho-shpm-101-static-distance-protection-relay-used-excellent>. [Kasutatud 23.10.2017].
- [5] „Siemens Siprotec 5,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/291/109739291/img\\_232667/v1/E\\_CC\\_SIP\\_5\\_Gruppe\\_sRGB\\_small.png](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/291/109739291/img_232667/v1/E_CC_SIP_5_Gruppe_sRGB_small.png). [Kasutatud 23.10.2017].
- [6] D. Mahendra, *MSc. Thesis. Dynamic Testing of Distance Protection*, TUDelft, 2017.
- [7] G. Ziegler, Numerical Distance Protection 4th edition, Nuremberg: Publicis Publishing, 2011.
- [8] Ü. Treufeldt, Lühised elektrisüsteemides, Tallinn: TTÜ, 2002.
- [9] Elering, *401 Requirements for relay protection and system automation*, Tallinn, 2017.
- [10] Working Group 34.10, „Analysis and Guidelines For Testing Numerical Protection Schemes,“ CIGRE, 2000.
- [11] „EVS-EN 60255-121:2014 Measuring relays and protection equipment - Part 121: Functional requirements for distance protection,“ CENELEC, Brussels, 2014.
- [12] A. Bonetti, M. V. Yalla ja S. Holst, „The IEC 60255-121:2014 standard and its impact on performance specification, testing and evaluation of distance protection relays,“ *IEEE*, 2016.
- [13] A. Apostolov ja B. Vandiver, „Testing of Advanced Distance Protection Relays,“ *IEEE*, Texas, 2009.

- [14] A. Apostolov ja H. Kang, „Virtual Testing of Distance Protection,“ *IEEE*, 2006.
- [15] ABB, „Line distance protection REL670,“ ABB Grid Automation Products, Västerås, 2018.
- [16] A. Apostolov ja B. Vandiver, „Testing of Multifunctional Distance Protection Relays,“ *IEEE*, , 2007.
- [17] C. Dzienis, M. Kereit, J. Bkumschein ja M. Claus, „An Experimental Analysis of High-Speed-Distance Protection,“ *IEEE*, Wroclaw, 2010.
- [18] M.M. Saha, T. Einarsson ja S.Lindström, „A New Adaptive High Speed Distance Protection Scheme for Power Transmission Lines,“ *IEEE*, Edinburgh, 2016.
- [19] „RTDS Simulator overview,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.rtds.com/wp-content/uploads/2015/12/RTDS-Simulator-Overview2017-06-08.pdf>. [Kasutatud 01.11.2017].
- [20] „Omicron CMC 256plus,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.omicronenergy.com/en/products/cmc-256plus/documents/>. [Kasutatud 01.11.2017].

# Lisad

L.1. Töötsoonides teostatud testide tulemused

L.2. Esimese ja teise tsooni piiril teostatud testide tulemused

## L.1. Töötsoonides teostatud testide tulemused

LIIN K-H RTDS								
	1.Tsoon			2.Tsoon			3.Tsoon	
Aeg (ms)	Tootja2	Tootja1	RTDS	Tootja2	Tootja1	RTDS	Tootja2	Tootja1
3-faasiline lühis	26	15	20	427	436	403	738	735
	28	25	20	427	434	416	737	736
	26	16	20	427	434	415	739	741
	28	16	21	429	434	413	736	745
	26	15	22	425	435	417	739	741
	27	15	21	425	435	414	737	744
	25	15	20	430	434	418	739	734
	25	16	21	428	439	417	736	736
	25	16	20	427	434	413	735	745
	26	25	21	430	435	418	735	735
<b>KESKMINE</b>	<b>26,2</b>	<b>17,4</b>	<b>20,6</b>	<b>427,5</b>	<b>435</b>	<b>414,4</b>	<b>737,1</b>	<b>739,2</b>
1-faasiline lühis	35	15	19	435	435	417	738	751
	36	18	17	437	445	414	736	735
	38	20	21	436	451	418	736	745
	38	17	20	436	440	414	737	751
	38	21	21	438	445	417	740	752
	34	18	20	436	435	415	738	746
	37	16	21	438	434	416	736	736
	38	16	21	436	435	412	737	735
	37	16	19	439	440	415	737	741
	38	16	19	431	435	416	737	745
<b>KESKMINE</b>	<b>36,9</b>	<b>17,3</b>	<b>19,8</b>	<b>436,2</b>	<b>439,5</b>	<b>415,4</b>	<b>737,2</b>	<b>743,7</b>

LIIN K-H OMICRON						
	1.Tsoon		2.Tsoon		3.Tsoon	
Aeg (ms)	Tootja2	Tootja1	Tootja2	Tootja1	Tootja2	Tootja1
3-faasiline lühis	32	15	428	435	724	741
	33	16	427	440	723	741
	33	14	428	434	725	735
	31	15	430	436	723	734
	31	14	427	440	725	735
	32	16	429	441	726	735
	32	16	429	434	725	736
	31	15	425	435	727	734
	31	16	428	441	725	734
	33	15	430	435	723	735
<b>KESKMINE</b>	<b>31,9</b>	<b>15,2</b>	<b>428,1</b>	<b>437,1</b>	<b>724,6</b>	<b>736</b>
1-faasiline lühis	42	16	428	440	723	735
	43	16	426	435	744	734
	42	16	428	440	724	734
	43	16	444	434	742	735
	44	15	443	435	723	740
	45	15	444	435	744	735
	44	16	445	435	723	735
	42	15	442	434	722	734
	42	15	442	434	744	734
	28	15	442	435	725	740
<b>KESKMINE</b>	<b>41,5</b>	<b>15,5</b>	<b>438,4</b>	<b>435,7</b>	<b>731,4</b>	<b>735,6</b>

LIIN B-E RTDS														
	1.Tsoon			2.Tsoon P		2.Tsoon T			2.Tsoon K		3.Tsoon P		3.Tsoon K	
Aeg (ms)	T2	T1	RT-DS	T2	T1	T2	T1	RT-DS	T2	T1	T2	T1	T2	T1
3-faasiline lühis	27	25	17	735	735	427	444	415	428	441	738	735	740	752
	26	25	21	740	735	427	445	413	428	435	738	735	740	745
	24	25	20	739	751	426	445	414	427	435	739	735	738	741
	26	25	20	738	735	427	445	414	427	435	738	745	736	745
	25	26	20	738	736	425	444	416	429	435	738	751	736	746
	25	26	19	740	741	428	451	413	429	441	739	745	738	736
	25	26	18	737	735	425	451	412	429	435	739	746	737	736
	25	25	19	738	735	427	451	416	426	436	738	741	739	751
	26	42	21	738	735	424	445	412	429	435	737	741	739	745
	25	22	19	740	735	425	451	413	429	435	740	735	740	751
<b>KESK</b>	<b>25,4</b>	<b>26,7</b>	<b>19,4</b>	<b>738,3</b>	<b>737,3</b>	<b>426,1</b>	<b>447,2</b>	<b>413,8</b>	<b>428,1</b>	<b>436,3</b>	<b>738,4</b>	<b>740,9</b>	<b>738,3</b>	<b>744,8</b>
1-faasiline lühis	40	22	21	442	436	439	435	414	437	435	739	747	742	747
	37	21	18	441	446	440	436	414	442	435	742	752	739	745
	39	21	18	440	453	437	434	412	440	436	738	737	741	746
	38	31	20	437	445	440	441	412	440	440	741	752	741	747
	38	31	17	441	447	441	436	413	440	435	741	736	744	745
	40	19	19	440	451	441	435	414	439	441	738	746	742	735
	42	18	19	438	445	437	436	414	444	435	741	752	744	748
	42	17	20	440	451	441	434	412	441	437	743	746	741	746
	42	18	21	444	436	441	436	413	439	435	738	746	740	748
	41	19	17	439	446	439	436	412	437	435	739	742	741	753
<b>KESK</b>	<b>39,9</b>	<b>21,7</b>	<b>19</b>	<b>440,2</b>	<b>445,6</b>	<b>439,6</b>	<b>435,9</b>	<b>413</b>	<b>439,9</b>	<b>436,4</b>	<b>740</b>	<b>745,6</b>	<b>741,5</b>	<b>746</b>

LIIN B-E OMICRON										
	1.Tsoon		2.Tsoon P		2.Tsoon T		2.Tsoon K		3.Tsoon	
Aeg (ms)	Tootja2	Tootja1	Tootja2	Tootja1	Tootja2	Tootja1	Tootja2	Tootja1	Tootja2	Tootja1
3-faasiline lühis	32	18	428	435	427	434	424	434	718	740
	32	17	428	434	429	435	426	434	722	735
	30	17	429	441	430	434	427	434	720	740
	31	18	426	440	430	434	424	440	717	740
	31	18	426	435	428	434	427	434	718	734
	32	18	425	435	430	436	426	435	718	735
	33	17	427	434	426	441	425	434	717	739
	32	18	428	435	430	435	427	440	721	734
	32	17	427	434	426	435	426	435	722	734
	32	17	426	435	426	434	426	435	721	734
<b>KESK.</b>	<b>31,7</b>	<b>17,5</b>	<b>427</b>	<b>435,8</b>	<b>428,2</b>	<b>435,2</b>	<b>425,8</b>	<b>435,5</b>	<b>719,4</b>	<b>736,5</b>
1-faasiline lühis	42	18	422	435	444	435	444	434	744	735
	44	18	423	435	444	435	423	434	721	735
	27	18	423	435	425	440	445	440	745	735
	43	20	444	434	445	434	422	435	721	739
	43	17	421	434	424	434	444	435	720	735
	43	17	444	434	443	435	443	435	720	734
	27	17	423	435	424	435	443	435	719	735
	45	20	443	439	443	435	424	435	718	735
	45	17	424	435	442	434	423	439	743	735
	28	18	422	435	418	434	443	439	743	735
<b>KESK.</b>	<b>38,7</b>	<b>18</b>	<b>428,9</b>	<b>435,1</b>	<b>435,2</b>	<b>435,1</b>	<b>435,4</b>	<b>436,1</b>	<b>729,4</b>	<b>735,3</b>



LIIN B-A RTDS								
	1.Tsoon			2.Tsoon			3.Tsoon	
Aeg (ms)	Tootja2	Tootja1	RTDS	Tootja2	Tootja1	RTDS	Tootja2	Tootja1
3-faasiline lühis	23	22	22	425	437	417	738	737
	22	23	20	427	436	419	739	741
	23	24	18	426	436	419	738	742
	21	22	17	427	436	418	736	736
	22	22	16	425	435	418	734	737
	22	22	16	425	436	421	737	736
	21	23	17	427	435	416	739	735
	24	23	19	425	436	416	738	735
	24	23	20	428	437	415	738	736
	23	23	20	426	437	415	739	742
<b>KESKMINE</b>	<b>22,5</b>	<b>22,7</b>	<b>18,5</b>	<b>426,1</b>	<b>436,1</b>	<b>417,4</b>	<b>737,6</b>	<b>737,7</b>
1-faasiline lühis	36	33	16	439	451	423	738	752
	36	25	21	438	452	421	737	751
	39	27	21	444	451	419	736	751
	37	24	20	437	451	421	735	752
	37	26	18	438	452	421	740	757
	37	24	15	440	452	421	740	753
	38	22	18	435	452	418	737	751
	36	24	17	440	453	417	740	753
	39	32	20	441	452	422	740	753
	38	24	18	438	451	422	740	756
<b>KESKMINE</b>	<b>37,3</b>	<b>26,1</b>	<b>18,4</b>	<b>439</b>	<b>451,7</b>	<b>420,5</b>	<b>738,3</b>	<b>752,9</b>

<b>LIIN B-A OMICRON</b>						
	<b>1.Tsoon</b>		<b>2.Tsoon</b>		<b>3.Tsoon</b>	
<b>Aeg (ms)</b>	<b>Tootja2</b>	<b>Tootja1</b>	<b>Tootja2</b>	<b>Tootja1</b>	<b>Tootja2</b>	<b>Tootja1</b>
<b>3-faasiline lühis</b>	36	23	427	441	722	735
	27	23	427	435	721	741
	28	23	429	440	743	735
	26	23	429	436	721	735
	26	23	426	435	722	736
	26	22	432	436	742	741
	26	23	429	435	722	741
	28	22	431	435	719	735
	26	23	428	441	721	734
	28	23	429	436	724	740
<b>KESKMINE</b>	<b>26,8</b>	<b>22,8</b>	<b>428,7</b>	<b>437</b>	<b>725,7</b>	<b>737,3</b>
<b>1-faasiline lühis</b>	36	22	418	434	722	734
	19	21	424	439	718	735
	23	22	417	441	721	736
	44	22	424	435	743	735
	24	21	442	435	721	736
	24	21	442	434	720	734
	23	21	442	441	723	734
	25	21	442	440	721	735
	42	22	443	439	720	740
	42	22	422	435	720	734
<b>KESKMINE</b>	<b>30,8</b>	<b>21,5</b>	<b>431,6</b>	<b>437,3</b>	<b>722,9</b>	<b>735,3</b>

## L.2. Esimese ja teise tsooni piiril teostatud testide tulemused

TEST	RTDS		OMICRON	
	Tootja1 (ms)	Tootja2 (ms)	Tootja1 (ms)	Tootja2 (ms)
<b>LIIN K-H</b>				
1.	45,4	247,3	84,7	37,4
2.	74,2	39,0	35,1	103,3
3.	45,1	162,5	45,9	40,1
<b>LIIN B-E</b>				
1.	45,7	142,4	90,9	40,6
2.	45,4	35,4	44,9	36,6
3.	45,5	127,9	75,0	46,5
<b>LIIN B-A</b>				
1.	61,4	171,7	114,3	78,9
2.	135,5	115,1	81,4	40,0
3.	71,6	152,0	46,1	54,4