



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

Arvydas Kaleininkas

**VIRŠITAMPIŲ PEREINAMŲJŲ VYKSMŲ TYRIMAS
TRANSFORMATORIŲ NEUTRALĖJE, APSAUGOTOJE
VIRŠITAMPIŲ RIBOTUVAIS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas:
Prof. dr. Alfonsas Morkvėnas

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

VIRŠITAMPIŲ PEREINAMŲJŲ VYKSMŲ TYRIMAS
TRANSFORMATORIŲ NEUTRALĖJE, APSAUGOTOJE
VIRŠITAMPIŲ RIBOTUVAIS

Baigiamasis magistro projektas
Energijos technologijos ir ekonomika (kodas 621E30004)

Vadovas

Prof. dr. Alfonsas Morkvėnas

Recenzentas

Lekt. dr. Povilas Valatka

Projektą atliko

Arvydas Kaleininkas

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

(Fakultetas)

Arvydas Kaleininkas

(Studento vardas, pavardė)

Energijos technologijos ir ekonomika (kodas 621E30004)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto

„Viršįtampių pereinamųjų vyksmų tyrimas transformatorių neutralėje, apsaugotoje viršįtampių ribotuvais“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. gegužės 30 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Arvydo Kaleininko** baigiamasis projektas „Viršįtampių pereinamųjų vyksmų tyrimas transformatorių neutralėje, apsaugotoje viršįtampių ribotuvais“ 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)

Kaleininkas, A. Viršįtampių pereinamųjų vyksmų tyrimas transformatorių neutralėje apsaugotoje viršįtampių ribotuvais / Vadovas prof. D. Alfonsas Morkvėnas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Kaunas, 2017. 43 psl.

SANTRAUKA

Baigiamajame darbe tiriamas vienas iš svarbiausių energetikos sistemos įrenginiu – galios transformatorius. Analizuojami jungimo būdai, neutralės pozicijos, kada ir koku atveju naudojama įžeminta neutralė, o kada izoliuota. Tačiau svarbiausia, kas vyksta transformatoriaus neutralėje, kai transformatorinių pastotė pasiekia stataus fronto banga, kai žaibo išlydis pažeidžia elektros liniją. Susidarę viršįtampiai padaro didelius nuostolius galios transformatoriams, kartais netgi ir apsaugojus viršįtampių ribotuvais. Todėl svarbu ištirti pereinamuosius procesus neutralėje įvairiomis situacijomis, nes dažnai izoliacijos žala prasideda nuo neutralės. Eksperimentinių bandymų eigoje, buvo imituotas įtampos viršįtampis vienos apvijos transformatoriaus modelyje ir gauti įtampų grafikai ir charakteristikos. Bandymai buvo atliekami kai neutralė buvo įžeminta, izoliuota, įžeminta per įvairių dydžių varžas ir įžeminta per įtampos reguliatorių. Gauti rezultatai tikėtinais parodys detalesnius, mažai tirtus procesus neutralėje ir padės efektyviau apsaugoti galios transformatorių.

Reikšminiai žodžiai: viršįtampis, galios transformatorius, neutralė, izoliuota, įžeminta, pereinamasis procesas, apvijos, izoliacija.

Kaleininkas, A. Research of transient surges in power transformer neutral protected by surge arrester / Supervisor prof. D. Alfonsas Morkvėnas; Kauno University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics, Department of Electrical Power Systems.

Kaunas, 2017. 43 p.

SUMMARY

During this project we explore and get to know one of the most important element of our electrical system – power transformer. How and when to use multiple neutral positions, including isolated and grounded. Yet the main key of this project, is to find out what happens in the neutral (grounded or isolated) when a power line gets strucked by a lightning and when a massive voltage surge appears on the power transformer. Voltage surges can have a huge impact to the power transformer in a bad way. During this project, experiments were necessary in order to seek any answers. For the measurments one phase/widing transformer model was used. A voltage surge was imitated with a voltage generator and with the help of an osciligraf – voltage diagram through out the widening was made. Experiments we caried out on few options: neutral grounded, neutral grounded through a resistor and through a voltage regulator. It is expected to make a more detail look in the inside of neutral and how voltage distributes throughout the widening on multiple neutral positions.

Keywords: voltage surge, power transformer, neutral, isolated, grounded, transition, winding, isolation.

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	7
ĮVADAS	8
1. TRANSFORMATORIŲ IZOLIACIJA	10
2. ELEKTROS TINKLŲ NEUTRALĖS RĖŽIMAI.....	14
3. TRANSFORMATORIŲ IZOLIACIJOS APSAUGA.....	16
3.1 Elektrotechninių įrenginių apsauga nuo viršįtampių	16
3.2 Vidinė transformatorių apsauga	17
4. TRANSFORMATORIŲ PARAMETRŲ NUSTATYMAS	19
4.1 Aukšto dažnio transformatorių parametrai.....	19
4.2 Aukšto dažnio transformatorių modeliai.....	19
5. VIRŠĮTAMPIAI TRANSFORMATORIAUS APVIJOSE	22
6. PEREINAMŲJŲ VYKSMŲ TRANSFORMATORIAUS APVIJOSE SKAIČIAVIMAS.....	27
7. EKSPERIMENTINIS PEREINAMŲJŲ VYKSMŲ TYRIMAS TRANSFORMATORIUJE...	29
8. EKONOMINĖ ANALIZĖ.....	41
IŠVADOS.....	42
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	43

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav.	Autotransformatoriaus apvijų schema.....	10
1.2 pav.	Transformatorių izoliacinės konstrukcijos	11
1.3 pav.	Transformatorius su popierine-alyvine apvijų izoliacija.....	12
1.4 pav.	Galios transformatorių išilginės izoliacijos eskizas.....	12
1.5 pav.	Vijinės izoliacijos pramušimo įtampos priklausomybė nuo izoliacijos storio	13
2.1 pav.	Prisilietimo prie elektros tinklo pasekmės.....	14
2.2 pav.	Elektros tinklų neutralės režimai	15
4.1 pav.	Vienos apvijos pereinamųjų vyksmų atstojamoji schema	20
4.2 pav.	Vienos apvijos pereinamųjų vyksmų atstojamoji schema (be aktyviųjų varžų).....	20
4.3 pav.	Įtampų impulsai apvijose, skirtingais laiko tarpais.....	21
5.1 pav.	Priverstinė dedamoji transformatoriaus apvijose.....	23
5.2 pav.	Viršįtampiai neutralėje be ribotuvo.....	24
5.3 pav.	Pereinamasis vyksmas be ribotuvo	24
5.4 pav.	Pereinamieji procesai izoliuotoje neutralėje	25
5.5 pav.	Viršįtampių ribotuvo voltamperinė charakteristika	26
6.1 pav.	Įtampos pasiskirstymas pagal skirtingas α reikšmes	28
7.1 pav.	a) įtampos generatorius b) galios transformatorius c) osciloskopas.....	29
7.2 pav.	Galios transformatorių schemas.....	30
7.3 pav.	Bandyams naudojamas galios transformatorius	31
7.4 pav.	Įtampos amplitudė transformatoriuje, 1-ame taške (neutralė izoliuota).....	32
7.5 pav.	Pereinamieji vyksmai transformatoriuje (neutralė izoliuota).....	33
7.6 pav.	Įtampos amplitudžių grafikas (neutralė izoliuota).....	33
7.7 pav.	Pereinamieji vyksmai transformatoriuje (neutralė įžeminta).....	34
7.8 pav.	Įtampos amplitudžių grafikas (neutralė izoliuota).....	34
7.9 pav.	Pereinamieji vyksmai transformatoriuje (neutralė įžeminta per 75Ω).....	35
7.10 pav.	Pereinamieji vyksmai transformatoriuje (neutralė įžeminta per 150Ω).....	36
7.11 pav.	Pereinamieji vyksmai transformatoriuje (neutralė įžeminta per 3600Ω).....	37
7.12 pav.	Įtampos amplitudžių bendras grafikas.....	38
7.13 pav.	Pereinamieji vyksmai transformatoriuje (eksperimentas su KZ706 reguliatoriumi)	39
7.14 pav.	Įtampos amplitudžių grafikas su reguliatoriumi.....	39
8.1 pav.	Galios transformatorių pagrindinės avarių priežastys.....	41

IVADAS

Visi įtampos padidėjimai virš aukščiausios leistinos tinklo įtampos yra vadinami viršįtampiais. Tyrimai analizuojantys viršįtampius elektros energetikos sistemoje yra labai svarbūs ir itin sudėtingi uždaviniai. Viršįtampių pereinamieji procesai gali turėti įtakos daugeliui elektros energetikos sistemos sudėtinių dalių. Energetikos sistemoje galios transformatoriai yra vieni iš svarbiausių sistemos elementų, todėl viršįtampiai susiformavę viduje gali padaryti nemažą žalą - iki kelių kartų viršyti leistiną įtampą ir elektros įrenginių izoliaciją ir veikti įvairų laiko tarpą. Kadangi transformatorių neutralės gali būti įžemintos arba izoliuotos, svarbu ištirti viršįtampių poveikį transformatoriui visais šiais atvejais. Transformatoriaus apsaugai naudojami iškrovikliai arba pastaruoju metu – viršįtampių ribotuvai. Į liniją sukeltos bangos į transformatorių patenka elektromagnetiniu impulsu, kuris sukelia viršįtampius transformatoriaus neutralėje. Netinkamai suderinus viršįtampio ribotuvo apsaugines charakteristikas su izoliacijos atsparumu, gali būti pažeidžiama neutralės izoliacija. Šiame darbe bus analizuojamas pereinamųjų vyksmų pobūdis ir viršįtampių ribotuvų darbo sąlygos transformatoriuje (izoliuotoje ir įžemintoje neutralėje).

Temos aktualumas: modeliuojant pereinamuosius vyksmus nustatyti, kaip įtampa pasiskirsto išilgai apvijų, kai neutralė yra įžeminta (per varžą, viršįtampių ribotuvą ir tiesiogiai) ir izoliuota. Tyrimai parodys kuriose apvijose dalyse įtampa yra žemiausia, kuriose aukščiausia ir iš gautų rezultatų nuspręsti, ar tinkamesnis viršįtampių ribotuvų parinkimas yra galimas.

Mokslinė problema: viršįtampių ribotuvai transformatoriaus neutralėje šiai dienai parenkami pagal labai paprastą metodiką (pagal ilgalaikę leistiną veikimo įtampą U_c). Per maža parinkta U_c reikšmė neefektyviai eksploatuotų viršįtampio ribotuvą, o per didelė – sumažintų transformatoriaus neutralės apsaugos lygį. Todėl daroma išvada, jog jie parenkami nepakankamai atsižvelgiant į pereinamuosius vyksmus veikiančius transformatorių ir neutralės galimus lygius.

Tyrimo objektas: viršįtampių pereinamųjų vyksmų įtaka transformatoriaus izoliacijai.

Tyrimo tikslas: detaliai išanalizuoti viršįtampių įtaką transformatoriaus neutralėi ir nustatyti ar galime pateikti tikslesnę metodiką, parenkant apsaugą viršįtampiams.

Tyrimo uždaviniai:

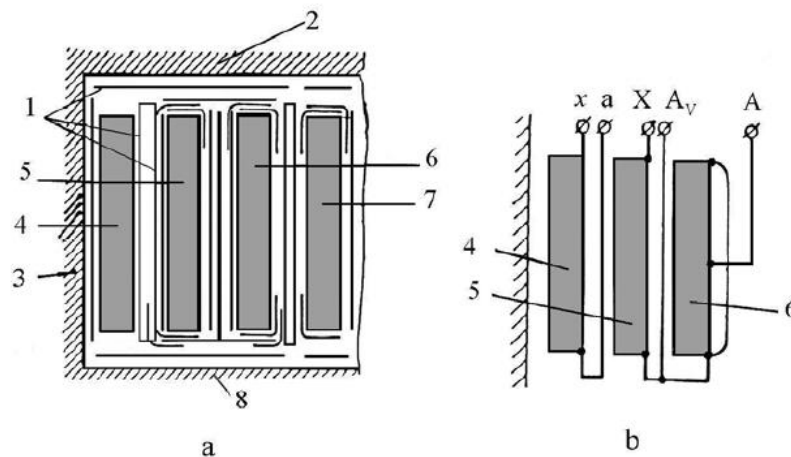
- Išanalizuoti transformatorių neutralės pozicijas;
- Susidaryti skaitmeninį transformatoriaus skaičiavimo modelį;
- Susidaryti skaičiuojamojo transformatoriaus modelį;
- Atliekami reikalingi eksperimentai ir tyrimai;
- Iš gautų eksperimentinių rezultatų padaryti išvadas.

Darbe naudoti metodai – užsienio ir lietuvių autorių mokslinės literatūros analizė, modeliavimui transformatoriaus apvijose taikomi skaitmeniniai metodai, atliekami tyrimai ir eksperimentai. Todėl, atliktas magistro darbas yra pirmojo ir antrojo tyrimų projektų rezultatas. Pirmojo tiriamojo projekto metu buvo atliekama teorijos analizė, o antrojo projekto metu buvo atlikti transformatoriaus skaitmeniniai ir eksperimentiniai tyrimai.

1. TRANSFORMATORIŲ IZOLIACIJA

Elektros energetikoje transformatorių izoliacija apibūdinama kaip sudėtinga techninių elementų sistema, susidedanti iš vidaus apvijų izoliacijos, perjungiklių izoliacijos ir išorinės izoliacijos. Literatūrose [1][3], apžvelgiami galios transformatorių struktūra ir izoliacija. Išorės izoliaciją sudaro izoliacija tarp įvadų bei oro tarpai tarp išvadinių srovėlaidžių ir korpuso ir skirtingų apvijų srovėlaidžių. Lietuvoje (didžioji dalis ir visame pasaulyje) naudojamų galios transformatorių vidinė izoliacija yra sudaryta iš popieriaus, alyvos, elektrotechninio kartono ir alyvine užtvarine izoliacija. Transformatorių alyva atlieka aušinimo funkciją ir gerai izoluoja įvairias transformatoriaus konstrukcijas. Apvijų izoliacija gali būti skirstoma į pagrindinę ir išilginę. Pagrindinei izoliacijai (žr. 1.1 pav.) galime priskirti:

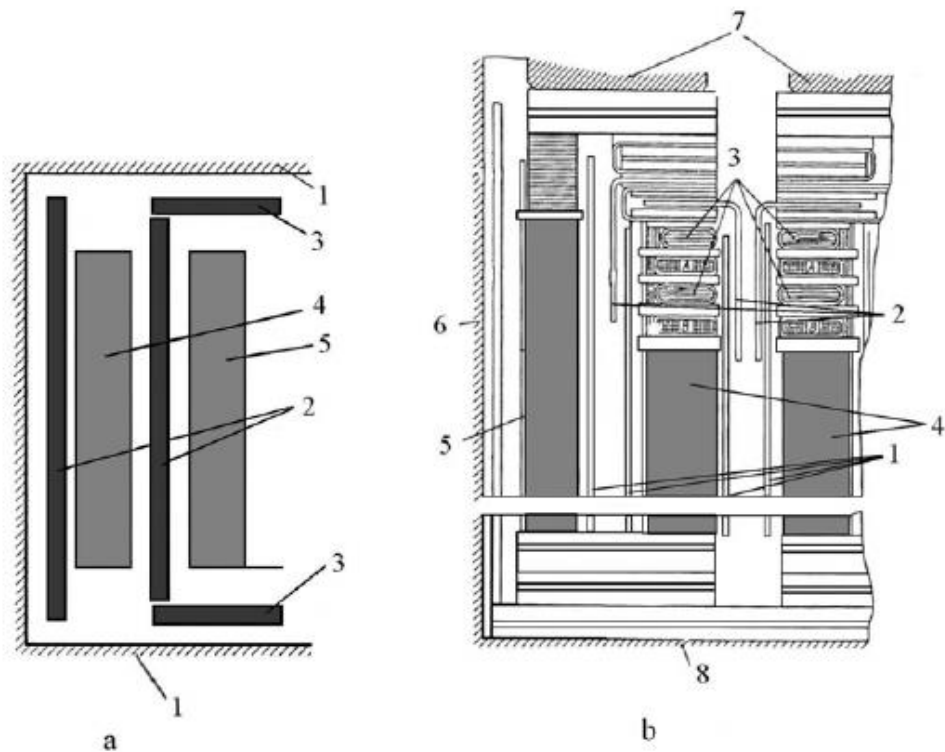
1. izoliacija tarp apvijų (arba tarp ekrano ir apvijos), kurios užmautos ant bendro magnetolaidžio vidurinėje dalyje;
2. izoliacija tarp kraštuose esančių apvijų (užmautų ant vieno magnetolaidžio);
3. izoliacija tarp dviejų gretutinių magnetolaidžio strypų išorinių apvijų (tarpfazinė);
4. izoliacija tarp bako sienelės išorinės apvijos.



1.1 pav. Autotransformatoriaus apvijų schema

Čia, a – konstrukcinė schema; b – sujungimo schema 1 – barjerai; 2 – viršutinis jungas; 3 – strypas; 4, 5, 6 – fazės A apvijos (atitinkamai žemosios, vidutinės ir aukštosios įtampų); 7 – kitos fazės aukštosios įtampos apvija; 8 – apatinis jungas; a, x – žemosios įtampų išvadai; A, Av, X – atitinkamai aukštosios, vidutinės įtampų ir neutralės išvadai.

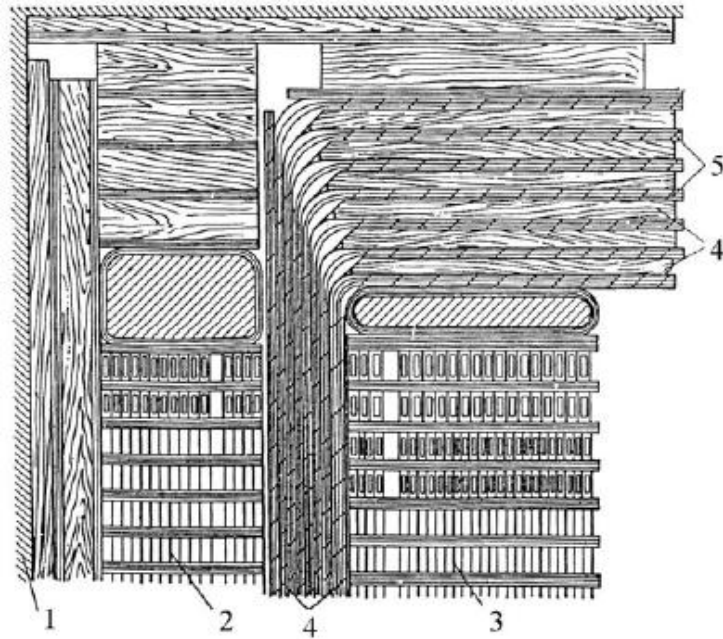
Visų įtampų transformatorių alyvinės užtvarinės izoliacijos konstrukcija panaši (žr. 1.2 pav).



1.2 pav. Transformatorių izoliacinės konstrukcijos

Čia, a – 35 kV įtampos: 1 – magnetolaidis; 2 – bakelitiniai cilindrai; 3 – elektrotechninio kartono skydai; b – 110 kV įtampos: 1 – elektrotechninio kartono barjerai; 2 – kampinės poveržlės; 3 – elektrinės talpos žiedai; 4 – aukštosios įtampos apvijos; 5 – žemosios įtampos apvija; 6 – strypas; 7 – įžemintas presavimo žiedas; 8 – jungas.

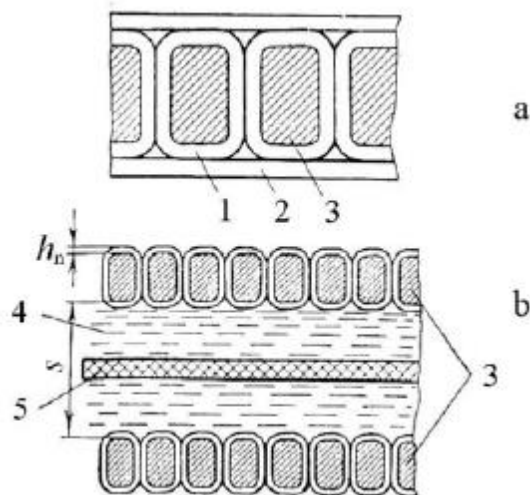
110 kV ir aukštesnės įtampos galios transformatoriai taip pat gaminami ir su maišyta popierine-alyvine izoliacija (žr. 1.3 pav). Transformatorių su tokia izoliacija, elektrinis atsparumas didesnis net 40–60%, jeigu lyginsime su transformatoriais turinčiais tik alyvinę izoliaciją. Šie nemaži skirtumai leidžia sumažinti transformatorių gabaritus.



1.3 pav. Transformatorius su popierine-alyvine apvijų izoliacija

Čia, 1 – magnetolaidis; 2 – žemosios įtampos apvija; 3 – aukštosios įtampos apvija; 4 – popierius; 5 – įdėklas iš medžio arba elektrotechninio kartono.

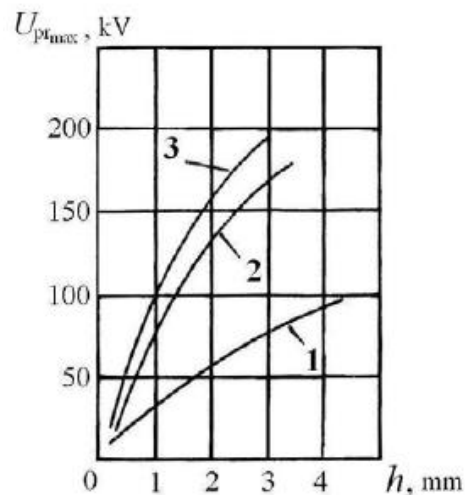
Dabar apžvelkime išilginės galios transformatorių izoliaciją. Pagrindinė izoliacija susideda iš dviejų dalių (žr. 1.4 pav., a): vijų izoliacijos 1, t.y. izoliacijos tarp dviejų gretimų vijų laidų 3, apvijų izoliacijos 2, t.y. izoliacijos tarp dviejų gretimų apvijų, atskirtų transformatorių alyvos kanalu 4 (žr. 1.4 pav., b).



1.4 pav. Galios transformatorių išilginės izoliacijos eskizas

Čia, 1 – vijų izoliacija; 2 – apvijų izoliacija; 3 – apvijos srovėlaidis; 4 – alyva; 5 – elektrotechninio kartono barjeras; h_n – izoliacijos sluoksnio storis; s – atstumas tarp dviejų apvijų.

Dažniausia vijų izoliacija gaminama iš popieriaus arba iš medvilnės ir būna įmirkinta alyvoje. Popierinės-alyvinės vijų izoliacijos elektrinio atsparumo priklausomumas nuo izoliacijos storio bandant pulsine ir 1 minutės trukmės 50 Hz dažnio kintamąja įtampa parodytas (žr. 1.5 pav).



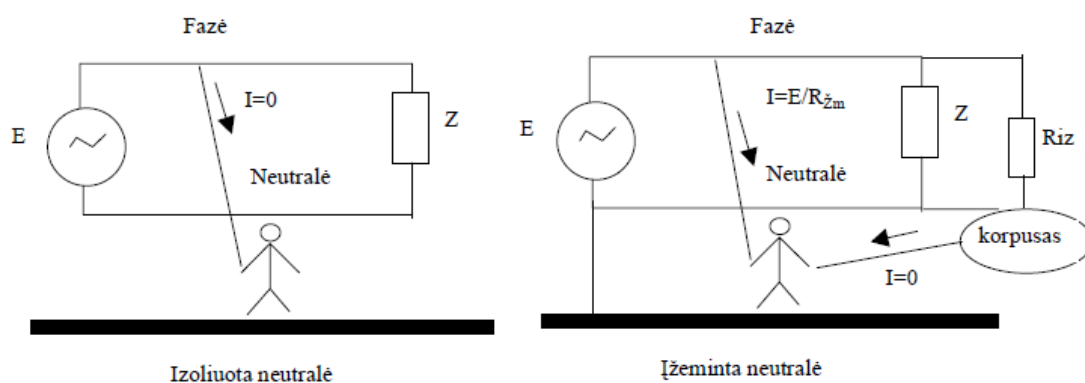
1.5 pav. Vijinės izoliacijos pramušimo įtampos priklausomybė nuo izoliacijos storio

Čia, 1 – bandant 1 minutės trukmės 50 Hz dažnio įtampa; 2, 3 – bandant pulsinėmis įtampomis (atitinkamai – trumpuoju impulsu ir visos bangos impulsu).

Izoliacija tarp apvijų sudaryta iš 8–30 mm pločio alyvos kanalo, vadinamo ašiniu kanalu. Ašinio kanalo elektriniam atsparumui padidinti kanalas perskiriamas į dvi dalis elektrotechninio kartono užtvara. Nedidelių galių ir vidutinių įtampų transformatoriai taip pat gaminami ir su sausa izoliacija (be izoliacinės alyvos). Atsižvelgiant į turimas eksperimentų sąlygas, bandymuose bus naudojamas pastarasis transformatorius, su sausa izoliacija.

2. ELEKTROS TINKLŲ NEUTRALĖS RĖŽIMAI

Elektros tinklų neutralių režimai priklauso nuo transformatorių neutralių režimo. Remiantis literatūra [2], transformatorių neutralės gali būti įžemintos betarpiškai, per indukcinę ritę (Peterseno ritę) arba izoliuotos. Tinklai, kurių neutralės įžemintos, vadinami tinklais su įžeminta neutrале. Tinklai, kurių neutralės izoliuotos - tinklai su izoliuota neutrале. O tinklai, kurių neutralės įžemintos per indukcinę ritę, kompensuojančią tinklo talpą žemės atžvilgiu, vadinami tinklais su kompensuota neutrале. Energetikos sistemoje linijos dažniausiai prasideda ir baigiasi transformatoriais, todėl dažniausia linijos darbo režimą nulemia transformatoriaus neutralės darbo režimas.

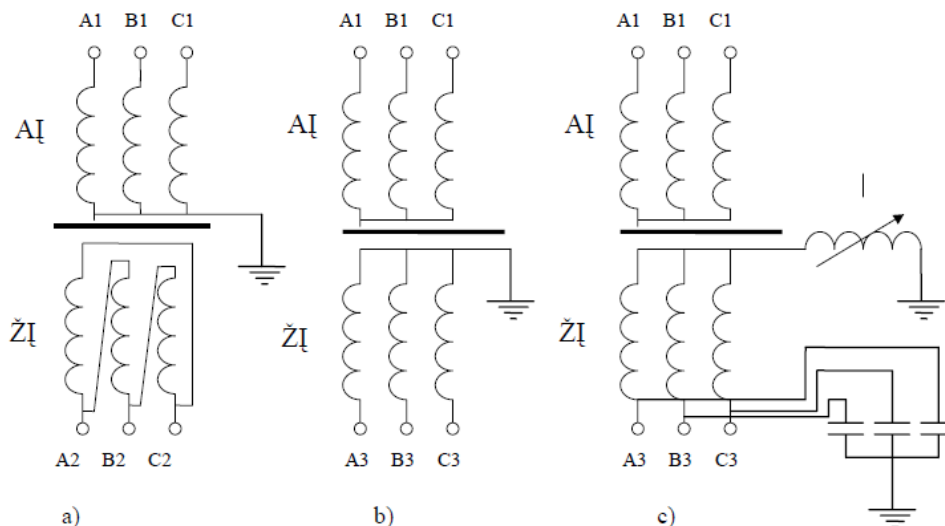


2.1 pav. Prisilietimo prie elektros tinklo pasekmės

Matyti iš paveikslo (žr. 2.1 pav), kad prisilietus prie izoliuotos neutralės sistemos laido, teka labai maža srovė (sąlyginai nulinė), nes grandinė neturi jokio ryšio su žeme, o elektros srovė teka tik uždaru kontūru. Šią srovę lemia laidų talpumas (žemės atžvilgiu). Talpa tiesiogiai priklauso nuo laidininko ilgio. Žmogaus gyvybei pavojaus nėra praktiškai tik labai nedideliame tinkle, o dideliame – dėl didelių ampero reikšmių, gali būti pavojinga, dėl šios priežasties neutralės izoliavimas yra neefektyvus. Tačiau tinkle su izoliuota neutrале gali kilti dar viena problema – jeigu transformatoriaus izoliacija yra pramušama (tarp aukštos ir žemos pakopos apvijų), tinklas yra pavojingas dėl iškilusios aukštos įtampos žemos apvijos pusėje. To galime išvengti, kai neutralė yra įžeminta. Trumpas jungimas, įžemintos neutralės tinkle, gali įvykti tik prilietus fazinį laidą. Prisilietus prie fazinio laido, tekančią srovę lemia varža pažeidimo vietoje, kurioje kyla reali ir didelė grėsmė.

Neutralės įžeminimas turi labai svarbų praktinį pritaikymą. Praktikoje, rečiau prisiliečiama prie laidų, todėl tiesioginis apsaugojimas nėra labai efektyvus. Efektyviau yra apsaugoti nuo

potencialų, atsirandančių ant metalinių korpusų. Tokiu atveju, šie paviršiai sujungiami su neutraliu laidu ir taip apsaugojamas žmogus 2.2pav.



2.2 pav. Elektros tinklų neutralės režimai

- Čia, a) AĮ tinklas įžemintos neutralės, Ž_į – izoliuotos
 b) AĮ tinklas izoliuotos neutralės, Ž_į – įžemintos
 c) AĮ tinklas izoliuotos neutralės, Ž_į – kompensuotos

Taigi, pagal aukščiau išvardintas sąlygas, tinklai iki 1000V gali būti su įžeminta arba izoliuota neutrале, šios pozicijos daugiausia priklauso nuo saugumo reikalavimų. Tinklai iki 1000V yra labai išplėtoti ir dideli, todėl sukaupiama didelė parazitinė talpa, todėl tai yra dar viena priežastis nenaudoti izoliuotos neutralės tokiam tinkle. Neutralės izoliavimas naudojamas tik nedideliuose tinkluose ir ypač pavojingose zonose.

Tinklai 10 - 35 kV naudojami su izoliuota ar kompensuota neutrале, priklausomai nuo talpinių srovių. Šio tinklo privalumas, jog nukritusiam laidui ant žemės, trumpas jungimas neįvyksta. O privalumas, nes pakelia tinklo patikimumą (gali veikti su nukritusiu laidu), kuris yra labai svarbus parametras, žinant, jog 10 – 35kV tinklai taip pat yra dideli. Tačiau pažeidimo vietoje kyla labai didelis pavojus žmonėms, aplink nukritusį laidą.

Dėl ekonomiškų priežasčių, tinklai su didesne negu 110 kV įtampa, dirba su įžeminta neutrале. Jeigu toks tinklas dirbtų su izoliuota neutrале, avarijos metu smarkiai pakiltų įtampa. Tokiu atveju tektų didinti izoliatorių skaičių ir skirti papildomas išlaidas.

Daugelyje kitų šalių (pvz, JAV) visų elektros tinklų neutralės yra įžemintos. Taip daroma dėl žmogaus gyvybės ir sveikatos, nes nukritęs laidas (nors ir nesukelia trumpo jungimo) yra pavojingas ir jį atjungti būtina.

3. TRANSFORMATORIŲ IZOLIACIJOS APSAUGA

3.1. Elektrotechninių įrenginių apsauga nuo viršįtampių

Viršįtampių ribotuvai ne taip seniai buvo pradėti naudoti apsaugai nuo viršįtampių. Pagal literatūrą [1], viršįtampių ribotuvai apsaugo įrenginių izoliaciją darbo sąlygomis. Seniau plačiau buvo naudojami iškrovikliai, tačiau viršįtampių ribotuvai pasižymi ypač gera įtampos slopinimo savybe ir reguoja į visas įtampos reikšmes, kurios yra didesnės už darbinę ribotuvo įtampa U_c . Dėl prieš tai rašytų savybių, labai svarbu viršįtampių ribotuvą parinkti teisingai. Tinkamai parinkta darbinė įtampa, tik dalis darbo. Svarbu, kad nesumažėtų elektros sistemos patikimumas, kai tinkle atsiranda ilgos trukmės, žemo lygio įtampos viršįtampiai. Šie, elektros įrenginių izoliacijai žalos nedaro, tačiau pagal energetinį resursą yra pavojingi viršįtampių ribotuvams.

Elektromagnetiniai pereinamieji procesai elektros tinkle atsiranda dėl banginių reiškinių linijose ir pastočių šynose bei inercija krūvių kaupimuisi ar srovės kitimui sutelktuose schemas talpos ir induktyviuosiuose elementuose. Algoritmų skaičiavimas yra komplikuojamas dėl to, kad elektromagnetinių bangų linijose parametrai yra banginiai. Žaibo išlydžio sukeltų viršįtampių amplitudė žaibo išlydžio vietoje, kai išlydis tenka laidui, apribota linijos izoliacijos atsparumu. Atvirkštinio izoliacijos pramušimo metu viršįtampių amplitudė apribota pramušimo momentu, nesvarbu ar išlydis įvyksta impulso fronte ar gėstančioje dalyje bei įtampos kritimu įžeminimo įrenginiuose ir atramos induktyviojoje varžoje. Linijose susiformavę pilnutinės bangos impulsai pavojingesni nei trumposios bangos impulsai, kurie greičiau gesta dėl pulsinių vainikinio išlydžio ir energetinių nuostolių. Atvirkštinio izoliacijos pramušimo metu susiformavę bangos pavojingos tarp vijinei transformatorių izoliacijai.

Parentant viršįtampių ribotuvus, pagal laukiamų maksimalių viršįtampių parametrus, svarbų nustatyti pagrindines, viršįtampių ribotuvo veikimo patikimumą garantuojančias, charakteristikas. Be to, viršįtampių ribotuvai turi būti parinkti ir išdėstyti taip, kad garantuotų pastotės įrenginių patikimą veikimą. Svarbiausia viršįtampių techninė charakteristika yra ilgalaikė leistinoji veikimo įtampa (U_c). Ši charakteristika efektyviai įžemintos transformatorių neutralės tinkle turi būti parinkta įvertinus būtiną sąlygą:

$$U_c > \frac{k \times U_n}{\sqrt{3}}. \quad (3.1)$$

Čia, U_n – nominalioji elektros tinklo įtampa, kV, k – leistinasis ilgalaikės aukščiausios ir nominaliosios įtampų santykis.

Apskaičiuojant minimalią ilgalaikę leistinąją veikimo įtampą, turi būti įvertintas 5% atsargos koeficientas. Tikslesnį viršįtampių ribotuvų ilgalaikės leistinosios veikimo įtampos reikšmės parinkimą lemia daugelis veiksnių, tai jungimo viršįtampių lygis, rezonansinių viršįtampių trukmė, viršįtampių įrengimo vieta skirstykloje ir elektros tinkle. 110–330 kV elektros tinkle įžeminta autotransformatorių ir transformatorių neutrale vienfazio įžemėjimo metu įtampa sveikose fazėse trumpą laiką įtampa gali padidėti 1,4 karto. Viršįtampių ribotuvo stabilumui garantuoti, įvertinus įtampos padidėjimo vienfazio trumpojo jungimo metu trukmę, ilgalaikė leistinoji veikimo įtampa apskaičiuojama taip:

$$U_c > \frac{k \times U_n}{\sqrt{3}} \times \frac{k_{TJ}}{T_{st}}. \quad (3.2)$$

Čia: k -viršįtampių ribotuvo stabilumo faktorius parenkamas pagal atitinkamas stabilumo charakteristikas, k_{TJ} – vienfazio trumpojo jungimo koeficientas įžemintos neutralės tinkle, $k_{TJ} = 1,4$.

Izoliuotos neutralės tinkle apsaugos priemonės nuo viršįtampių turi nereaguoti į įtampos padidėjimą elektros tinkle vienfazio įžemėjimo metu iki linijinės įtampos. Izoliuotos neutralės elektros tinkle ilgalaikė leistinoji įtampa turi būti: 6,3 kV įtampos sistemoje ne žemesnė, kaip 7,2 kV, 10 kV įtampos sistemoje – 12 kV, 35 kV įtampos sistemoje – 41 kV.

3.2. Vidinė transformatorių apsauga

Apžvelgime literatūrą [1] apie vidinę transformatorių apsaugą, sudaromą sustiprinant pirmųjų ir paskutiniųjų apvijų vijų izoliaciją ir naudojant talpinius ekranus.

Iki 38,5 kV transformatoriuose naudojama tik sustiprintų pirmųjų ir paskutiniųjų vijų izoliacija. Virš 110 kV transformatoriuose sustiprinama kraštinių vijų izoliacija. Virš 110 kV transformatoriuose sustiprinama kraštinių vijų izoliacija ir įrengiami talpiniai ekranai.

Sustiprinus kraštinių vijų izoliaciją, blogėja tų vijų aušinimas. Dėl to tenka padidinti apie 30% vijų skerspjūvį.

Talpinių ekranų tikslas:

- 1) Sumažinti α ;

$$\alpha = \sqrt{C_q/C_d}. \quad (3.3)$$

Čia: $C_d = \sqrt{\frac{1}{\sum 1/C'_d}}$ – ekvivalentinė tarp vijinė talpa, $C_q = \sum C'_q$ – ekvivalentinė talpa tarp

vijų ir įžemintų konstrukcijų, C'_d, C'_q – atitinkamų kondensatorių talpos.

2) Sumažinti pradinį įtampos pasiskirstymą ir priartinti prie įtampos pasiskirstymo, kuris gaunamas nusistovėjus darbo režimui. Pradinis įtampos pasiskirstymas sutampa su įtampos pasiskirstymu nusistovėjus darbo režimui, kai $\alpha=0$ pasiekti neįmanoma, todėl stengiamasi α kiek galima mažinti. α mažinamas, mažinant ekvivalentinę talpą tarp vijų ir įžemintų konstrukcijų ir didinant ekvivalentinę tarp vijinę talpą. Tuo tikslu įrengiami talpiniai ekranai.

4. PARAMETRŲ NUSTATYMAS TRANSFORMATORIUOSE

4.1. Aukšto dažnio transformatorių parametrai

Transformatorius prijungtas prie maitinimo tinklo yra veikiamas įvairių tipų praeinančių viršįtampių, kurių amplitudės ir bangų formos turi būti suprantamos ir aiškios, kad žinotume kokią žalą patiria veikiamos izoliacijos. Įtampos pasiskirstymas išilgai apvijų priklauso nuo įtampos bangos formų. Žemų dažnių diapozone, įtampa išilgai apvijų yra tiesinė. Tačiau žaibo išlydžio į liniją atveju, didžioji dalis įtampos tenka pirmoms apvijoms. Transformatoriai yra sukurti atlaikyti tokius įtampų svyravimus, eksperimentų pagalba. Aukšto dažnio transformatorių parametru skaičiavimo modeliai yra panašūs kaip ir žemo dažnio transformatorių [6]. Trys pagrindiniai metodai gali būti tokia tvarka:

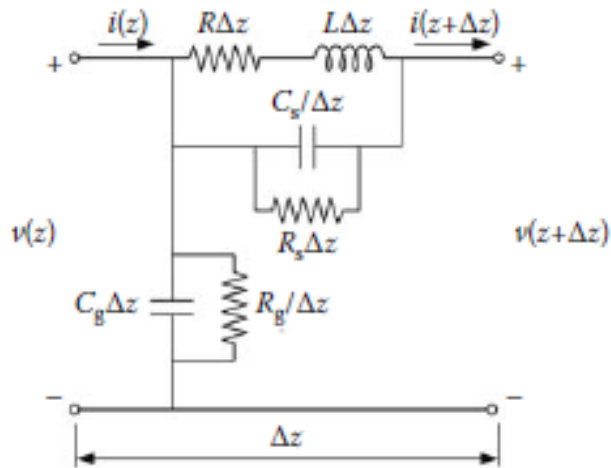
1. Formuliu taikymas
 - a. Pagal suprastintus geometrinius parametrus
 - b. Empirinės formulės pagal išmatavimus
2. Eksperimentiniai nustatymai pagal laboratorinius testavimus
3. Elektromagnetinių laukų simuliacijos metodai

Nepriklausomai nuo pasirinkto metodo, skaičiuojant aukšto dažnio transformatorių parametrus, būtina skaičiuoti induktyvumą, talpumą, tam, kad matyti transformatoriaus charakteristiką veikiant aukštam dažniui. Skaičiuojant parametrus, reikalinga detali informacija apie tiriamą transformatorių (geometrinės savybės), kuri yra žinoma tik gamintojui.

4.2. Aukšto dažnio transformatorių modeliai

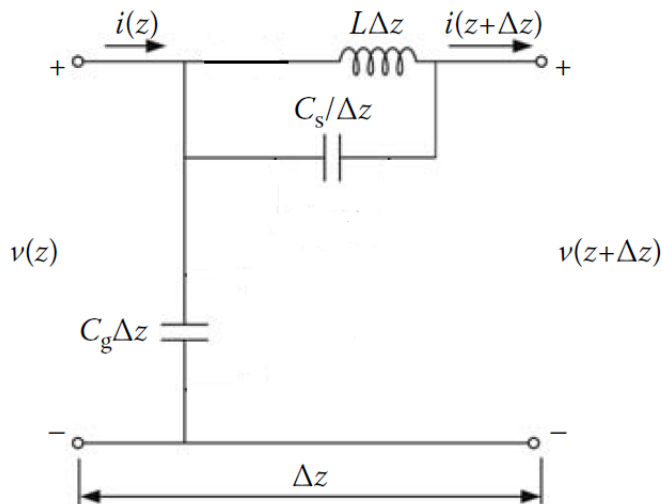
Elektromagnetiniai pereinamieji vyksmai, dėl aukšto dažnio bangų (taip pat žinomas kaip stataus fronto bangos) paprastai tiriama naudojant vidinius modelius, kurie leidžia suprasti, kaip pasiskirsto incidento impulsas išilgai transformatoriaus apvijų. Tipinis vidaus vyksmų pavaizdavimas, diferencialiniam segmentui Δ_z , kai analizuojame vienos apvijos transformatoriaus modelį, parodyta 4.1 pav. Reikalingus parametrus galime išskirti tokius [4]:

1. L - diferencialinio segmento Δ_z apvijų induktyvumas
2. R - diferencialinio segmento Δ_z apvijų aktyvioji varža
3. C_s - diferencialinio segmento Δ_z talpumas tarp apvijų
4. R_s - diferencialinio segmento Δ_z , C_s segmento aktyvioji varža
5. C_g - diferencialinio segmento Δ_z talpumas tarp apvijos ir korpuso/žemės
6. R_g - diferencialinio segmento Δ_z , C_g segmento aktyvioji varža



4.1 pav. Vienos apvijos pereinamųjų vyksmų atstojamoji schema

Tačiau šis skaičiavimo modelis, mūsų atveju, gali įgauti ir paprastesnę formą. Tiriamoje vienos apvijos modelyje aktyviosios varžos (lyginant su induktyvumu ir talpumu) yra labai mažos. Apvijos storis yra labai mažas, todėl paskaičiuota aktyvioji jos varža yra maža. Numatoma, kad reaktyvioji varža ir aktyvioji aprašoma tokia lygybe - $X_z = 10X_r$. Koreguota skaičiavimo schema pateikta 4.2 pav.



4.2 pav. Vienos apvijos pereinamųjų vyksmų atstojamoji schema (be aktyviųjų varžų)

Taikant skaitmeninį modelį pereinamiesiems vyksmams skirstykloje ir transformatoriuje modeliuoti tenka naudoti labai mažą kelių nanosekundžių skaičiavimo žingsnį.

Žaibo ir komutacinių viršįtampių modeliavimui naudojamos programos, kurių algoritmuose yra panaudotos banginių vyksmų lygtys su adekvačiu energijos disipacinių reiškinių įvertinimu bei laidų išsidėstymu aplinkoje. Tam, kad galima būtų adekvačiau atspindėti elektromagnetinių vyksmų eigą elektros tiekimo ir transformatoriaus schemose, sudarytose iš

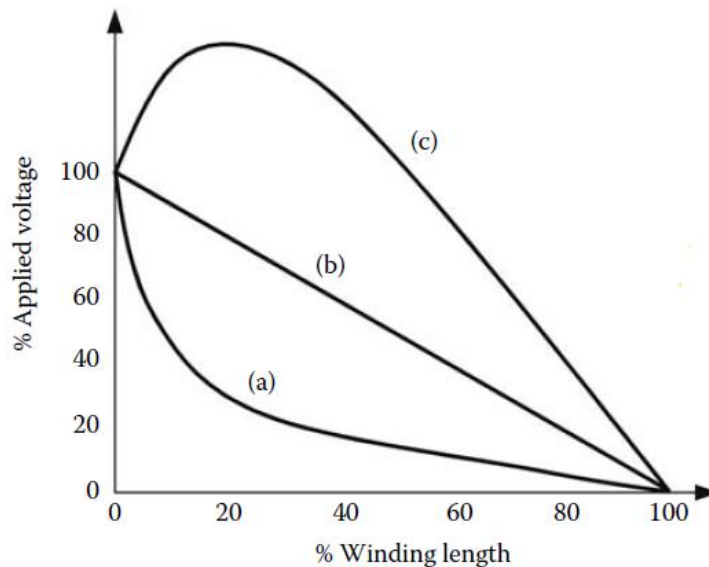
įvairaus ilgio linijų atkarpų bei jungiamųjų laidų, tenka priimti galimai trumpesnį diskretinį laike žingsnį.

Įtampos impulsų elgesys skirtingais laiko periodais, gali būti aprašyti įtampos pasiskirstymo grafikais (žr. 4.3 pav). Trys periodai gali būti išskirti:

a) Pradinė įtampos charakteristika. Fenomeno pradžioje, talpos, vyraujančios grandinėje yra dominuojantys elementai, brėždami netolyginį įtampos grafiką.

b) Galutinis įtampos pasiskirstymas. Fenomenui baigiantis, aktyvinės varžos lemia grandinės reakciją, sukeldamos tolyginį potencialų pasiskirstymą

c) Tarpinė įtampos charakteristika. Tarp a ir b periodų, sąveika tarp elektrinių ir magnetinių energijų susidaro ir sukelia virpantį periodą, kuriame viršįtampiai gali pasireikšti skirtingose vietose, išilgai apvijų.



4.3 pav. Įtampų impulsai apvijose, skirtingais laiko tarpais

5. VIRŠĖTAMPIAI TRANSFORMATORIAUS APVIJOSE

Prieš tai išsiaiškinome, kad transformatoriaus apvijų izoliacijai ypač pavojingos viršėtampių bangos su stačiais frontais. Elektros energetikos sistemoje su efektyviai įžeminta neutrале didelės dalies transformatorių neutrалė yra izoliuota. Galios transformatorius yra svarbiausias ir brangiausias skirstyklos įrenginys Tokios bangos atsklinda oro linijomis, kai žaibo išlydis į liniją įvyksta netoli pastotės. Viršėtampių lygiui ir bangos formai pasiekiančiai galios transformatorių didelę įtaką turi skirstyklos įrenginių išdėstymas ir konfiguracija. Netinkamai suderinus viršėtampių ribotuvo apsaugines charakteristikas su izoliacijos atsparumu pažeidžiama galios transformatoriaus izoliacija neutrалės aplinkoje. Analizuojant pulsinius procesus, kai transformatorių veikia žaibo sukeltų viršėtampių elektromagnetinė banga, galios transformatorius modeliuojamas paskirstytaisiais parametrais. Toliau naudosime kituose skyriuose aprašytą vienos apvijos skaičiuojamąją schemą. Pradiniu momentu, veikiant bangos frontui, srovė induktyvumu neprateka ir įtampa talpų C_s ir C_k grandinėje. Pagal [6] literatūrą, transformatoriaus apvijos elementaraus modulio parametrai paskirstyto elemento ilgiui yra:

$$L_0 = L_k \times n; C_0 = C_k \times n; C_{s0} = C_s \times n. \quad (5.1)$$

Čia: n - elementų skaičius vienam paskirstytam moduliui.

Visos transformatoriaus apvijos nuo įvado iki neutrалės parametrai:

$$L = L_0 \times l; C = C_0 \times l; C_s = C_{s0} \times l. \quad (5.2)$$

Čia: l – apvijos nuo įvado iki neutrалės ilgis.

Dažniausias ir paprasčiausias būdas apskaičiuoti talpą yra remiantis gerai žinoma formule tarp lygiagrečių plokščių. Skaičiavimo žingsnelio talpa tarp apvijų aprašoma tokia lygtimi:

$$C_k = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r h}{d_s} \quad (5.3)$$

Čia: ε_0 - laisvo oro dielektrinė skvarba, ε_r - medžiagos tarp apvijų dielektrinė skvarba, h - laidininko aukštis, d_s - atstumas tarp apvijų.

Skaičiavimo žingsnelio talpa tarp apvijų ir korpuso ar žemės aprašoma tokia lygtimi:

$$C_g = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r W}{d_g} \quad (5.4)$$

Čia: ε_0 - laisvo oro dielektrinė skvarba, ε_r - medžiagos tarp apvijų dielektrinė skvarba, w - laidininko plotis, d_s - atstumas tarp apvijų ir žemės.

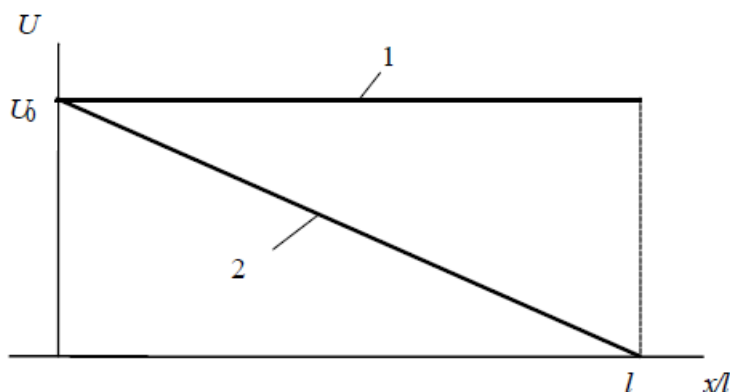
Įtampų pasiskirstymą išilgai apvijų apytikriai galima apskaičiuoti:

$$U(x, 0) = U_0 \times e^{-\alpha l \left(\frac{x}{l}\right)}. \quad (5.5)$$

Čia: U_0 - įtampos ekstremumas, $\alpha l = l \sqrt{\frac{C_k}{C_s}}$; C_k – talpa tarp vijų, C_s – talpa tarp vijos ir transformatoriaus korpuso.

Galios transformatoriams ir autotransformatoriams $\alpha l = 10 \div 20$.

Priverstinės dedamosios įtampos pasiskirstymas, kai transformatoriaus neutralė izoliuota (1 kreivė) ir įžeminta (2 kreivė), parodyta (žr. 5.1 pav). Pradiniu momentu, kadangi srovė induktyvumu neprateka, įtampos izoliuotos ir įžemintos neutralės atvejais transformatoriaus apvijose pasiskirsto beveik vienodai. Įtampų pasiskirstymas transformatoriaus apvijose pradiniu momentu, kai transformatoriaus neutralė izoliuota ir įžeminta, parodyta (žr. 5.1 pav).

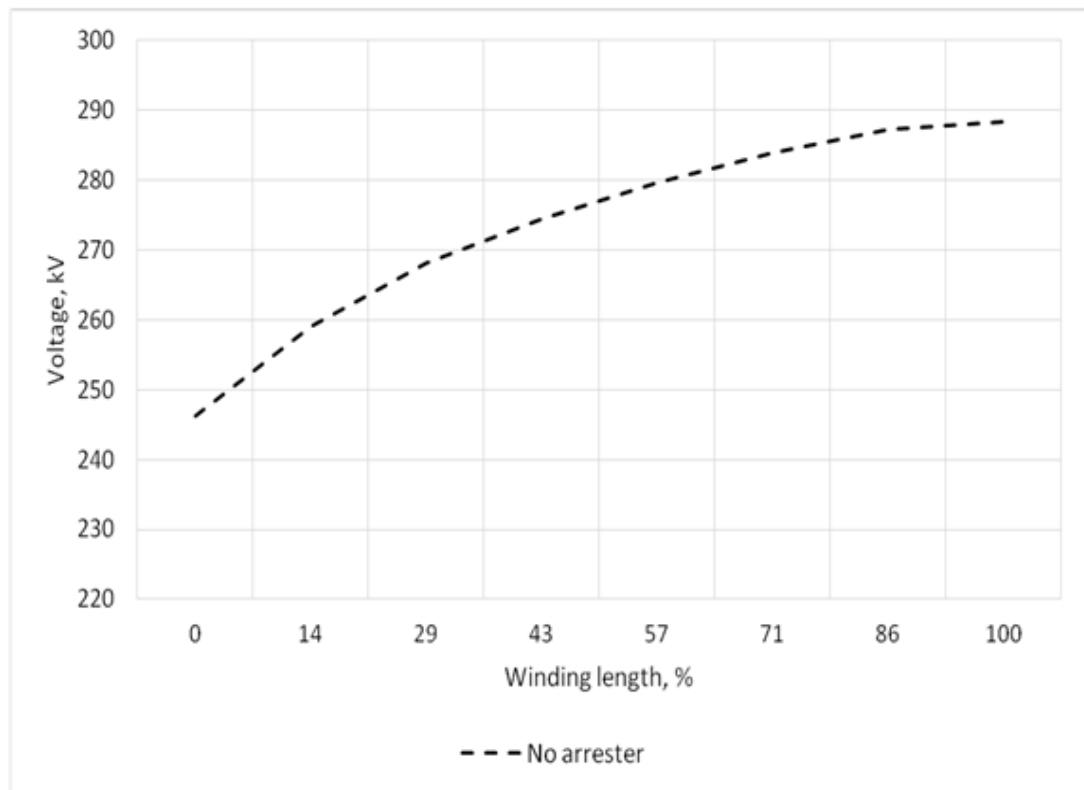


5.1 pav. Priverstinė dedamoji transformatoriaus apvijose

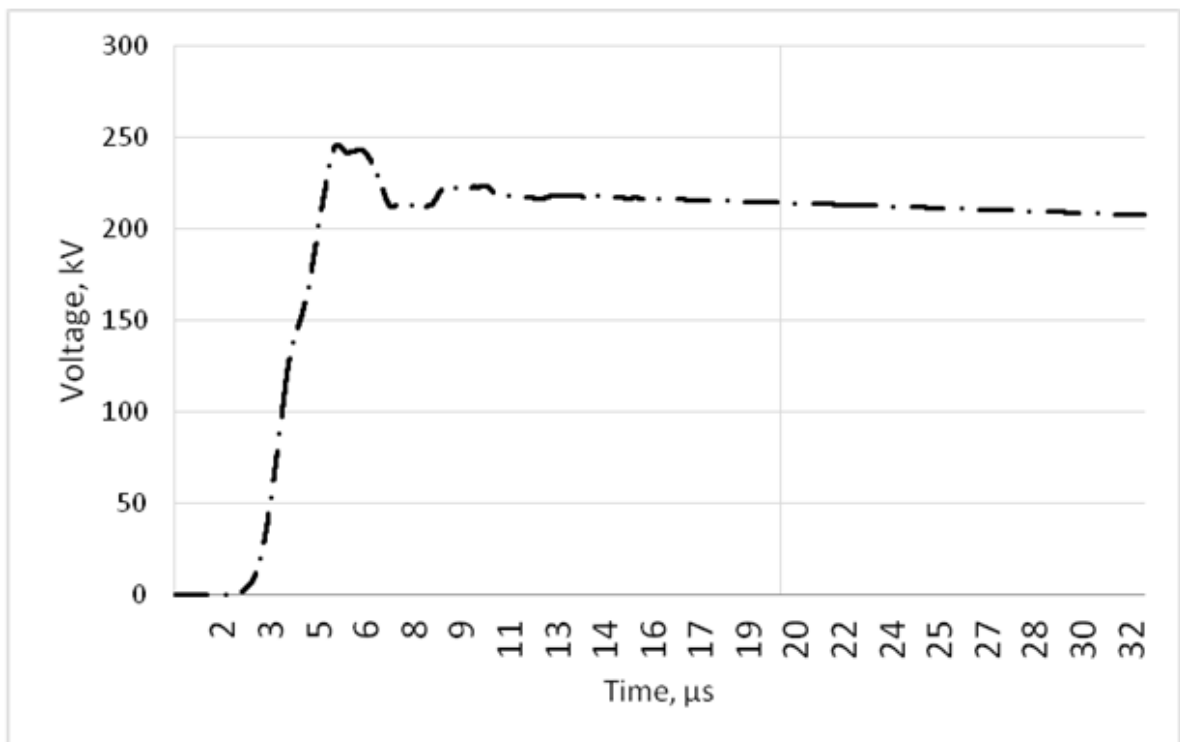
Galios transformatoriuje su įžeminta neutrале aukščiausi viršįtampiai pasireiškia pradinėje apvijų dalyje. Įtampa pirmosiose apvijose gali būti $(1,2-1,3)U_f$. Galios transformatoriuje su izoliuota neutrале aukščiausi viršįtampiai pasireiškia neutralėje. Neutralėje įtampa gali pakilti iki $(1,5-1,8)U_f$. Tiksliai apskaičiuoti pereinamuosius procesus transformatoriaus apvijose yra gana sudėtinga. Bendriesiems dėsningumus paaiškinti patogiau naudotis transformatoriaus modeliu arba skaitmeniniais metodais taikomais kompiuterinėmis programomis.

Transformatoriaus skaitmeniniame modelyje atlikus pereinamųjų vyksmų modeliavimą, kai į transformatorių patenka žaibo išlydžio sukelta viršįtampių elektromagnetinė banga. Iš literatūros [6], pereinamųjų vyksmų sukeltų maksimalių viršįtampių transformatoriaus apvijose

charakteristikos, kai neutralėje nėra viršįtampių ribotuvo, parodytos 5.2 pav., pereinamasis vyksmas veikiančio transformatoriaus parodytas 5.3 pav.

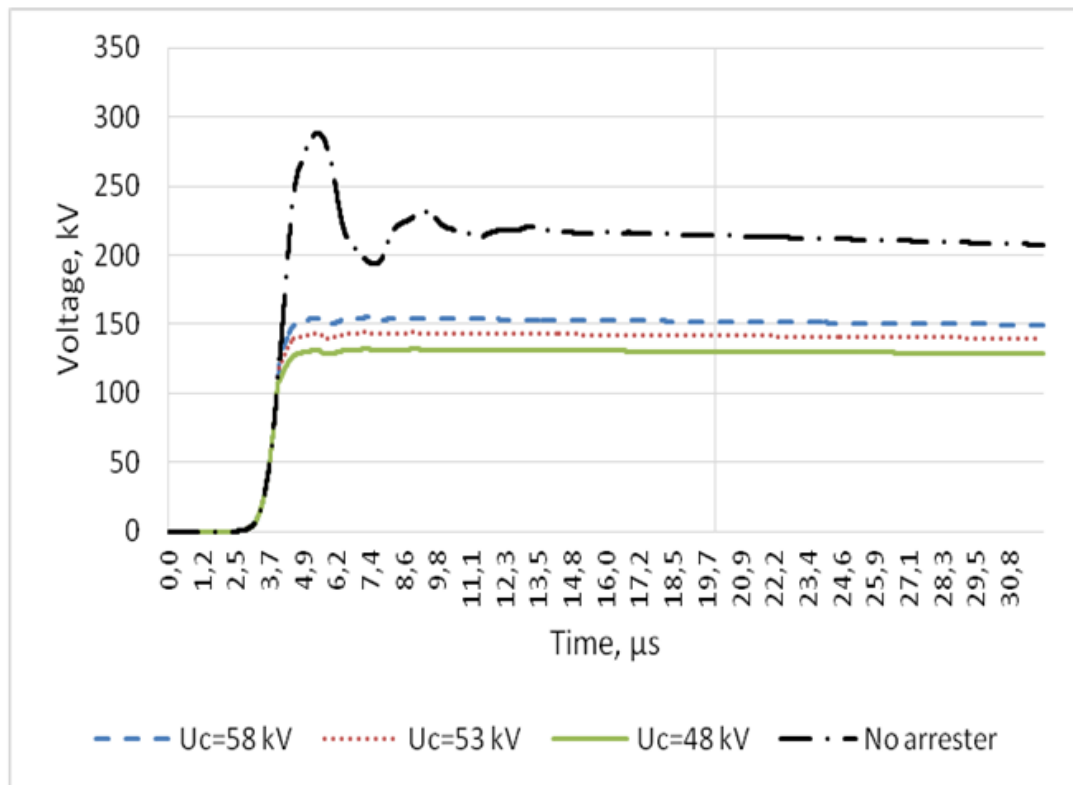


5.2 pav. Viršįtampiai neutralėje be ribotuvo



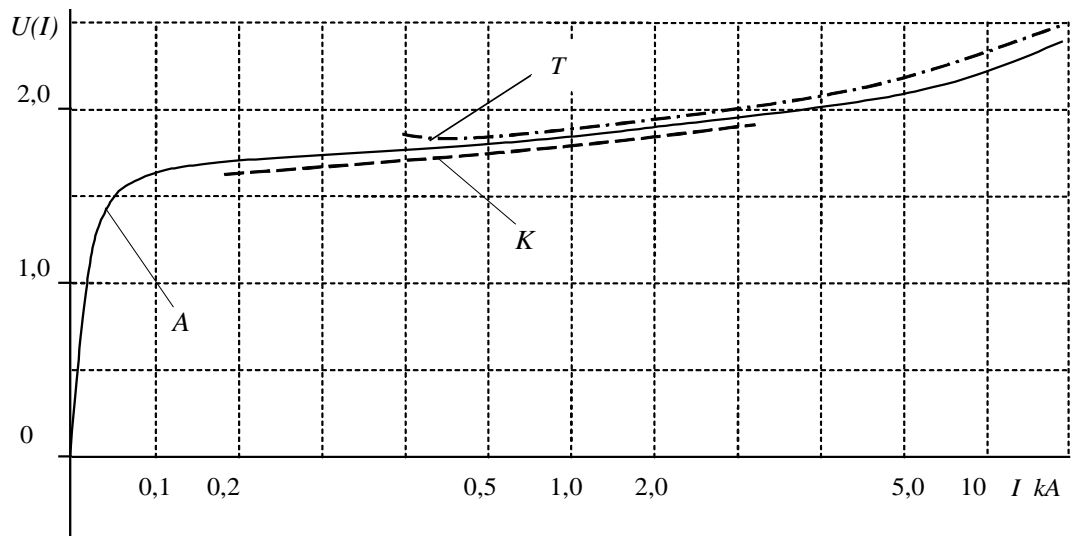
5.3 pav. Pereinamasis vyksmas be ribotuvo

Viršįtampių slopinimas izoliuotoje neutralėje pavaizduotas 5.4 pav. Grafike pavaizduoti trijų tipų viršįtampių ribotuvai, su trimis skirtingomis suveikimo įtampomis. Ribotuvo suveikimo įtampa, arba ilgalaikė leistinoji veikimo įtampa (U_c) reiškia tik ribą, nuo kurios ribotuvai pradeda veikti. Ši riba, nėra įtampos reikšmė, iki kurios viršįtampis sumažinamas. Nuslopinto viršįtampio įtampos reikšmė yra daug didesnė negu leistinoji ilgalaikė veikimo įtampos reikšmė. Iš 5.4 pav. matosi, kad nuslopintos įtampos reikšmė yra iki trijų kartų didesnė už ribotuvo suveikimo įtampą.



5.4 pav. Pereinamieji procesai izoliuotoje neutralėje

Šis skirtumas tarp viršįtampio ribotuvo suveikimo įtampos ir nuslopintos įtampos matomas iš viršįtampių ribotuvo tipinės voltamperinės charakteristikos (žr. 5.5 pav.). Pavaizduotoje voltamperinėje charakteristikoje suveikimo, kai A – lygis, kai izoliaciją veikia atmosferinių viršįtampių visa banga, K – lygis, kai vyksta komutacinių viršįtampių pereinamasis procesas ir T – lygis, kai susidaro trumpas staus fronto impulsas ($1/4$, $1 \mu\text{s}$ fronto statumas ir $4 \mu\text{s}$ impulso trukmė), atsirandantis dėl kibirkštinio iškroviklio prisijungimo.



5.5 pav. Viršitampių ribotuvo voltamperinė charakteristika

6. PEREINAMŲJŲ VYKSMŲ TRANSFORMATORIAUS APVIJOSE SKAIČIAVIMAS

Penktame skyriuje aprašėme ir išnaginėjome galios transformatorių aprašomus paskirstytuosius parametrus, pagal vienos apvijos transformatoriaus modelį. Kadangi eksperimentuose naudosime tokį patį modelį, svarbus apsiskaičiuoti įtampos reikšmes įvairiuose apvijos vietose. Todėl pirma atliekame skaičiavimo pagal penktame skyriuje aprašytas formules, o kitame skyriuje, vykdome eksperimentus.

Skaičiavimams atlikti, reikalingi transformatoriaus parametrai: transformatoriaus laisvo oro dielektrinės skvarbos, medžiagos tarp apvijų dielektrinės skvarbos, apvijų išmatavimų ir t.t. Geometrinius apvijų skaičiavimus atlikti galima, tačiau visi kiti reikalingi parametrai yra nepaskaičiuojami ir jie nenurodyti lentelėje, esančioje ant transformatoriaus. Tačiau, mūsų transformatorius, su kuriuo bus atlikti bandymai, tokios lentelės neturi.

Įtampos grafikas bus nubraižytas remiantis 5.5 formule. Negalėdami suskaičiuoti talpinių varžų tarp apvijų ir tarp apvijų-korpuso, negalime rasti įtampos lygties nežinomojo αl . Tačiau penktame skyriuje nurodėme, kad galios transformatorių $\alpha l=10\div 20$. Pasirenkame mažiausią ir didžiausią αl reikšmes ir atliekame skaičiavimus.

1) Skaičiuojame įtampos reikšmes, kai $\alpha l=10$, 12 žingsnių:

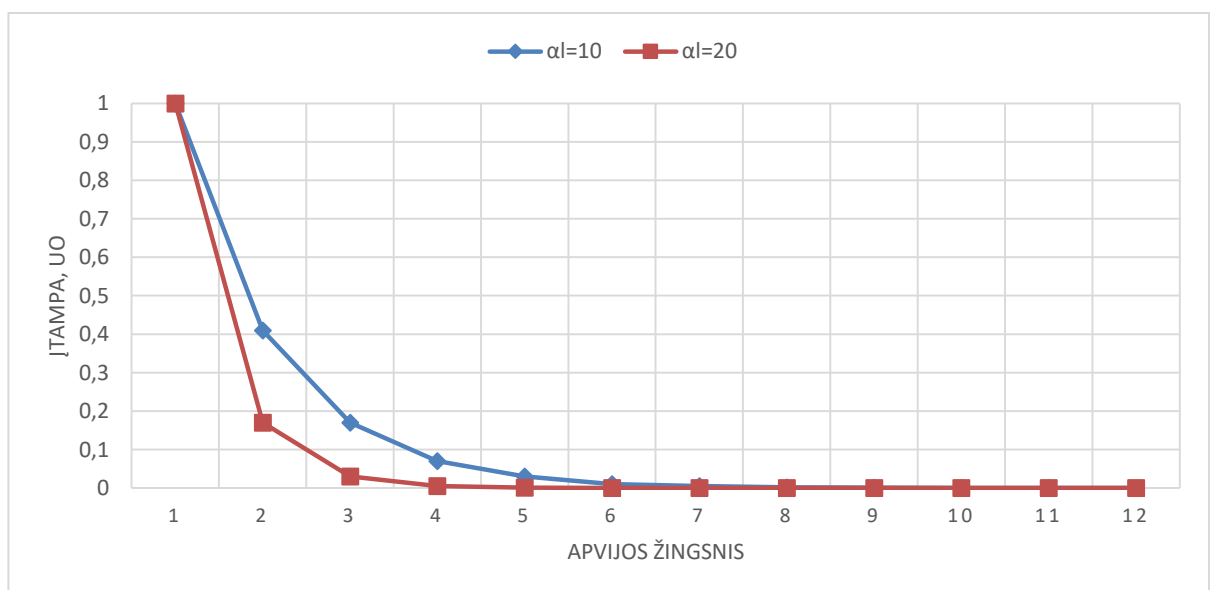
1. $U(x, 0) = U_0 \times e^{-10\left(\frac{0}{1}\right)} = U_0 \times 2,71^0 = U_0$
2. $U(x, 0,09) = U_0 \times e^{-10\left(\frac{0,09}{1}\right)} = U_0 \times 2,71^{-0,9} = U_0 0,41$
3. $U(x, 0,18) = U_0 \times e^{-10\left(\frac{0,18}{1}\right)} = U_0 \times 2,71^{-1,8} = U_0 0,17$
4. $U(x, 0,27) = U_0 \times e^{-10\left(\frac{0,27}{1}\right)} = U_0 \times 2,71^{-2,7} = U_0 0,07$
5. $U(x, 0,36) = U_0 \times e^{-10\left(\frac{0,36}{1}\right)} = U_0 \times 2,71^{-3,6} = U_0 0,03$
6. $U(x, 0,45) = U_0 \times e^{-10\left(\frac{0,45}{1}\right)} = U_0 \times 2,71^{-4,5} = U_0 0,01$
7. $U(x, 0,54) = U_0 \times e^{-10\left(\frac{0,54}{1}\right)} = U_0 \times 2,71^{-5,4} = U_0 0,05 \times 10^{-1}$
8. $U(x, 0,63) = U_0 \times e^{-10\left(\frac{0,63}{1}\right)} = U_0 \times 2,71^{-6,3} = U_0 0,02 \times 10^{-1}$
9. $U(x, 0,72) = U_0 \times e^{-10\left(\frac{0,72}{1}\right)} = U_0 \times 2,71^{-7,2} = U_0 0,07 \times 10^{-2}$
10. $U(x, 0,81) = U_0 \times e^{-10\left(\frac{0,81}{1}\right)} = U_0 \times 2,71^{-8,1} = U_0 0,03 \times 10^{-2}$
11. $U(x, 0,89) = U_0 \times e^{-10\left(\frac{0,89}{1}\right)} = U_0 \times 2,71^{-8,9} = U_0 0,14 \times 10^{-3}$
12. $U(x, 1) = U_0 \times e^{-10\left(\frac{1}{1}\right)} = U_0 \times 2,71^{-10} = U_0 0,04 \times 10^{-3}$

2) Skaičiuojame įtampos reikšmes, kai $\alpha l=20$, 12 žingsnių:

1. $U(x, 0) = U_0 \times e^{-20\left(\frac{0}{1}\right)} = U_0 \times 2,71^0 = U_0$
2. $U(x, 0,09) = U_0 \times e^{-20\left(\frac{0,09}{1}\right)} = U_0 \times 2,71^{-1,8} = U_0 0,17$
3. $U(x, 0,18) = U_0 \times e^{-20\left(\frac{0,18}{1}\right)} = U_0 \times 2,71^{-3,6} = U_0 0,03$
4. $U(x, 0,27) = U_0 \times e^{-20\left(\frac{0,27}{1}\right)} = U_0 \times 2,71^{-5,4} = U_0 0,05 \times 10^{-1}$
5. $U(x, 0,36) = U_0 \times e^{-20\left(\frac{0,36}{1}\right)} = U_0 \times 2,71^{-7,2} = U_0 0,07 \times 10^{-2}$
6. $U(x, 0,45) = U_0 \times e^{-20\left(\frac{0,45}{1}\right)} = U_0 \times 2,71^{-9} = U_0 0,13 \times 10^{-3}$
7. $U(x, 0,54) = U_0 \times e^{-20\left(\frac{0,54}{1}\right)} = U_0 \times 2,71^{-10,8} = U_0 0,21 \times 10^{-4}$
8. $U(x, 0,63) = U_0 \times e^{-20\left(\frac{0,63}{1}\right)} = U_0 \times 2,71^{-12,6} = U_0 0,35 \times 10^{-5}$
9. $U(x, 0,72) = U_0 \times e^{-20\left(\frac{0,72}{1}\right)} = U_0 \times 2,71^{-14,4} = U_0 0,58 \times 10^{-6}$
10. $U(x, 0,81) = U_0 \times e^{-20\left(\frac{0,81}{1}\right)} = U_0 \times 2,71^{-16,2} = U_0 1 \times 10^{-6}$
11. $U(x, 0,89) = U_0 \times e^{-20\left(\frac{0,89}{1}\right)} = U_0 \times 2,71^{-17,8} = U_0 0,2 \times 10^{-7}$
12. $U(x, 1) = U_0 \times e^{-20\left(\frac{1}{1}\right)} = U_0 \times 2,71^{-20} = U_0 0,2 \times 10^{-8}$

Rezultatus sudedame į bendrą grafiką 6.1 pav. Iš gautų rezultatų galime daryti išvadas:

- Didžiausios įtampos reikšmės yra apvijų pradžiose. 3.2 skyriuje aprašyta vidinė kraštinių apvijų papildoma izoliacija, pasitvirtina ir būtina apsaugoti pirmines apvijas.
- Įtampa, apvijų išilgai, greitai mažėja. Nors ir αl reikšmė visų transformatorių yra skirtinga, tačiau greitas įtampus kritimas yra panašus savo staigumu.



6.1 pav. Įtampos pasiskirstymas pagal skirtingas αl reikšmes

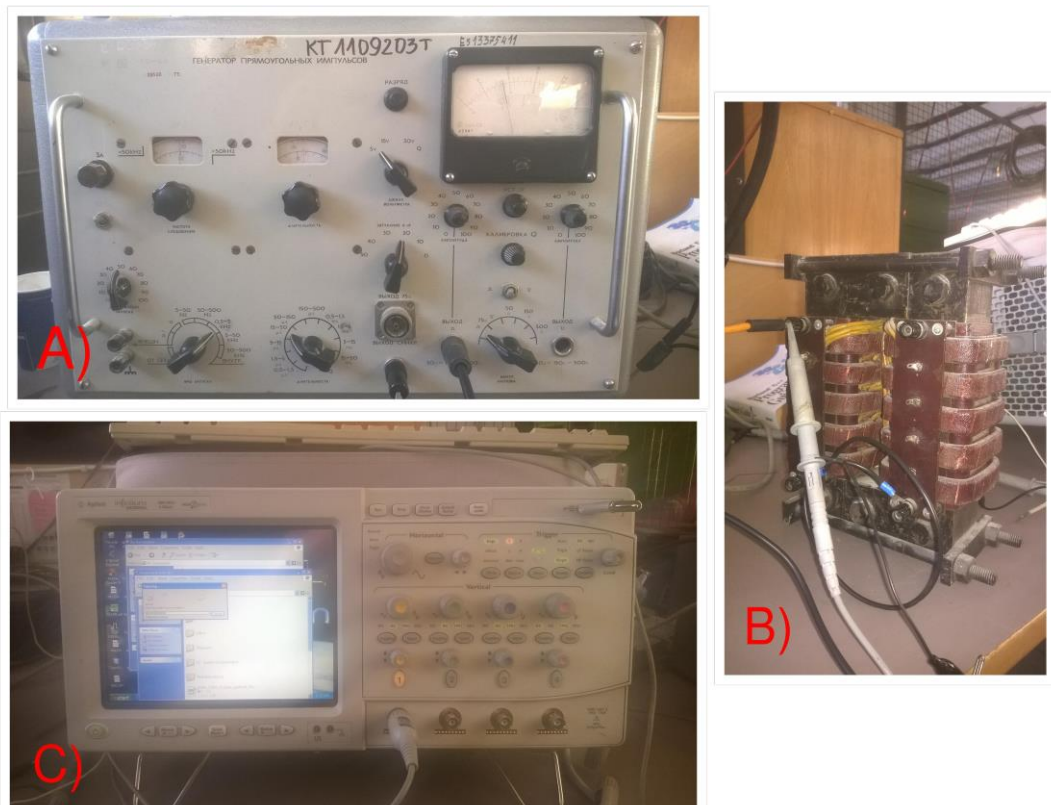
7. EKSPERIMENTINIS PEREINAMŲJŲ VYKSMŲ TYRIMAS TRANSFORMATORIUJE

Šiame skyriuje bus atliekami eksperimentiniai įtampos kitimo, išilgai transformatoriaus apvijų, matavimai. Reikia bandymus atlikti visomis tinklo neutralės pozicijomis, todėl skiriami trijų variantų bandymai:

1. Transformatoriaus neutralė izoliuota
2. Transformatoriaus neutralė įžeminta
3. Transformatoriaus neutralė įžeminta per viršįtampių ribotuvą.

Eksperimentams atlikti bus reikalingi: pulsinis įtampos generatorius (atliks jėgos linijos, ateinančios į pastotę, funkciją), galios transformorius (vienos apvijos modelis), osciloskopas (matavimams fiksuoti), varžos ir vienam iš eksperimentų bus reikalingas įtampos reguliatorius (bus naudojamas vietoje viršįtampio ribotuvo).

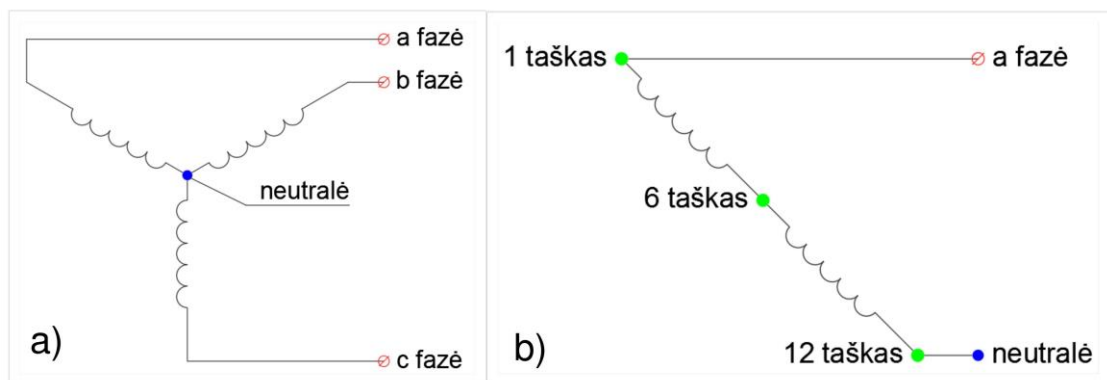
Įtampos generatoriaus išėjimo įtampa ir palaikoma srovė bus pastovi. Naudojama įtampa yra maža, bet leidžia tinkamai stebėti įtampas įvairiuose transformatoriaus taškuose (apie matavimo taškus kalbėsime vėliau). Naudojamas dažnis yra standartinis - 50 hercų.



7.1 pav. a) įtampos generatorius b) galios transformorius c) osciloskopas

Transformorius bus svarbiausias šių bandymų įrenginys. Kadangi įtampos generacija yra nedidelė, todėl transformorius taip pat nedidelis bus tinkamas. Įtampos pasiskirstymo analizei

atlikti, mus bus reikalinga tik viena transformatoriaus pusė, t.y. vienos apvijos transformatoriaus modelis. Į vieną galios transformatoriaus pusę bus pajungta įtampa, o kita įrenginio pusė veiks tuščia veika. Matavimai prasidės nuo pirmo taško, nuo transformatoriaus vietos, kur prijungta įtampa ir bus pasirenkami vienodi apvijų žingsniai, nuo apvijų pradžios - iki galo. Pirminė ir antrinė transformatoriaus apvijos sujungiamos nuosekliai, į vieną bendrą. 7.2 pav. vaizduoja matuojamąją grandinę, kai iš trifazio galios transformatoriaus schemas (A), paliekame tik vieną fazę ir abi apvijas sujungiame į vieną bendrą (B). Matuojamieji taškai (žingsniai) taip pat sužymėti.



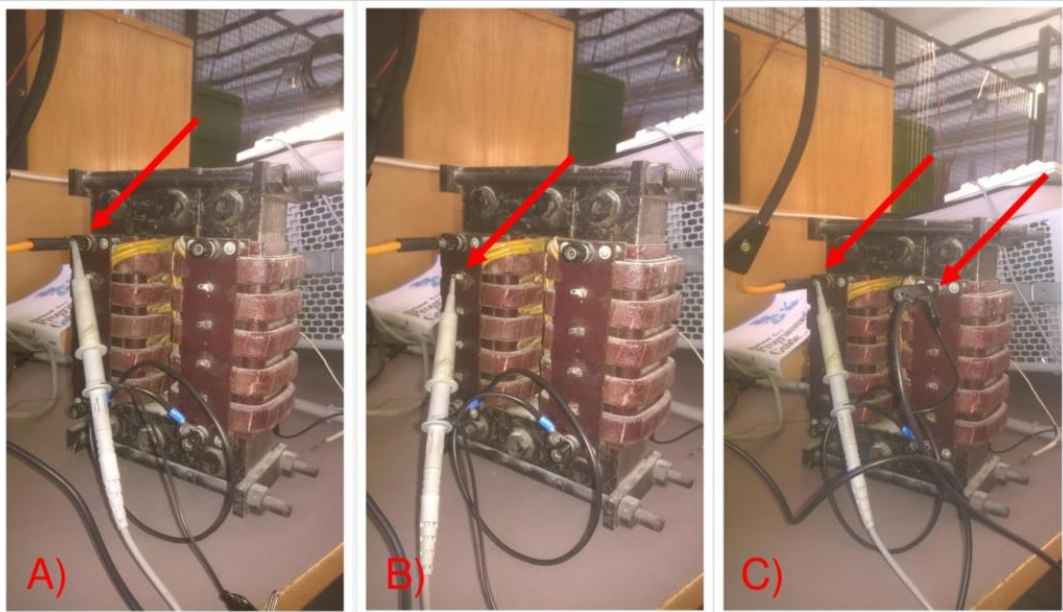
7.2 pav. Galios transformatorių schemas

Įtampos reikšmės visuose taškuose bus skirtingos. Šie skirtumai atsiranda dėl susidarančių induktyviųjų ir talpinių varžų. Taip pat įtampos reikšmės bus skirtingos prie visų neutralės režimų.

Osciloskopas yra elektros signalo formos stebėjimo ir matavimo prietaisas. Signalas stebimas kaip dviejų matavimų grafikas, kur 'Y' ašis rodo tiriamo signalo amplitudę, o horizontali 'X' ašis rodo laiko reikšmę. Šiuo prietaisu bus matuojami visi įtampos pakitimai, išilgai apvijų. Osciloskopo matuoklis bus pridedamas prie transformatoriaus korpuso skirtinguose taškuose ir kiekvieną kartą įtampos grafikas bus išsaugojamas, kompiuteryje apdorojama forma (nuotraukos formatu).

Darbo eiga susidaro iš keturių etapų:

1) Pirmas tyrimo etapas – kai transformatoriaus neutralė izoliuota. Pirma - viską teisingai sujungti. Įtampos generatoriaus išėjimo signalas prijungiamas prie transformatoriaus gnybto (žr. 7.3 pav. A) raudona rodyklė). Generatorius pajungiamas ir nustatomas 50 Hz dažnis. Su osciloskopo lazdele pradėdame skaičiavimus nuo taško, kuriame pajungiamą įtampa (žr. 7.3 pav. A) raudona rodyklė). Šiame taške atlikus matavimą ir išsaugojus grafiką, keičiame tašką, eidami tolyn (žr. 7.3 pav. B) raudona rodyklė).

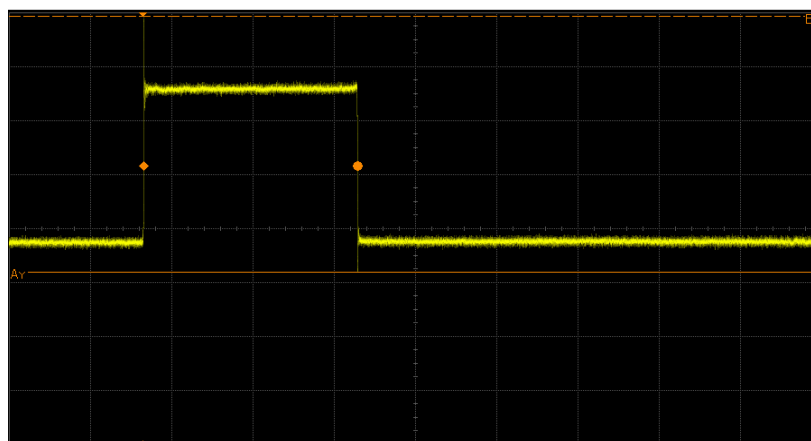


7.3 pav. Bandymams naudojamas galios transformatorius

Matavimams atlikti pasirenkami dvylika, vienodų ilgių, atkarpų (žingsnių). Pirmojo matavimo įtampos grafikas pateiktas 7.4 pav. Matome, jog įtampos amplitudė šiame taške yra labai nedidelė. Atliktus visus matavimus, kai neutralė yra izoliuota, galime pamatyti 7.5 pav. Pagal gautus rezultatus galime daryti išvada, kad neutralė turi būti apsaugota viršįtampių ribotuvu, dėl didėjančios įtampos, arba izoliacija apvijos gale, turi būti padidinta. Viršįtampių padariniai gali siekti nuo neutralės izoliacijos sugadinimo iki pačio transformatoriaus žalos.

7.6 pav. sudėtos visų matuojamųjų taškų įtampų amplitudės ir gauname įtampos grafiką per visą apvijų ilgį. Įtampos pasiskirstymas ar jos didėjimas nėra tolygiai nuoseklus. Pagal 5-to skyriaus teoriją, mūsų eksperimentas turėjo parodyti, kad įtampa transformatoriaus apvijose (kai neutralė izoliuota) turėjo pakilti apie 1,5–1,8 karto. Ši sąlyga nebuvo pilnai išpildyta, bandymo metu įtampa nuo 2,71V pakilo iki 3,69V, t.y. įtampa išaugo ~1,36 karto. Pasirikti matavimo žingsniai buvo vienodai nutolę vienas nuo kito, todėl eksperimento principas buvo teisingas ir jis paklaidų neturėjo sukelti. Mūsų naudojamas transformatorius yra pakankamai mažo naudingumo koeficiento, to priežastis gali būti prastos kokybės apvijos arba didelis magnetinio srauto nutekėjimas. Verta paminėti, kad pramonėje naudojami galios transformatoriai ne vienu aspektu yra skirtingi nuo laboratorijose naudojamų, ypač dėl energijos nuostolių. Mažų ir pigių transformatorių efektyvumo koeficientas yra apie 90%. Didelių galios transformatorių naudingumas gali būti iki 99%.

Saved: 01 JAN 2003 02:03:28



Acquisition Sampling mode real time Normal
 Memory depth automatic 16400000 pts
 Sampling rate automatic Sampling rate 4.00 GS/s
 Averaging off Interpolation on

Channel 1 Scale 1.00 V/ Offset 220 mV
 Coupling AC Impedance 1M Ohm

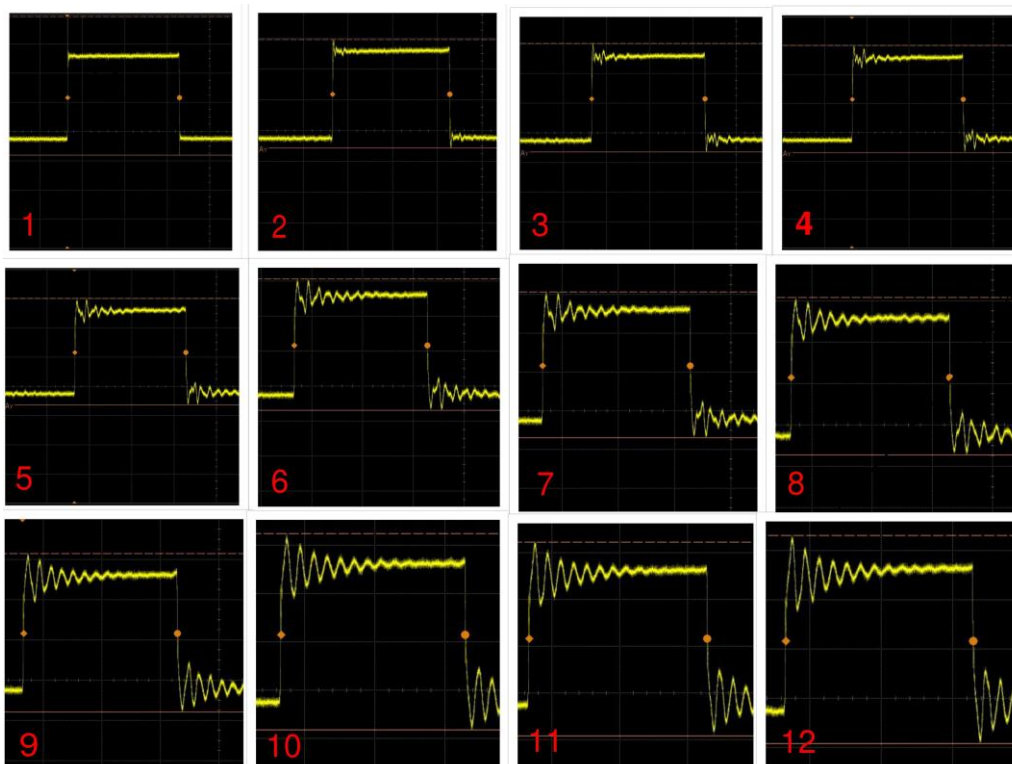
Time base Scale 5.00 μ s/ Position 16.7356000 μ s Reference center

Trigger Mode edge Sweep single
 Sensitivity normal Holdoff time 50 ns Coupling DC
 Source channel 1 Trigger level 1.075 V Slope rising

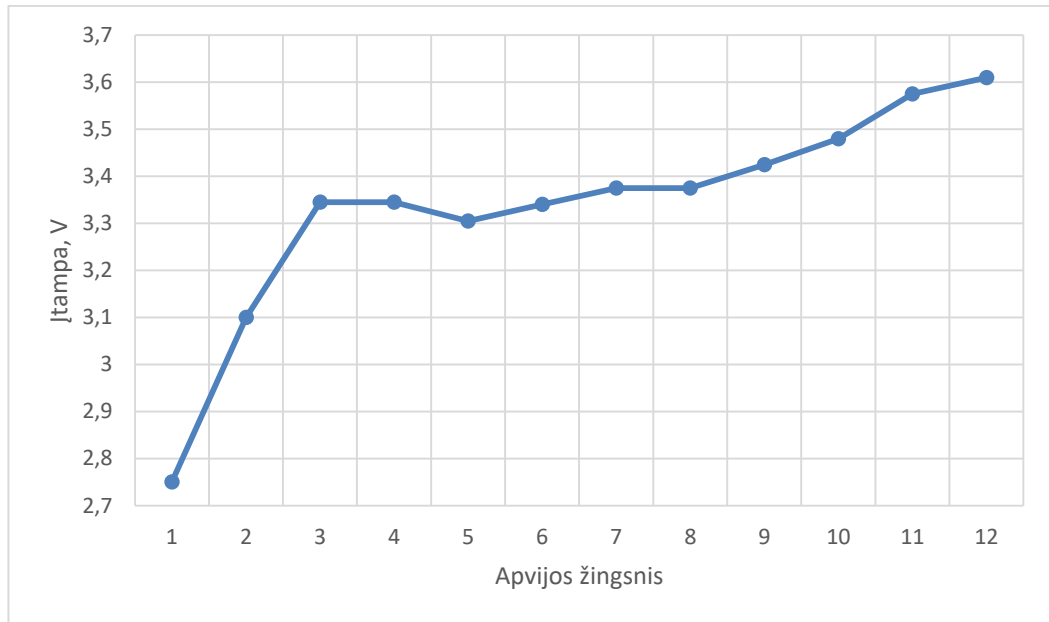
Measure	Y p-p(1)	Frequency(1*)	Rise time(1*)	Fall time(1*)	Period(1*)
Current	4.737 V	Edge?	17.470 ns	25.417 ns	Edge?
Mean	4.737 V	-----	17.470 ns	25.417 ns	-----
Min	4.737 V	-----	17.470 ns	25.417 ns	-----
Max	4.737 V	-----	17.470 ns	25.417 ns	-----
Range	0.0 V	-----	0.0 s	0.0 s	-----
Std Dev	0.0 V	-----	0.0 s	0.0 s	-----
# of Meas	1	-----	1	1	-----
Edge Dir	-----	-----	Rising	Falling	-----

Marker	Y p-p(1)	X	Y
Current	4.737 V	A---(1) =	-589 mV
Mean	4.737 V	B---(1) =	4.149 V
Min	4.737 V	Δ =	4.738 V
Max	4.737 V	1/ Δ X =	-----
Range	0.0 V	-----	-----
Std Dev	0.0 V	-----	-----

7.4 pav. Įtampos amplitudė transformatoriuje, 1-ame taške (neutralė izoliuota)

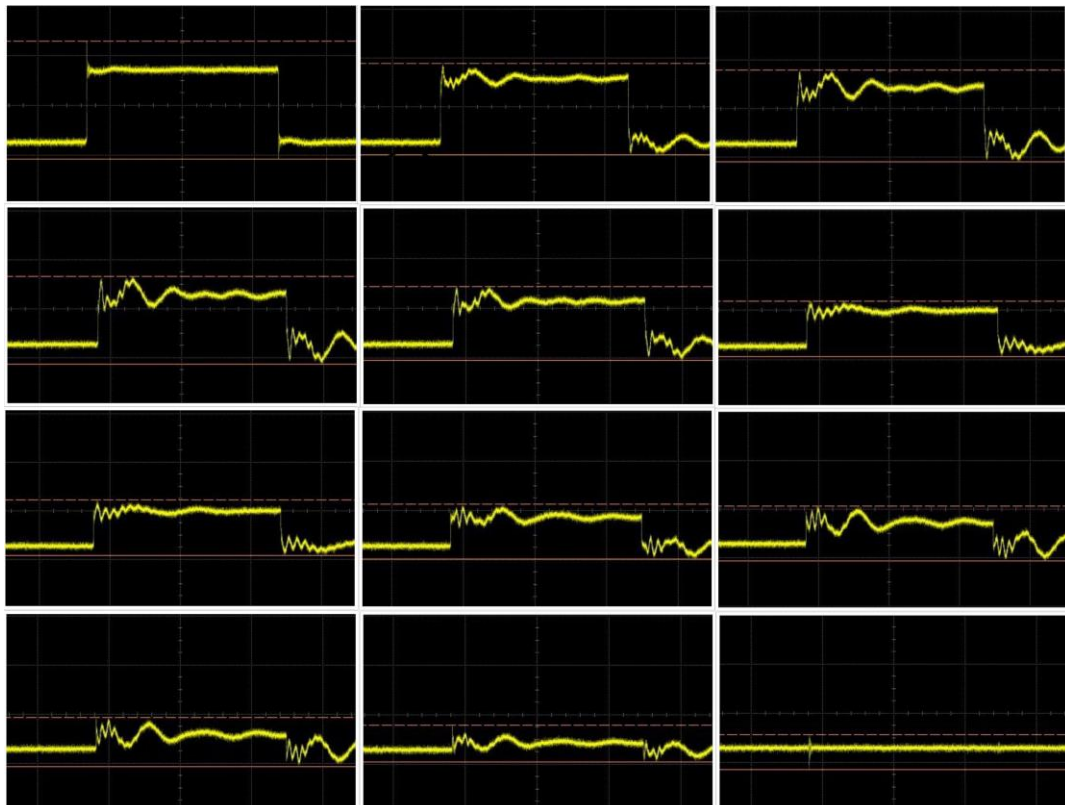


7.5 pav. Pereinamieji vyksmai transformatoriuje (neutralė izoliuota)

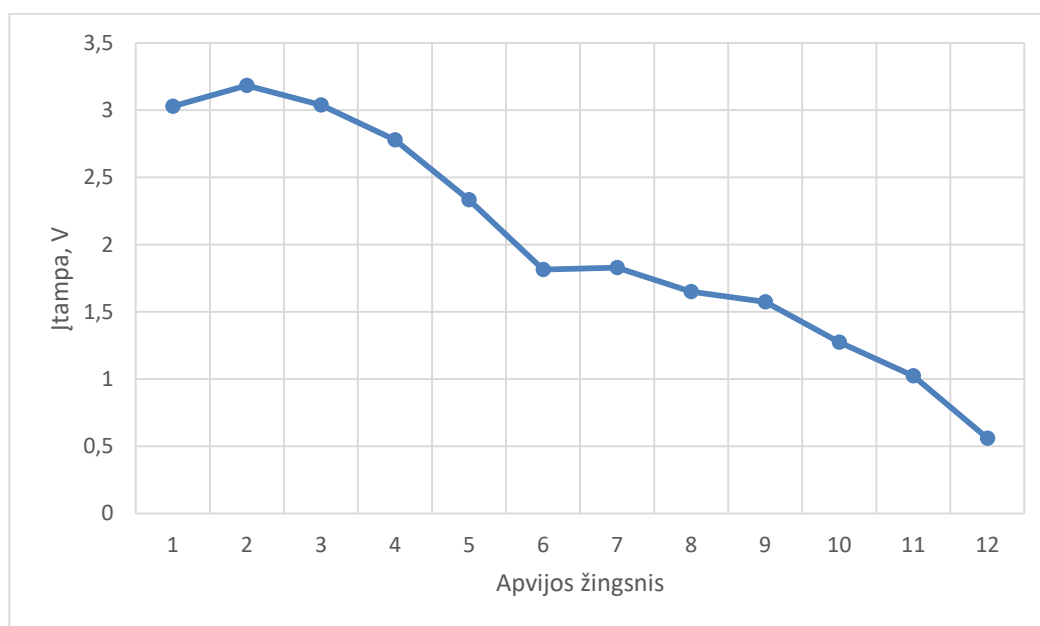


7.6 pav. Įtampos amplitudžių grafikas (neutralė izoliuota)

2) Antras tyrimo etapas – transformatoriaus neutralė įžeminta. Pajungimo schema ir bandymo principas lieka tas pats, tik neutralę įžeminame (žr. 7.7 pav). Skaičiuojami dvylika matuojamųjų taškų, tose pačiose pozicijose, kaip ir bandyme, kai neutralė buvo izoliuota. Visų taškų įtampos grafikai pavaizduoti 7.8 pav.



7.7 pav. Pereinamieji vyksmai transformatoriuje (neutralė įžeminta)

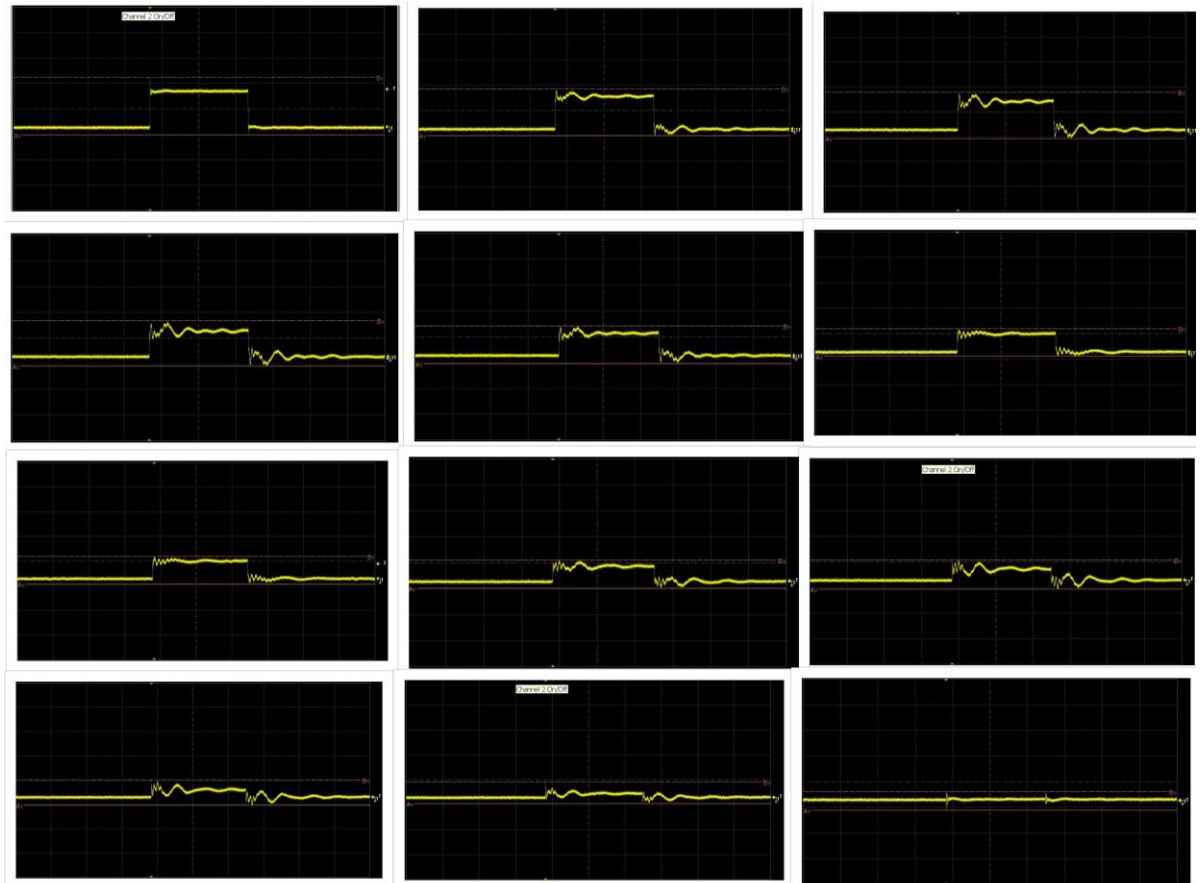


7.8 pav. Įtampos amplitudžių grafikas (neutralė izoliuota)

Rezultatas yra visiškai atvirkščias, lyginant įtampos pasiskirstymą. Įžemintos neutralės taške įtampos reikšmė yra lygi nuliui, o grandinės pradžioje, įtampa yra aukščiausia, tačiau tekant grandine, įžeminimo link – mažėja. Verta pastebėti, kad įtampos reikšmės, transformatoriaus pradžioje, yra aukštesnės, nei kai neutralė yra izoliuota. Taigi, apvijos izoliacija turi būti padidinta ne tik apvijų pabaigoje, bet ir pradžioje.

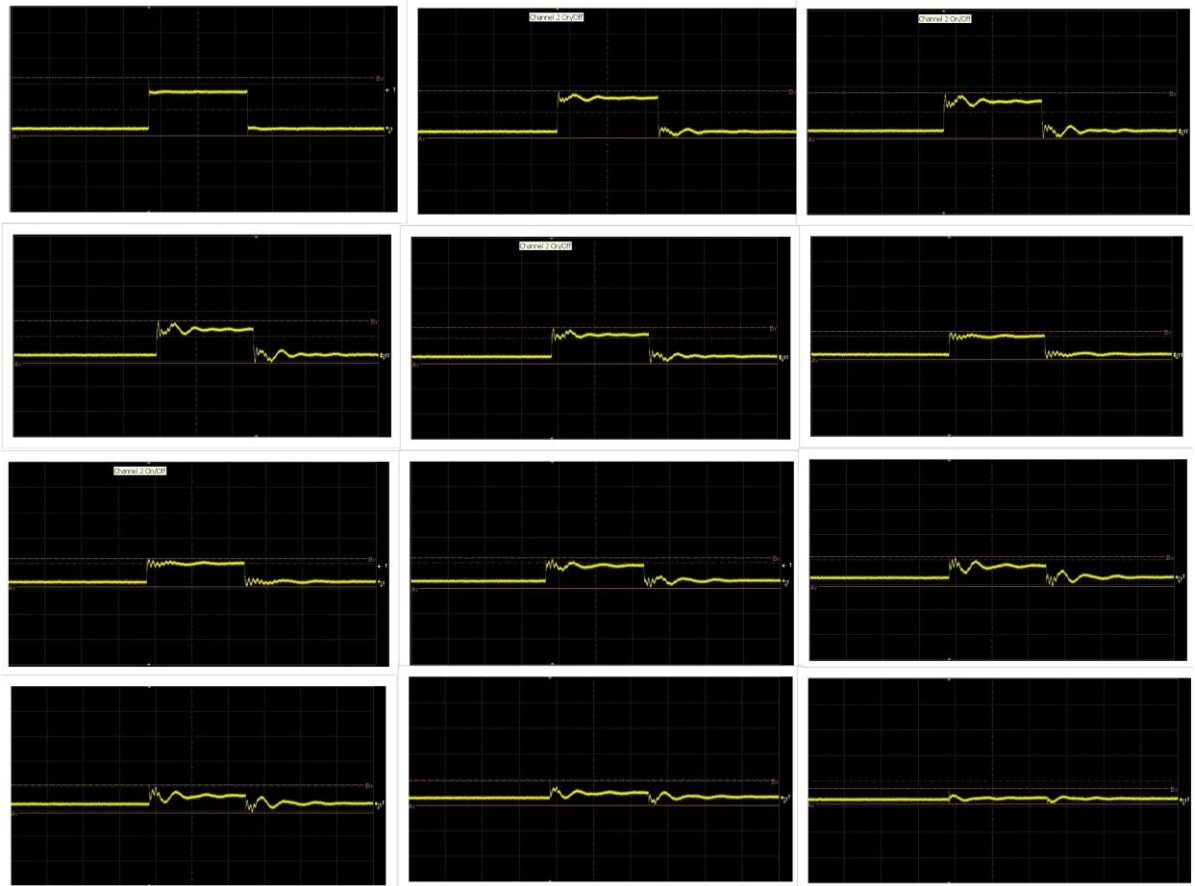
3) Pasižiūrėkime įtampos pasiskirstymą kai neutralė bus įžeminta netiesiogiai, o per varžą. Praktikoje pasitaiko, kad įžeminta neutralė jungiama per varžą. Šios varžos labiau sumažina trumpo jungimo srovės, nes tiesiogiai įžemintos neutralės trumpo jungimo srovė yra apribojama tik žemės varža. Tačiau varžos negali būti per didelės, nes srovių reikšmės bus per mažos relinėms apsaugoms suveikti.

a) Pirmas bandymas buvo atliktas, kai neutralė įžeminta per 75 omų varžą, rezultata matome 7.9 pav.



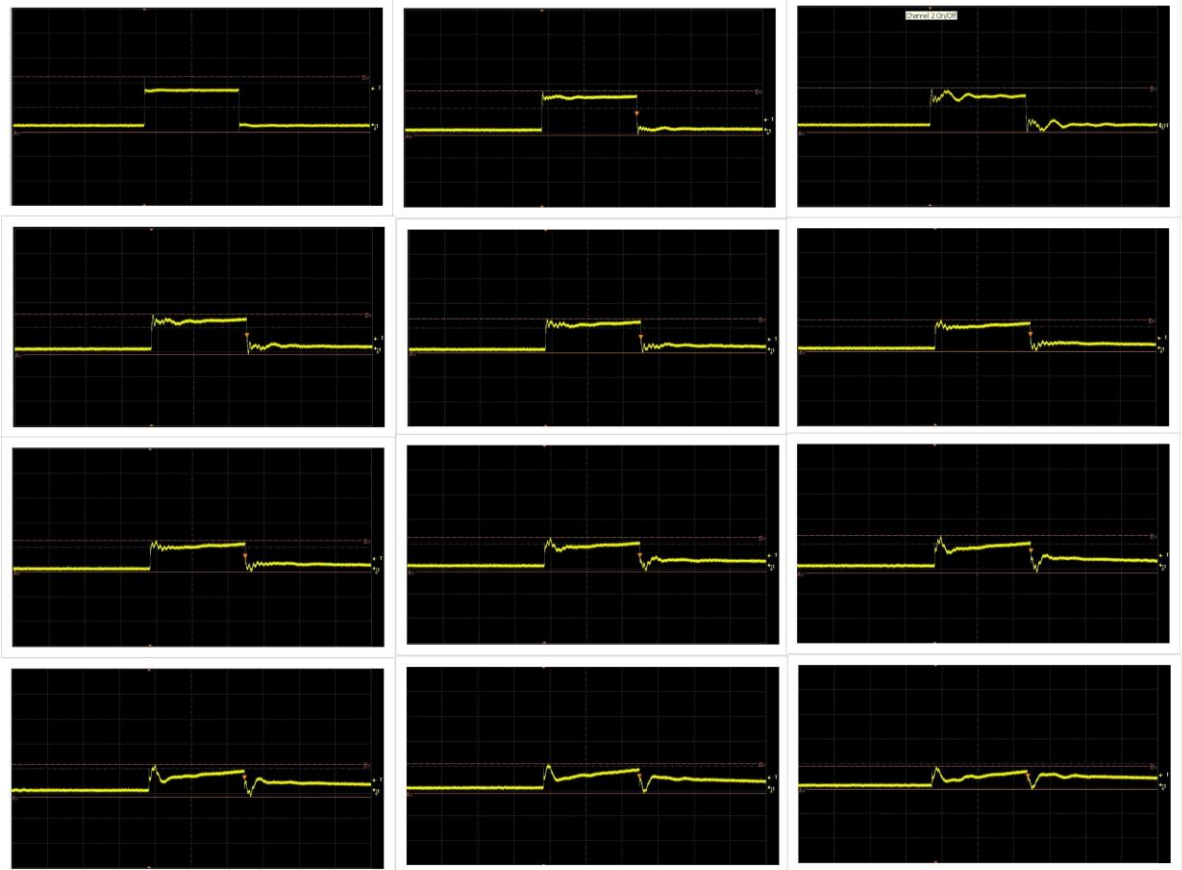
7.9 pav. Pereinamieji vyksmai transformatoriuje (neutralė įžeminta per 75Ω)

b) Kitu variantu, varžą didiname iki 150 omų, į grandinę jungiant papildomą varžą. Pereinamieji vyksmai visuose žingsniuose pavaizduoti 7.10 pav.



7.10 pav. Pereinamieji vyksmai transformatoriuje (neutralė įžeminta per 150Ω)

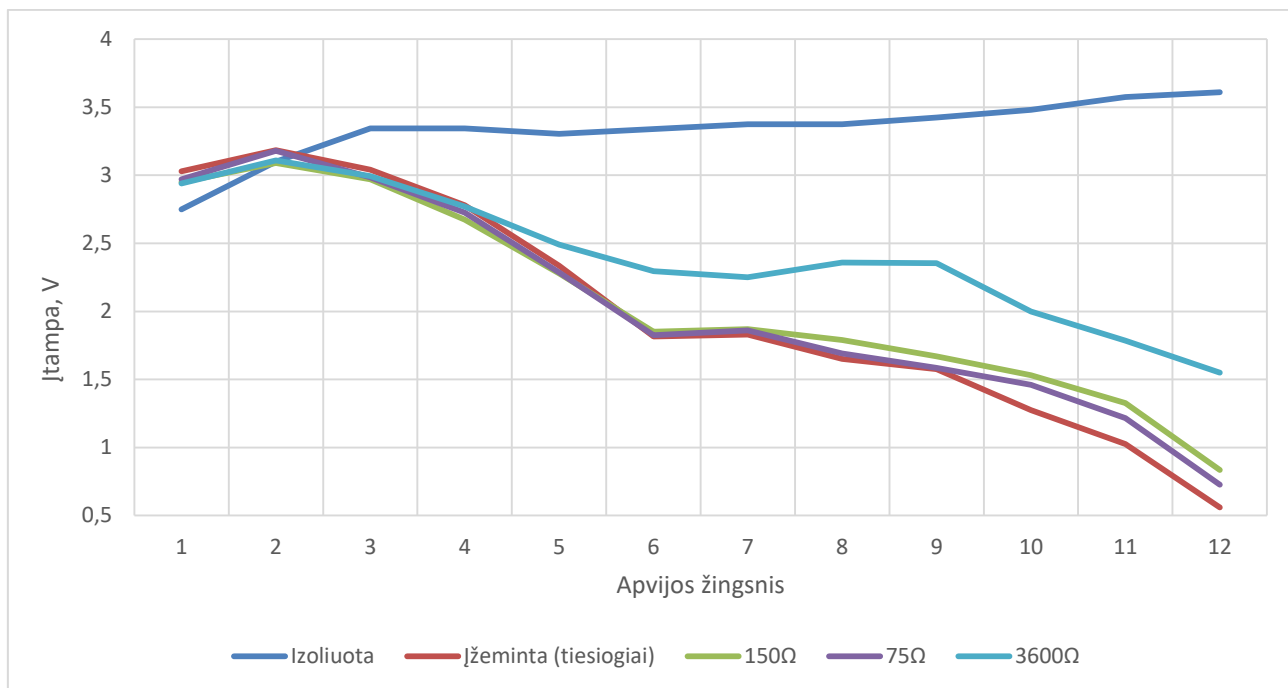
c) Paskutiniu metu, atvaizduojame įtampos grafikus, kai neutralė įžeminta per 3600 omų varžą 7.11 pav. Varžos pakitimas yra didelis, todėl ir jos įtaka įtampos pasiskirstymui turėtų smarkiai pasikeisti.



7.11 pav. Pereinamieji vyksmai transformatoriuje (neutralė įžeminta per 3600Ω)

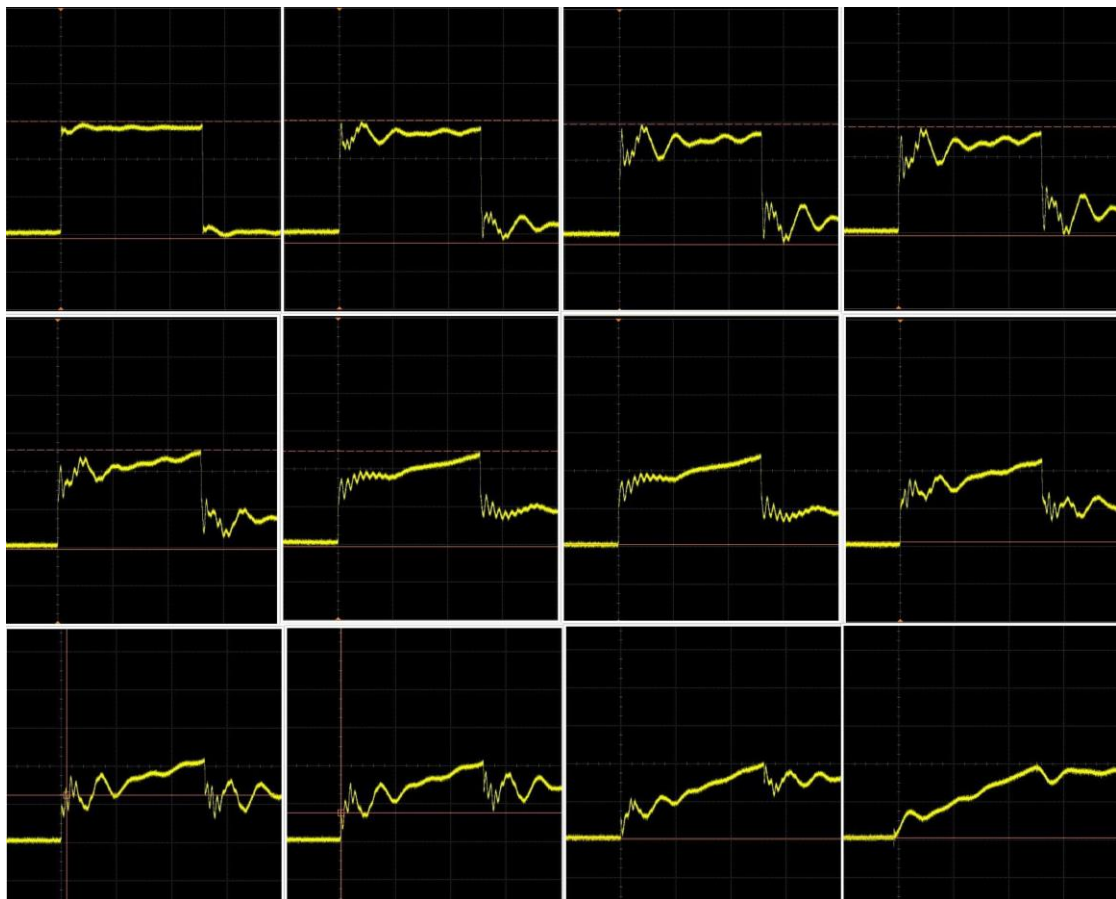
Iš pateiktų oscilografo grafikų, sunku nustatyti tikslų tiesioginį ryšį tarp viršįtampių ir varžos dydžio. Oscilografas ne tik gali braižyti grafikus, tačiau ir nusižymėjus norimą vietą, ir rodyti tikslias įtampos reikšmes. Iš gautų duomenų, buvo išrinktos įtampų amplitudės ir pagal jų reikšmes ir gauti grafikai, kai neutralė įžeminta tiesiogiai, per 75 omų varžą, 150 omų varžą bei 3600 omų varžą 7.12 pav.

Iš 7.12 pav. grafikų galime daryti išvadą, kad neutralę įžeminant per varžą galime atsižvelgti į jos pasiskirstymą apvijose. Matyti, kad transformatoriaus apvijų izoliacijai didesnis poveikis nejuntamas transformatoriaus pradžioje, tad jungiant papildomas varžas tarp žemės ir neutralės, papildoma izoliacija apvijoms nėra reikalinga. Tačiau, dideli įtampų pokyčiai matomi nuo ketvirto apvijos žingsnio. Nuo šios vietos matomas didelis įtampos šuolis, kai varža yra 3600 omų. Atsižvelgiant į rezultatus, galime teigti, kad papildoma izoliacija reikalinga antroje apvijų pusėje.

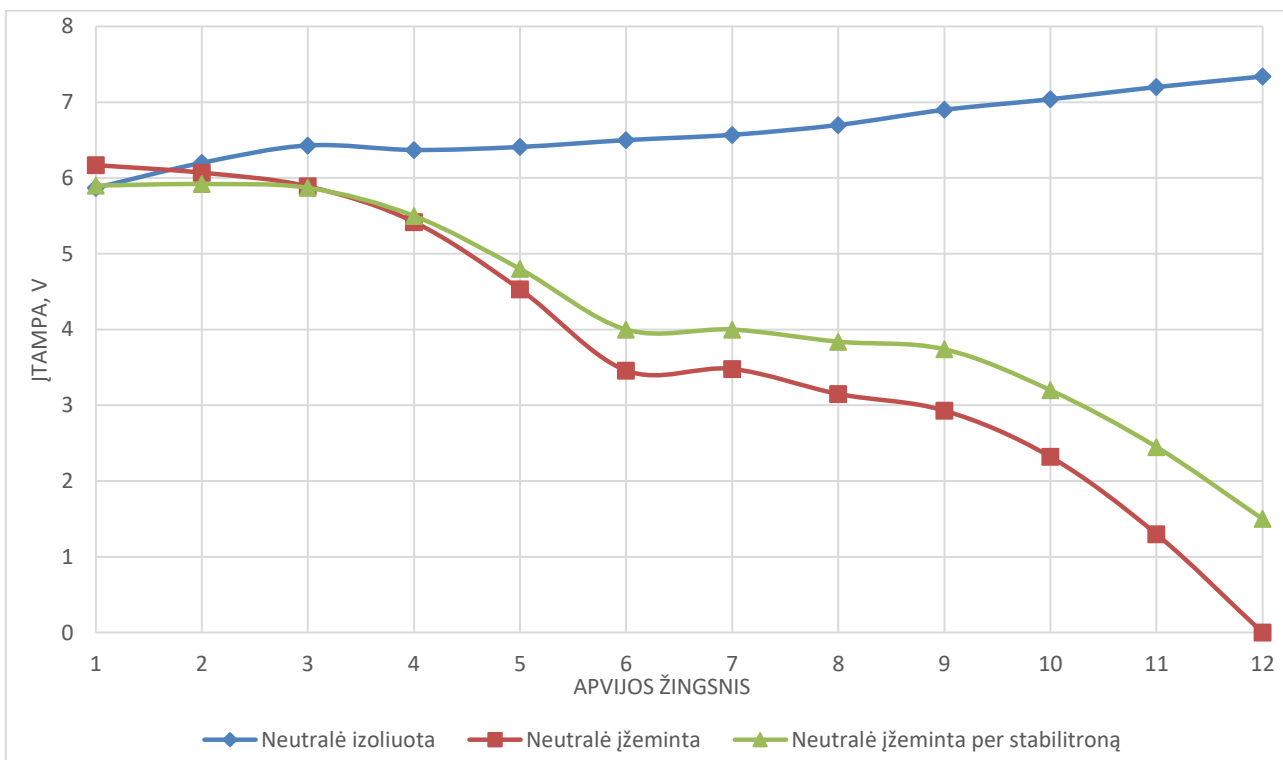


7.12 pav. Įtampos amplitudžių bendras grafikas

4) Trečias tyrimo etapas – tyrimai atliekami kai transformatoriaus neutralė įžeminta per įtampos reguliatorių. Šiame darbe mes įvardijome, kad tyrimai bus atlikti su viršįtampių ribotuvu, tačiau šiems eksperimentams bus naudojamas viršįtampio ribotuvo analogas – įtampos reguliatorius. Tyrimai atliekami su mažomis įtampų reikšmėmis, todėl pereinamuosius vyksmus su viršįtampių ribotuvu ištirti nepavyktų. Pagal literatūrą [9], įtampos reguliatorius (būdamas *pn* sandūros diodu) turi vieną ir pačia reikalingiausią savybę, kaip ir viršįtampių ribotuvas – netiesinę įtampos charakteristiką. Regulatorius į grandinę jungiamas tiesioginiu būdu. Bandymas atliekamas su *KZ706* modelio įtampos reguliatoriumi [8]. Tyrimo rezultatai, įtampos grafikos pavidalu, pateikti 7.13 pav.



7.13 pav. Pereinamieji vyksmai transformatoriuje (eksperimentas su KZ706 reguliatoriumi)



7.14 pav. Įtamos amplitudžių grafikas su reguliatoriu

Bandymų su reguliatoriumi pagrindinis tikslas buvo – išsiaiškinti kaip efektyviai veikia viršįtampių ribotuvas, kai neutralę apsaugojame su įtampos reguliatoriumi (analogas – viršįtampių ribotuvas). Pagal gautus rezultatus, galime nustatyti, kad apsaugojus neutralę viršįtampių ribotuvu, būdingi šie įtampos pereinamieji vyksmai:

1. Pagal 7.14 pav. galime pamatyti, kad apvijas veikianti įtampa, apsaugojus viršįtampių ribotuvu, eksperimento metu, išaugo. Gauti rezultatai leidžia suprasti, kad buvo parinktas įtampos reguliatorius su netinkama ilgalaikė leistinąja veikimo įtampa (U_c). Įtampų padidėjimai stebimi nuo apvijų vidurio iki paskutinio taško, linijos galo. Šis įtampų padidėjimas, galėjo įvykti dėl netiesinių reguliatoriaus charakteristikų ir labiausiai galėjo įtakoti, tai jog linija veikė „ilgos linijos“ efektu. Kadangi mūsų liniją veikia pulsinis statusis frontas ir tai linijos dažnį suskaido į daug skirtingų diapazonų, fragmentų, dažnių visumą, mūsų skaičiuojamąją liniją veikia talpos efektas ir įtampa linijos gale išauga. Nuo linijos galo iki linijos pradžios – įtampų skirtumai (tarp tiesiogiai įžemintos ir įžemintos per reguliatorių) mažėja, nes talpos efektas pasireiškia vis mažiau.

2. Parinkus viršįtampių ribotuvą pagal netinkamas charakteristikas, galios transformatoriui galime labiau pakenkti, nei apsaugoti. Tai gali būti viena iš didžiausių sąlygų, kodėl avarijos metu, dėl nežinomų priežasčių, transformatoriaus izoliacija yra pažeidžiama.

8. EKONOMINĖ ANALIZĖ

Galios transformatorius yra ne tik vienas iš svarbiausių elektros energetikos dalių, tačiau ir pats brangiausias. Technologijoms sparčiai tobulėjant, elektros tinklų patikimumas, stabilumas tik didėja. Tačiau, 100% apsaugoti galios transformatorių – nėra pilnai įvykdoma ir avarijų nuolatos įvyksta. Dėl transformatoriaus didelių kapitalinių kaštų, nuolatos išlieka didelė paklausa jų apsaugojimui. Pagal [10] literatūros šaltinį, galime išskirti pagrindines galios transformatorių avarijų priežastis 8.1 pav.

TABLE 1 – Cause of Failures	
Electrical Disturbances	29.43%
Lightning	17.32%
Insulation issues	9.80%
Electrical Connection, Loose or High Resistance	7.38%
Maintenance issues	5.91%
Moisture	4.03%
Overload	2.01%
Sabotage	2.01%
Other	1.24%

8.1 pav. Galios transformatorių pagrindinės avarių priežastys

Iš trijų pagrindinių avarijos priežasčių, net dvi yra artimai susijusios su šio projekto tema. Pirmiausia, žaibo sukelti viršįtampiai ir transformatoriaus apvijų izoliacija. Dažnai avarijos vietoje, nustatoma, kad veikimo sutrikimas prasidėjo nuo neutralės. Galime daryti išvadą, jog pereinamųjų vyksmų tyrimas, būtent neutralėje – gali sumažinti galios transformatorių avarių, dėl išorinių viršįtampių šaltinių ar netinkamai parinktos izoliacijos, skaičių ir padidindami eksploatacijos laikotarpį.

IŠVADOS

1. Pagal matematinį modelį, apskaičiuotas ir grafiškai pavaizduotas apytikrinis įtampų pasiskirstymas išilgai apvijos. Gauti grafikai pavaizduoja visų rūšių transformatorių įtampų kitimą apvijomis, matematiškai.

2. Atlikus bandymus, gauti pereinamųjų vyksmų transformatoriuje duomenys, grafikai, kai neutralė yra izoliuota. Nustatyta, kad izoliuotoje neutralėje įtampa nuo apvijų pradžios iki galo, padidejo 1,36 karto. Pagal [1] literatūra, įtampa turėjo padidėti nuo 1,5 iki 1,8 karto, tačiau verta paminėti, kad pramonėje naudojami galios transformatoriai ne vienu aspektu yra skirtingi nuo laboratorijose naudojamų, ypač dėl energijos nuostolių, o mažų ir pigių transformatorių efektyvumo koeficientas gali skirtis nuo 90-99%.

3. Eksperimentiškai gauti pereinamieji vyksmai apvijose, kai neutralė yra įžeminta tiesiogiai ir per skirtingo dydžio aktyviausias varžas. Gauti įtampų grafikai parodo kaip įtampa pasiskirsto išilgai apvijų, kuriose vietose įtampos labiausia išauga, o kuriose mažiausiai, įžeminant per skirtingas varžas. Įtampos reikšmės pirmojoje transformatoriaus apvijų pusėje yra beveik vienodos, todėl šioje dalyje izoliacijai nėra pavojingas papildomų varžų prijungimas. Tačiau antroje apvijų pusėje – matomi akivaizdūs įtampos šuoliai.

4. Gauti pereinamieji procesai, prijungiant viršįtampių ribotuvą (įtampos reguliatorių, mūsų atveju). Rezultatai parodė, kad netinkamai parinkus viršįtampių ribotuvą (pagal ilgalaikę leistinąją veikimo įtampą), galime ne tik neapsaugoti transformatoriaus izoliacijos, bet ir sukelti dar didesniu įtampos šuolius. Tai gali lemti papildomas priežastis, dėl ko įvyksta transformatoriaus avarijos, apsaugotais viršįtampių ribotuvais.

5. Atlikta ekonominė analizė, apžvelgiama baigiamojo darbo ekonominė nauda.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. „Izoliacija ir viršįtampiai“ J.Baublys, P.Jankauskas, L.A.Markevičius, A.Morkvėnas, p.349-350, 357-358, 359-360.
2. „Elektros energetikos pagrindai“ Gytis Svinkūnas, Algimantas Navickas.
3. „Elektros mašinos I dalis“ asinchroninės mašinos, transformatoriai. S.Gečys, A.Kalvaitis, P.Smolskas.
4. „Power systems electromagnetic transients simulation“ Neville Watson and Jos Arrillaga, p. 176-177.
5. „Power system transients parameter determination“ Juan A. Martinez-Velasco, p.220-223, p.230-232.
6. “Recursive method to examine electromagnetic transient processes in cable network“ Gudžius S., Markevičius L., Morkvėnas A.
7. „Žaibo sukeltų viršįtampių poveikio galios transformatoriaus izoliacijai tyrimas“ D.Brazionienė, U. Iliotienė, A. Rožanskienė, V.Tička.
8. „American microsemiconductor“ KZ706 diode. Preiga per internetą:
<http://datasheets360.com/pdf/6582129749408148620>
9. „Fundamentals of Electronics: Book 1: Electronic Devices and Circuit Applications“ by Thomas F. Schubert, Ernest M. Kim, p 102-104.
10. „Failure analysis of transformers“ by William H. Bartley P.E. The Hartford Steams Boiler Inspection & Insurance Co. Hartford CT, p.1.