

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

**Alfonsas MORKVĖNAS**

**VIRŠĖTAMPIŲ POVEIKIS ELEKTROS  
ĮRENGINIŲ IZOLIACIJOS SENĖJIMO  
PROCESAMS**

Habilitacijos procedūrai teikiamų mokslo darbų apžvalga

Technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija (06T)

**Kaunas  
2008**

**Alfonsas Morkvėnas. Viršitampių poveikis elektros įrenginių izoliacijos senėjimo procesams.** Habilitacijos procedūrai teikiamų mokslo darbų apžvalga. Technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija (06T)

© **Alfonsas Morkvėnas**  
**2008**

## TURINYS

<b>I. ĮVADAS</b> .....	4
<b>II. VIRŠĖTAMPIŲ PEREINAMŲJŲ PROCESŲ MODELIAVIMAS</b> .....	6
<b>III. APSAUGOS NUO VIRŠĖTAMPIŲ PRIEMONIŲ EFEKTYVUMAS</b> .9	
<b>IV. ĮRENGINIŲ IZOLIACIJOJE VYKSTANČIŲ PROCESŲ MODELIAVIMAS</b> .....	13
<b>V. ĮRENGINIŲ IZOLIACIJĄ VEIKIANČIŲ VEIKSNIŲ IR VYKSTANČIŲ PROCESŲ IZOLIACIJOJE TARPUSAVIO RYŠIO TYRIMAS</b> .....	16
<b>VI. APIBENDRINIMAS</b> .....	19
<b>VII. HABILITACIJOS PROCEDŪRAI TEIKIAMĖ MOKSLŲ DARBAI</b> .....	20

## I. ĮVADAS

### Darbu aktualumas ir nagrinėjama problema

Šiuolaikinė elektros energetikos sistema yra sudėtingos įrangos, įvairių joje vykstančių procesų, įrenginių kontrolės ir bandymo sistemų visuma. Elektros energetikos sistema ir jos veikimo patikimumas yra svarbus veiksnys, užtikrinantis visų ūkio sričių veiklą.

Elektros energetikos sistemoje eksploatuojamų įrenginių būklės įvertinimas bei defektų prognozė yra aktualus ir gana sudėtingas uždavinys, apimantis procesus, vykstančius elektros tinkle ir įrenginių izoliacijoje. Nuo šio uždavinio sprendimo priklauso elektros įrenginio darbo efektyvumas ir patikimas elektros sistemos darbas. Pagrindiniai elektros įrenginių elementai yra laidininkas ir izoliacija. Galios ir matavimo transformatoriai turi magnetolaidį. Elektros įrenginių būklę gana dažnai lemia izoliacija [C1, C4]. Norint tiksliau įvertinti elektros įrenginių būklę bei laiku aprikti atsiradusius defektus, reikia iširti elektros sistemoje ir elektros įrenginių izoliacijoje vykstančius procesus, nustatyti įvairių veiksmų įtaką jų būklei apibūdinančioms charakteristikoms, tai pat jų kitimo dėsningumus. Analizuojant viršįtampių sukeliamus įrenginių izoliacijoje pokyčius galima prognozuoti izoliacijos senėjimo greitį, defektų kitimą ir laiku tuos defektus pašalinti, kad elektros energetikos sistemoje būtų išvengta avarių ir nuostolių.

Elektros įrenginių izoliacijos būklę ir patikimo darbo trukmę lemia įvairūs veiksniai (darbo srovė ir įtampa, viršįtampiai, virššroviai, vibracija, drėgmė ir kt.) atsirandantys elektros energetikos sistemoje. Elektros įrenginių izoliacija (vidinė ir išorinė) turi būti atspari ilgalaikiai maksimaliai leistinajai įtampai, komutaciniams ir atmosferiniams viršįtampiams [C1]. Viršįtampių pereinamieji procesai, jeigu elektros įrenginių izoliacija tinkamai eksploatuojama ir apsaugota nuo viršįtampių, nesutrumpina jos naudojimo trukmės.

Dėl viršįtampių poveikio kietojoje ir skystojoje izoliacijoje prasideda ar suintensyvėja dalinių išlydžių procesai [C5]. Vykstant daliniams išlydžiams, blogėja elektros įrenginių izoliacinės savybės, izoliacinėje alyvoje daugėja įvairių dujų, yra veikiami didėja kietosios izoliacijos mikroertmių paviršiai, o kartu spartėja senėjimo procesai [C12, C13, C21]. Viršįtampių poveikį izoliacijai galima nagrinėti sudarant izoliacijos modelį, kuris įvertina dalinių išlydžių procesą. Elektros įrenginio izoliacijoje, veikiant viršįtampiams, intensyvėja daliniai išlydžiai. Dalinių išlydžių lygis izoliacijai senstant didėja vidutiniškai 5–8 % per metus [C5].

Elektros energetikos sistemos veikimo patikimumas glaudžiai susijęs su sistemos elektros įrenginių darbu. Jiems įvertinti ir atsirandantiems defektams prognozuoti taikomi įvairūs periodinės ar nuolatinės kontrolės metodai [C4-C6, C8-C10, C12-C17, C19-C21]. Apžvelgus daugelio užsienio ir Lietuvos mokslininkų [C17, C18, C19] šios krypties atliktus darbus, matyti, kad didžioji

dalis metodų ir priemonių registruoja atsirandančių defektų generuojamus trikdžius (dalinius išlydžius, vibraciją, ultragarsą ir kt.) ir kontroliuoja įvairius dėl defektų atsiradusius šalutinius veiksnius (išsiskyrusių dujų kiekį, izoliacijos nuostolių kampo tgδ pokytį, vandens kiekį, rūgštingumą ir kt.).

Viršįtampių lygio ir trukmės poveikio izoliacijai charakteristika skirtingais aspektais tyrinėjo įvairūs autoriai [C1, C18]. Izoliacijos resursui įvertinti atlikti eksperimentai, siekiant nustatyti izoliacijos atsparumo iki pažaidos priklausomybę nuo poveikio trukmės ir temperatūros [C18]. Tokie tyrimai atliekami tam, kad būtų galima įvertinti, kaip izoliacinių medžiagų atsparumas priklausomas nuo įtampos poveikio trukmės (voltsekundinė charakteristika), o kartu ir nustatyti ribinį izoliacijos resursą. Elektros energetikos sistemoje skirtingose elektros tinklo vietose eksploatuojami įrenginiai yra veikiami skirtingų parametrų veiksnių (viršįtampių amplitudė, poveikio trukmė, pasikartojimo dažnis, perkrovos ir kt.). Todėl elektros įrenginių izoliacijos senėjimo procesai vyksta skirtingai. Be to, įvairiose elektros tinklo vietose viršįtampių parametrai, dėl elektros tinklo konfigūracijos, techninių charakteristikų, vykstančių sudėtingų fizikinių reiškinių pasiskirstę netolygiai. Antrinių elektros įrenginių izoliacijos kokybinių charakteristikų kontrolė, atliekama periodiškai ar nuolatos, gali parodyti įrenginio būklę, tačiau veiksnių pobūdis ir įtaka dar lieka neišaiškinti [C4, C10, C13, C16, C20]. Registruojant veikiančių veiksnių charakteristikas (viršįtampių amplitudes ir poveikio trukmę) ir sinchroniškai jų poveikio pasekmes (dalinių išlydžių charakteristikas: tariamąjį krūvį, išlydžio sroves, pasikartojimo dažnį ir kt.), galima aptikti elektros įrenginio defektus pradinėje stadijoje.

### **Tyrimų tikslas ir uždaviniai**

Pagrindinis darbų tikslas – sukurti elektros tinkle vykstančių viršįtampių pereinamųjų procesų poveikio elektros įrenginių izoliacijai skaitmeninį modelį, toje izoliacijoje atsirandantiems defektams aptikti.

Darbe sprendžiami uždaviniai:

- elektros tinklo skaitmeninio modelio sukūrimas viršįtampių pereinamiesiems procesams modeliuoti ir jų parametrų pasiskirstymui nustatyti;
- viršįtampius ribojančių priemonių skaitmeninio modelio ir įtakos viršįtampių parametrų pasiskirstymui elektros tinkle tyrimas;
- elektros įrenginių popieriaus ir alyvos izoliacijoje vykstančių procesų modelio sudarymas ir defektų įtakos dalinių išlydžių parametrams įvertinimas;
- veikiančių viršįtampių įtakos dalinių išlydžių izoliacijoje parametrų tyrimas;
- viršįtampių parametrų ir jų poveikio trukmės registravimas bei resurso išnaudojimo prognozė.

### **Darbų naujumas ir praktinė reikšmė**

Pasiūlytas metodas elektros įrenginių izoliacijai defektuoti pagal registruojamų viršįtampių parametrus.

Sudaryti skaitmeniniai kombinuoto oro ir kabelių elektros tinklo modeliai su ribotuvais, viršįtampių pasiskirstymui elektros tinkle įvertinti, veikiant įvairiems vidiniams ir išoriniams trikdžiams.

Sudarytas metodas įrenginių izoliacijos resurso išnaudojimui prognozuoti pagal registruojamą izoliaciją veikiančių veiksmų pobūdį. Rezultatai gali būti pritaikyti kuriant naujas nuolatinės elektros įrenginių būklės įvertinimo ir defektų aptikimo pradinėje stadijoje sistemas.

Viršįtampių ribotuvų darbo sąlygų tyrimai izoliuotos ir išemintos neutralės tinkle įgalino sudaryti viršįtampių ribotuvų parinkimo ir išdėstymo elektros tinkle metodiką, kuri yra aprobuota ir taikoma parenkant viršįtampių ribotuvus Lietuvos elektros energetikos sistemoje.

## II. VIRŠĮTAMPIŲ PEREINAMŪJŲ PROCESŲ MODELIAVIMAS

Viršįtampių pereinamųjų procesų elektros sistemose modeliavimas ir jų pasiskirstymo ir poveikio trukmės charakteristikų prognozavimas yra svarbus uždavinys, parenkant izoliacijos lygį, įvertinant apsaugos nuo viršįtampių priemonių efektyvumą ir darbo sąlygas, taip pat įvertinant jų poveikį izoliacijos senėjimo procesams. Viršįtampių parametrų skirstiniui nustatyti, būtina apskaičiuoti ir išanalizuoti gana daug atsitiktinių procesų [C7].

Viršįtampiams modeliuoti reikia sudaryti elektros tinklų skaičiuojamąją schemą, apskaičiuoti jos elementų parametrus ir pasirinktu metodu, sprendžiant elektromagnetinių procesų lygtis, apskaičiuoti galimąjį viršįtampių lygį ir poveikio trukmę, atsižvelgiant į juos sukėlusias priežastis. Pagal modeliavimo rezultatus galima nustatyti, kokie įtampų lygiai ir jų poveikio trukmė elektros tinkluose gali būti pavojingi elektros įrenginių izoliacijai bei kokias apsaugos priemones efektyviausia naudoti ir kaip jas išdėstyti elektros tinkle [8, 15, 17, 33, 34].

Sudarant elektros tinklo skaitmeninį modelį turi būti įvertinti įvairūs veiksniai, darantys įtaką pereinamajam procesui. Proceso pobūdžiui ir trukmei turi įtakos elektros tinklo schemos konfigūracija ir linijos atkarpų ilgiai bei parametrų priklausomybės nuo dažnio (paviršiaus reiškinys), o aukštosios įtampos sistemoje – vainikinis išlydis [C2, C3].

Elektros tinklas yra sutelktųjų ir paskirstytųjų talpos ir laidžio ir varžos ir induktyvumo elementų junginys, turintis virpamojo kontūro savybių. Normalaus darbo metu šios tinklo savybės nepasireiškia. Įtampa neviršija maksimaliai leistinos elektros tinklo įtampos  $U_{md}$ . Atsiradus kokiam nors parametrų pokyčiui (linijos ar kito elektros sistemos elemento įjungimas ar atjungimas, trumpasis jungimas, žaibo išlydis ir pan.), staigiai pakinta tinklo struktūra ir dėl tinklo elementuose sukauptos elektrinės ir magnetinės energijos persiskirstymo ar žaibo krūvio nutekėjimo, atsiranda virpamieji procesai. Dėl šių pereinamųjų procesų įtampa padidėja ir viršija  $U_{md}$ . Įtampos padidėjimas virš  $U_{md}$  vadinamas viršįtampiu. Viršįtampiai pagal poveikio vietą skirstomi į

fazinius, veikiančius izoliaciją tarp fazės ir žemės, tarpfazinius, veikiančius tarpfazinę izoliaciją, tarpvijinius, veikiančius vijų izoliaciją, ir tarpkontaktinius, veikiančius atjungtų ar atjungiančių aparatų izoliaciją tarp kontaktų [M1].

Viršįtampiai apibūdinami – maksimaliaja verte  $U_{\max}$  arba smūginio koeficientu  $k_v = U_{\max}/U_{\text{md}}$ , poveikio izoliacijai trukme, pereinamojo proceso kreivės forma ir veikimo zona. Tiriant viršįtampius elektros sistemose yra sudaromos skaičiuojamosios schemos matematinis modelis ir parenkami lygčių sprendimo metodai [M1].

Linijoje laiduose vykstančius elektromagnetinius procesus laiduose tarpusavyje sieja bendri magnetiniai srautai ir elektriniai krūvių laukai. Daugialaidės linijos modelio įtampas ir srovės aprašo matricinės telegrafinės lygtys, kuriose parametrai yra savitųjų pilnutinių varžų ir laidžių matricos. Parametrai linijos telegrafinėms lygtims surandami išsprendus elektromagnetinio lauko diferencialines Maxwello lygtis. Joms spręsti būtinos ribinės sąlygos nustatomos pagal modeliuojamos elektros linijos konstrukcinius matmenis bei laidų ir aplinkos lyginamuosius parametrus [36]. Be to, modelio linijos priklauso nuo to, kaip kinta srovės arba koks yra jų kitimo dažnis. Todėl pradinės uždavinio sąlygas tikslinga supaprastinti, laikant, kad linijoje teka kintamosios stacionariosios srovės. Taip sprendžiant, galima gauti linijos telegrafines lygtis [9, M1].

Tiriant viršįtampių pasiskirstymą skirstykloje, sudaryta iš linijos atsklidusių elektromagnetinių bangų struktūra ir jų ribiniai parametrai. Iš linijos Atsklidusių elektromagnetinių bangų amplitudę riboja linijos izoliacija. Įvykus žaibo išlydžiui į apsauginį laidą, atramą ar šalia linijos, o izoliacija nepramušta, tai visa elektromagnetinė banga atsklinda į pastotę. 110–330 kV pastotės viršįtampių ir ribotuvų darbo sąlygoms tirti yra numatyta skaičiavimų strategija, kuri leidžia apskaičiuoti didžiausias įrenginių izoliaciją veikiančių įtampų reikšmes [22].

Izoliuotos neutralės tinkle viršįtampių pereinamieji procesai gali vykti dėl įvairių vidinių ir išorinių trikdžių. Izoliuotos neutralės tinkle viršįtampių pereinamasis procesas gali vykti įžemėjus vienai fazei, pakartotinai užsidegus lankui įžemėjimo vietoje, atjungiant transformatorių veikiantį tuščiaja veika, atjungiant kondensatorių baterijas, įjungiant liniją, susidarius tinkle rezonansui ar ferorezonansui. Viršįtampių lygis priklauso nuo juos sukeliančių priežasčių bei schemos parametru – elektros linijų ilgio, jų konstrukcijų, apkrovos ir įtampos lygio elektros tinkle. Pavojingiausi izoliuotos neutralės tinkle (didžiausioji vertė) viršįtampiai būna, įžemėjus fazei bei pakartotinai užsidegus lankui įžemėjimo vietoje ir jungiant linijas, kai tinkle yra įžemėjimas [13, 33].

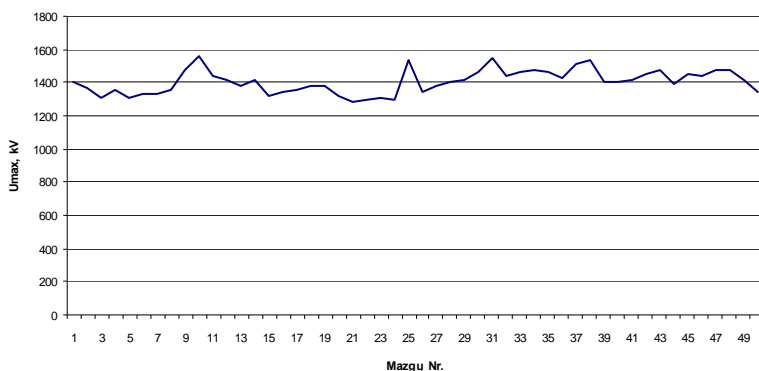
Elektromagnetinė viršįtampių banga susiformavusi linijoje dėl jos jungimo arba dėl žaibo išlydžio į liniją, linijos atramą ar šalia linijos atsklidusi į skirstyklą, jos elementuose sukelia pereinamąjį procesą. Viršįtampių tyrimai buvo atliekami 110–330 kV transformatorinių pastočių skirstyklose modeliuojant įvairaus pobūdžio elektromagnetines bangas [3, 12, 22, 34].

Modeliuojant žaibo išlydžio sukeltų viršįtampių pereinamuosius procesus pastotės skirstykloje, sudaromas detalus skaitmeninis modelis pagal geometrinę pastotės elementų išdėstymo schemą. Schemos elementai matavimo ir galios transformatoriai modeliuojami ekvivalentinėmis talpomis, šynos linijų atkarpomis, prie pastotės prijungtos linijos banginėmis varžomis, nes, modeliuojant atmosferinių viršįtampių pereinamuosius procesus viršįtampių pereinamasis procesas trunka kelis šimtus mikrosekundžių, o elektromagnetinės bangos atsispindėjusios nuo kito linijų galo, nespėja sugrižti ir įtakos pereinamajam procesui pastotėje beveik neturi [8, M1].

Schemos atkarpos modeliuojamos paskirstytaisiais parametrais. Paskirstytųjų parametru grandinės modelyje apibūdinamos [8]:

- skirtingais tiesioginės ir nulinės sekos elektromagnetinių bangų sklaidimo greičiais;
- elektromagnetinės bangos gesimu dėl linijos bei žemės varžos;
- linijų be atspindžių – banginėmis varžomis.
- netiesinių elementų – voltamperine charakteristika.

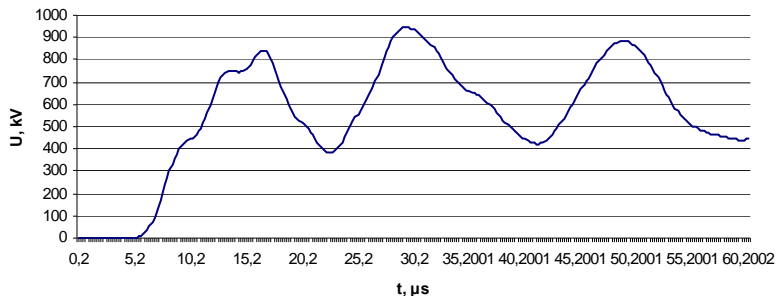
Viršįtampių pasiskirstymas 330 kV skirstykloje, kurios skaitmeninį modelį sudaro 52 mazgai parodytas 1 pav., o viršįtampių veikiančių skirstyklos transformatoriaus izoliaciją, pereinamasis procesas parodytas 2 pav.



1 pav. Maksimaliųjų viršįtampių pasiskirstymas 330 kV įtampos schemoje be ribotuvų pažymėtuose taškuose (žaibo sukeltos iš linijos atsklidusios viršįtampių elektromagnetinės bangos forma 1,2/50, bangos amplitudė 2000 kV)

Įtampos pereinamasis procesas transformatoriaus įvade veikiant žaibo viršįtampių 1,2/50 mikrosekundžių elektromagnetinei bangai, parodyti 2 pav.

Viršįtampiai, veikiantys įrenginių izoliaciją, sukelia dalinius išlydžius, kurių parametru priklauso nuo viršįtampių amplitudės poveikio trukmės ir defekto dydžio [27].



2 pav. Pereinamasis procesas transformatoriaus įvade, kai veikia 1,2/50 formos banga, o galios transformatoriaus izoliacija apsaugota viršįtampių ribotuvo, kurio ilgalaikė leistinoji įtampa  $U_c$  yra 226 kV

Skaitmeninis elektros tinklo modelis gali būti taikomas ir žemosios įtampos elektros tinkle modeliuojant žaibo išlydžio sukeltus viršįtampius, kurie pavojingi mikroelektronikos įrangai. Jų poveikis ir charakteristikos išanalizuotos [2, 7, 32, M1] ir įvertintos eksperimentiškai.

Skaitmeninio elektros tinklo modelio taikymas yra svarbus pereinamųjų procesų charakteristikoms nustatyti [3, 10, 26] ir viršįtampių poveikio izoliacijai pasekmės įvertinti. Be to, viršįtampių pereinamųjų procesų skaitmeninis modelis reikalingas apsaugos nuo viršįtampių priemonių efektyvumui nustatyti ir optimalioms vietoms ir parametrams parinkti [7, 8, 12, 17, 22, 34, 36] izoliuotos ir įžemintos neutralės elektros tinkle.

### III. APSAUGOS NUO VIRŠĮTAMPIŲ PRIEMONIŲ EFEKTYVUMAS

Elektros įrenginių izoliacijos apsaugai naudojamos specialios apsaugos priemonės. Šiuolaikinės apsaugos nuo viršįtampių priemonės, naudojamos visų įtampų tinkluose, riboja visus viršįtampius, kurie susidaro dėl vidinių elektros tinklo parametrų pokyčių ir dėl išorinio žaibo išlydžio sukeltų viršįtampių [2, 5, 7, 8, 12, 15, 17, 22, 32, 33, 34, 36 ir M1].

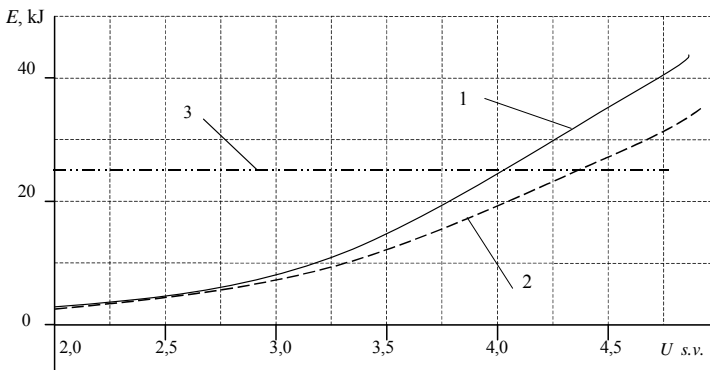
Šiuo metu visų įtampų tinkluose apsaugai nuo viršįtampių labai plačiai pradėta naudoti viršįtampių ribotuvus. Viršįtampių ribotuvų voltamperinė charakteristika yra ryškiai netiesinė. Tokių apsauginių įrenginių (be kibirkštinių tarpelių) darbo režimas yra paprastas. Dirbant normaliu režimu per ribotuvą srovė beveik neteka. Atsiradus tinkle viršįtampiams, per ribotuvą tekanti srovė didėja tolygiai, be staigių šuolių, kaip iškroviklyje, todėl viršįtampių per einamasis procesas yra švelnesnis, tačiau apsauginė zona siauresnė [12].

Viršįtampių procesams elektros tinkle su viršįtampių ribotuvais modeliuoti sudarytos elektros tinklo skaitmeninio modelio schemas, apskaičiuoti jų elementų parametrai ir pasirinktas rekurentinis skaičiavimo metodas elektromagnetinių procesų lygtims spręsti. Sudaryta įrenginių su netiesinėmis voltamperinėmis charakteristikomis lygčių sprendimo metodika [12, 17].

Viršįtampių parametrų statistiniams skaičiavimams tikslinga naudoti greitesnius skaitmeninius diferencialinių lygčių sprendimo metodus. Prieaugių ekvivalentiškumo diferencialinių lygčių integravimo žingsniuose savybė leidžia efektyviai šiam tikslui naudoti rekurentinį pereinamųjų procesų skaičiavimo metodą [17].

Viršįtampių ribotuvų parametrai parenkami skirtingai izoliuotos ir įžemintos neutralės elektros tinklams. Elektros tinklo skaitmeninis modelis priderinamas prie neutralės režimo. Izoliuotos neutralės tinkle jautriausia viršįtampiams yra kabelių izoliacija. Sudarant elektros tinklo skaitmeninį modelį, reikia apimti visą galvaniškai sujungtą elektros tinklą. Šiuo atveju viršįtampių ribotuvų vietos parinkimas ir energetinė geba priklauso nuo elektros tinklo konfigūracijos.

Viršįtampių ribotuvų energetinei gebai įvertinti izoliuotos neutralės tinkle buvo apskaičiuotas ribotuvui tenkantis išspinduliuojamos energijos kiekis esant komutavimo viršįtampiams izoliuotos neutralės tinkle. Ribotuvo išspinduliuojamo energijos kiekio priklausomybė nuo viršįtampių lygio parodyta 3 pav. [17].



3 pav. Ribotuvo išspinduliuojamos energijos kiekis izoliuotos neutralės tinkle: 1 – ribotuvui 10 kV tinkle; 2 – ribotuvui 6 kV tinkle; 3 – leistinasis išspinduliuojamos energijos kiekis

Parentant ribotuvus kabelių tinkle turi būti įvertinti realūs viršįtampių parametrai, apskaičiuojant ar nustatant jų lygį regulatoriais. Tyrimais nustatyta, kad, kai viršįtampių lygis 10 kV elektros tinkle yra aukštesnis kaip  $4U_{mf}$ , ribotuvo darbo sąlygos gali būti sunkesnės už bandomąsias. Tokiame tinkle turi

būti galingesni ribotuvai arba keli jų komplektai. Izoliuotos neutralės tinkle, esant išmėjusiai fazei, rekomenduojamos ilgesnės pauzės tarp kartotinių komutacijų [17].

Izoliuotos neutralės tinkle eksploatuojamiems viršįtampių ribotuvams pavojingiausias režimas yra daugkartinis išmėjimas. Naudojantis elektros tinklo skaitmeniniu modeliu, galima analizuoti sudėtingas situacijas elektros tinkle. Tiriant tokio pobūdžio viršįtampių lygį ir viršįtampių ribotuvų darbo sąlygas, turi būti sudarytas gana tikslus matematinis tinklo modelis, kuris įvertintų visus gana akivaizdžiai viršįtampių lygį veikiančius veiksnius, tinklo parametrų priklausomybę nuo dažnio, įvairius galimus tinklo režimus, fazių išjungimą ne tuo pačiu metu, daugkartinį lanko užsidegimą išmėjimo vietoje ir pan. [8].

Analizuojamame 35 kV įtampos izoliuotos neutralės elektros tinkle pakartotinių elektros lanko kibirkščiavimo metu viršįtampių vertės gali būti net 3 kartus didesnės už  $U_m$  vertes. Tai sudarytų net 170 kV, o ribotuvų varistoriai, mažindami tokias įtampas daug kartų, galėtų neleistinai įkaisti, gerokai pasikeistų jų voltamperinės charakteristikos, galiausiai jie prarastų terminį stabilumą.

Panašesniai tinkle vykstančių procesų vaizdui gauti ir linijoms modeliuoti buvo panaudotas tikslesnis matematinis modelis, kuriuo buvo įvertinti beveik visi linijose vykstantys elektromagnetinių procesų disipaciniai reiškiniai [8].

Modelyje galima pastebėti, kad elektromagnetinės bangos silpsta, ypač nulinėje sekoje. Jos kinta plačiame dažnių diapazone: nuo  $10^4$  iki  $10^8$  MHz. Pereinamojoje charakteristikoje tai pasireiškia elektromagnetinės bangos vėlinimus nuo 10 nanosekundžių iki 1 mikrosekundės. Tai lemia elektromagnetinių bangų frontų formavimą ir procesų dažnius vienfazių išmėjimų metu.

Išmėjimų procesams modeliuoti nepakanka tinkamai atspindėti vien tai kaip elektromagnetinės bangos linijose silpsta ir kaip mažėja jų amplitudės. Po trumpinimo nuo išmėjusios vietos plinta elektromagnetinė banga su gana stačiu frontu, kurio kitimo vėlesniame bangos susiformavimo procese tinkamai neįvertinus, galima gauti iškreiptą, neadekvatų maksimaliųjų verčių susidarymo vaizdą. Tai ypač svarbu nustatant ribotuvuose išsiskyrusią energiją [8].

Elektros tinklo modelyje pakartotino pažeistosios fazės išmėjimo viršįtampiai buvo modeliuojami trimis etapais:

- pirmuoju etapu pasiekiamas stacionarus ir normalus prieš fazės trumpinimą režimas: prijungiamas tinklas ir išlaukiama, kol procesas modelyje nusistovės iki stacionarus;

- antruoju etapu atliekamas procesų modeliavimas po fazės trumpinimo ir, parinkus elektros lanko gesimo momentą, kai srovė elektros lanke keičia kryptį, surandamas liekamasis tinkle krūvis;

- trečiuoju etapu modeliuojamas kartotinis fazės trumpinimas su krūvio indukuota įtampa tinklo nulinėje sekoje.

Pritaikius elektros tinklo skaitmeninį modelį ir išanalizavus viršįtampių procesus ir ribotuvų stabilumo sąlygas daugkartinių įžemėjimų metu izoliuotos neutralės tinkle buvo nustatyta, kad parenkant viršįtampių ribotuvų parametrus būtina atsižvelgti į realiai elektros tinkle galimus daugkartinius įžemėjimus. Vidiniams viršįtampių ribotuvams ilgalaikė leistinoji įtampa turi būti aukštesnė nei linijoje esantiems ribotuvams [8].

Įžemintos neutralės 110–330 kV įtampos elektros tinkle viršįtampių ribotuvų parinkimo strategija yra kitokia. Tokiame elektros tinkle vienfaziai įžemėjimai negalimi, nes įžemėjus vienai fazei įvyksta trumpasis jungimas [12, 15, 36].

110–330 kV įtampos elektros tinklo įrenginių izoliacijos patikimumui užtikrinti turi būti įrengtos apsaugos priemonės nuo viršįtampių (iškrovikliai, viršįtampių ribotuvai ir kt.), pažeminančios viršįtampius tiek, kad jų amplitudė ir poveikio trukmė neviršytų standartizuotų leistinųjų ir bandomųjų verčių.

Projektuojant 110–330 kV įtampos elektros tinklą, apsaugos priemonės (viršįtampių ribotuvai) turi būti parenkamos taip, kad didžiausios viršįtampių vertės neviršytų skirstykloje esančių įrenginių atitinkamų viršįtampiams bandomųjų įtampų. Parinkant pakanka atlikti deterministinio pobūdžio skaičiavimus ir surasti didžiausias galimas tinkle įtampas [12, 15, 36].

Elektros energetikos sistemos aukštesnės kaip 110 kV įtampos įrenginių izoliacijos apsauga yra orientuota į visus galinčius susiformuoti viršįtampius. Ventiliniai iškrovikliai, naudojami iki 110 kV įtampos elektros tinkle į komutacinius viršįtampius nereaguoja, nes jų prisijungimo įtampa yra aukštesnė už komutacinių viršįtampių lygį. Viršįtampių ribotuvai pradeda riboti viršįtampius tuomet, kai tinkle įtampa peržengia ilgalaikę viršįtampių ribotuvo leistinąją įtampą  $U_c$  [8, M1].

Nustatant viršįtampių ribotuvų darbo sąlygas ir parenkant jų vietas, būtina atlikti reikiamus pereinamųjų procesų, sukeltų žaibo išlydžio bei įvairių komutacijų metu, skaičiavimus ir jų analizę. Parenkant viršįtampių ribotuvų parametrus viršįtampių lygio ir ribotuvo sroviniai parametrai nustatomi modeliuojant įvairius režimus [12, 15, 36].

Svarbiausia yra viršįtampių ribotuvo stabilumo charakteristika, kuri įvertinama stabilumo koeficientu  $T$ . Norint apsaugoti ribotuvą nuo perkaitimų, reikia parinkti tokią  $U_r$  vardinės įtampos vertę ir atitinkamai  $U_c$  įtampą, kad komutacinis viršįtampis neviršytų lygio, apibrėžto terminio stabilumo faktoriaus ( $k_{TOV}$ ) dydžiu.

Koordinuojant ribotuvų parametrus ir izoliacijos impulsinį atsparumą žaibo viršįtampiams, reikia pirmiausia atsižvelgti į pastotės ir jos apsauginio įžeminimo įrenginio konstrukciją bei šiuos patikimumo reikalavimus [12, 15, 36]:

– jeigu pastotė maitina vartotojus vienu transformatoriumi ir yra be skirstyklos, tada pagrindinis veiksnys, lemiantis esamo vienintelio ribotuvo (ribotuvų komplekto) parametru pasirinkimą, dažnai yra tik žaibo viršįtampis.

Tuomet, padidinus  $U_c$  parametą (su juo automatiškai didėja ir liekamosios įtampos) iki didžiausios leistinos vertės pagal žaibo viršįtampius, dažniausiai yra pasiekiamas lygis, tenkinantis ir komutacinių viršįtampių didžiausias vertes;

– jeigu pastotėje yra skirstykla ir kelios išeinančios linijos, tuomet linijų ribotuvai, parinkti pagal išorinės izoliacijos elektrinį atsparumą, palengvina ir prie transformatorių esančių ribotuvų darbo sąlygas. Ribotuvų prie transformatoriaus  $U_c$  gali būti aukštesnė. Kartu sumažėja tikimybė, kad ribotuvas bus termiškai perkrautas vidaus viršįtampiais;

– jeigu pirmosios linijų atramos įžemintuvai yra prijungtas prie pastotės įžeminimų tinklo, tuomet, po žaibo išlydžio į šią atramą ir elektros lankui pramušus kurios nors fazės izoliaciją, pastotės įrenginius pasiekia viršįtampio banga faziniu laidu ir įžemiklio tinklu.

Ypač sudėtinga viršįtampių ribotuvams situacija susidaro oro linijose su kabelių tarpais. Oro linijose su kabeliniais tarpais padidėja žaibo išlydžio į oro liniją ar atramą sukeltų viršįtampių pavojus kabelių izoliacijai. Šie labai staus fronto viršįtampiai veikia kabelio izoliaciją tiesiogiai, jeigu žaibo išlydis sukėlęs elektromagnetinę viršįtampių bangą susiformavo arti oro linijos perėjimo į kabelį vietas [15, 36].

Ribotuvai viršįtampių lygį sumažina apie 20–35 % ir kartu padidina apsaugos efektyvumą. Tačiau ribotuvų apsaugos zona susiaurėja, palyginus su iškroviklių apsaugos zona. Gamintojai rekomenduoja ribotuvus įrengti arčiau saugomo objekto. Prie transformatoriaus įrengtas iškroviklis saugo visą pastotę, nes jo apsauginė zona, įvertinus tai, kad kitų pastotės įrenginių izoliacija atsparesnė viršįtampiams (bandomosios impulsinės įtampos aukštesnės), yra 120–130 m. Ribotuvų saugoma zona yra siauresnė dėl to, kad ribotuvai viršįtampius riboja tolygiai. Oro linijos su kabeliniais tarpais negalima eksploatuoti be apsaugos nuo viršįtampių priemonių. Kabelinių tarpų apsaugai nuo komutacinių ir atmosferinių viršįtampių iš abiejų, tarpo perėjimo iš oro linijos į kabelį pusį būtina įrengti viršįtampių ribotuvus [12, 15, 36].

#### **IV. ĮRENGINIŲ IZOLIACIJOJE VYKSTANČIŲ PROCESŲ MODELIAVIMAS**

Elektros įrenginių kietojoje izoliacijoje ar sandūroje su laidininku gamybos proceso metu visuomet lieka įvairaus dydžio mikroertmių, o skystojoje izoliacinėje terpėje gali būti vandens lašelių, oro burbuliukų ar kietojo dielektriko dalelių. Nuo šių mikrodefektų dydžio priklauso izoliacinės medžiagos kokybė. Veikiant įtampai ar viršįtampiams šiose mikroertmėse ar priemaišose, dėl skirtingos dielektrinės skvarbos lokaliose izoliacijos vietose, elektrinis laukas išsikreipia ir mikroertmėse vyksta išlydžio procesai. Dalinių išlydžių procesas įrenginių izoliacijoje priklauso nuo įtampos, aplinkos ir įrenginio darbo temperatūros bei kitų atsitiktinių parametų [C5]. Įrenginių vidinės izoliacijos atsparumo mažėjimą lemia dalinių išlydžių intensyvumas bei

jų lygis, senėjimas dėl įtampos, šilumos, drėgmės ir oksidacijos poveikio. Dėl viršįtampių poveikio susidarę intensyvesni daliniai išlydžiai izoliacijoje palieka inertišku poveikio pėdsaką – įvairių degimo produktų ir išlydžių metu susidariusi įvairių dujų [6, 27, 29].

Kompleksiškai analizuojant elektros įrenginių izoliaciją veikiančius veiksnius ir nustačius patikimą ryšį tarp jų, galima nustatyti atsirandančius pokyčius. Kontroliuojant liekamųjų produktų pokytį ir koncentraciją galima įvertinti poveikio mastą ir pobūdį. Dėl veikiančių veiksnių atsirandančių liekamųjų produktų koncentracijai nustatyti sudaromas procesus izoliacijoje imituojantis modelis. Naudojant tokį modelį galima išanalizuoti veikiančių veiksnių įtaką dalinių išlydžių charakteristikoms bei nustatyti funkcinius ryšius tarp veiksnių ir liekamųjų produktų koncentracijos [18, 19, 27].

Defektų pobūdis kabelių linijų izoliacijoje gali būti nustatytas analizuojant pradinį procesus ar pereinamąsias charakteristikas, analizei pritaikius skaitmeninius filtrus [9, 14, 16, 20, 23, 24, 25]. Pagal pereinamųjų procesų pokytį tiksliai modeliuojant elektros tinklą gali būti identifikuoti kabelio defektai.

Daugumos aukštosios įtampos energetikos įrenginių izoliaciją sudaro kombinuota izoliacija: kietoji ir skystoji, kietoji ir dujinė ir pan. Modeliuojant izoliacijoje vykstančius procesus vieno komponento imitacinis modelis nepakankamai tiksliai imituoja vienoje ar kitoje terpėje vykstančius išlydžius bei dėl jų poveikio susidariusias dujas ar lokaliuosius perkaitimo židinius [18, 27].

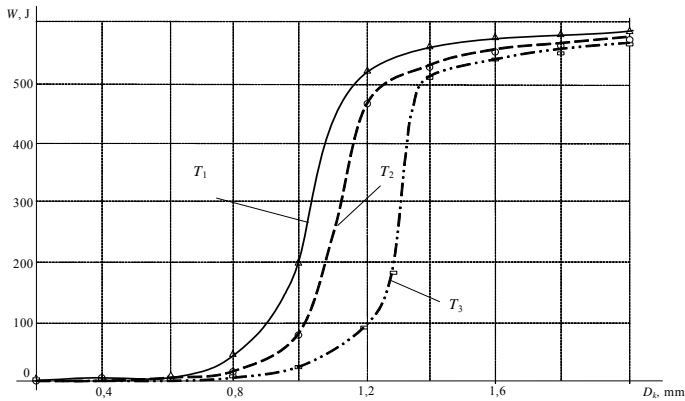
Skystoje terpėje defektas gali būti vandens lašelis, dujų burbuliukas ar kietojo dielektriko atplaiša. Bendruoju atveju skystoje terpėje defektas gali būti modeliuojamas kaip dielektrinė sfera dielektrike [27].

Kylant įtampai galimos įvairios situacijos, nes išlydis gali būti tik vienoje terpėje (kietojoje ar skystoje) arba abejose. Defekto vietą ir pradžią lemia daugelis veiksnių. Modeliuojant procesus elektros įrenginių izoliacijoje veikiant viršįtampiams turi būti įvertintos visos galimos situacijos.

Dalinių išlydžių modelio procesams izoliacijoje įvertinti yra taikomi keli standartizuoti integraliniai parametrai. Standartizuoti integraliniai parametrai apibūdinantys dalinių išlydžių procesą, yra tariamasis krūvis, vidutinė srovė, kvadratinis greitis, dalinių išlydžių galia gali būti apskaičiuojami analizuojant izoliacijoje vykstančius procesus [21, 27].

Elektros įrenginyje atsiradęs mikrodefektas, veikiamas dalinių išlydžių energijos, didėja. Defektas įrenginių izoliacijoje gali kisti veikiamas įvairių veiksnių – įtampos, viršįtampių, temperatūros, drėgmės ir pan. Nuo šių veiksnių poveikio intensyvumo priklauso defekto kitimo greitis. Kintant mikrodefektų geometrijai atitinkamai kinta dalinių išlydžių bei jų poveikio pasekmių (dujų kiekio) parametrai. Panaudojus sudarytą modelį buvo nustatytos dalinių išlydžių charakteristikų priklausomybės nuo defekto geometrinių parametrų. Dalinių

išlydžių energijos kiekio priklausomybės nuo defekto geometrinių parametru dielektrike [27] parodytos 4 pav.



4 pav. Funkcinės dalinių išlydžių energijos priklausomybės nuo defekto geometrinių parametru:  $T_1=10^\circ\text{C}$ ;  $T_2=50^\circ\text{C}$ ;  $T_3=90^\circ\text{C}$

Gedimai įrenginiuose su popieriaus ir alyvos izoliacija atsiranda dėl struktūrinių pokyčių. Vienas silpniausių kombinuotosios izoliacijos komponentų yra alyva (skystoji terpė). Šio izoliacijos komponento pokyčiai susidaro veikiant įvairiems veiksniams: elektriniams (daliniai išlydžiai, stiprus elektrinis laukas ir pan.), šiluminiams (apvijų įkaitimas perkrovų ir trumpųjų jungimų metu ir pan.), vibracijai ir t. t.

Įrenginio su kombinuota izoliacija svarbi charakteristika, apibūdinanti skystosios izoliacijos būklę ir resurso išnaudojimą, yra dujų susidarymo koeficientas  $B_D$  [C12]. Sudarant kompleksinį izoliacijoje vykstančių procesų imitavimo modelį, svarbu tiksliai nustatyti šią charakteristiką. Dalinių išlydžių energijos skystyje išsisklaido į kelias dedamasias. Eksperimentiškai nustatyta [9], kad dalinių išlydžių energija skystajame dielektrike išsisklaido taip: 25 % energijos išspinduliuojama; 30 % energijos panaudojama išlydžio kanalui išplėsti; 3–4 % – jonizacijai; 6–8 % – poveikiui dielektriko paviršiumi.

Sudarytas kietos ir skystos komponentų izoliacijos modelis įgalina nustatyti dalinių išlydžių ir dujų, susidarančių išlydžių metu, kiekį. Periodiškai atliekant izoliacinės alyvos chromatografinę analizę, pagal izoliacijoje susidariusio dujų kiekio, pokytį galima nustatyti, kokia izoliacijos būklė, ar nėra akivaizdžių defektų [27, 29].

Dujų kiekis, susidaręs alyvos popieriaus izoliacijoje dėl dalinių išlydžių poveikio, priklauso nuo jų susidarymo sąlygų. Kadangi dalis susidariusių dujų ištirpsta alyvoje, tai didelę įtaką dujų susidarymo procese turi dalinių išlydžių pasikartojimo dažnis. Veikiant daliniams išlydžiams, kai jų pasikartojimo dažnis

yra didesnis kaip 3–4 impulsai per pusperiodį, skystojoje terpėje atsiranda dujų burbuliukų, o dalinių išlydžių procesas vyksta juose.

Pritaikius skaitmeninį izoliacijoje vykstančių procesų modelį bei energijos ir defekto priklausomybių aproksimavimą pagal eksponentinę funkciją, o energijos ir temperatūros – pagal tiesinę, dalinių išlydžių energija, įvertinus temperatūrą ir defekto dydį per pusperiodį, kietajame dielektrike gali būti apskaičiuojama pagal tokią formulę [27]:

$$W_{DI} = 0,0212 e^{9,07 \cdot d} \left\{ [1 + 0,0125(1 - 0,3585e^{-0,97 \cdot d})] - 0,0125(1 - 0,3585e^{-0,97 \cdot d}) T \right\}; \quad (1)$$

čia  $T$  – temperatūra, °C;  $d$  – defekto skersmuo, mm;  $W_{DI}$  – energija per pusperiodį dėl dalinių išlydžių poveikio, J.

Pritaikius tokį pat aproksimavimo principą skystajam dielektrikui energija dėl dalinių išlydžių poveikio gali būti apskaičiuojama taip:

$$W_{DI} = 0,0681 e^{9,332 \cdot d} \left\{ [1 + 0,0125(1 - 0,93e^{-2,17 \cdot d})] - 0,0125(1 - 0,93e^{-2,17 \cdot d}) T \right\}. \quad (2)$$

Defektas įrenginių izoliacijoje gali didėti veikiamas įvairių veiksnių – įtampos, viršįtampių, temperatūros, drėgmės ir pan. Nuo šių veiksnių poveikio intensyvumo priklauso defekto kitimo greitis. Pagal izoliacijoje susidariusio dujų kiekio pokytį galima nustatyti, kokia yra izoliacijos būklė, ar nėra akivaizdžių defektų.

Įvertinus energijos, temperatūros ir defekto ryšio priklausomybes, dujų kiekio pokytis gali būti apskaičiuojamas taip:

$$\Delta G = K_s B_D \Delta \tau_d 2,12 e^{9,07 \cdot d} \left\{ [1 + 0,0125(1 - 0,3585e^{-0,97 \cdot d})] - 0,0125(1 - 0,3585e^{-0,97 \cdot d}) T \right\}; \quad (3)$$

čia  $\Delta \tau_d$  – laiko intervalų skaičius, s.v.

Izoliacijos skaitmeninis modelis gali būti pritaikytas analizuojant dujų kiekio izoliacinėje alyvoje kitimo procesus ir nustatant defekto pobūdį. Be to, modelis gali būti pritaikytas registruojamų viršįtampių ir dalinių išlydžių pokyčiui, kai izoliacijoje atsiranda defektai, kompleksiskai įvertinti [27].

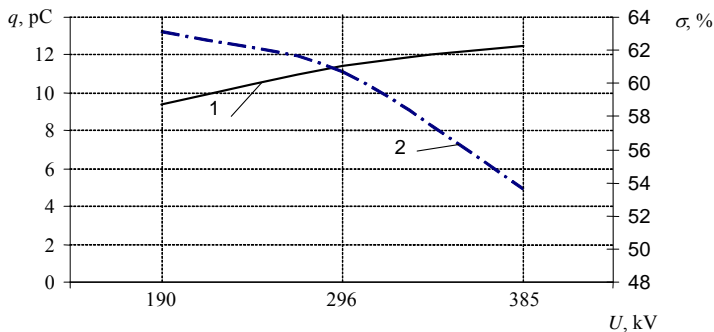
## **V. ĮRENGINIŲ IZOLIACIJĄ VEIKIANČIŲ VEIKSNIŲ IR VYKSTANČIŲ PROCESŲ IZOLIACIJOJE TARPUSAVIO RYŠIO TYRIMAS**

Dalinių išlydžių procesas įrenginių izoliacijoje priklauso nuo įtampos dydžio, aplinkos ir įrenginio darbo temperatūros bei kitų atsitiktinių parametrų. Kompleksiškai analizuojant elektros įrenginių izoliaciją veikiančius veiksnius ir nustatčius patikimą ryšį tarp jų, galima nustatyti atsirandančius pokyčius. Dalinių išlydžių procesui turi įtakos įtampos vertė, izoliacijos temperatūra bei drėgmės kiekis joje. Elektros įrenginių izoliacijos eksploatacijos trukmę, įvertinus dalinius išlydžius galima apytikriai apskaičiuoti pagal [C22].

Nuolatinei elektros įrenginių izoliacijos kontrolei įvertinant realias darbo sąlygas ir skirtingus viršįtampių parametrus reikalinga tikslesnė metodika ir veikiančių viršįtampių integralinių charakteristikų registracija [1, 5, 11].

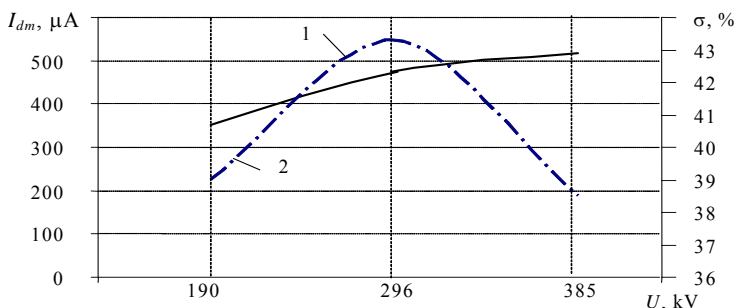
Defekto kibirkštinio tarpelio pramušimo įtampa apskaičiuojama pagal defekto skersmenį ir temperatūrą. Naudojant modelį apskaičiuojama maksimaliosios išsikrovimo srovės vertė  $I_{dm}$ , maksimalusis tariamasis krūvis  $q$ , suminis krūvis  $\Sigma q$  ir impulsų skaičius  $n$  per pusperiodį [21].

Sudarytos modelio parametru funkcinės priklausomybės nuo įtampos ir temperatūros  $f_p(U)$  ir  $f_p(t)$ . Funkcinės priklausomybės [21] nuo įtampos dalinių išlydžių (1) ir standartinio nuokrypio procentinės vertės (2) parodytos 7 pav.



7 pav. Maksimalių dalinių išlydžių (1) ir standartinio nuokrypio (2) priklausomybės nuo įtampos

Maksimaliosios dalinių išlydžių srovės (1) ir standartinio nuokrypio procentinės vertės (2) priklausomybės nuo įtampos parodytos 8 pav.



8 pav. Maksimaliosios dalinių išlydžių srovės (1) ir standartinio nuokrypio (2) priklausomybės nuo įtampos [21]

Galimus įrenginių izoliacijos defektus galima nustatyti lyginant nuolat registruojamų dalinių išlydžių parametrų, viršįtampių lygio matavimus. Nustatant dalinių išlydžių parametrų pokyčių priklausomybę nuo viršįtampių

lygio, taip pat kaupiant ir lyginant matavimų registracijas galima nustatyti izoliacijos senėjimo tendenciją ir prognozuoti galimus įrenginių izoliacijos defektus [19, 21, 28, 37].

Dalinių išlydžių padidėjimas mažina izoliacijos eksploataavimo trukmę. Įrenginio eksploatacijos pradžioje užregistruotas dalinių išlydžių lygis yra vienas iš kriterijų, patikimo darbo trukmei nustatyti. Reguliariai registruojant dalinių išlydžių parametrus galima nustatyti izoliacijos senėjimo tendenciją ir laiku prognozuoti resursui atkurti būtinus profilaktinius darbus [27].

Aukštosios įtampos įrenginių izoliacijos resursas yra faktinė eksploatacijos trukmė nuo pradinio momento  $t_0$  iki jos pažaidos (pramušimo) momento  $t_r$ . Aukštosios įtampos įrenginių izoliacijos būklę ir patikimo darbo trukmę lemia įvairūs energetikos sistemos veiksniai. Pagrindiniai įrenginius veikiantys veiksniai, turintys įtakos senėjimo procesų greičiui, yra viršįtampiai ir perkrovos. Viršįtampiai tiesiogiai veikia izoliaciją, didina dalinių išlydžių lygį, sąlygoja defektų atsiradimą ir jų didėjimą izoliacijoje ir pan. [1, 30].

Įvertinant izoliacijos resursą svarbu nustatyti veikiančios įtampos charakteristikas – maksimaliąją vertę, poveikio trukmę. Eksploatuojant elektros įrenginius, gali būti registruojamas viršįtampių lygis ir jų poveikio įrenginių izoliacijai trukmė sudarant jų poveikio integralines charakteristikas [1, 30].

Įrenginių izoliacijos kokybė yra apibūdinama trumposios ir visos bangos impulsine bandomąja įtampa, bandomąja 50 Hz vienos minutės aukštąja įtampa ir ilgalaikė leistinąja aukščiausiaja darbo įtampa. Per visą eksploataavimo trukmę įrenginį gali veikti įvairaus intensyvumo ir amplitudės žaibo išlydžio sukelti viršįtampiai, komutaciniai, rezonansiniai, ferorezonansiniai viršįtampiai ir trumpalaikiai įtampos padidėjimai, viršijantys maksimalią darbo įtampą dėl trumpųjų jungimų, įžemėjimo izoliuotos neutralės tinkle ir harmonikų. Kiekvienas viršįtampio poveikis palieka pėdsakus kietojoje ir skystojoje izoliacijoje. Izoliacijos resursas gali būti apibūdinamas veikiančios įtampos trukmės (voltsekundine) charakteristika [1, 30].

Įrenginio izoliacijos ribinė patikimo eksploataavimo voltsekundinė charakteristika gali būti sudaroma pagal gamintojo garantinius bandomųjų įtampų dydžius. Pagal įtampos, galinčios veikti izoliaciją, amplitudę gali būti sudaryta ribinė poveikio trukmė. Per visą įrenginio eksploatacijos trukmę veikiant izoliaciją trumpiems (iki 2  $\mu$ s) viršįtampiams, kurių amplitudė artima trumposios bangos impulso amplitudei, izoliacijos resursą trumpiesiems impulsams galima apskaičiuoti taip:

$$\tau_{2\Sigma} = k_2 \cdot n_2 \cdot \tau_2, \quad (4)$$

čia  $\tau_{2\Sigma}$  – trumposios bangos amplitudės ir trukmės viršįtampių veikiamos izoliacijos eksploataavimo trukmė;

$k_2$  – izoliacijos atsargos koeficientas trumpiesiems impulsams;

$n_2$  – trumposios bangos impulsų skaičius iki pažaidos;

$\tau_2$  – trumposios bangos impulso trukmė.

Visos bangos amplitudės ir trukmės (iki 50  $\mu$ s) viršįtampiams izoliacijos resursas gali būti įvertintas taip:

$$\tau_{50\Sigma} = k_{50} \cdot n_{50} \cdot \tau_{50}, \quad (5)$$

čia  $\tau_{50\Sigma}$  – izoliacijos eksploataavimo trukmė, veikiant izoliaciją visos bangos amplitudės ir trukmės viršįtampiams;

$k_{50}$  – izoliacijos atsargos koeficientas visos bangos impulsams;

$n_{50}$  – visos bangos impulsų skaičius iki pažaidos;

$\tau_{50}$  – visos bangos impulso trukmė.

Bandomosios 50 Hz dažnio įtampos (1 min) poveikio trukmės per visą eksploataavimo laikotarpį izoliacijos resursas gali būti įvertintas taip:

$$\tau_{1\Sigma} = k_1 \cdot n_1 \cdot \tau_1, \quad (6)$$

čia  $\tau_{1\Sigma}$  – izoliacijos eksploataacijos trukmė, veikiant izoliaciją bandomosios 1 minutės 50 Hz dažnio amplitudės viršįtampiams;

$k_1$  – izoliacijos atsargos koeficientas 50 Hz dažnio bandomajai įtampai;

$n_1$  – 1 minutės 50 Hz dažnio bandomosios įtampos bandymų skaičius iki pažaidos;

$\tau_1$  – 50 Hz dažnio bandomosios įtampos poveikio trukmė.

Nustačius įrenginio izoliacijos ribines trukmės vertes atitinkamoms fiksuotoms galimų įtampų vertėms, registruojant viršįtampių lygį ir trukmę galima nustatyti santykinį izoliacijos resurso išnaudojimą. Izoliacijos resurso išnaudojimas nustatomas įvairiems eksploataavimo metu veikiančių viršįtampių intervalams. Paprasčiausiai izoliacijos resurso išnaudojimą įvertinti galima pritaikius ištiesintą voltsekundinę charakteristiką. Analizuojant registruotų viršįtampių charakteristikas pagal diapazonus galima nustatyti kokio pobūdžio viršįtampiai vyrauja tiriamajame elektros tinkle, kokios yra įrenginių izoliacijos darbo sąlygos ir kokio pobūdžio profilaktinius bandymus ar remontą tikslinga atlikti ir užtikrinti patikimą įrenginių, eksploatuojamų registratoriaus aprėpties zonoje, izoliacijos darbą [11, 13, 30, 31, 38].

## VI. APIBENDRINIMAS

1. Sukurtas skaitmeninis elektros tinklo su įžeminta ir izoliuota neutrale modelis viršįtampių pereinamiesiems procesams modeliuoti ir analizuoti. Modelyje efektyviai sprendžiamos sudėtingo mazgo (su tiesiniais ir netiesiniais elementais) diferencialinės lygtys. Skaitmeniniame elektros tinklo modelyje įvertinta linijos ir žemės parametų priklausomybė nuo dažnio, o aukštosios įtampos modelyje įvertintas vainikinis išlydis.

2. Pritaikius elektros tinklo skaitmeninį modelį ir išanalizavus viršįtampių procesus ir ribotuvų stabilumo sąlygas daugkartinių įžemėjimų metu izoliuotos neutralės tinkle buvo nustatyta, kad, parenkant viršįtampių ribotuvų parametrus, būtina atsižvelgti į realiai elektros tinkle galimus daugkartinius įžemėjimus.

3. Sudarytas popieriaus ir alyvos izoliacijos skaitmeninis modelis dalinių išlydžių procesams, veikiant viršįtampiams, tirti įvertinus defekto pobūdį kietojoje ir skystojoje izoliacijoje. Ištirtos dalinių išlydžių parametrų kitimo charakteristikos įvertinus temperatūros ir slėgio įtaką. Sudarytos ryšio tarp dalinių išlydžių ir dujų kiekio izoliacinėje alyvoje charakteristikos. Nustatyta galimybė įvertinti defekto kitimą pagal dujų kiekio pokytį.

4. Sudaryta elektros įrenginių izoliacijos resurso išnaudojimo kontrolės metodika pagal elektros įrenginio darbo sąlygas, atsižvelgiant į registruojamų viršįtampių lygio ir poveikio trukmės integralinių charakteristikų pobūdį.

## **VII. HABILITACIJOS PROCEDŪRAI TEIKIAMI MOKSLO DARBAI**

### **Mokslinės informacijos instituto (ISI) duomenų bazėse referuojamuose leidiniuose**

1. Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Navickas, Algimantas Stanislovas; Stanionienė, Renata. Evaluation of overvoltage influence upon insulation resources of equipment // EMD 2004: Proceedings of XIV International Conference on Electromagnetic Disturbances, September 22-24, 2004, Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, 2004. ISBN 9986-05-766-3. P. 57-60. [COMPENDEX], [ISI Proceedings, <http://isi01.isiknowledge.com/>].

2. Drabatiukas, Anatolijus; Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Plioplys, Giedrius; Valatka, Povilas. Investigation of the overvoltages level distribution in low voltage network // EMD 2004: Proceedings of XIV International Conference on Electromagnetic Disturbances, September 22-24, 2004, Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, 2004. ISBN 9986-05-766-3. P. 61-64. [COMPENDEX], [ISI Proceedings, <http://isi01.isiknowledge.com/>].

3. Daunoras, Jonas; Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas. The investigation of electromagnetic disturbances in HV substation // EMD 2004: Proceedings of XIV International Conference on Electromagnetic Disturbances, September 22-24, 2004, Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, 2004. ISBN 9986-05-766-3. P. 143-146. [ISI Proceedings, <http://isi01.isiknowledge.com/>], [COMPENDEX].

4. Gečys, Steponas; Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas. Maximum electromagnetic power of induction motor supplying from limited power source // EMD 2005: Overvoltages in Power, Electronic and Computer Engineering. Proceedings of XV International Conference on Electromagnetic Disturbances, Bialystok, Poland. Kaunas: Technologija, 2005. ISSN 1822-3249. P. 163–168. [ISI Proceedings, <http://isi01.isiknowledge.com/>].

- 5.** Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Navickas, Algimantas Stanislovas; Stanionienė, Renata. Investigation of overvoltages influence to equipment insulation resource expenditure in insulated neutral network // EMD 2005: Overvoltages in Power, Electronic and Computer Engineering. Proceedings of XV International Conference on Electromagnetic Disturbances, Bialystok, Poland. Kaunas: Technologija, 2005. ISSN 1822-3249. P.169-172. [ISI Proceedings, <http://isi01.isiknowledge.com/>].
- 6.** Navickas, Algimantas Stanislovas; Linkevičiūtė, Birutė; Morkvėnas, Alfonsas. Transformers faults prediction efficiency using fuzzy theory // EMD 2005: Overvoltages in Power, Electronic and Computer Engineering. Proceedings of XV International Conference on Electromagnetic Disturbances, Bialystok, Poland. Kaunas: Technologija, 2005. ISSN 1822-3249. P. 177-180. [ISI Proceedings, <http://isi01.isiknowledge.com/>].
- 7.** Daunoras, Jonas; Gudžius, Saulius; Morkvėnas, Alfonsas; Plioplys, Giedrius; Baublys, Juozas. Low voltage arresters efficiency control system // EMD 2005: Overvoltages in Power, Electronic and Computer Engineering. Proceedings of XV International Conference on Electromagnetic Disturbances, Bialystok, Poland. Kaunas: Technologija, 2005. ISSN 1822-3249. P. 233-236. [ISI Proceedings, <http://isi01.isiknowledge.com/>].
- 8.** Gečys, Steponas; Morkvėnas, Alfonsas; Rožanskas, Antanas; Tička, Vidmantas. The working conditions investigation of overvoltages arresters during multiple ground fault // EMD 2005: Overvoltages in Power, Electronic and Computer Engineering. Proceedings of XV International Conference on Electromagnetic Disturbances, Bialystok, Poland. Kaunas: Technologija, 2005. ISSN 1822-3249. P.237-240. [ISI Proceedings, <http://isi01.isiknowledge.com/>].
- 9.** Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Markevičius Linas. Application of transient analysis for network state identification // EMD 2005: Overvoltages in Power, Electronic and Computer Engineering. Proceedings of XV International Conference on Electromagnetic Disturbances, Bialystok, Poland. Kaunas: Technologija, 2005. ISSN 1822-3249. P. 329-332. [ISI Proceedings, <http://isi01.isiknowledge.com/>].
- 10.** Gečys, Steponas; Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Audronis; Morkvėnas, Alfonsas. Critical slip in maximum electromagnetic power of a motor for borehole prospecting mechatronic devices // Solid State Phenomena: Mechatronics systems and Materials: a collection of papers from the 1st international conference MSM 2005, Vilnius, Lithuania, 20-23 October 2005 / edited by Nin Bizys, Andrejus Henrikas Marcinkevičius, 2006, Vol. 113. ISSN 1012-0394. P. 55-60. [ISI Web of Science].
- 11.** Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Navickas, Algimantas Stanislovas; Stanionienė, Renata. The Analysis of the Integral Characteristics of the Overvoltages Effect Duration // EMD 2006: Proceedings of XVI International Conference on Electromagnetic Disturbances,

September 27-29, 2006, Kaunas, Lithuania, Kaunas: Technologija, 2006. ISSN 1822-3249. P. 72-77. [ISI Proceedings, <http://isi01.isiknowledge.com/>].

12. Daunoras, Jonas; Gečys, Steponas; Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Tička, Vidmantas. Specialities of Selection of Surge Arresters in 110-330 kV // EMD 2006: Proceedings of XVI International Conference on Electromagnetic Disturbances, September 27-29, 2006, Kaunas, Lithuania, Kaunas: Technologija, 2006. ISSN 1822-3249. P. 237-241. [ISI Proceedings, <http://isi01.isiknowledge.com/>].

13. Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Stanionienė, Renata. The investigation of the impact of protection devices against overvoltages on the insulation reliability // ECT 2007: Electrical and Control Technologies, Proceedings. Kaunas: Technologija, 2007. ISSN 1822-5934. P. 181-185. [ISI Proceedings, <http://isi01.isiknowledge.com/>].

14. Gudžius, Saulius; Jonaitis, Audrius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Markevičius, Linas. The spotting reliability of the transient processes during one phase to ground fault // EMD 2007: proceedings of the XVII International Conference on Electromagnetic Disturbances, September 19-21 2007, Bialystok, Poland / Kaunas University of Technology, Vilnius Gediminas Technical University, Bialystok Technical University. Kaunas: Technologija, 2007. ISSN 1822-3249. P.183-186. [ISI Proceedings, <http://isi01.isiknowledge.com/>].

15. Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Navickas, Algimantas Stanislovas; Stanionienė, Renata; Rožanskas, Antanas. The influence of the overvoltages on the reliability of the 110 kV power line with cable insertion // EMD 2007: proceedings of the XVII International Conference on Electromagnetic Disturbances, September 19-21 2007, Bialystok, Poland / Kaunas University of Technology, Vilnius Gediminas Technical University, Bialystok Technical University. Kaunas: Technologija, 2007. ISSN 1822-3249. P. 187-190. [ISI Proceedings, <http://isi01.isiknowledge.com/>].

### **Lietuvos mokslo tarybos patvirtinto sąrašo tarptautinėse duomenų bazėse referuojamuose leidiniuose**

16. Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Navickas, Algimantas Stanislovas; Stanionienė, Renata. The determination of cable line transient characteristics // Nordic Insulation Symposium. NORD-IS 03, Nordic Insulation Symposium Tampere, June 11-13. 2003. P 309-315. [INSPEC].

### **Kituose recenzuojamuose mokslo leidiniuose**

17. Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas. Viršįtampių ribotuvų darbo sąlygų tyrimas izoliuotos neutralės tinkle // Energetika = Power engineering = Энергетика / Lietuvos mokslų akademija.

2001, nr. 1. ISSN 0235-7208. P. 21-26. Prieiga per internetą: <<http://www.maleidykla.katalogas.lt/>>.

**18.** Deksnyš, Rimantas Pranas; Čeponis, Žydrūnas; Morkvėnas, Alfonsas. Šiluminės energijos nuostolių įvertinimas ir defektų nustatymas infraraudonųjų spindulių termografija // Energetika = Power engineering = Энергетика / Lietuvos mokslų akademija. 2001, nr. 2. ISSN 0235-7208. P. 35-44. Prieiga per internetą: <<http://www.maleidykla.katalogas.lt/>>.

**19.** Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Sučila, Vytautas. Diagnostic monitoring of high voltage equipment // Rīgas tehniskās universitātes zinātniskie raksti = Scientific Proceedings of Riga Technical University. Sērija 4. Energetika un elektrotehnika = Power and Electrical Engineering. 2001, sej. 3. ISSN 1407-7345. P. 82-87. Prieiga per internetą: <<http://omega.rtu.lv/en/contents/proceedings.htm>>.

**20.** Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Sučila, Vytautas; Keliauskas, Liubertas. The determination of cable line transient characteristics // Nordic Insulation Symposium Stockholm, June 11-13, 2001. P. 125-132.

**21.** Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Sučila, Vytautas. The research of mutual connection of the factors influencing devices insulation // EMD 2001: XI International Conference on Electromagnetic Disturbances, Overvoltages in Power-Electronic- and Computer Engineering, Bialystok Technical University, Vilnius Gediminas Technical University, Kaunas University of Technology. Bialystok, 2001. P. 4.1-4.

**22.** Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas. The research of overvoltages arresters efficiency in high voltage substation // EMD 2001: XI International Conference on Electromagnetic Disturbances, Overvoltages in Power-Electronic- and Computer Engineering, Bialystok Technical University, Vilnius Gediminas Technical University, Kaunas University of Technology. Bialystok, 2001. P. 3.2-6.

**23.** Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Keliauskas, Liubertas. The spot of the transient for the high voltage insulation // The 9<sup>th</sup> INSUCON International Electrical Insulation Conference: Europe's premier conference on electrical insulation / Messe Berlin, Berlin Germany 18-20 June 2002. P. 39-42.

**24.** Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Baublys Juozas. Cable insulation diagnostic due special transient analyse // EMD 2002: XII International Conference on Electromagnetic Disturbances, 25-27 September, 2002. Palanga. Kaunas: Technologija, 2002. P. 51-54.

**25.** Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Baublys Juozas. Digital filter for softing reflections // EMD 2002: XII International Conference on Electromagnetic Disturbances, 25-27 September, 2002. Palanga. Kaunas: Technologija, 2002. P. 115-118.

**26.** Gečys, Steponas; Gudžius, Saulius; Morkvėnas, Alfonsas. The influence of complex supply circuit parameters on characteristics of electrical motors for borehole investigating devices // EMD 2003: Overvoltages in Power-Electronic-Computer-Engineering: proceedings of the 13th International Conference on Electromagnetic Disturbances, Białystok, Poland. Kaunas: Technologija, 2004. ISBN 9955-09-776-0. P. 229-232.

**27.** Čėponis, Žydrūnas; Jasiūnas, Kęstutis; Morkvėnas, Alfonsas; Stanionienė, Renata. Dalinių išlydžių proceso kombinuotojoje alyvos ir popieriaus izoliacijoje tyrimas // Energetika = Power engineering = Энергетика / Lietuvos mokslų akademija. 2003, nr. 3. ISSN 0235-7208. P. 21-29. Prieiga per internetą: <<http://www.maleidykla.katalogas.lt/>>.

**28.** Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Navickas, Algimantas Stanislovas. The evaluation of high voltage devices state according to the change of quality characteristics // EMD 2003: Overvoltages in Power-Electronic-Computer-Engineering: proceedings of the 13th International Conference on Electromagnetic Disturbances, Białystok, Poland. Kaunas: Technologija, 2004. ISBN 9955-09-776-0. P. 141-144.

**29.** Linkevičiūtė, Birutė; Morkvėnas, Alfonsas; Navickas, Algimantas Stanislovas; Svinkūnas, Gytis. Artificial neural networks models for reliability evaluation of high voltage devices // EMD 2003: Overvoltages in Power-Electronic-Computer-Engineering: proceedings of the 13th International Conference on Electromagnetic Disturbances, Białystok, Poland. Kaunas: Technologija, 2004. ISBN 9955-09-776-0. P. 145-148.

**30.** Gudžius, Saulius; Linkevičiūtė, Birutė; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Plioplys, Giedrius; Stanionienė, Renata. The evaluation system of high voltage equipment insulation working conditions // Nord-IS 05: proceedings of the 19th Nordic Insulation Symposium, Trondheim, Norway, June 13-15, 2005. Trondheim: Tapir Academic Press, 2005. ISBN 82-519-2055-8. P. 187-190.

**31.** Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Stanionienė, Renata; Gvozdaz, Petras. Viršįtampių poveikio trukmės registracijų analizė // Elektros ir valdymo technologijos - 2006 = Electrical and Control Technologies – 2006: tarptautinės konferencijos pranešimų medžiaga / Kauno technologijos universitetas. Elektros ir valdymo inžinerijos fakultetas. Kaunas: Technologija, 2006. ISBN 9955-25-054-2. P. 152-156.

**32.** Drabatiukas, Anatolijus; Morkvėnas, Alfonsas; Gvozdaz, Petras. Viršįtampių eksperimentinis tyrimas vartotojų žemosios įtampos tinkle // Elektros ir valdymo technologijos – 2006 = Electrical and Control Technologies – 2006: tarptautinės konferencijos pranešimų medžiaga / Kauno technologijos universitetas. Elektros ir valdymo inžinerijos fakultetas. Kaunas: Technologija, 2006. ISBN 9955-25-054-2. P. 157-160.

**33.** Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas. Elektromagnetinių pereinamųjų procesų modeliavimo izoliuotos neutralės tinkle

ypatumai // Elektros ir valdymo technologijos – 2006 = Electrical and Control Technologies – 2006: tarptautinės konferencijos pranešimų medžiaga / Kauno technologijos universitetas. Elektros ir valdymo inžinerijos fakultetas. Kaunas: Technologija, 2006. ISBN 9955-25-054-2. P. 161-166.

**34.** Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Stanionienė, Renata; Jasiūnas, Kęstutis; Razma, Alfridas. Apsaugos priemonių nuo viršįtampių parinkimo 110-330 kV tinkle ypatumai // Elektros ir valdymo technologijos – 2006 = Electrical and Control Technologies – 2006: tarptautinės konferencijos pranešimų medžiaga / Kauno technologijos universitetas. Elektros ir valdymo inžinerijos fakultetas. Kaunas: Technologija, 2006. ISBN 9955-25-054-2. P. 147-151.

**35.** Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Markevičius Linas. Electromagnetic transient processes recognition model in insulated neutral net // EMD 2006: Proceedings of XVI International Conference on Electromagnetic Disturbances, September 27-29, Kaunas Lithuania. Kaunas: Technologija, 2006. ISSN 1822-3249. P. 342-347.

**36.** Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Navickas, Algimantas Stanislovas; Stanionienė, Renata. 110 kV kabelinių intarpų apsaugos priemonių nuo viršįtampių darbo sąlygų tyrimas // Elektros ir valdymo technologijos, ECT 2007: 2-osios tarptautinės konferencijos straipsnių lietuvių kalba rinkinys / Kauno technologijos universitetas. Kaunas: Technologija, 2007. ISBN 978-9955-25-248-1. P. 20-23.

**37.** Gudžius, Saulius; Jonaitis, Audrius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Stanionienė, Renata. The Evaluation of the Insulation Resource According to the Integrals Characteristics of the Overvoltages Effect Duration // Nord-IS 07 proceedings of the 20th Nordic Insulation Symposium, Lyngby, Denmark, June 11-13, 2007. Lyngby: Technical University of Denmark, 2007. P. 161-164.

### **Monografijos**

**M1.** Baublys Juozas, Gudžius Saulius, Jankauskas Pranas, Markevičius Linas, Morkvėnas Alfonsas. Žaibas. Apsauga nuo žaibo.– MTD „Energetika“. Vilnius, 2006. ISBN 9986-858-28-3. 231 p.

### **Cituojami darbai**

**C1.** Тиходеев, Н.Н.; и Шур, С.С. Изоляция электрических сетей. Ленинград: Энергия, 1979. 304 с.

**C2.** Semleyn A. Contribution to the theory of on lines with frequency dependent parameters. // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, vol. 100, <sup>1</sup> 2, P. 848-856.

**C3.** Semlyen A.; and Huang W. G. Corona Modeling for the Calculation of Transients on Transmission Lines // IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No.3 July, 1986. P. 228-239.

**C4.** Сви, П. М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 128 с.

**C5.** Kreuger, F. H. Partial discharges detection high voltage equipment. London: Butterworth & Co. Ltd. 1989, 192 p.

**C6.** Сви, П. М.; Смекалов, В. В. Техническая диагностика изоляции вводов и трансформаторов тока. Электрические станции. 1990, № 6. С. 71-75.

**C7.** Половой И. Ф.; Михайлов Ю. А.; Халилов Ф. Х. Внутренние перенапряжения на электрооборудовании высокого и сверх высокого напряжения // 2-е изд. перераб. и доп., Ленинград: Энергоатомиздат. Ленинградское отд-ние, 1990. С. 152.

**C8.** Ренев, В.П.; Соколов, В.В. Повышение эффективности диагностики состояния трансформаторного оборудования. Диагностика и обслуживание трансформаторного оборудования после длительной эксплуатации. Запорожье, 1994. С. 9-12.

**C9.** Reason, J. On-line transformer monitoring. Electrical World, October, 1995, vol. 209, No. 10. P. 19-26.

**C10.** Aubin, J.; and Gervais, P. On-line monitoring of key fault gases in power transformers and shunt reactors. Sixty-second Annual International Conference of Doble Clients, 1995. P. 122 – 135.

**C11.** Kim I.; Funabashi T.; Sasaki H.; Hagiwara T.; Kobayashi M. Study of ZnO arrester model for steep front wave // IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, No 2 April 1996. P. 834-841.

**C12.** Аракельян, В.Г.; и Дарьян, Л. А. Теория и практика создания сигнализатора горючих газов для мониторинга маслонаполненного оборудования. Электротехника, 1997, № 2. С. 49-55.

**C13.** Gibeault, J. P. On-line monitoring of key fault gases in transformer oil. 10<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, Montreal, 1997. P. 62-71.

**C14.** Urbani, G.M.; and Brooks, R.S. Using the recovery voltage method to evaluate aging in oil-paper insulation. IEEE International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, 22-25 June, 1998, Vasteras, 1998. P. 93-97.

**C15.** Русов, В.А.; и Соколов, В.В. Перспективы развития системы мониторинга трансформаторного оборудования под нагрузкой // X международная научно-техническая конференция трансформаторостроения – 2000. Запорожье, 2000. С. 101-110.

**C16.** Hamed, M.; and El Desouky, A.A. Computerized inspection for the high voltage insulating surfaces. Electric Power Systems Research, 2000, Nr. 53. P. 91-95.

**C17.** Jasiūnas, K. Galios transformatorių diagnostika liekamosios įtampos metodu. Elektrotechnika: mokslo darbai. Kaunas: Technologija, 2000, Nr. 24(33), ISSN 0136-8028. P. 45-49.

**C18.** Gerhards, J.; and Temkins, A. Prognostics of electrical insulation resources: Nordic Insulation Symposium Stockholm, 11-13 June 2001. P. 125-132.

**C19.** Jasiūnas, K.; and Čeponis, Ž. The researches of complex oil-paper insulation resource. Power and electrical engineering: SERIJA 4, SEJUMS 5, Riga Technical University, Riga, 2002. ISSN 0136-8028. P. 52-57.

**C20.** Cavallini, C.M.; and Montanari, G.C. On-field partial discharge measurements: A feasible approach to noise rejection and defect assessment. The 9<sup>th</sup> INSUCON International Electrical Insulation Conference Messe Berlin, Germany, 18-20 June 2002, Berlin, 2002. P. 183-188.

**C21.** Morais D. R.; and Rolim J. G. A hybrid tool for detection of incipient faults in transformers based on the dissolved gas analysis of insulating oil. IEEE Transactions on Power Delivery, April 2006, Vol.21, No.2. P.673-680.

**C22.** Baublys J. Aukštosios įtampos elektros įrenginių izoliacinių medžiagų savybės. ISBN 9986-858-30-5. Vilnius: UAB Energetika, 2007. 310 p.

Redagavo *Pranas Dastikas*

SL 344. 2008-05-08. 1,75 leidyb. apsk. 1. Tiražas 16 egz.

Užsakymas 317.

Išleido leidykla „Technologija“, K. Donelaičio g. 73, LT-44029 Kaunas  
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, LT-51424 Kaunas