



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Deividas Činikas

SROVĖS TRANSFORMATORIŲ PEREINAMŪJŲ PROCESŲ
TRUMPOJO JUNGIMO METU TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas
Doc. dr. Gytis Svinkūnas

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

**SROVĖS TRANSFORMATORIŲ PEREINAMŲJŲ PROCESŲ
TRUMPOJO JUNGIMO METU TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos sistemos (kodas 621H63005)

Vadovas

Doc. dr. Gytis Svinkūnas

Recenzentas

Doc. dr.

Projektą atliko

Deividas Činikas

KAUNAS, 2015



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Deividas Činikas

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos sistemos, 621H63005

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Srovės transformatorių pereinamųjų procesų
trumpojo jungimo metu tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

201 ____ . ____ d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Deivido Činiko** baigiamasis projektas tema „Srovės transformatorių pereinamųjų procesų trumpojo jungimo metu tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Činikas, D. Srovės transformatorių pereinamųjų procesų trumpojo jungimo metu tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Gytis Svinkūnas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Kaunas, 2015. 41 psl.

SANTRAUKA

Trumpojo jungimo pereinamojo proceso pradžioje stipriai išauga srovės transformatorių paklaidos. Kad užtikrintų tikslų RA (relinės apsaugos) prietaisų darbą, tekant trumpojo jungimo srovei, srovės transformatorius turi dirbti reikiamu tikslumu. Kad suprasti kas vyskta srovės transformatoriuje trumpojo jungimo metu, reikia nagrinėti pereinamuosius procesus.

Šiame darbe apžvelgiamas srovės transformatorių veikimas, fazės ir srovių paklaidos, pereinamieji procesai trumpojo jungimo metu. Taip pat apžvelgiamas netiesinis srovės transformatoriaus matematinis modelis.

Metodinėje dalyje analizuojama tinklo schema, kuri bus pritaikyta matematiniam srovės transformatoriaus modeliui, programine įranga skaičiuojami trumpieji jungimai.

Tyrimui naudojamas matematinis netiesinis srovės transformatoriaus modelis SIMULINK programinės įrangos aplinkoje. Tiriami srovės tranformatoriuose vykstantys pereinamieji procesai trumpojo jungimo metu.

Reikšminiai žodžiai: srovės transformatorius, įsisotinimas, pereinamasis procesas, relinė apsauga.

Činikas, D. Research on Transient of Current Transformers at Short Circuit. Final project of master / supervisor doc. dr. Gytis Svinkūnas; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electrical Power Systems.

Kaunas, 2015. 41 psl.

SUMMARY

Current transformers errors highly increase at transient beginning, when faults occur. In order to ensure a proper relay protection performance, current transformer have to operate at right accuracy. Current transformer transient must be analysed to understand that happens after short circuit.

There is an overview of current transformers performance, phase and current errors, transient at short circuit. Also, the report goes about nonlinear mathematical model of current transformer.

Power network scheme is analysed for be applied for mathematical current transformer model in the methodical part. Short circuits with software was calculated too.

For investigation is used nonlinear current transformer model at SIMULINK software environment. In this paper, transient of current transformers at short circuits was investigated.

Keywords (up to 8 words): current transformer, saturation, transient, relay protection.

TURINYS

SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS	7
ĮVADAS	8
1. APŽVALGINĖ DALIS	9
1.2 Srovės transformatoriaus fazorių diagrama	10
1.2.1 Srovės paklaida	12
1.2.2 Fazės paklaida	13
1.3 Pereinamasis procesas srovės transformatoriuje.....	14
1.3.1 Pereinamasis procesas prieš įsisotinimą ir po įsisotinio	14
1.3.2 Antrinės apvijos apkrovos varžos ir X/R santykio įtaka srovės transformatoriaus įsisotinimui.....	18
1.4 Netiesinis matematinis srovės transformatoriaus modelis.....	22
2. METODINĖ DALIS	25
2.1 Tinklo schemos analizė.....	25
2.2 Trumpųjų jungimų skaičiavimas naudojant programinę įrangą	27
2.3 Srovės transformatoriaus matematinio modelio analizė	28
3. TYRIMO REZULTATŲ DALIS	31
3.1 Pereinamųjų procesų trumpojo jungimo metu srovės transformatoriuose tyrimas	31
4. IŠVADOS.....	40
5. LITERATŪRA	41

SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS

Naudotos santrumpos:

TP – transformatorių pastotė;

RA – relinė apsauga.

N_1 – srovės transformatoriaus pirminė apvija, vnt;

N_2 – srovės transformatoriaus antrinė apvija, vnt;

I_1 (I_p) – pirminė apvija tekanti srovė, A;

I_2 (I_s) – antrinė apvija tekanti srovė, A;

Φ_1 – pirminės apvijos magnetinis srautas, Wb;

Φ_2 – antrinės apvijos magnetinis srautas, Wb;

Φ_M (Φ_T) – liekamasis magnetinis srovės transformatoriaus srautas, Wb;

I_0 (I_μ) – įmagnetinančioji (sužadavimo) srovė, A;

K_I – transformacijos koeficientas;

E – vidinė įtampa, V;

R_m – magnetinė varža, Ω ;

β – fazės paklaida;

θ_s – suminis antrinės apvijos fazių kampas, $^\circ$;

I_M – įmagnetinimo srovės komponentė, A;

I_H – įmagnetinimo srovės fazės komponentė, A;

α – nuostolių kampas dėl šerdies įsimagnetinimo, $^\circ$;

r – fazių kampas dėl apkrovos, $^\circ$;

R_c – šerdies nuostolių varža, Ω ;

T – laiko konstanta;

L_m – magnetinis induktyvumas, H;

R – aktyvioji varža, Ω ;

X – reaktyvioji varža, Ω ;

Z – pilnutinė varža, var;

A – plieninės šerdies skerspjūvio plotas, m^2 ;

I_k – trumpojo jungimo srovė, A;

L_b – apkrovos induktyvumas, H.

IVADAS

Elektros energetinėje sistemoje neišvengiama nenormalių darbo režimų. Nenormalūs darbo režimai gali sugadinti elektros įrenginius, todėl labai svarbu kuo greičiau atjungti pažeistą tinklo dalį. Tai gali vykdyti relinės apsaugos ir automatikos įtaisai. Norint, kad relinės apsaugos ir automatikos įtaisai funkcionuotų tiksliai, reikia kad srovės transformatoriai dirbtų tam tikru tikslumu. Tačiau susiduriama su problema, kad įvykus trumpajam jungimui, pereinamojo proceso pradžioje stipriai išauga srovės transformatorių paklaidos. Norint nustatyti paklaidų atsiradimo priežastis reikia analizuoti juose vykstančius pereinamuosius procesus.

Šio tyrimo tikslas išanalizuoti pereinamuosius procesus vykstančius srovės transformatoriuose trumpojo jungimo metu naudojant matematinį srovės transformatoriaus modelį SIMULINK programinės įrangos aplinkoje, modeliui pritaikant realios tinklo schemas parametrus.

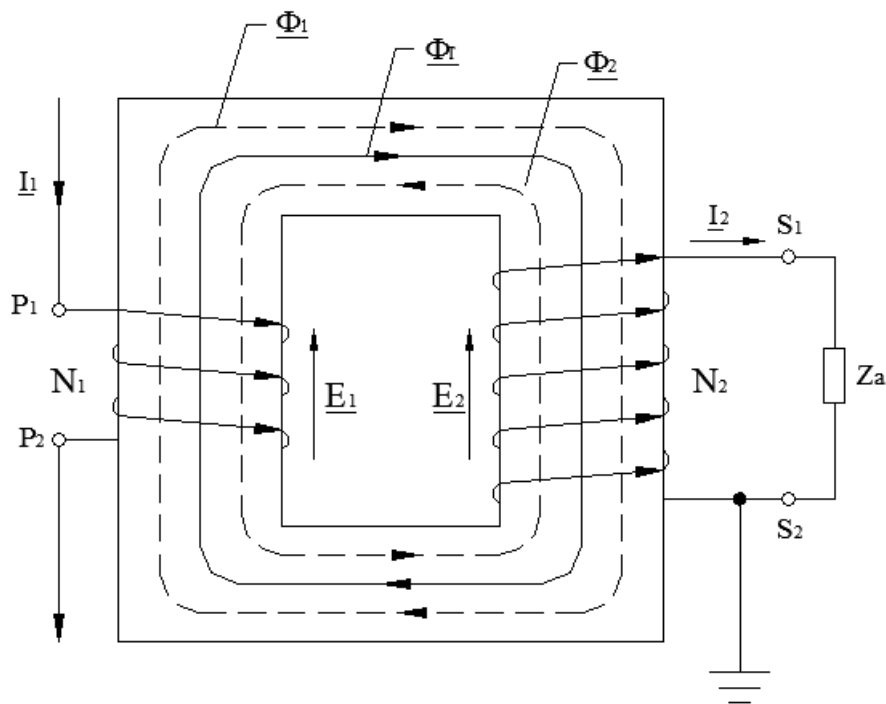
Šia tematika buvo atlikta nemažai tyrimų ir nustatyta, kad įvykus trumpajam jungimui yra iškraipoma antrine apvija tekanti srovė, todėl pereinamojo proceso metu ir padidėja paklaidos. Iškraipymus išaukia trumpojo jungimo srovėje atsiradę nuolatinės srovės dedamosios (aperiodinės dedamosios), kurios išaukia srovės transformatoriaus šerdies įsisotinimą. Nors šia tema ir buvo atlikta nemažai tyrimų, tačiau nepavyko atrasti tokių, kuriuose būtų nustatyta kaip kinta įmagnetinančios srovės ir liekamojo magnetinio srauto kreivės, kintant antrinės apvijos apkrovos varžai, kai įvertinamos pirminės ir antrinės apvijos varžos.

1. APŽVALGINĖ DALIS

1.1 Srovės transformatoriaus veikimo principas

Srovės transformatorius – tai elektros įrenginys skirtas srovės transformavimui aukštoje įtampoje į srovę žemoje įtampoje. Jie naudojami relinei apsaugai ir apskaitai.

Įrenginio veikimo principą galima paaikškinti naudojantis schema, pavaizduota 1.1 paveiksle.



1.1 pav. Srovės transformatoriaus schema

Srovės transformatorių sudaro pirminė apvija N_1 , antrinė apvija N_2 , kuri sujungta su apkrovos varža Z_a ir plieninis magnetolaidis ant kurio užvyniotos abi apvijos. Pirminė apvija tekanti srovė I_1 sukuria magnetovarą $I_1 N_1$, o antrinė apvija tekanti srovė I_2 sukuria magnetovarą $I_2 N_2$, kurios atitinkamai indukuoja magnetinius srautus Φ_1 ir Φ_2 . Magnetovaros ir jų kuriami magnetiniai srautai Φ_1 ir Φ_2 geometriškai sumuojasi (magnetinių srautų teigiamos kryptys parodytos 1.1 paveiksle.), sudarydami liekamąją magnetovarą $I_\mu N_1$ ir liekamąjį magnetinį srovės transformatoriaus srautą Φ_T :

$$I_1 N_1 - I_2 N_2 = I_\mu N_1, \quad (1)$$

$$\Phi_1 - \Phi_2 = \Phi_T. \quad (2)$$

Liekamasis magnetinis srautas Φ_T , kitaip vadinamas darbinium arba pagrindiniu, kerta abi apvijas ir indukuoja antrinėje apvijoje vidinę įtampą E_2 , kuri uždaroje grandinėje sukuria antrinės apvijos srovę I_2 . Magnetinį srautą Φ_T sukuria liekamosios magnetovaros $I_\mu N_1$ srovė I_μ . Pastaroji

yra srovės \underline{I}_l dalis ir vadinama įmagnetinančia srove. Jeigu įmagnetinančioji srovė $\underline{I}_\mu = 0$, tai išraiška 1 būtų:

$$\underline{I}_1 N_1 = \underline{I}_2 N_2, \quad (3)$$

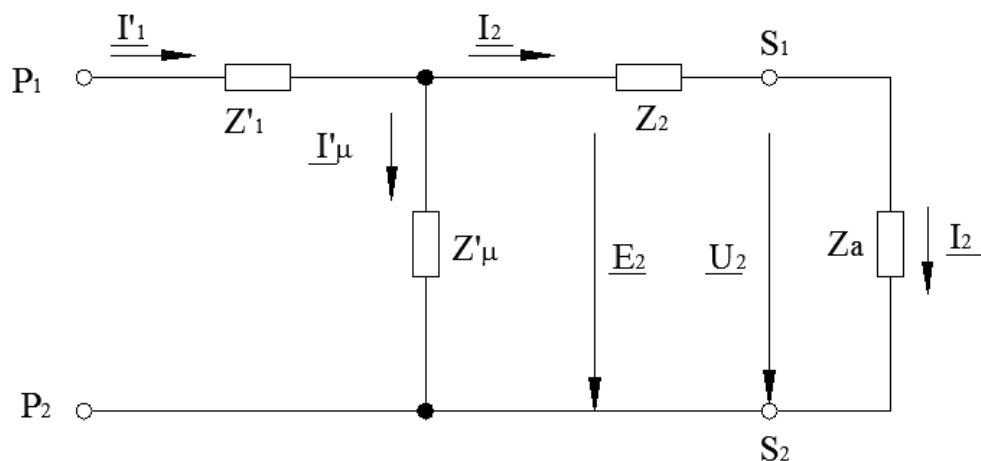
arba

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_1 \frac{N_1}{N_2} = \frac{\underline{I}_1}{K_I}, \quad (4)$$

čia K_I – transformacijos koeficientas, vadinamas vijų koeficientu ir yra apskaičiuojamas pagal šią išraišką:

$$K_I = \frac{N_2}{N_1}. \quad (5)$$

Atstojamoji srovės transformatoriaus schema pateikiama 1.2 paveiksle [1].



1.2 pav. Srovės transformatoriaus atstojamoji schema

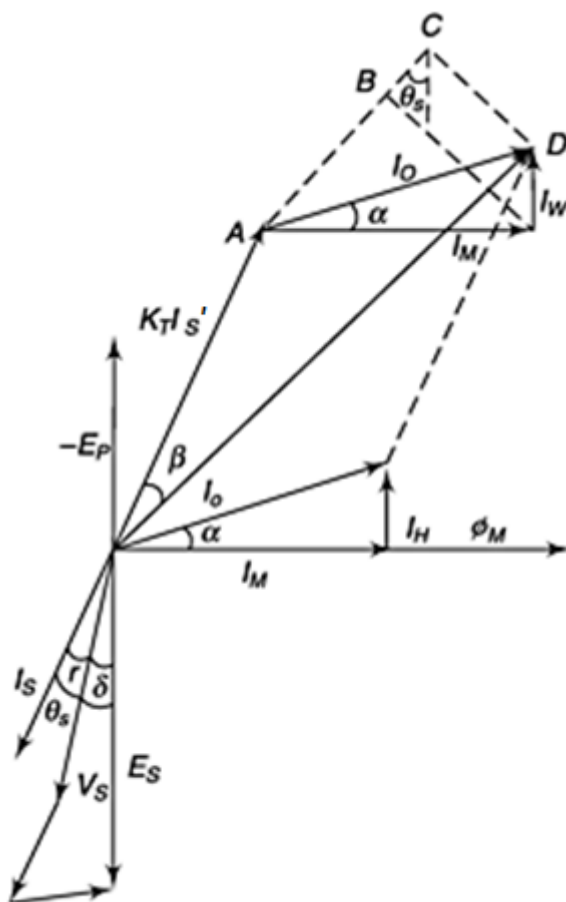
1.2 Srovės transformatoriaus fazorių diagrama

Idealiuose srovės transformatoriuose antrinė apvija tekančios srovės dydis I_2 (I_s) yra toks pats kaip ir pirminė apvija tekančios srovės I_1 (I_p) padalintas iš transformacijos koeficiento. Tokiu atveju pirminė srovė pilnai transformuojasi antrinėje apvijoje ir srovės transformatorius dirba be paklaidų.

Realiuose srovės transformatoriuose taip nėra, todėl atsirandančias paklaidas geriausiai nagrinėti pasinaudojant srovės transformatoriaus fazorių diagrama, kuri pateikta 1.2.1 paveiksle.

Iš fazorių diagramos matome, kad pirminei ir antrinei apvijai bendras atskaitos taškas yra šerdį veriantis elektromagnetinis srautas Φ_M . Pirminės apvijos elektromagnetinis laukas E_p ir antrinėje apvijoje indukuotas elektromagnetinis laukas E_s atsilieka nuo magnetinio srauto Φ_M 90°. Vektorių E_p ir E_s dydis yra proporcingas antrinės ir pirminės apvijos vijų skaičiui. Sužadavimo srovė (įmagnetinimo) I_0 yra pirminė apvija tekančios srovės dalis ir susideda iš dviejų

komponenčių I_M ir I_H . I_M yra reaktyvioji komponentė atsojanti histerezės ir sūkurinių srovių nuostolius šerdyje ir yra fazėje su pirminėje apvijoje indukuotu elektromagnetiniu lauku E_p . Antrine apvija tekanči srovė I_s atsilieka nuo antrinėje apvijoje indukuoto elektromagnetinio lauko E_s kampu θ_s . Kampas θ_s yra sudarytas iš kampų δ ir r sukurtų apkrovos prijungtos prie antrinės apvijos. Atvirkštinė antrinės apvijos srovė I_s' yra paduodama yra pirminę apviją padauginus iš transformacijos koeficiento K_T . Atstojamoji srovė I_p yra vektorių $K_T I_s'$ ir I_0 geometrinė suma.



1.2.1 pav. Srovės transformatoriaus fazorių diagrama. I_s – antrine apvija tekančios srovės dydis, E_s – antrinėje apvijoje indukuota vidinė įtampa, V_s – įtampa antrinės apvijos išvaduose, E_p – pirminės apvijos vidinė įtampa, I_p – pirminė apvija tekančios srovės dydis, K_T – transformacijos koeficientas, I_0 – įmagnetinimo (sužadavimo) srovė, I_M – įmagnetinimo srovės komponentė, kurianti magnetinį srautą, I_H – įmagnetinimo srovės fazės komponentė, atstojanti nuostolius šerdyje, Φ_M – šerdį veriantis magnetinis srautas, δ – fazių kampas dėl antrinės apvijos, r – fazių kampas dėl apkrovos, θ_s – suminis antrinės apvijos fazių kampas, α – nuostolių kampas dėl šerdies įsimagnetinimo, β – fazių kampas tarp pirminės ir atvirkštinės antrinės srovės, $K_T I_s'$ – atvirkštinės antrinės srovės sandauga su transformacijos koeficientu.

Magnetinis srautas Φ_M ir sužadavimo srovė I_0 yra nustatomi pagal tai, kokia yra reikalinga įtampa antrinėje apvijoje, paeiliui nustatant apkrovą prijungtą prie antrinės apvijos.

Paklaidos srovės transformatoriuose gali būti srovės, kampo ir pilnoji. Pilnoji paklaida nusakoma vektoriaus I_0 moduliu (atkarpa AD) ir ji apima srovės ir fazės paklaidas. Šios paklaidos didėja, didėjant įmagnetinimo srovei I_0 . Siekiant sumažinti įmagnetinimo srovę I_0 , reikia sumažinti šerdį veriantį magnetinį srautą Φ_M :

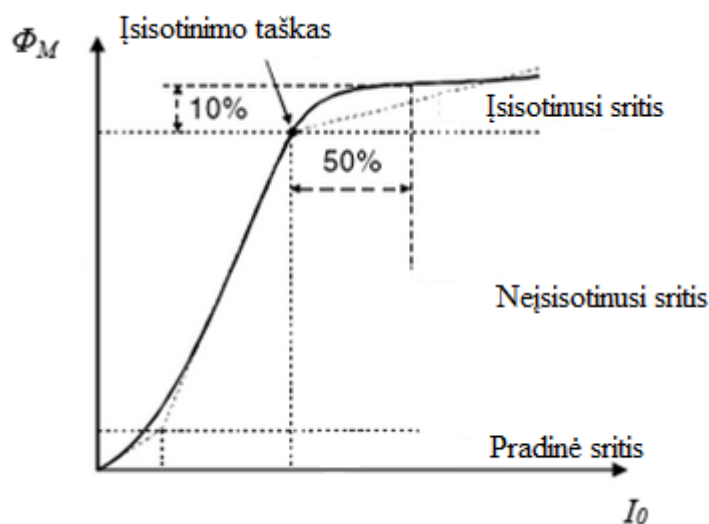
$$\Phi_M = \frac{I_0 N_I}{R_m}, \quad (6)$$

Iš čia:

$$I_0 = \frac{\Phi_M R_m}{N_I}, \quad (7)$$

kur R_m – plieno šerdies magnetinė varža.

Įmagnetinimo charakteristika – magnetinio srauto priklausomybė nuo įmagnetinimo srovės parodyta 1.2.2 paveiksle.



1.2.2 pav. Srovės transformatoriaus įmagnetinimo charakteristika [2]

Charakteristikoje matome, kad pradinėje srityje įmagnetinimo srovė I_0 apytikriai proporcinga magnetiniam srautui Φ_M . Neįsisotinusioje srityje magnetinis srautas didėja sparčiau negu įmagnetinimo srovė. Prie magnetinio srauto reikšmės, paveiksle pažymėtos rodykle, vyksta magnetolaidžio įsisotinimas. Didinant srautą įsisotinimo srityje, įmagnetinimo srovė didėja žymiai sparčiau už magnetinį srautą, kas sąlygoja greitą paklaidų padidėjimą.

Toliau detaliau pakalbėsime apie srovės ir fazės paklaidas.

1.2.1 Srovės paklaida

Tikrasis srovės transformatoriaus transformacijos santykis nėra lygus vardiniam transformacijos koeficientui, nes pirmine apvija tekančios srovės dydis priklauso ir nuo

įsimagnetinimo bei šerdies įšilimo nuostolių. Paklaida atsirandanti dėl šio skirtumo vadinama srovės paklaida. Ši paklaida gali būti išreiškiama tokia formule:

$$\text{Procentinė srovės paklaida} = \frac{K_N(I_S - I_P)}{I_P \cdot 100} \quad (8)$$

Fazorių diagramoje srovės paklaidą atspindi atkarpa AC.

1.2.2 Fazės paklaida

Idealiam srovės transformatoriui, kampas tarp pirminės apvijos srovės ir atvirkštinės antrinės apvijos srovės vektorių yra nulis. Realiam srovės transformatoriui visada yra skirtumas tarp šių dviejų paminėtų parametrų todėl, kad pirmine apvija tekanči srovė turi tiekti kitiems elementams žadinimo srovę. Kampas tarp šių dviejų vektorių yra vadinamas fazės poslinkiu arba srovės transformatoriaus fazės paklaida. Sinusinei srovei ši paklaida bus teigiama, kai antrine apvija tekančios srovės vektorius bus pirmesnis už pirmine apvija tekančios srovės vektorių. Kadangi fazės paklaida β labai maža (praktikoje $\tan \beta \cong \beta$), tai ji gali būti išreiškiama šia formule:

$$\beta = \frac{I_M \cdot \cos \theta_S = I_H \cdot \sin \theta_S}{K_T I_S + I_M \cdot \sin \theta_S + I_W \cdot \cos \theta_S}, \quad (9)$$

arba apytikriai :

$$\beta = \frac{I_M}{K_T I_S}. \quad (10)$$

Fazės paklaida paprastai išreiškiama minutėmis. Srovės transformatoriaus charakteristikos gali būti pagerintos iki minimumo sumažinus srovės ir fazės paklaidas. Remiantis 8 ir 9 formulėmis, tai gali būti pasiekta:

- Naudojant aukšto pralaidumo ir mažų histerezės nuostolių magnetinę šerdį;
- Palaikyti vardinę apkrovą kuo galima labiau artimą leistinai vertei;
- Užtikrinant minimalų ilgį magnetinio srauto kelyje ir padidinant jo plotą;
- Mažinant vidinę antrinės apvijos apkrovą iki minimaliai leistinos;
- Palaikyti antrinės apvijos apkrovą artimą minimaliai leistinai [3].

1.3 Pereinamasis procesas srovės transformatoriuje

Srovės transformatoriaus veikimas pereinamojo proceso metu yra charakterizuojamas veikimu prieš įsisotinimą ir po įsisotinimo. Prieš įsisotinimą pereinamasis procesas yra apibūdinamas perdavimo funkcija ir dažnio atsaku. Pereinamojo proceso priklausomybė srovės transformatoriaus įsisotinimui daugiau ar mažiau yra susijusi su įsisotinimo laiku.

Skirtingų tipų srovės transformatoriai skirtingai funkcionuoja pereinamojo proceso metu. Standartiniai srovės transformatoriai yra klasifikuojami pagal daugybę skirtingų klasių ir standartų, bet iš principo yra tik trijų skirtingų tipų srovės transformatoriai. Šie tipai išskiriami pagal plieninės šerdies dizainą ir oro tarpų buvimą. Oro tarpai šerdyje ypatingai įtakoja liekamojo magnetinio srauto savybes. Pagal šiuos aspektus gali būti išskiriami trys srovės transformatorių tipai:

- Srovės transformatoriai su dideliu liekamuju magnetiniu srautu (*angl. High Remanence*);
- Srovės transformatoriai su mažu liekamuju magnetiniu srautu (*angl. Low Remanence*);
- Srovės transformatoriai be liekamojo magnetinio srauto (*angl. Non Remanence*).

Pirmojo tipo srovės transformatoriai yra su uždara šerdimi. Srovės transformatoriai, kurių liekamas magnetinis srautas mažas, šerdyje turi mažus oro tarpus. Tokia konstrukcija leidžia apriboti liekamąjį magnetinį srautą iki 10 % įsisotinimo srauto. Trečiojo tipo srovės transformatoriai šerdyje turi didelius oro tarpus ir jų liekamas magnetinis srautas lygus nuliui [4].

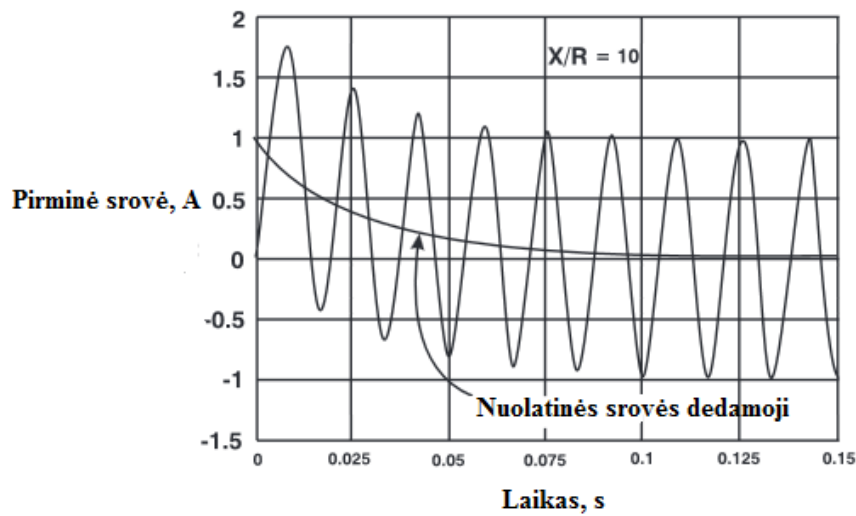
Kaip matome magnetinės šerdies savybės turi didelę įtaką srovės transformatoriaus veikimui ir charakteristikoms.

1.3.1 Pereinamasis procesas prieš įsisotinimą ir po įsisotinimo

Pirminės srovės matavimams paprastai reikalingas tam tikros tikslumo klasės srovės transformatorius, kurio darbo srovė dažniausiai neviršija vardinio dydžio, tai relinės apsaugos ir automatikos įrenginiuose srovės transformatorius turi atlikti jam skirtas funkcijas esant žymiai didesnėms srovėms už vardines, pereinamojo proceso metu. [5] Būtent tada, srovės transformatoriaus veikimas ir kelia didžiausią susirūpinimą.

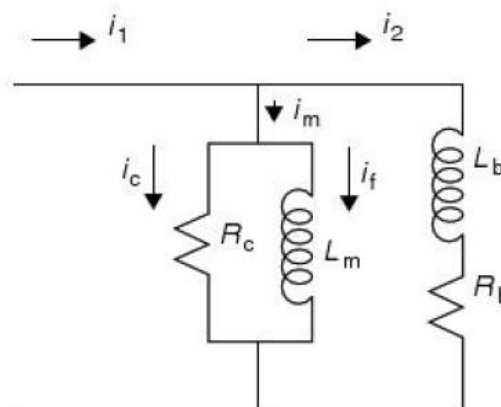
Kai atsiranda trumpas jungimas, tada srovės reikšmės žymiai išauga ir trumpojo jungimo srovė gali turėti didelį kiekį nuolatinės srovės komponentių (aperiodinių dedamųjų), kurios

įsotina šerdį. Pirminės srovės su nuolatinės srovės komponente iliustracija pateikiama 1.3.1.1 paveiksle.



1.3.1.1 pav. Pirminė srovė su nuolatinės srovės dedamoja [6]

Visi šie veiksniai įtakoja ne tik šerdies įsotinimą, bet ir antrinės srovės pastebimus iškraipymus [7]. Nors ir šerdies įsotinimas yra netiesinis reiškinys, tačiau pirmiausiai apibrėšime priklausomybę tarp pirminės trumpojo jungimo srovės srovės transformatoriuje, jo apkrovos ir magnetinio srauto, veriančio šerdį, kai šerdis turi tiesinę įmagnetinimo charakteristiką. Kai tai bus atlikta, tada galėsime kokybiškai išnagrinėti netiesiškumo poveikį srovės transformatoriaus veikimui. Pereinamojo proceso analizei naudosime srovės transformatoriaus ekvivalentinę schemą, pateiktą 1.3.1.2 paveiksle.



1.3.1.2 pav. Srovės transformatoriaus ekvivalentinė schema pereinamojo proceso analizei

Iš schemos matome, kad toliau priimsime, jog magnetinė varža yra analogiška šerdies nuostolių varžai R_c ir magnetiniam induktyvumui L_m . Pirminė srovė $i_1(t)$, kurioje yra eksponentinių nuolatinės srovės dedamųjų gali būti išreikšta šia išraiška:

$$i_1(t) = I_{max} \left[\cos(\omega t - \theta) - e^{-\frac{t}{T}} \cos \theta \right], \text{ kai } t > 0, \quad (11)$$

ir $i_1(t) = 0$, kai $t < 0$, kur I_{max} yra sinusoidinės trumpojo jungimo srovės didžiausia vertė nusistovėjusiam režime, T yra pirminės trumpojo jungimo srovės laiko konstanta arba kitaip laiko pastovioji, o θ – srovės fazių kampas, po trumpojo jungimo atsiradimo (pradiniu momentu). Laiko pastovioji gali kisti nuo šimtųjų iki dešimtųjų sekundės dalių, priklausomai nuo trumpojo jungimo pobūdžio. Laiko konstanta T turi labai didelį poveikį pereinamiesiems procesams srovės transformatoriuje. Poveikis yra tuo didesnis, kuo didesnė laiko konstanta T ir kuo mažesnis srovės fazių kampas θ .

Laplaso srityje pirminės srovės išraiška būtų tokia:

$$i_1(s) = I_{max} \cos \theta \left(\frac{s}{s^2 + \omega^2} + \frac{T}{1 + sT} \right) + I_{max} \sin \theta \left(\frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \right), \quad (12)$$

Be to,

$$i_2(s) = R_c i_c = s L_m i_f = i_2 (R_b + s L_b), \quad (13)$$

kur $L_m i_f$ yra šerdies liekamasis magnetinis srautas Φ_M , kurį sukelia sužadavimo srovė i_f . Iš to išplaukia, kad antrinė srovė i_2 lygi:

$$i_2 = i_1 - (i_f - i_c) \quad (14)$$

Iš lygčių 13 ir 14 galime surasti Φ_M ir i_2 pirminės srovės i_1 atžvilgiu. Priimame, kad apkrovos induktyvumas L_b yra lygus nuliui, tada:

$$\Phi_M = \frac{R_c R_b}{R_c + R_b} \frac{I}{s + 1/\tau} i_1 \quad (15)$$

$$i_2 = \frac{R_c R_b}{R_c + R_b} \frac{I}{s + 1/\tau} I_1, \quad (16)$$

kur

$$\tau = \frac{R_c L_m + R_b L_m}{R_b R_c} \quad (17)$$

I 15 ir 16 lygybes įstatę pirminės srovės i_1 išraišką iš 12 lygybės ir atlikus Laplaso transformaciją gautume tokias liekamojo magnetinio srauto Φ_M ir antrinės srovės i_2 išraiškas:

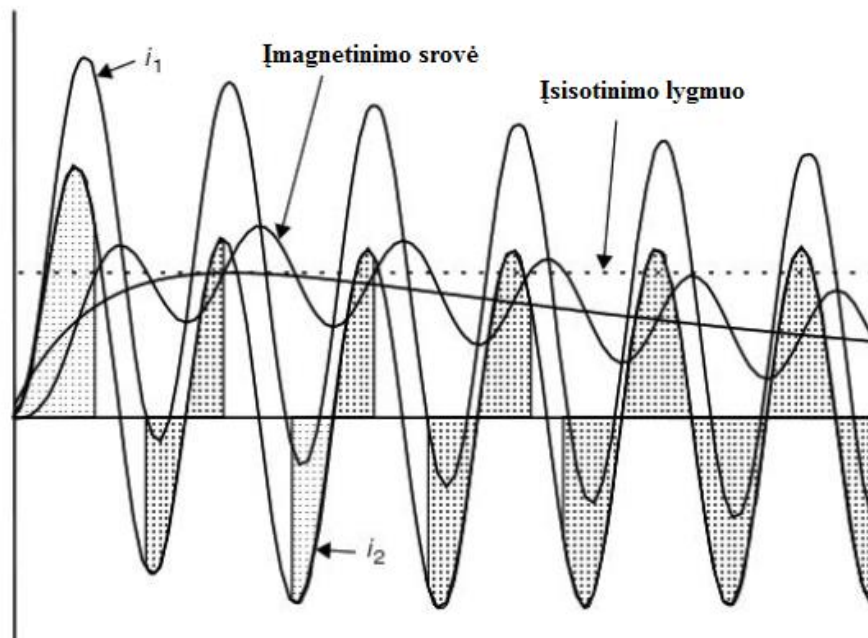
$$\Phi_M = I_{\max} \cos\theta \frac{R_c R_b}{R_c + R_b} \left\{ \varepsilon^{-\frac{t}{T}} \left[-\frac{\tau T}{\tau - T} + \tau (\sin\varphi \cos\varphi \tan\theta - \cos^2\varphi) \right] + \varepsilon^{-\frac{t}{T}} \left(\frac{\tau T}{\tau - T} \right) + \tau \frac{\cos\varphi}{\cos\theta} \cos(\omega t - \theta - \varphi) \right\} \quad (18)$$

$$i_2 = \frac{1}{B_b} \frac{d\lambda}{dt} = I_{\max} \cos\theta \frac{R_c}{R_c + R_b} \left\{ \varepsilon^{-\frac{t}{T}} \left[-\frac{T}{\tau - T} + (\sin\varphi \cos\varphi \tan\theta - \cos^2\varphi) \right] + \varepsilon^{-\frac{t}{T}} \left(\frac{\tau}{\tau - T} \right) - \omega \tau \frac{\cos\varphi}{\cos\theta} \sin(\omega t - \theta - \varphi) \right\}, \quad (19)$$

kur $\omega\tau = \tan\varphi$.

Kai apkrova induktyvinė, apkrovos induktyvumas negali būti nevertinamas, tada 18 ir 19 išraiškos pasidarytų dar sudėtingesnės, tai yra šiose išraiškose atsirastų papildomos laiko konstantos.

Trumpojo jungimo srovėje atsiradusios nuolatinės srovės dedamosios išaukia žymų įmagnetinimo srovės padidėjimą, o tai reiškia, kad padidėja ir šerdį veriantis liekamasis magnetinis srautas Φ_M (žiūrėti 1.3.1.3 paveikslą).



1.3.1.3 Srovės transformatoriaus pirminė, antrinė ir įmagnetinimo srovės

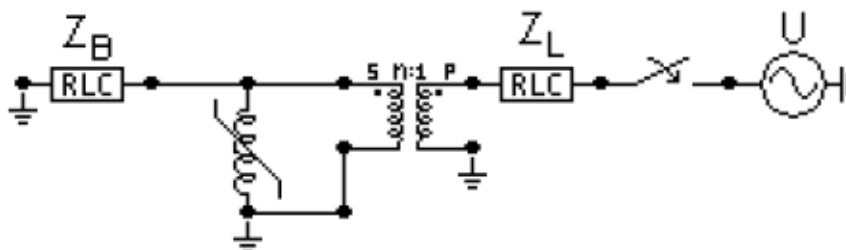
1.3.1.3 paveiksle taškinė linija parodo sritį, prie kurios srovės transformatoriaus šerdis yra įsotinama, kai įmagnetinimo srovė kerta šią liniją. Laikas, kurį įmagnetinimo srovė yra virš

taškinės linijos, laikomas įsisotinimo lygmens (srities) pastoviąja. Tokiu būdu magnetinis induktyvumas L_m srovės transformatoriaus ekvivalentinėje schemoje (1.3.1.2 paveikslas) tampa lygus 0. Kai įmagnetinimo srovė yra virš taškinės linijos (įsotinimo lygmenyje), antrine apvija tekanti srovė taip pat tampa lygi nuliui. Tai vaizduoja 1.3.1.3 paveiksle esanti neužjuodintos i_2 kreivės dalis. Taip pat 1.3.1.3 paveiksle matome, kad kai kompensuojamos nuolatinės srovės komponentės (aperiodinės dedamosios), įmagnetinančioji srovė pradeda mažėti ir tampa apytikriai lygi nuliui, o srovės transformatorius vėl tampa neįsisotinęs [8]. Srovės transformatoriaus įsisotinimo laikas priklauso nuo grandinės parametrų, todėl toliau reiktų paminėti srovės transformatoriaus antrinės apvijos apkrovos dydžio ir X/R (reaktyviosios/aktyviosios varžos) santykio įtaką.

1.3.2 Antrinės apvijos apkrovos varžos ir X/R santykio įtaka srovės transformatoriaus įsisotinimui

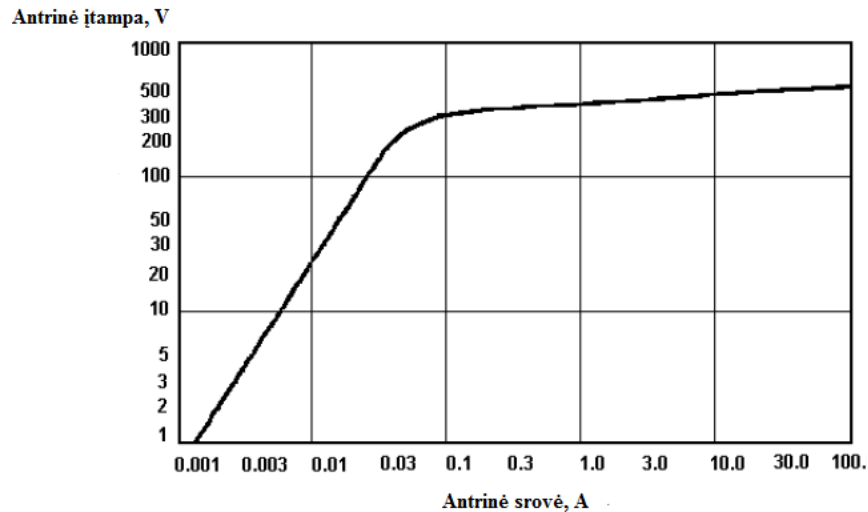
Apie antrinės apvijos apkrovos varžos ir X/R santykio įtaką bus kalbama remiantis Vroclavo universitete atliktu bandymu, taikant modeliavimą.

Modeliavimas buvo atliktas naudojant EMTP programinę įrangą (angl. *electro – magnetic transient program*). Bandymo schema pateikiama 1.3.2.1 paveiksle.



1.3.2.1 Bandymo schema EMTP programinėje įrangoje

Atliekant modeliavimą, pirminė srovės transformatoriaus varža ir varža įmagnetinimo šakoje buvo nepaisomi. Šerdies netiesiškumo modeliui gauti parinktas netiesinis induktorius, kurio sužadavimo kreivė pateikiama 1.3.2.2 paveiksle. Srovės transformatoriaus pirminės ir antrinės srovės santykis 1000:5. Dėl paprastumo liekamoji magnetovara buvo nevertinama.



1.3.2.2 Induktoriaus sužadavimo kreivė naudota bandyme

1. Antrinės apvijos apkrovos varžos įtakos srovės transformatoriaus įsisotinimui bandymas.

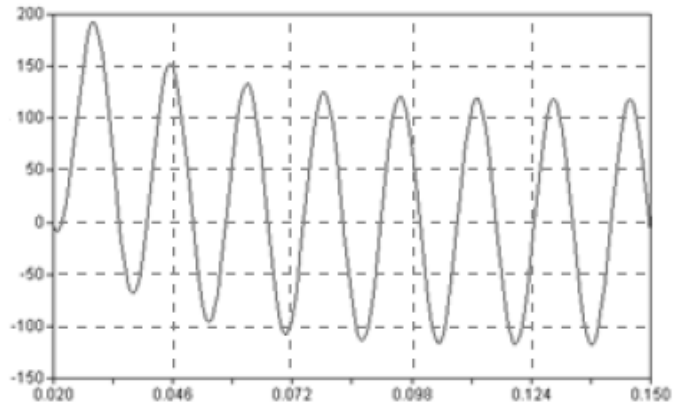
Šiuolaikinių relių, skirtų relinei apsaugai, varžos yra gana mažos. Bandyme naudotų parametų reikšmės pateikiamos 1.3.2.1 lentelėje.

1.3.2.1 lentelė. 1 bandyme naudotų parametų reikšmės

R_B	0,3; 3,0; 5,0; 10 Ω
X_B	0,01 Ω
X_L/R_L	8
U	110 kV
I_f	13,6 kA
f	60 Hz

Paveiksle 1.3.2.3 pateikiama modeliavime gauta antrinės srovės kreivė, kai antrinės apvijos apkrovos varža lygi 0,3 Ω . Paveiksle matome, kad prie tokios varžos srovės transformatorius neįsisotina. Kai varža padidinama, atsiranda pastebimi srovės iškraipymai. 2.2.2.4 paveiksle pateikiama antrinės srovės kreivė, kai antrinės apvijos apkrovos varža atitinkamai lygi 3, 5 ir 10 Ω . Tai įrodo, kad net ir maža varža labai gali įtakoti srovės transformatoriaus tikslumą.

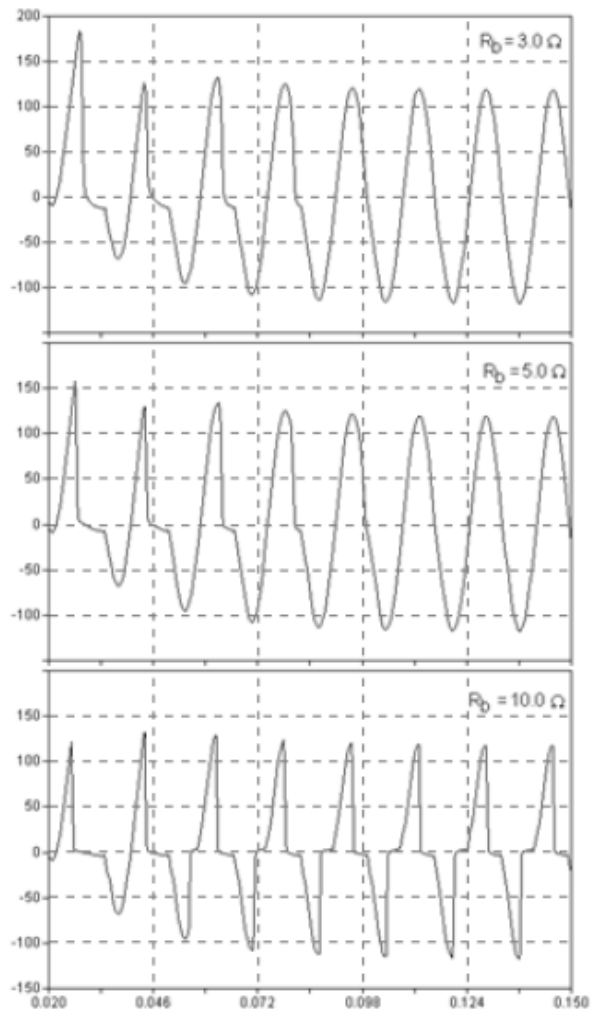
Antrinė srovė, A



Laikas, s

1.3.2.3 pav. Neiškraipyta antrinė srovė ($R_B = 0,3 \Omega$)

Antrinė srovė, A



Laikas, s

1.3.2.4 pav. Antrinės srovės iškreipimai priklauso nuo varžos dydžio

2. X/R santykio įtakos srovės transformatoriaus įsisotinimui bandymas.

X/R santykis yra labai svarbus parametras, kai atsižvelgiama į srovės transformatoriaus įsisotinimą, nes šis parametras atsakingas už nuolatinės srovės komponentių nuslopinimą trumpojo jungimo srovėje. Kadangi nuolatinės srovės komponentės kuria beveik pastovų magnetinį srautą, jos žymiai prisideda prie srovės transformatoriaus įsisotinimo.

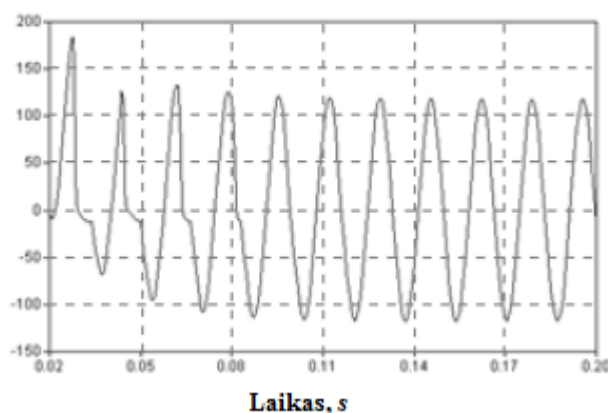
Lentelėje 1.3.2.2 pateikiamos bandyme naudotų parametrų reikšmės. Visiems bandymams trumpojo jungimo reikšmė buvo palaikoma vienoda. Antrinės apvijos varža buvo palaikoma pastovi $Z_B = 3+j0,1 \Omega$.

1.3.2.2 lentelė. 2 bandyme naudotų parametrų reikšmės

X_L/R_L	R_L, Ω	X_L, Ω
8	1,000	8
10	0,802	8,022
15	0,536	8,044
20	0,403	8,052

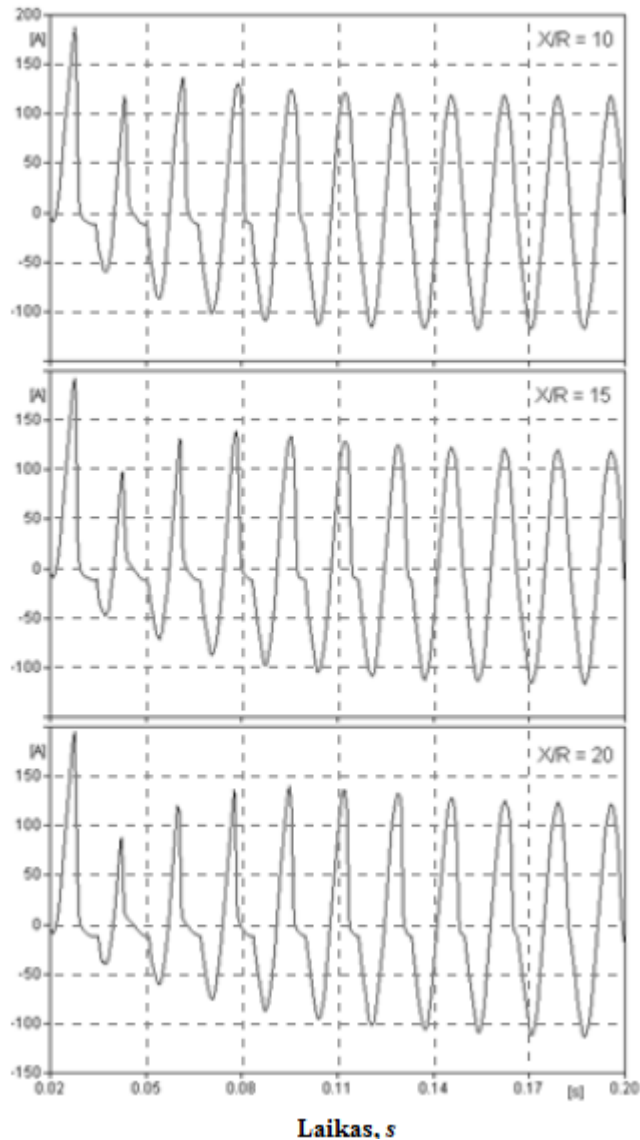
1.3.2.5 paveiksle pateikiama antrinės srovės kreivė, kai $X/R = 8$. Matome, kad antrinės srovės kreivė yra šiek tiek iškraipyta. Kai buvo padidinta reaktyvioji varža, antrinės srovės iškreipimai pasidarė labiau pastebimi (1.3.2.6 paveikslas). Paveiksle matome, kad atsirado ne tik antrinės srovės, bet ir trumpojo jungimo srovės amplitudės iškreipimai. Kai $X/R = 20$, maždaug po 20 ms nusistovėjusios trumpojo jungimo srovės amplitudė buvo apytiksliai lygi 120 A, o pereinamojo proceso metu apie 90 A. Kaip matome, šis skirtumas didėja, kai didėja X/R santykis. Šie antrinės srovės kreivės ir amplitudės iškreipimai daro labai didelę įtaką srovės matavimo tikslumui. Pirmaisiais ciklais išmatuota srovė bus labai netiksli [9].

Antrinė srovė, A



1.3.2.5 pav. Antrinės srovės kreivė, kai $X/R = 8$

Antrinė srovė, A



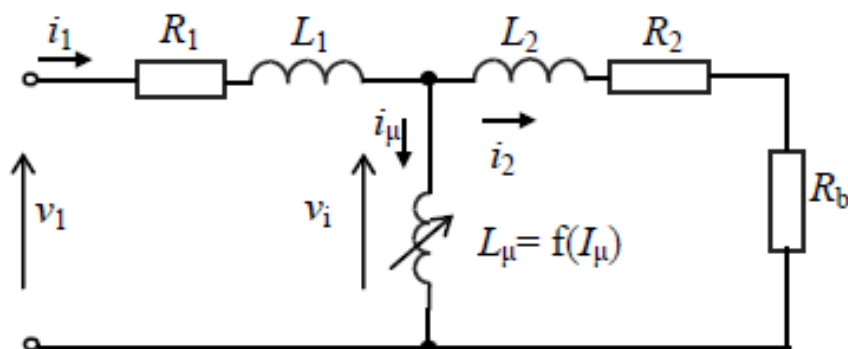
1.3.2.6 Antrinės srovės iškraipymai priklausomai nuo X/R

Išanalizavus šiuos bandymus matome, kad antrinės apvijos apkrovos varža ir X/R santykis santykis turi labai didelę įtaką srovės transformatoriaus įsisotinimui. Nors didesnę įtaką antrinės srovės matavimui turi antrinės apvijos apkrovos varža, tačiau X/R santykis negali būti neįvertintas.

1.4 Netiesinis matematinis srovės transformatoriaus modelis

Netiesinis srovės transformatoriaus modelis gali būti aprašytas pagal ekvivalentinę srovės transformatoriaus schemą. Ekvivalentinis srovės transformatoriaus modelis sudaromas panaudojant pirminę apviją apibūdinančius parametrus (pirminės apvijos varža R_1 , pirminės

apvijos nuotėkio induktyvumas L_1), antrinę apviją apibūdinančius parametrus (antrinės apvijos varža R_2 , antrinės apvijos nuotėkio induktyvumas L_2) ir juos sujungiant su apkrovos varža R_b . Realiomis sąlygomis apkrovos varža R_b yra analoginio arba skaitmeninio testerio varža. Įmagnetinimą atstoja netiesinis įmagnetinimo induktyvumas L_μ , kuris yra įmagnetinimo srovės I_μ funkcija. Sūkurinių srovių nuostoliai nepaisomi, todėl joks pasispriešinimas, įtakojančias galios energijos nuostolius šiame modelyje nevertinamas. Ekvivalentinė srovės transformatoriaus schema pateikiama 1.4.1 paveiksle .



1.4.1 pav. Ekvivalentinė srovės transformatoriaus schema

Netiesinis matematinis srovės transformatoriaus modelis aprašomas tokiomis matematinėmis lygtimis:

$$i_1(t) = i_2(t) + i_\mu(t) \quad (20)$$

Indukuota įtampa v_i aprašoma šia lygtimi:

$$v_i(t) = N \frac{d\Phi(t)}{dt}, \quad (21)$$

kur Φ – magnetinis srautas, N – apvijų santykis.

$$N \frac{d\Phi(t)}{dt} = i_2(t)R + L \frac{di_2(t)}{dt}, \quad (22)$$

$$R = R_2 + R_b, \quad (23)$$

$$L = L_2 + L_b, \quad (24)$$

kur L_b – apkrovos induktyvumas.

Labai sunkus uždavinys yra nustatyti priklausomybę tarp įmagnetinančios srovės ir magnetinio induktyvumo. Ji gali būti nustatoma eksperimentiniu arba analitiniu būdu, atliekant skaičiavimus. Dažniausiai magnetinis induktyvumas išreiškiamas šia lygtimi:

$$L_\mu = \frac{N^2 A}{l} \frac{dB}{dH}, \quad (25)$$

kur A – plieninės šerdies skerspjūvio plotas, l – magnetinio takelio ilgis, dB/dH – B - H charakteristikos diferencinis nuolydis [10].

Išraiška 2.18 gali būti perrašoma taip:

$$L_{\mu} \frac{di_{\mu}}{dt} = v_i \quad (26)$$

Iš išraiškų 2.13, 2.15 ir 2.19 gauname:

$$\frac{di_{\mu}(t)}{dt} = \frac{I}{L + L_{\mu}(i_{\mu})} [Ri_I - Ri_{\mu}(t) + L \frac{di_I(t)}{dt}] \quad (27)$$

Toliau nagrinėsime srovės transformatoriaus pereinamuosius procesus trumpojo jungimo metu konkrečiu atveju, naudojant matematinį srovės transformatoriaus modelį.

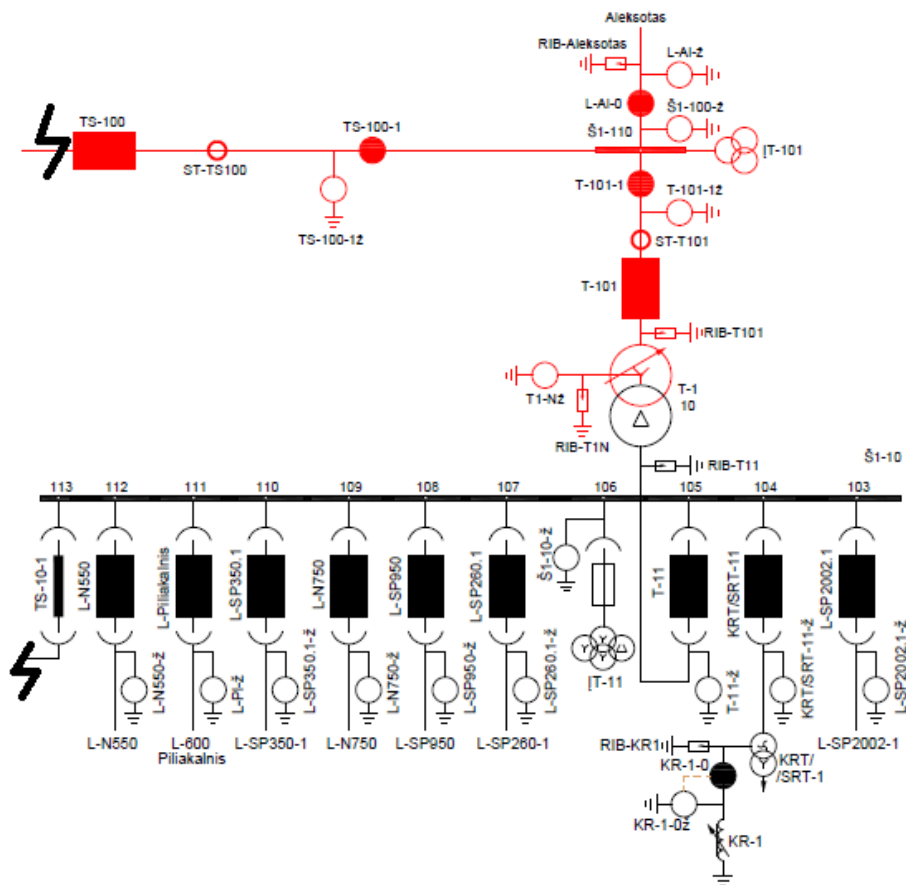
2. METODINĖ DALIS

Šioje dalyje bus nagrinėjami pereinamieji procesai srovės transformatoriuose trumpojo jungimo metu. Tyrimui bus naudojamas matematinis srovės transformatoriaus modelis ir konkreti 10 kV tinklo schema, kurios parametrai bus įvertinti modelyje. Visą tyrimą susikirstysime į tokius etapus:

- 1) Tinklo schemos analizė;
- 2) Trumpųjų jungimų skaičiavimas naudojant programinę įrangą;
- 3) Srovės transformatoriaus matematinio modelio analizė;
- 4) Pereinamųjų procesų trumpojo jungimo metu srovės transformatoriuose tyrimas.

2.1 Tinklo schemos analizė

Kaip ir buvo minėta, tyrimas bus atliekamas konkrečiam atvejui. Tyrimui naudosime realią tinklo schemą su realiais parametrais. Bus nagrinėjamas atvejis, kai Ežerėlio TP 10 kV šynos būtų maitinamos iš Noreikiškių TP 1-osios 10 kV šynų sekcijos „L-600 Piliakalnis“ fiderio (nenormalus darbo režimas) per fiderį „L-100 Kačerginė“. Noreikiškių TP 110 kV ir 10 kV 1 šynų sekcijų operatyvinė schema pateikta 2.1.1 paveiksle.



2.1.1 pav. Noreikiškių TP 110 kV ir 10 kV 1 šynų sekcijų operatyvinė schema

Iš paveikslo matome, kad Ežerėlio TP 10 kV šynos bus maitinamos per transformatorinę N-460. Žinodami linijų varžas, ilgius ir trumpuosius jungimus ant Noreikiškių TP šynų, galime apsiskaičiuoti trumpuosius jungimus linijos gale, ant Ežerėlio TP 10 kV šynų.

2.2 Trumpųjų jungimų skaičiavimas naudojant programinę įrangą

Trumpieji jungimai ant Noreikiškių TP 10 kV šynų yra žinomi ir pateikti 2.2.1 lentelėje.

2.2.1 lentelė. Trumpieji jungimai ant Noreikiškių TP 10 kV šynų

$I_k(3)_{max}$,	5,817 kA
$I_k(3)_{min}$	4,177 kA
$I_k(2)_{max}$	5,06 kA
$I_k(2)_{min}$	3,633 kA

Taip pat reikia žinoti sumines linijos varžas ir ilgius. Paskaičiuotos linijų varžos ir ilgiai pateikti 2.2.1 paveiksle.

KET Kauno m skyriaus Dispečerinė grupė										
10kV tinklo trumpų jungimų skaičiavimas										
Schemos duomenys		Nr-600								
Transformatorių pastotė		Sekcija		Sistemos varžos (Ω)						
				R max	Rmin	Xmax	Xmin			
A Noreikiškės		I-II		0	0	1,042	1,451			
Ei-lės Nr.	Linija				Varžos (Ω)		Transformatoriai			
	Pradžia	Galas	Ilgis (km)	II-a gr. (km)	R	X	Disp. numer.	Galia (kVA)	ΔU_k (%)	
A 1	Noreikiškės I-II	N460	7,066		3,082	2,325				
A 2	N460	EžTP	8,831		5,6	3,531				

2.2.1 pav. Linijų varžos ir ilgiai

Gautos trumpųjų jungimų vertės pateiktos 2.2.2 paveiksle. Paveiksle matome, kad trumpojo jungimo vertės galutiniame taške, tai yra ant Ežerėlio TP 10 kV šynų yra lygios:

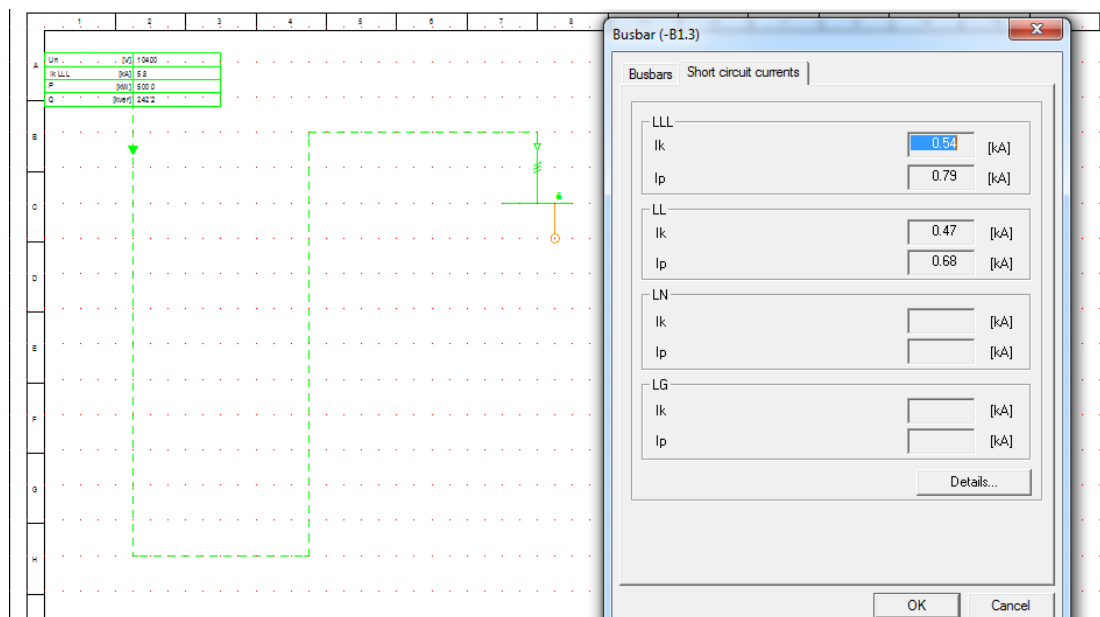
2.2.2 lentelė. Trumpieji jungimai ant Ežerėlio TP 10 kV šynų

$I_k(3)_{max}$,	0,546 kA
$I_k(3)_{min}$	0,534 kA
$I_k(2)_{max}$	0,475 kA
$I_k(2)_{min}$	0,464 kA

KET Kauno m skyriaus Dispečerinė grupė									
10kV tinklo trumpųjų jungimų skaičiavimas									
Schema		Nr-600							
Transformatorių pastotė ir fideris		Noreikiškės I-II - fid.(N601)							
Ei-lės Nr.	Linija		Trumpųjų jungimų srovės (kA)						
			Linijos gale				Už transformatoriaus prie 10kV įtampos (kA)		
	Pradžia	Galas	I(3) max	I(3) min	I(2) max	I(2) min	Tr. disp. numeris	I(3) max	I(3) min
S I S T E M A: Noreikiškės I-II			5,817	4,177	5,06	3,633			
1	Noreikiškės I-II	N460	1,328	1,243	1,155	1,081			
2	N460	EŽTP	0,546	0,534	0,475	0,464			

2.2.2 pav. Trumpųjų jungimų reikšmės

Rezultatų palyginimui buvo atlikti skaičiavimai naudojant programinę įrangą „ABB DOC“. Schemos supaprastinimui visos oro linijos ir kabelių linijos buvo pakeistos viena atstojamąja linija su tokia pačia atstojamąja linijų varža ir linijų ilgiu. Gautos trumpųjų jungimų reikšmės pateiktos 2.2.3 paveiksle.



2.2.3 pav. Paskaičiuotos trumpųjų jungimų reikšmės ABB DOC programine įranga

2.3 Srovės transformatoriaus matematinio modelio analizė

Pirmiausiai apsiskaičiuokime srovę, kuri tekės pirmine apvija I_1 esant normaliam darbo režimui:

$$I_1 = \frac{P}{U \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\varphi} = \frac{500 \cdot 10^3}{10,4 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,9} = 30,84 \text{ A} \quad (28)$$

Žinant, kad ant Noreikiškių TP 10 kV fiderio „L-600 Piliakalnis“ naudojami srovės transformatoriai, kurių transformacijos koeficientas 200/1 A, galime apsiskaičiuoti antrine apvija tekančios srovės I_2 vertę, nevertindami įmagnetinančios srovės I_0 :

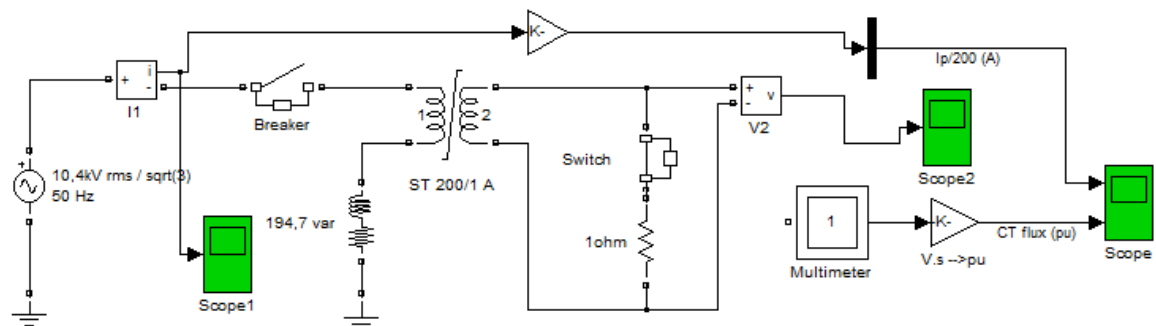
$$I_2 = \frac{I_1}{K_I} = \frac{30,84}{200} = 0,1542 \text{ A} \quad (29)$$

Prie srovės transformatoriaus pirminės apvijos prijungsimė aktyviają ir induktyviają varžas, kurios atstos linijų varžas. Kadangi žinome srovę, kuri tekės pirmine apvija, tai galime apsiskaičiuoti pilnutinę grandinės varžą, kurią turėdami galėsime surasti pilnutinę varžą Z :

$$Z = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I} = \frac{10,4 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 30,84} = 194,7 \text{ var} \quad (30)$$

Srovės transformatoriaus matematinis modelis „SIMULINK“ aplinkoje pateiktas 2.3.1 paveiksle. Paveiksle pateiktas modelis normalaus darbo režimo analizei. Norint nagrinėti avarinį režimą reikia persiskaičiuoti parametrus atitinkamai pagal 3.3.1, 3.3.2 ir 3.3.3 išraiškas.

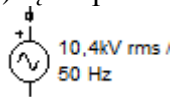
Lyginant šį matematinį srovės transformatoriaus modelį su modeliu, kuris aprašytas 1.3.2 skyrelyje, šis pranašesnis tuo, kad jame yra įvertinta pirminės ir antrinės apvijos varžos R_1 ir R_2 , vadinasi modeliavimo rezultatai yra objektyvesni.



2.3.1 pav. Srovės transformatoriaus matematinis modelis „SIMULINK“ aplinkoje

Modelyje naudojami elementai:

- 1) Įtampos šaltinis



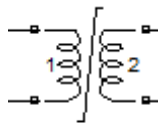
- 2) Srovės matavimui skirtas elementas



- 3) Įtampos matavimui skirtas elementas



4) Srovės transformatorius, kurio transformacijos koeficientas 200:1

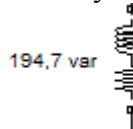


ST 200/1 A

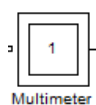
5) Antrinės apvijios varža



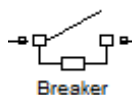
6) Induktyvioji ir aktyvioji varža



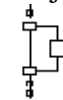
7) Šerdį veriančiam magnetiniui srautui matuoti skirtas elementas



8) Jungtuvas



9) Perjungiklis



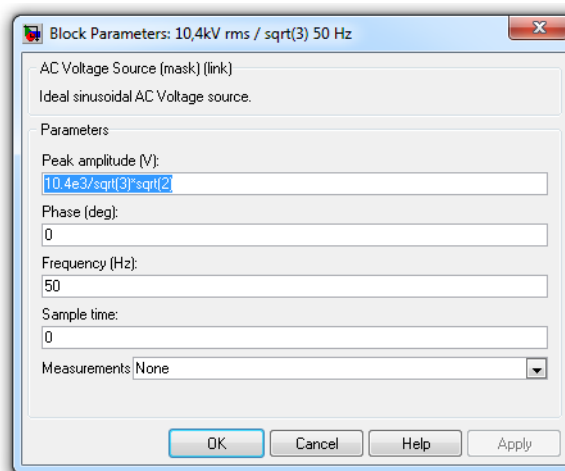
10) Elementas, skirtas perduodamo signalo parametrą keisti



11) Elementas modeliavimo rezultatams stebėti



Įtampos šaltinio parametrai pateikti 2.3.2 paveiksle.

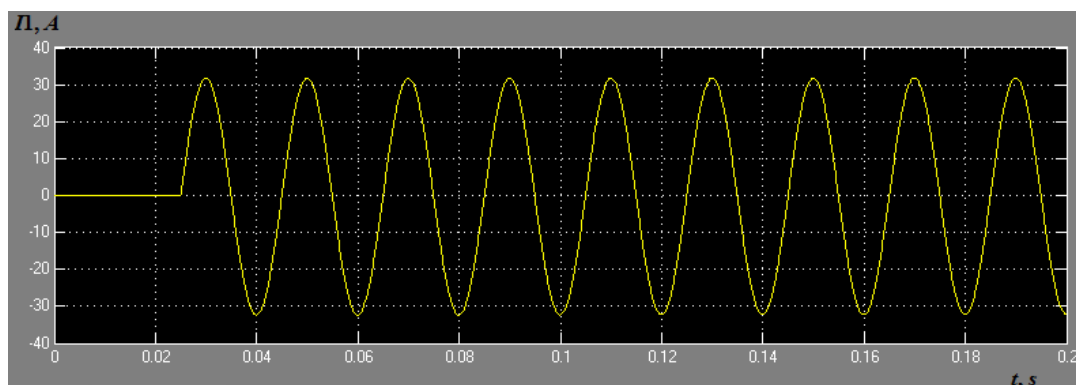


2.3.2 Įtampos šaltinio parametrai

3. TYRIMO REZULTATŲ DALIS

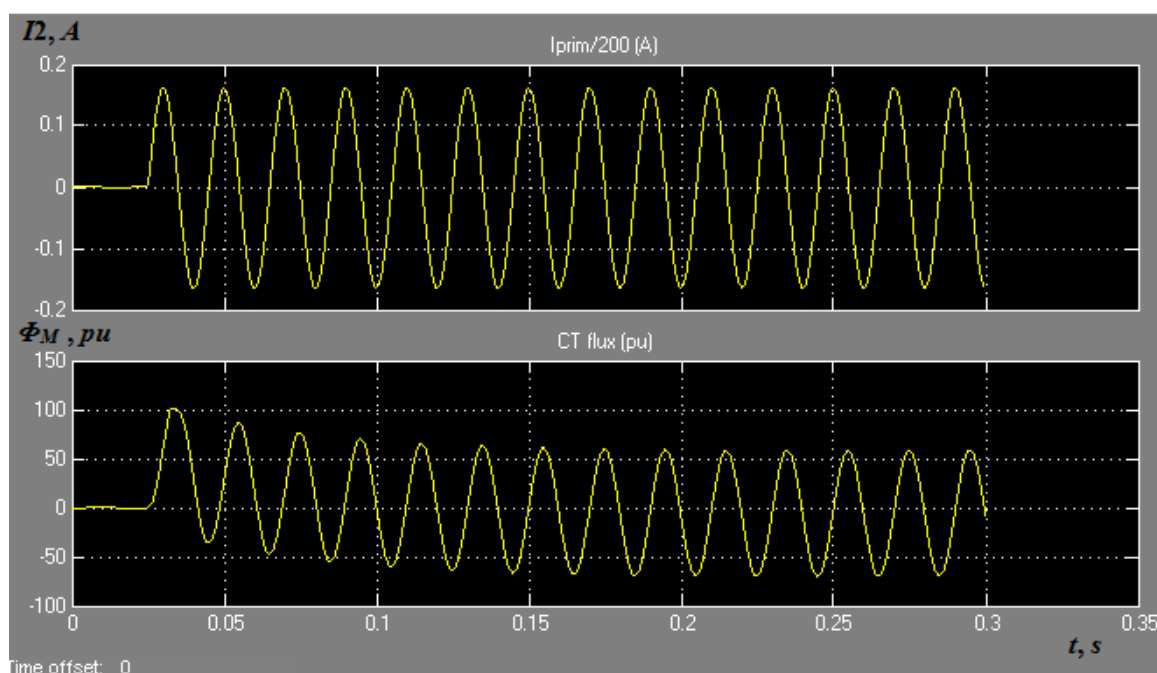
3.1 Pereinamųjų procesų trumpojo jungimo metu srovės transformatoriuose tyrimas

Prieš atliekant modeliavimą trumpojo jungimo sąlygomis pasitikrinkime modeliavimo rezultatus esant normaliam darbo režimui. Paveiksle 3.1.1 ir 3.1.2 atitinkamai pateikiamos pirmine apvija tekančios srovės I_1 ir antrine apvija tekančios srovės I_2 kreivės, bei šerdį veriančio magnetinio srauto kreivė.

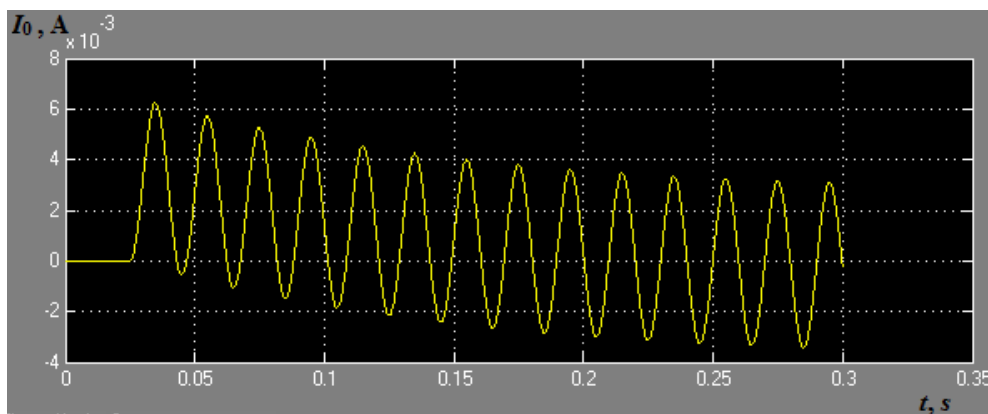


3.1.1 pav. Pirmine apvija tekančios srovės I_1 kreivė esant normaliam darbo režimui

Iš kreivės 3.1.1 pateiktos paveiksle matome, kad pirmine apvija tekanti srovė yra neiškraipyta, o jos vertė atitinka 2.3 skyrelyje paskaičiuotai vertei. Vadinasi pilnutinė varža Z buvo paskaičiuota teisingai ir tenkina modelio sąlygas.



3.1.2 pav. Antrine apvija tekančios srovės I_2 ir šerdį veriančio liekamojo magnetinio srauto Φ_M kreivės esant normaliam darbo režimui

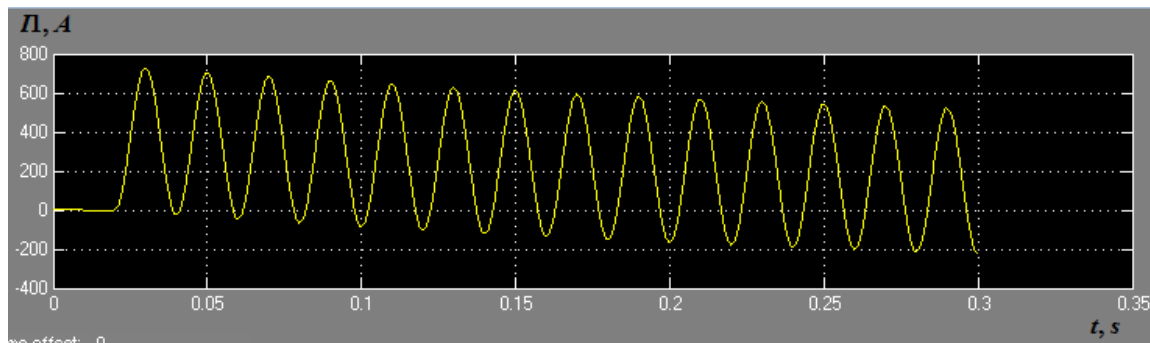


3.1.3 pav. Įmagnetinančios srovės I_0 kreivė esant normaliam darbo režimui

Iš kreivės pateiktos paveiksle 3.1.2 matome, kad antrine apvija tekanči srovė taip pat yra neiškraipyta. Šerdį veriantis magnetinis srautas kreivėje pateiktas μ matavimo vienetais. $1 \mu = 5,63 \cdot 10^{-5} \text{ Wb}$.

Atlikus modeliavimą esant normaliam darbo režimui, matome, kad modelis atitinka reikiamus parametrus, todėl perskaičiavus parametrus, jį galime naudoti trumpojo jungimo sąlygoms imituoti. Modeliavime imituosime trifazį trumpąjį jungimą už 15,9 km ir analizuosime rezultatus.

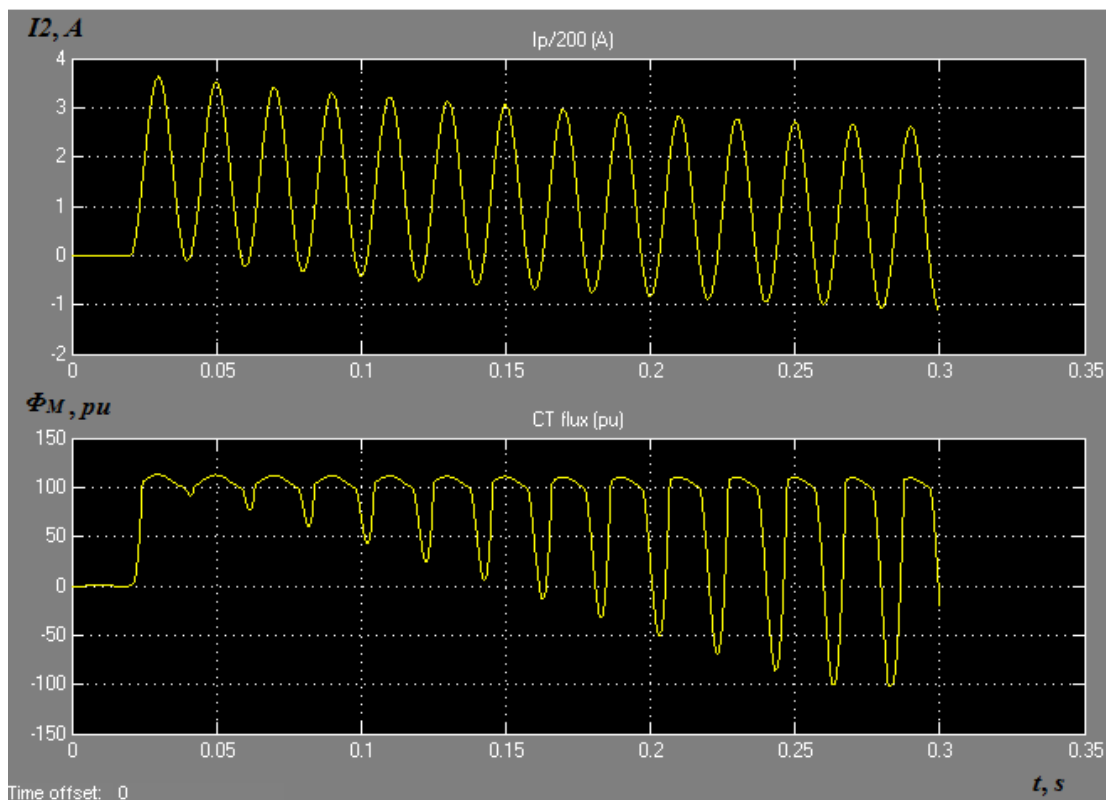
Paveiksle 3.1.4 pateikiama pirmine apvija tekančios srovės kreivė iki laiko momento $t = 0,3$ s įvykus trumpajam jungimui.



3.1.4 Pirmine apvija tekančios srovės I_1 kreivė įvykus trumpajam jungimui

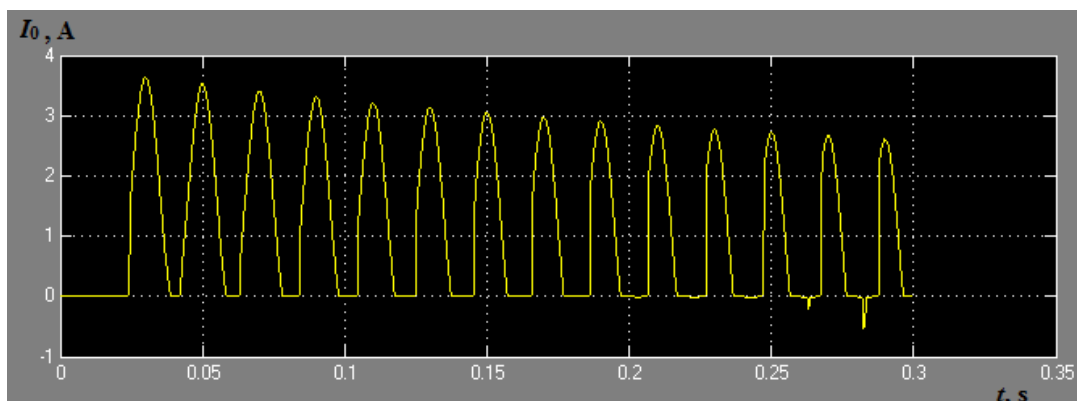
3.1.4 paveiksle matome, kad pirmine apvija tekančios srovės kreivė neiškraipyta, iškraipyta tik srovės amplitudė iki laiko momento $t = 0,25$ s.

3.1.5 paveiksle pateikiama antrine apvija tekančios srovės I_2 ir šerdį veriančio liekamojo magnetinio srauto Φ_M kreivės įvykus trumpajam jungimui.



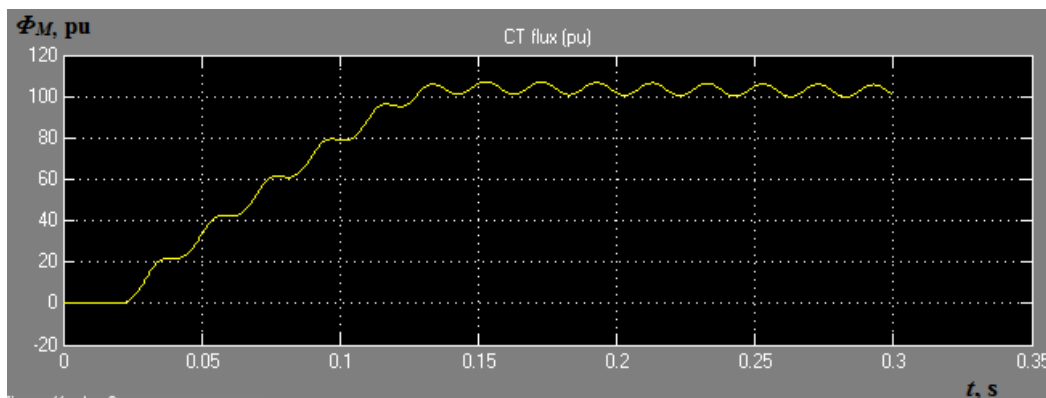
3.1.5 pav. Antrine apvija tekančios srovės I_2 ir šerdį veriančio liekamojo magnetinio srauto Φ_M kreivės įvykus trumpajam jungimui

Iš paveikslo 3.1.5 kreivių matome, kad pereinamojo proceso metu iškraipoma antrine apvija tekančios srovės I_2 amplitudė. Taip yra todėl, kad srovės transformatorius yra įsotinamas. Srovė I_2 nusistovi maždaug po $0,25\text{ ms}$, tai yra, kai srovės transformatorius pereina į neįsotinusių būseną. Vadinasi, matuojant antrine apvija tekančią srovę, kai srovės transformatorius yra įsotinęs, gaunama didelė paklaida. Taip pat lyginant 3.1.5 paveikslo kreivę su 3.1.2 paveikslo kreive pastebime, kad trumpojo jungimo metu žymiai išauga šerdį veriantis liekamasis magnetinis srautas Φ_M , vadinasi išauga ir įmagnetinančioji (sužadavimo) dedamoji I_0 , kurios kreivė pateikta 3.1.6 pav. Iš paveikslo 3.1.6 kreivės matome, kad įmagnetinančioji srovė I_0 nėra sinusoidinė.

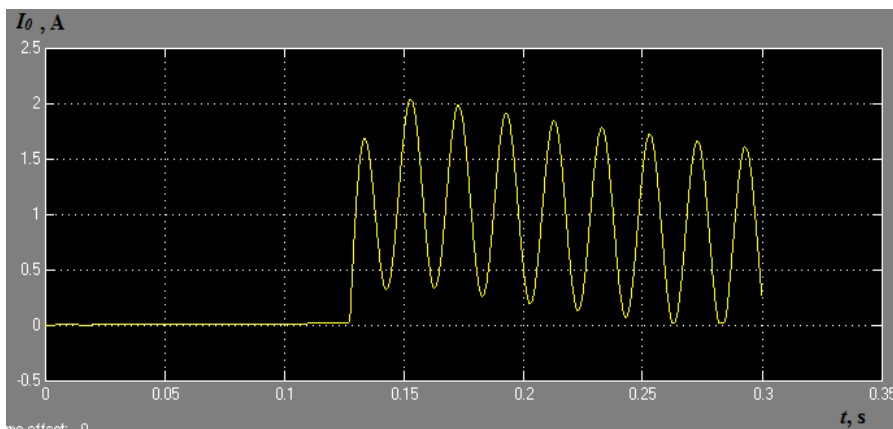


3.1.6 pav. Įmagnetinančios srovės I_0 kreivė įvykus trumpajam jungimui

Toliau pažiūrėsime kaip keičiasi šerdį veriantis magnetinis srautas Φ_M ir įmagnetinančioji srovė I_0 keičiantis antrinės apvijos apkrovos varžai R_b . Pirmu atveju apkrovos varža $R_b = 0,01 \Omega$. Gauta magnetinio srauto kreivė pateikta 3.1.7 paveiksle, o įmagnetinančios srovės 3.1.8 paveiksle.

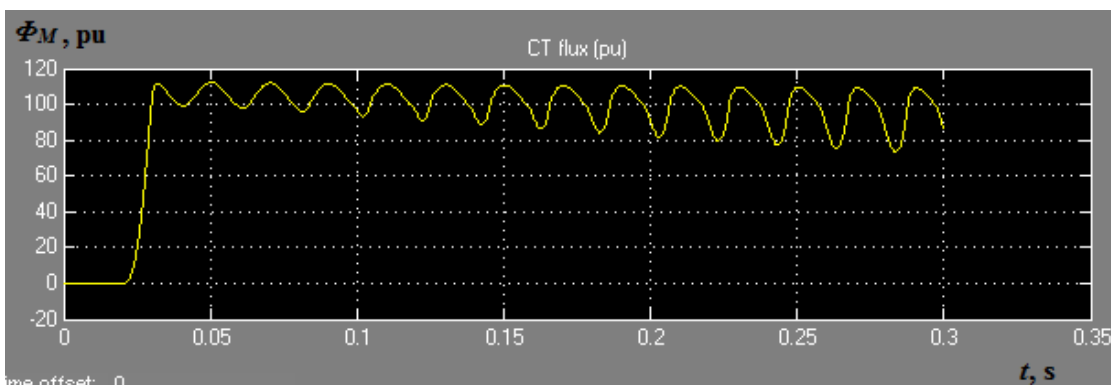


3.1.7 pav. Magnetinio srauto Φ_M kreivė, kai apkrovos varža $R_b = 0,01 \Omega$

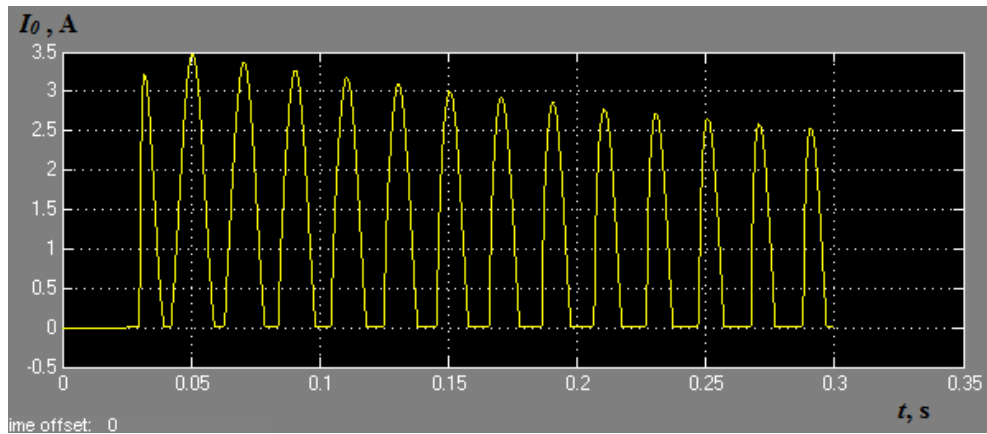


3.1.8 pav. Įmagnetinančios srovės I_0 kreivė, kai apkrovos varža $R_b = 0,01 \Omega$

Pakeitus apkrovos varžą R_b į $0,1 \Omega$ gautos magnetinio srauto Φ_M ir įmagnetinančios srovės I_0 kreivės pateikiamos 3.1.9 ir 3.1.10 paveiksluose.

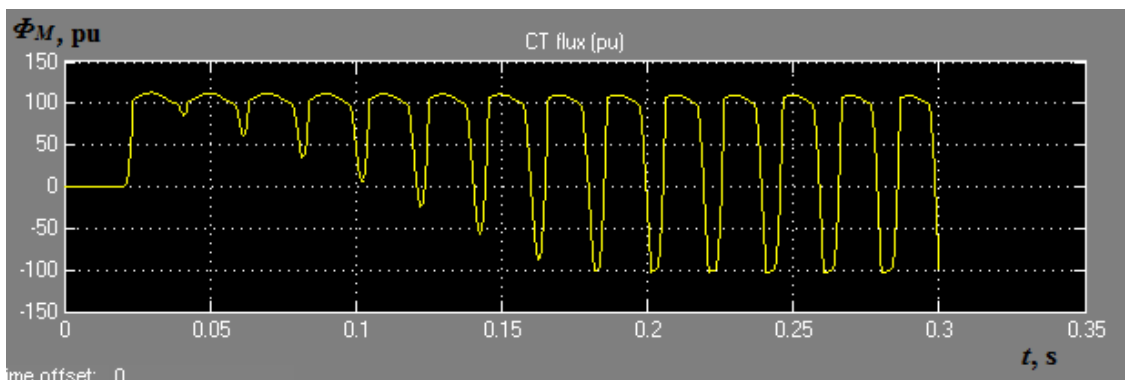


3.1.9 pav. Magnetinio srauto Φ_M kreivė, kai apkrovos varža $R_b = 0,1 \Omega$

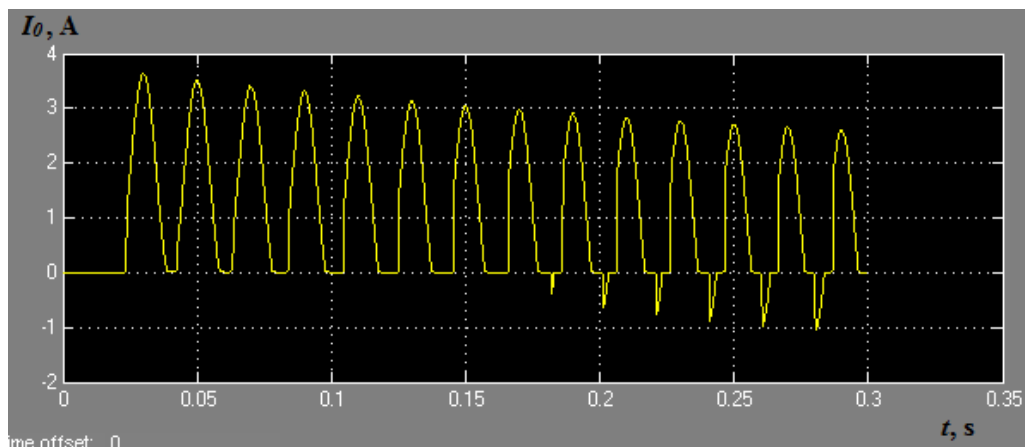


3.1.10 pav. Įmagnetinančios srovės I_0 kreivė, kai apkrovos varža $R_b = 0,1 \Omega$

Šį kartą apkrovos varžos R_b vertę keičiame į 2Ω . Gautos kreivės pateikiamos 3.1.11 ir 3.1.12 paveiksluose.



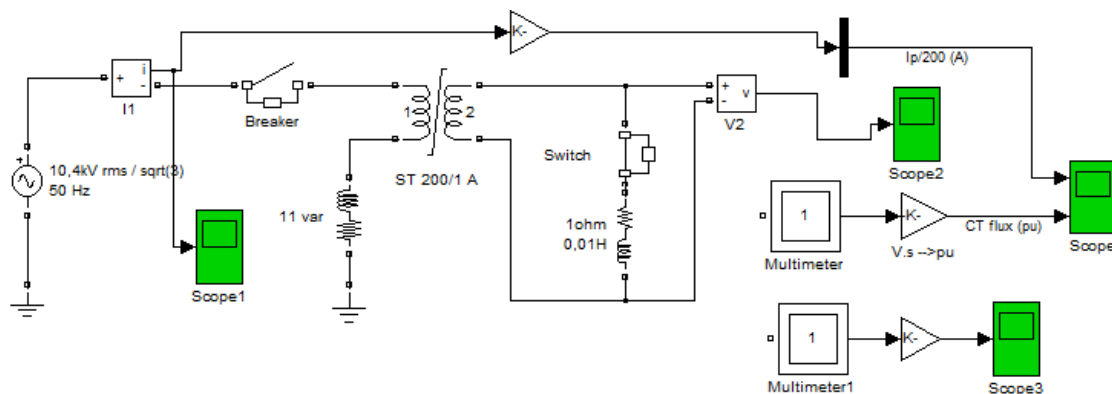
3.1.11 pav. Magnetinio srauto Φ_M kreivė, kai apkrovos varža $R_b = 2 \Omega$



3.1.12 pav. Įmagnetinančios srovės I_0 kreivė, kai apkrovos varža $R_b = 2 \Omega$

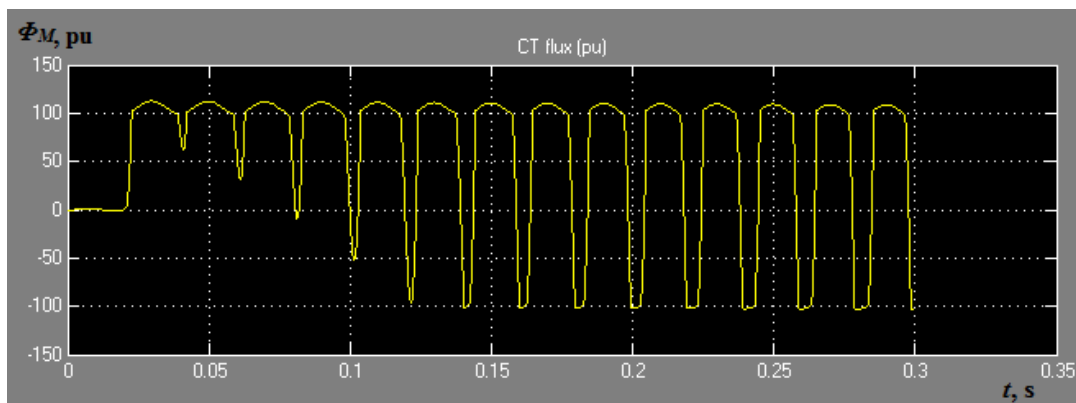
Žiūrėdami į 3.1.8, 3.1.10 ir 3.1.12 kreives matome, kad didėjant apkrovos varžai R_b , įmagnetinančios srovės I_0 forma yra labiau iškraipoma. Iš kreivių 3.1.7, 3.1.9 ir 3.1.10 matome, kad didėjant įmagnetinančios srovės formos iškraipymams I_0 , didėja ir šerdį veriančio magnetinio srauto kreivės iškraipymai. Vadinasi, kuo mažesnė apkrovos varža R_b , tuo mažiau iškraipoma įmagnetinančiosios srovės I_0 forma.

Prie antrinės apvijos prijunkime induktyvumą $L_b = 0,01$ H ir pakartokime tą patį bandymą, tai yra keiskime apkrovos varžą R_b ir stebėkime kaip keičiasi magnetinio srauto Φ_M ir įmagnetinančios srovės I_0 kreivės. Bandymo schema SIMULINK aplinkoje pateikta 3.1.13 paveiksle.

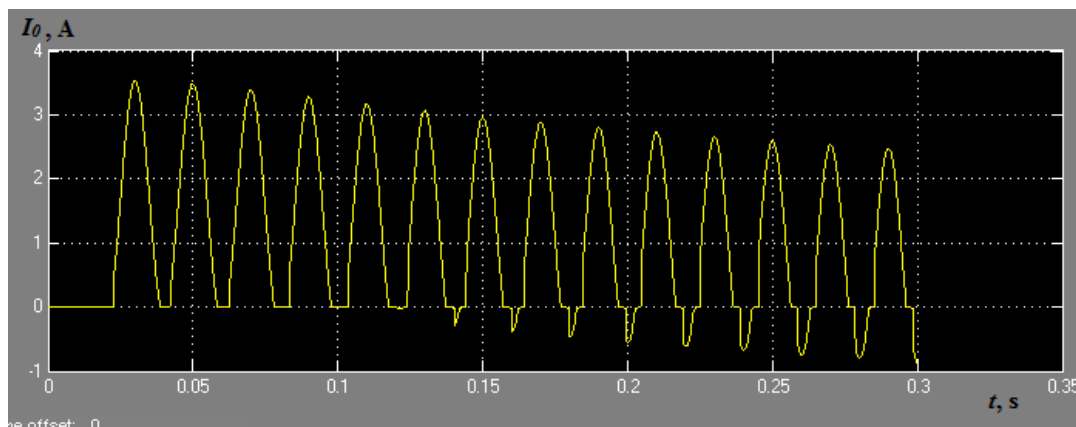


3.1.13 pav. Bandymo schema prijungus prie antrinės apvijos induktyvumą L_b

Gautos magnetinio srauto Φ_M ir įmagnetinančios srovės I_0 kreivės, kai $R_b = 1 \Omega$ pateiktos 3.1.14 ir 3.1.15 paveiksluose.

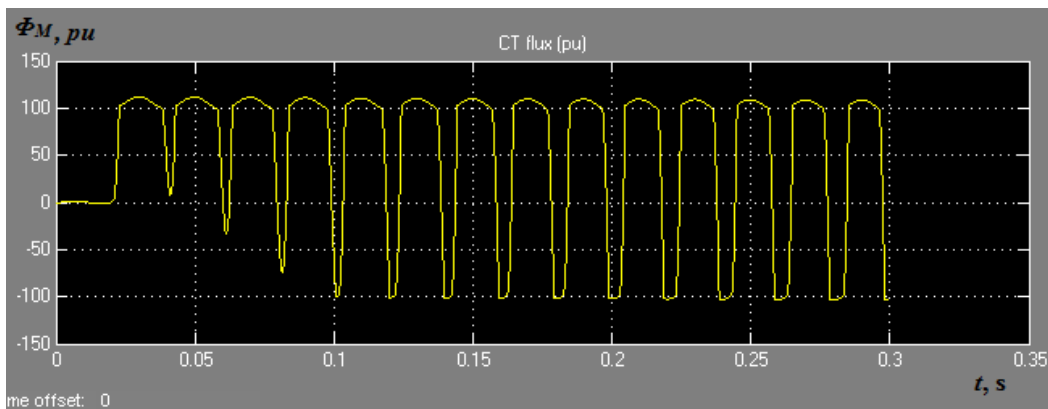


3.1.14 pav. Magnetinio srauto Φ_M kreivė, kai $R_b = 1 \Omega$, $L_b = 0,01$ H

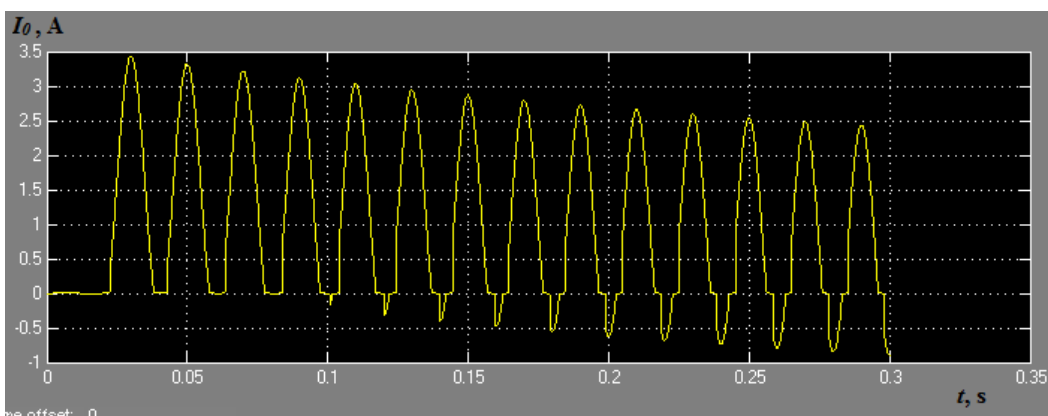


3.1.15 pav. Įmagnetinančios srovės I_0 kreivė, kai $R_b = 1 \Omega$, $L_b = 0,01$ H

3.1.16 ir 3.1.17 paveiksluose pateiktos magnetinio srauto Φ_M ir įmagnetinančios srovės I_0 kreivės, kai $R_b = 0,01 \Omega$.

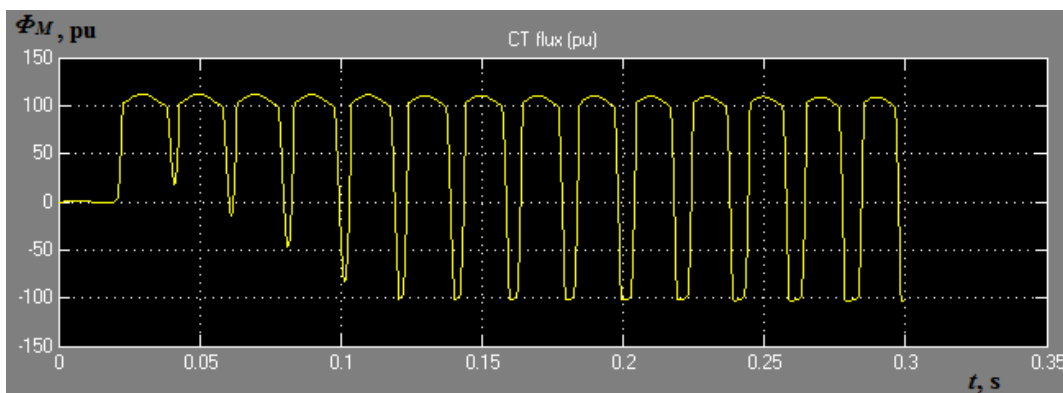


3.1.16 pav. Magnetinio srauto Φ_M kreivė, kai $R_b = 0,01 \Omega$, $L_b = 0,01 \text{ H}$

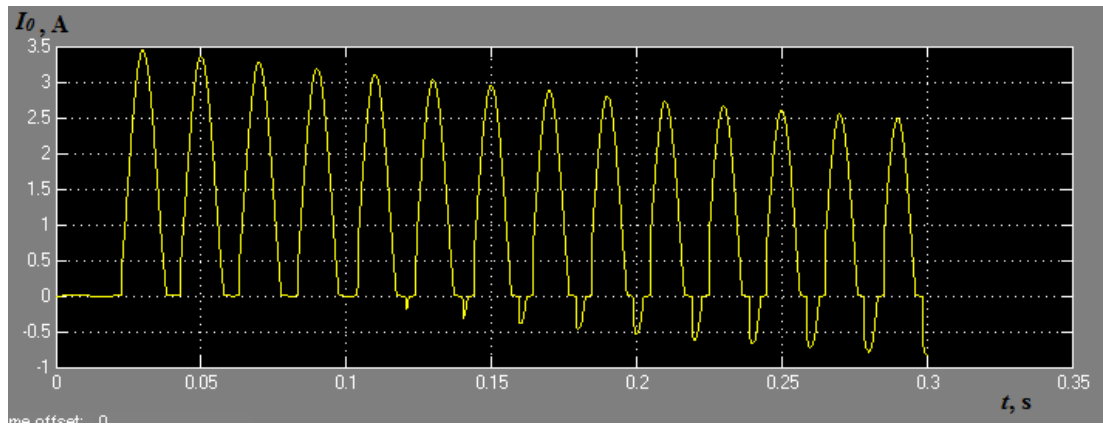


3.1.17 pav. Įmagnetinančios srovės I_0 kreivė, kai $R_b = 0,01 \Omega$, $L_b = 0,01 \text{ H}$

3.1.18 ir 3.1.19 paveiksluose pateiktos magnetinio srauto Φ_M ir įmagnetinančios srovės I_0 kreivės, kai $R_b = 0,1 \Omega$.

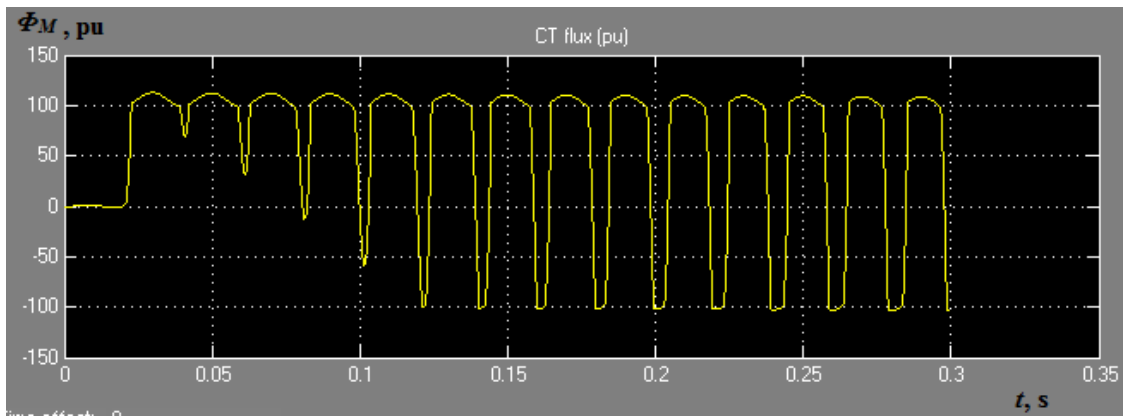


3.1.18 pav. Magnetinio srauto Φ_M kreivė, kai $R_b = 0,1 \Omega$, $L_b = 0,01 \text{ H}$

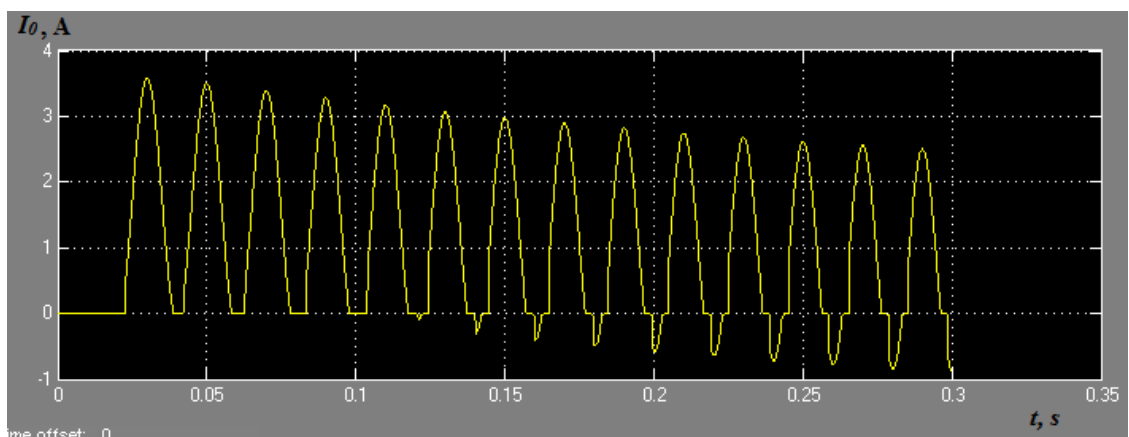


3.1.19 pav. Įmagnetinančios srovės I_0 kreivė, kai $R_b = 0,1 \Omega$, $L_b = 0,01 \text{ H}$

Magnetinio srauto Φ_M ir įmagnetinančios srovės I_0 kreivės, kai $R_b = 2 \Omega$, pateiktos 3.1.20 ir 3.1.21 paveiksluose.



3.1.20 pav. Magnetinio srauto Φ_M kreivė, kai $R_b = 2 \Omega$, $L_b = 0,01 \text{ H}$



3.1.21 pav. Įmagnetinančios srovės I_0 kreivė, kai $R_b = 2 \Omega$, $L_b = 0,01 \text{ H}$

Iš kreivių matome, kad prie antrinės apvijos prijungus apkrovos induktyvumą L_b , pasikeičia srovės transformatoriaus veikimas. Vienas iš pasikeitimų yra tas, kad greičiau pradeda nusistovėti pereinamasis procesas. Tai turi teigiamą įtaką srovės transformatoriaus darbui,

kadangi sumažėja paklaidos. Lyginant magnetinio srauto Φ_M kreives, kurios pateiktos paveiksluose 3.1.14, 3.1.16, 3.1.18 ir 3.1.20, matosi, kad pereinamasis procesas greičiausiai pradeda nusistovėti, kai apkrovos varža $R_b = 0,01 \Omega$ (3.1.16 paveikslas), tačiau, žiūrint į kitus paveikslus, kai $R_b = 0,1; 1$ ir 2Ω , pereinamasis procesas pradeda nusistovėti vienodu laiku. Lyginant įmagnetinančios srovės I_0 kreives, pereinamasis procesas greičiausiai pradeda nusistovėti, kai apkrovos varža $R_b = 0,01 \Omega$ (3.1.17 paveikslas), o kai $R_b = 0,1; 1$ ir 2Ω , pradeda nusistovėti praktiškai tuo pačiu metu. Taip pat matome, kad prijungus prie antrinės apvijos apkrovos induktyvumą L_b įmagnetinančios srovės I_0 kreivėse atsirado papildomi iškraipymai.

4. IŠVADOS

1. Analizuojant literatūrą nustatyta, kad srovės transformatoriaus tikslumui didelę įtaką turi šerdies konstrukcija, grandinės parametrai ir antrinės apvijos varža.

2. Atlikus modeliavimą su srovės transformatoriaus modeliu trumpojo jungimo sąlygomis buvo nustatyta, kad pereinamojo proceso metu yra iškraipoma antrine apvija tekanti srovė I_2 .

3. Lyginant normalaus darbo režimo kreives su trumpojo jungimo kreivėmis pastebėta, kad trumpojo jungimo metu žymiai išauga šerdį veriantis liekamasis magnetinis srautas Φ_M , vadinasi išauga ir įmagnetinančioji dedamoji I_0 , kas turi neigiamą įtaką paklaidų atžvilgiu.

4. Analizuojant pirmine apvija ir antrine apvija tekančios srovės I_1 ir I_2 kreives matosi, kad įvykus trumpajam jungimui, šios srovės staiga išauga, bet kai nusistovi šerdį veriantis liekamasis magnetinis srautas Φ_M , nusistovi ir srovės I_1 ir I_2 .

5. Išanalizavus įmagnetinančios srovės I_0 ir liekamojo magnetinio srauto Φ_M kreives, buvo nustatyta, kad didėjant antrinės apvijos apkrovos varžai R_b , padidėja ir šių kreivių iškraipymas.

6. Buvo nustatyta, kad prie srovės transformatoriaus antrinės apvijos prijungus apkrovos induktyvumą L_b , pereinamasis procesas pradeda nusistovėti greičiau iki tam tikros antrinės apvijos apkrovos varžos R_b .

7. Prie antrinės apvijos apkrovos prijungus induktyvumą L_b , atsirado papildomi įmagnetinančios srovės iškraipymai.

8. Apibendrinus visus tyrimo rezultatus galima daryti prielaidą, kad trumpojo jungimo pereinamojo proceso metu, srovės transformatoriuose išauga paklaidos, kas gali neigiamai įtakoti relinės apsaugos įrenginių darbą.

5. LITERATŪRA

1. TURAUSKAS, Z. Elektros tinklo relinė apsauga. Šiauliai, 2008, p. 22 - 23
2. BROWN, M., BALAKRISHAN, R., HEWITSON, L., Practical Power System Protection. Newnes, 2005, p. 57
3. BHARAT HEAVY ELECTRICALS LIMITED, Handbook of Switchgears. McGraw - Hill Companies, 2007 [žiūrėta 2015 m. balandžio 8 d.]. Prieiga per internetą: http://accessengineeringlibrary.com/browse/handbookofswitchgears/p20011feb99707_1001#p20011feb99707_2001
4. ZAKONJŠEK, J., Transient Behaviour of Conventional Current Transformers used as Primary Transducers and Input Elements in Protection IEDs and Stand Alone Merging Units. Study Committee B5 Colloquim, Brazil, 2013, p. 2 – 3
5. SAVICKAS, A., Aperiodinės trumpojo jungimo srovės dedamosios įtaka srovės transformatoriui. Kauno technologijos universitetas, Kaunas, 2008, p. 12
6. HORAK., J., HRABLIUK, J., Current Transformer Errors and Transformer Inrush as Measured by Magnetic, Optical and Other Unconventional CTs [žiūrėta 2015 m. balandžio 12 d.]. Prieiga per internetą: technical_references/pdfs/electrical_engineering/Current_Transformer_Errors_and_Transformer_Inrush.pdf
7. RAFAJDUS, P., BRACINIK, P., HRABOVCOVA, J., SAITZ, L., KANKULA, L., Current Transformer Analysis under Transient Conditions. XIX International Conference on Electrical Mashines, Rome 2010 [žiūrėta 2015 m. balandžio 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5607845>
8. HOROWITZ STANLEY, H., PHADKE ARUN, G., Power System Relaying (4th Edition). John Wiley, Oxford, 2013, p. 61 -63
9. SAWKO, P., Impact of Secondary Burden and X/R Ratio on CT Saturation// <http://zet10.ipee.pwr.wroc.pl/record/179/files/29.pdf>
10. RAFAJDUS, P., BRACINIK, P., HRABOVCOVA, V., The Current Transformer Parameters Investigation and Simulations// [žiūrėta 2015 m. balandžio 15 d.]. Prieiga per internetą: http://www.ee.ktu.lt/journal/2010/4/07__ISSN_13921215_The%20Current%20Transformer%20Parameters%20Investigation%20and%20Simulations.pdf