
Dalinių išlydžių proceso kombinuotojoje alyvos ir popieriaus izoliacijoje tyrimas

**Žydrūnas Čeponis,
Kęstutis Jasiūnas,
Alfonsas Morkvėnas,
Renata Stanionienė**

*Kauno technologijos universitetas,
Elektros sistemų katedra,
Studentų g. 48,
LT-3031 Kaunas*

Straipsnyje nagrinėjami dalinių išlydžių procesai, vykstantys kombinuotojoje izoliacijoje, ir jų įtaka išsiskiriančių dujų koncentracijos pokyčiui izoliaciniame alyvoje. Sudarytas kombinuotosios (skystosios ir kietosios) izoliacijos modelis dalinių išlydžių procesams imituoti bei išsiskyrusių dujų kiekiui nustatyti. Ištirtos dalinių išlydžių charakteristikų funkcinės priklausomybės nuo sąlygojančių veiksnių bei galimų defektų geometrinių parametrų. Sudarytos dujų kiekio pokyčio nuo eksploataavimo trukmės, esant normalioms eksploataavimo sąlygoms ir atsiradus defektui, priklausomybės. Nustatytos dujų koncentracijos pokyčio nuo defekto kitimo greičio charakteristikos.

Raktažodžiai: daliniai išlydžiai, dalinių išlydžių parametrai, kombinuotosios izoliacijos modelis, izoliacijos defektai

1. ĮVADAS

Aukštosios įtampos įrenginių izoliacija yra sudėtingiausia ir atsakingiausia dalis. Dažniausiai aukštosios įtampos įrenginių izoliaciją sudaro skystasis ir kietasis arba dujinis ir kietasis komponentai. Galimiems defektams bei senėjimui kombinuotojoje izoliacijoje įvertinti turi būti modeliuojami joje vykstantys procesai. Eksploatuojant įrenginį, kietojoje izoliacijoje susidaro įtrūkimai, dujinės mikroertmės, o skystojoje – vandens lašeliai, mechaninės kietosios izoliacijos atplaišos, dujų burbuliukai ir kt., todėl kinta dalinių išlydžių lygis.

Dalinių išlydžių procesas įrenginių izoliacijoje priklauso nuo įtampos dydžio, aplinkos ir įrenginio darbo temperatūros bei kitų atsitiktinių parametrų [1, 3]. Įrenginių vidinės izoliacijos atsparumo mažėjimą lemia dalinių išlydžių intensyvumas bei jų lygis, senėjimas dėl įtampos, šilumos, drėgmės ir oksidacijos poveikio. Dėl viršįtampių susidarę intensyvesni daliniai išlydžiai izoliacijoje palieka inertiškus poveikio pėdsakus – įvairius degimo produktus bei išlydžių metu susidariusias įvairias dujas.

Kompleksiškai analizuojant elektros įrenginių izoliaciją sąlygojančius veiksnius ir nustačius patikimą jų ryšį galima išaiškinti atsirandančius pokyčius. Kontroluojant liekamųjų produktų pokytį ir koncentraciją galima įvertinti poveikio mastą ir pobūdį. Veiksnių liekamųjų produktų koncentracijai nustatyti sudaromas procesus izoliacijoje imituojantis modelis. Naudojant tokį modelį galima išanalizuoti sąlygojančių veiksnių įtaką dalinių išlydžių charakteristikoms

bei nustatyti funkcinius veiksnių ir liekamųjų produktų koncentracijos ryšius.

Šio darbo tikslas – sudaryti kombinuotosios izoliacijos matematinį modelį izoliacijos ištekliais prognozuoti, defektams ir avaringumui įvertinti, ištirti įvairių veiksnių įtaką ir prioritetus dalinių išlydžių formavimosi procesui, taip pat dujų susidarymą ir pokytį.

2. KOMBINUOTOSIOS IZOLIACIJOS BŪKLĖS ĮVERTINIMO MODELIS

Daugumos aukštosios įtampos energetikos įrenginių izoliaciją sudaro kombinuotoji izoliacija, kietoji ir skystoji, kietoji ir dujinė ir pan. Modeliuojant procesus, vykstančius izoliacijoje, vieno komponento imitacinis modelis nepakankamai tiksliai imituoja tam tikroje terpėje vykstančius išlydžius bei dėl jų poveikio susidariusias dujas ar lokalinius perkaitimo židinius.

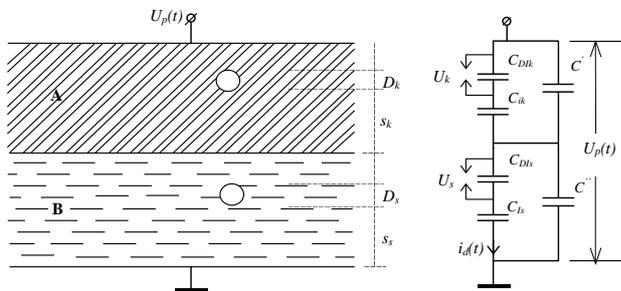
Kombinuotosios izoliacijos modelio principinė schema parodyta 1 pav.

Skystojoje terpėje defektas gali būti vandens lašelis, dujų burbuliukas ar kietojo dielektriko atplaiša. Bendruoju atveju skystojoje terpėje defektas gali būti modeliuojamas kaip dielektrinė sfera dielektrike [1].

Įvertinus skirtingą skvarbą, defekto tarpelio pramušimo įtampa gali būti apskaičiuojama taip [1]

$$U_k = DE_0 \frac{3\varepsilon_s}{\varepsilon_d + 2\varepsilon_s} \delta; \quad (1)$$

čia ϵ_s – skystosios terpės dielektrinė skvarba; ϵ_d – defekto dielektrinė skvarba; E_0 – elektros lauko stipris, kai nėra defekto; δ – pataisos koeficientas, įvertinantis temperatūros ir slėgio įtaką tarpelio pramušimo įtampai.



1 pav. Kombinuotosios izoliacijos imitacinis modelis (A – kietosios izoliacijos sluoksnis; B – skystosios izoliacijos sluoksnis): $U_p(t)$ – izoliaciją veikianti įtampa; D_k, D_s – defektų skersmuo; s_k, s_s – defektų atstumas iki elektrodo; C_{DIk}, C_{DIs} – defektų savitoji talpa; C_{ik} ir C_{is} – kietojo ir skystojo izoliacijos sluoksnių talpa išlydžio srovės kelyje; C'' ir C''' – kietojo ir skystojo izoliacijos sluoksnių geometrinė talpa; U_k, U_s – defekto kietajame ir skystajame sluoksnyje pramušimo įtampa; i_d – išlydžio srovė

Pataisos koeficientas δ apskaičiuojamas taip:

$$\delta = \frac{p}{760} \cdot \frac{293}{273+T};$$

čia p – atmosferos slėgis mm Hg st.; T – temperatūra °C.

Kylant įtampai galimos įvairios situacijos, nes išlydis gali būti tik vienoje terpėje (kietojoje ar skystojoje) arba abiejose. Defekto vietą ir pradžią lemia daugelis veiksnių. Modeliuojant procesus turi būti įvertintos visos galimos situacijos. Kietojo komponento defektą, kai defektas skystojoje terpėje nepažeistas, veikianti įtampa apskaičiuojama taip:

$$U_{DIk} = \frac{C_{ik} \cdot C_{DIk} \cdot C_{is}}{C_{DIk} \cdot C_{ik} \cdot C_{DIs} + C_{DIk} \cdot C_{ik} \cdot C_{is} + C_{DIk} \cdot C_{is} \cdot C_{DIs} + C_{ik} \cdot C_{DIs} \cdot C_{is}} \cdot U_p. \quad (2)$$

Skystojo komponento defektą, kai defektas kietojoje terpėje nepažeistas, veikianti įtampa gali būti apskaičiuojama taip:

$$U_{DIs} = \frac{C_{ik} \cdot C_{DIk} \cdot C_{is}}{C_{DIk} \cdot C_{ik} \cdot C_{DIs} + C_{DIs} \cdot C_{ik} \cdot C_{is} + C_{DIs} \cdot C_{DIk} \cdot C_{is} + C_{ik} \cdot C_{DIk} \cdot C_{is}} \cdot U_p. \quad (3)$$

Dviejų komponentų modelyje gali būti modeliuojama situacija, kai dalinis išlydis viename komponentų jau įvykęs, t. y. kibirkštinio tarpelyje įtampa buvo didesnė už pramušimo įtampą. Esant tokiai

situacijai, izoliacijoje nepažeisto defekto kietajame dielektrike, kai išlydis vyksta skystyje, įtampa gali būti apskaičiuojama taip:

$$U_{DIk} = \frac{C_{ik} \cdot C_{is}}{C_{DIk} \cdot C_{ik} + C_{DIk} \cdot C_{is} + C_{ik} \cdot C_{is}} \cdot U_p. \quad (4)$$

Vykstant išlydžio procesui kietajame dielektrike, skystojo dielektriko defekto įtampa gali būti apskaičiuojama taip:

$$U_{DIs} = \frac{C_{ik} \cdot C_{is}}{C_{DIs} \cdot C_{ik} + C_{DIs} \cdot C_{is} + C_{ik} \cdot C_{is}} \cdot U_p. \quad (5)$$

Kylant izoliaciją veikiančiai įtampai $U_p(t)$ kietajame ar skystajame komponente modeliuojamų defektų įtampos pasiekia kritinę pramušimo įtampos vertę. Vieno ar kito defekto įtampai esant didesnei už kritinę įtampą, tarpelis pramušamas ir defekto talpa šuntuojama. Gaunamas srovės šuolis, kurio didžiausia amplitudė I_{qm} . Tuo metu kontūru pradeda tekėti ekvivalentinės talpos C_{ek} išsikrovimo srovė $i_q(t)$. Srovės kitimo procesas apskaičiuojamas taip:

$$i_d(t) = I_{dm} \tau e^{-\frac{t}{\tau}}; \quad (6)$$

$$\text{čia } I_{dm} = \frac{C_{ek} U_{DI}}{\tau}; \quad (7)$$

$$C_{ek} = \frac{C_{ik} \cdot C_{is} \cdot C_{DIs}}{C_{ik} \cdot C_{is} + C_{is} \cdot C_{DIs} + C_{is} \cdot C_{DIs}}, \quad 0$$

$U_{DI} = U_{DIk}$, kai išlydis kietojo dielektriko defekte, ir

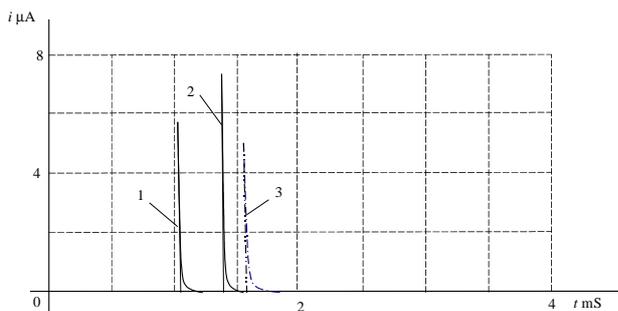
$$C_{ek} = \frac{C_{ik} \cdot C_{is} \cdot C_{DIk}}{C_{ik} \cdot C_{is} + C_{ik} \cdot C_{DIk} + C_{is} \cdot C_{DIk}}, \quad 0$$

$U_{DI} = U_{DIs}$, kai išlydis skystojo dielektriko defekte; τ – vidutinė dalinių išlydžių srovės impulso laiko pastovioji ($\tau = 0,01-0,3 \mu\text{S}$).

Dalinių išlydžių srovės procesas dviejų komponentų izoliacijoje, apskaičiuotas pagal sudarytą metodiką, parodytas 2 pav. Pirmieji du impulsai vyksta kietojoje izoliacijoje, o trečiasis skystojoje.

Dalinių išlydžių (defekto) kietajame komponente tariamasis krūvis

$$q_k = U_{DIk} \frac{C_{ik} \cdot C_{is} \cdot C_{DIs}}{C_{ik} \cdot C_{is} + C_{ik} \cdot C_{DIs} + C_{is} \cdot C_{DIs}}, \quad (8)$$



2 pav. Dalinių išlydžių srovės impulsai: punktyru parodytas išlydis skystyje

o skystajame komponente

$$q_s = U_{DIs} \frac{C_{ik} \cdot C_{is} \cdot C_{Dlk}}{C_{ik} \cdot C_{is} + C_{ik} \cdot C_{Dlk} + C_{is} \cdot C_{Dlk}} \quad (9)$$

Dalinių išlydžių energija izoliacijoje apskaičiuojama taip [1]:

$$W_k = \frac{q_k U_{Dlk}}{2}, \quad (10)$$

$$W_s = \frac{q_s U_{DIs}}{2}. \quad (11)$$

Dalinių išlydžių procesams izoliacijoje įvertinti yra taikomi keli standartizuoti integraliniai parametrai. Standartizuoti integraliniai parametrai [10], apibūdinantys dalinių išlydžių procesą, – tariamasis krūvis, vidutinė srovė, kvadratinis greitis, dalinių išlydžių galia gali būti apskaičiuojami analizuojant procesus izoliacijoje.

Kombinuotosios alyvos ir popieriaus izoliacijos modelyje naudojamas tariamasis krūvis, impulsų skaičius per pusperiodį ir energija. Šiuos parametrus yra lengviau patikrinti eksperimentiškai nustatant modelio adekvatumą. Modelyje apskaičiuojami didžiausios išlydžio srovės amplitudė I_{dm} , didžiausias tariamasis krūvis q , dalinių išlydžių energija W_{Dl} , suminis krūvis Σq ir impulsų skaičius n per pusperiodį.

3. IZOLIACIJOS ĮŠILIMO POVEIKIO DALINIŲ IŠLYDŽIŲ PROCESUI TYRIMAS

Įrenginių izoliacijos būklei apibūdinti buvo atlikti tyrimai, nustatantys įvairių veiksnių įtaką dalinių išlydžių ir dujų susidarymo procesui izoliacijoje. Elektros įrenginio temperatūra gali kisti gana plačiame diapazone. Temperatūra priklauso nuo aušinimo sąlygų ir apkrovos. Senstant izoliacijai defektai, esan-

tys izoliacijoje (įtrūkimai, mikroertmės ir pan.), ar drėgmės kiekis kinta. Tyrimų tikslas – nustatyti veiksnių įtaką ir sudaryti bendruosius kriterijus defekto pobūdžiui įvertinti. Tiriant dalinius išlydžius apibūdinančių parametru funkcines priklausomybes nuo įvairių veiksnių, buvo priimti tokie parametru kitimo intervalai:

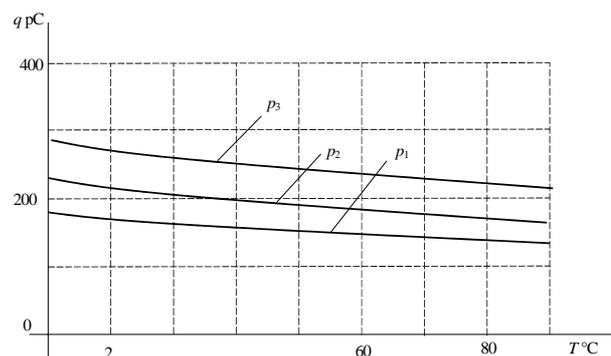
- izoliacijos temperatūra modelyje gali kisti nuo minimalios leistinosios matavimams temperatūros $+10^{\circ}\text{C}$ iki didžiausios leistinosios darbo temperatūros $+90^{\circ}\text{C}$;

- slėgis įrenginio skystojoje izoliacijoje buvo keičiamas nuo 750 mm Hg st. iki maksimalaus 1060 mm Hg st.;

- skystajame ir kietajame dielektrike defekto geometriniai parametrai (sferos skersmuo) buvo keičiami nuo 0,1 mm iki 2 mm;

- defekto dielektrinė skvarba nustatoma atsižvelgiant į defekto pobūdį: kietas, skystas ar dujinis.

Didžiausio dalinių išlydžių tariamojo krūvio funkcinės priklausomybės nuo temperatūros parodytos 3 pav., esant skirtingam slėgiui.

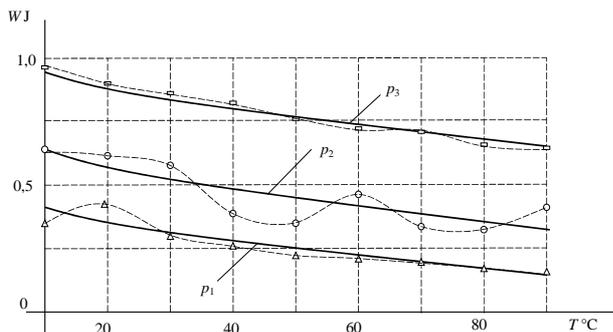


3 pav. Funkcinės dalinių išlydžių tariamojo krūvio priklausomybės nuo temperatūros: $p_1 = 760$, $p_2 = 900$, $p_3 = 1060$ mm Hg st.

Nustatant dalinių išlydžių parametru funkcines priklausomybes buvo keičiamas tik vienas veiksnys (temperatūra), kiti priimti pastovūs. Nustatyti dalinių išlydžių energija W , didžiausias tariamasis krūvis q , impulsų kiekis n ir vidutinė srovė I per pusperiodį.

Nustatant funkcines priklausomybes defektų sferos spindulys kietojoje ir skystojoje izoliacijoje buvo 0,5 mm; atstumas iki defekto kietojoje izoliacijoje – 2 cm, skystojoje – 5 cm; izoliacijos modelį veikianti įtampa – 100 kV; skystosios izoliacijos dielektrinė skvarba: 2,3 s.v. – izoliacinei alyvai ir 4,5 s.v. – kombinuotajai alyvos bei popieriaus izoliacijai; defektų dielektrinė skvarba: 1 s.v. – dujinei ir 79,5 s.v. – distiliuoto vandens terpėms.

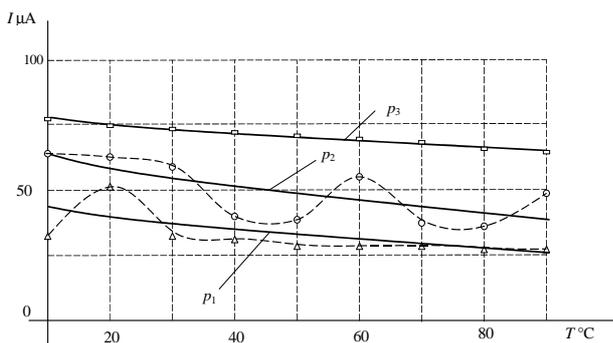
Aproksimuotos funkcinės dalinių išlydžių energijos priklausomybės nuo temperatūros parodytos 4 pav.



4 pav. Funkcinės dalinių išlydžių energijos priklausomybės nuo temperatūros: $p_1 = 760$, $p_2 = 900$, $p_3 = 1060$ mm Hg st.

Kadangi dalinių išlydžių impulsų skaičius (1 lentelė) per pusperiodį keičiantis parametrams kinta, apibendrintai įvertinus visą dalinių išlydžių procesą per pusperiodį yra nustatoma dalinių išlydžių vidutinė srovė.

Vidutinės dalinių išlydžių srovės per vieną pusperiodį funkcinės priklausomybės nuo temperatūros, esant skirtingiems slėgiams, parodytos 5 pav.



5 pav. Funkcinės dalinių išlydžių vidutinės srovės priklausomybės nuo temperatūros: $p_1 = 760$, $p_2 = 900$, $p_3 = 1060$ mm Hg st.

Vidutinės dalinių išlydžių srovės priklausomybė nuo temperatūros akivaizdžiai priklauso nuo impulsų skaičiaus per pusperiodį. Impulsų skaičius per pusperiodį pateiktas 1 lentelėje.

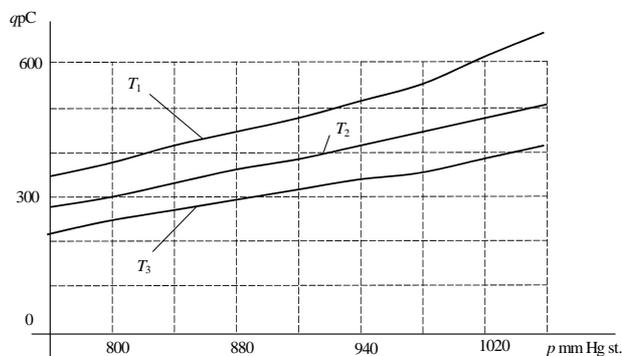
1 lentelė. Dalinių išlydžių impulsų skaičius per pusperiodį									
Slėgis mm Hg st.	Dalinių išlydžių impulsų skaičius per pusperiodį, kai temperatūra °C								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
760	2	3	2	2	2	2	2	2	2
900	3	3	3	2	2	3	2	2	3
1060	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Analizuojant tyrimo rezultatus galima pastebėti, kad dalinių išlydžių didžiausiam tariamajam krūviui temperatūros įtaka įrenginio darbo temperatūrų diapazone tiesinė.

4. SLĖGIO POVEIKIO DALINIŲ IŠLYDŽIŲ PROCESUI TYRIMAS

Elektros įrenginyje slėgis kinta nedaug, tačiau hermetiškuose galios transformatoriuose, veikiant temperatūrai ir kitiems faktoriams, slėgis gali padidėti avarinio darbo režimo metu. Tiriant slėgio įtaką visi kiti modelio parametrai buvo priimti tokie pat kaip ir 3 skyrelyje. Slėgis buvo keičiamas nuo 760 iki 1060 mm Hg st., esant 10, 50 ir 90°C temperatūrai.

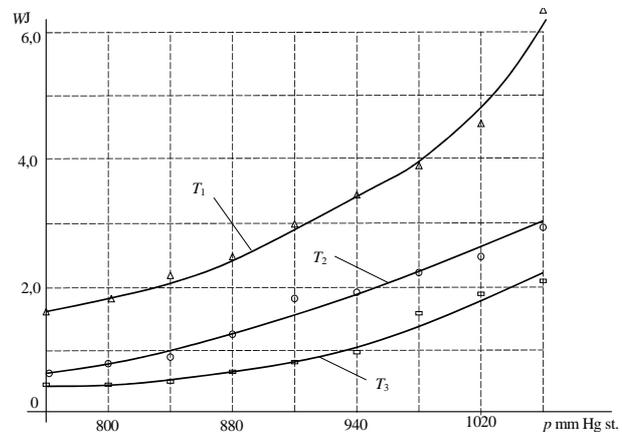
Funkcinės dalinių išlydžių tariamojo krūvio priklausomybės nuo slėgio parodytos 6 pav.



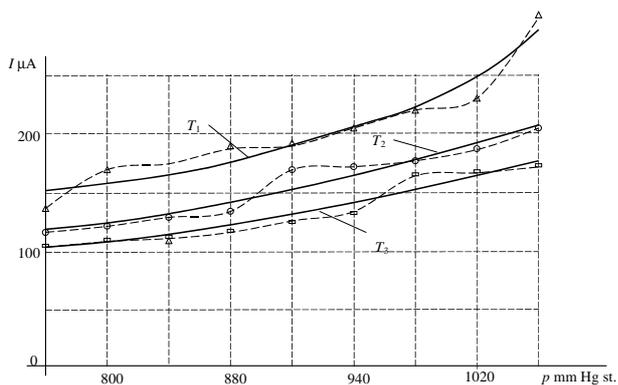
6 pav. Dalinių išlydžių tariamojo krūvio priklausomybės nuo slėgio. $T_1 = 10$, $T_2 = 50$, $T_3 = 90$ °C

Aproksimuotos funkcinės dalinių išlydžių energijos priklausomybės nuo slėgio parodytos 7 pav.

Vidutinės dalinių išlydžių srovės per vieną pusperiodį funkcinės priklausomybės nuo slėgio, esant skirtingoms temperatūroms, parodytos 8 pav. Punktyru – funkcinė priklausomybė, o ištisine linija – aproksimuota.



7 pav. Funkcinės dalinių išlydžių energijos priklausomybės nuo slėgio. $T_1 = 10$, $T_2 = 50$, $T_3 = 90$ °C



8 pav. Funkcinės dalinių išlydžių energijos priklausomybės nuo slėgio. $T_1 = 10$, $T_2 = 50$, $T_3 = 90^\circ\text{C}$

2 lentelė. Dalinių išlydžių impulsų skaičius per pusperiodį

Temperatūra °C	Dalinių išlydžių impulsų skaičius per pusperiodį, kai slėgis mm Hg st.								
	760	780	820	860	900	940	980	1020	1040
10	2	3	3	3	3	3	3	3	4
50	2	2	2	2	2	3	3	3	3
100	2	2	2	2	2	2	3	3	3

Dalinių išlydžių impulsų skaičius per pusperiodį pateiktas 2 lentelėje.

Vidutinė dalinių išlydžių srovė keičiantis slėgiui kinta netolygiai. Jos pokytį lemia impulsų skaičius. Sudarant aproksimuojančią elementarią funkciją galimos gana didelės paklaidos (iki 30%). Įvertinant modelyje integralinio kriterijaus (vidutinės dalinių išlydžių srovės) kitimo pobūdį, papildomai turi būti nustatomas ir impulsų skaičius. Eksploatacijoje apskaičiuojant įrenginių būklę apibūdinančių charakteristikų pokyčius, slėgis kinta labai siaurame diapazone, todėl praktiniuose skaičiavimuose, analizuojant eksploatacinį įrenginio režimą, slėgio įtaka gali būti nevertinama.

5. DEFEKTO PARAMETRŲ ĮTAKA DALINIŲ IŠLYDŽIŲ PROCESUI

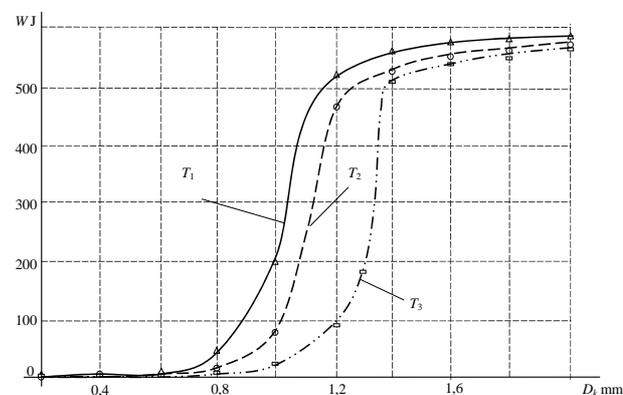
Elektros įrenginyje atsiradęs mikrodefektas, veikiamas dalinių išlydžių energijos, didėja. Kintant mikrodefektų geometrijai, atitinkamai kinta dalinių išlydžių bei jų poveikio pasekmių (dujų kiekio) parametrai. Panaudojus sudarytą modelį, buvo nustatytos dalinių išlydžių charakteristikų priklausomybės nuo defekto geometrinio parametro. Defekto geometrinio parametro įtakai dalinių iš-

lydžių procesui nustatyti buvo keičiamas defekto dydis kietajame ar skystajame dielektrikuose. Dalinių išlydžių energijos kiekio priklausomybė nuo defekto geometrinio parametro dielektrike parodytos 9 pav.

Analizuojant procesus, vykstančius dielektrike, galima akivaizdžiai pastebėti aktyvią dalinių išlydžių kitimo zoną, kurioje vykstantys procesai labiausiai pakeičia charakteristikas. Pagal charakteristikų pokyčio greitį, analizuojant kitimo pobūdį, galima įvertinti defekto pobūdį. Periodiškai kontroliuojant dalinių išlydžių poveikio izoliacijai liekamųjų produktų kiekį (dujų ir pan.), galima įvertinti šių veiksnių kitimo greitį, o pagal šią charakteristiką identifikuoti besivystantį defektą.

Dalinių išlydžių impulsų skaičius per pusperiodį pateiktas 3 lentelėje, kai defektas kinta kietajame, o 4 lentelėje – skystajame dielektrikuose.

Didėjant defektui kietojoje ar skystoje terpėje, dalinių išlydžių impulsų kiekis stabilizuojasi. Pagal defekto įvertinimo rekomendacijas, jei impulsų skaičius per pusperiodį yra didesnis kaip 6, tai toks defektas yra pavojingas įrenginio izoliacijai, nes vyksta izoliaciją ardantis lokalinis išlydis. Tyrimo duomenimis, pavojingas impulsų skaičius susidaro, kai defekto skersmuo didesnis kaip 0,8 mm.



9 pav. Funkcinės dalinių išlydžių energijos priklausomybės nuo defekto geometrinio parametro. $T_1 = 10$, $T_2 = 50$, $T_3 = 90^\circ\text{C}$

3 lentelė. Dalinių išlydžių impulsų skaičius per pusperiodį, defektui kintant kietajame dielektrike

Temperatūra °C	Dalinių išlydžių impulsų skaičius per pusperiodį, kai defekto skersmuo mm													
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	
10	2	1	3	3	4	5	7	8	11	15	15	15	15	
50	2	1	2	3	4	4	5	6	8	9	15	15	15	
100	2	1	2	3	3	4	4	5	6	7	8	10	15	

4 lentelė. Dalinių išlydžių impulsų skaičius per pusperiodį, defektui kintant skystajame dielektrike

Temperatūra °C	Dalinių išlydžių impulsų skaičius per pusperiodį, kai defekto skersmuo mm													
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	
10	2	2	3	4	5	7	9	12	15	15	15	15	15	
50	2	2	3	4	5	5	7	8	10	15	15	15	15	
100	2	2	3	3	4	4	5	6	7	9	11	15	15	

Galimus defektus įrenginių izoliacijoje galima nustatyti, palyginus periodiškai registruojamų dydžių pokytį. Nustatant dalinių išlydžių pokyčių priklausomybę nuo viršįtampių lygio ir kaupiant bei lyginant matavimų registracijas, galima nustatyti izoliacijos senėjimo tendenciją ir prognozuoti galimus defektus įrenginių izoliacijoje.

6. DUJŲ SUSIDARYMAS IZOLIACIJOJE VEIKIANT DALINIAMS IŠLYDŽIAMS

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

Įrenginio su kombinuota izoliacija svarbi charakteristika, apibūdinanti skystosios izoliacijos būklę ir išnaudotą išteklių, yra dujų susidarymo koeficientas B_D [1, 9]. Sudarant kompleksinį procesų izoliacijoje imitavimo modelį, svarbu tiksliai nustatyti šią charakteristiką. Dalinių išlydžių energijos skystyje išsisklaido į kelias dedamąsias. Eksperimentiškai nustatyta [9], kad dalinių išlydžių energija skystajame dielektrike išsisklaido taip: 25% – išspinduliuojama, 30% – išlydžio kanalo išsiplėtimui; 3–4% – jonizacijai, 6–8% – poveikiui dielektriko paviršiui.

Dujų kiekis, susidaręs kombinuotojoje 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 intensyvumas. Veikiant intensyviems daliniams išlydžiams, kai jų pasikartojimo dažnis yra didesnis kaip 3–4 impulsai per pusperiodį, skystojoje terpėje susidaro dujų burbuliukai, o dalinių išlydžių procesas vyksta juose. Dėl šių reiškinų izoliacijoje dalinių išlydžių energijos dalis, veikianti dujų susidarymą skystyje, sumažėja. Dujų kiekis izoliacijoje gali būti apskaičiuojamas taip:

$$G = B_D \cdot W_{DI}; \quad (12)$$

čia G – dujų kiekis, išsiskiriantis dėl dalinių išlydžių energijos; B_D – koeficientas, apibūdinantis dielektriko irimą veikiant dalinių išlydžių 1 J energijai; W_{DI} – dalinių išlydžių energija.

Pritaikius 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 formulę:

$$W_{DI} = 0,0212 e^{9,07d} \left\{ \left[1 + 0,0125(1 - 0,3585e^{-0,97d}) \right] - 0,0125(1 - 0,3585e^{-0,97d})T \right\}; \quad (13)$$

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

Pritaikius tokį pat aproksimavimo principą skystajame dielektrike energija dėl dalinių išlydžių poveikio gali būti apskaičiuojama taip:

$$W_{DI} = 0,0681 e^{9,332d} \left\{ \left[1 + 0,0125(1 - 0,93e^{-2,17d}) \right] - 0,0125(1 - 0,93e^{-2,17d})T \right\}. \quad (14)$$

Defektas įrenginių izoliacijoje gali kisti sąlygojamas įvairių veiksnių – įtampos, viršįtampių, temperatūros, drėgmės ir pan. Nuo šių veiksnių poveikio intensyvumo priklauso defekto kitimo greitis. Pagal dujų kiekio, susidariusio izoliacijoje, pokytį galima nustatyti izoliacijos būklę, akivaizdžius defektus.

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

$$\Delta G = K_s B_D \Delta \tau_d 2,12 e^{9,07d} \left\{ \left[1 + 0,0125(1 - 0,3585e^{-0,97d}) \right] - 0,0125(1 - 0,3585e^{-0,97d})T \right\}; \quad (15)$$

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

Pagal formules įvertinus ribines įrenginio darbo sąlygas (lengvas ir sunkias) bei atsiradusio defekto kitimo greitį, buvo sudarytos dujų kiekio pokyčio charakteristikos.

Dujų kiekio izoliacijoje pokyčio priklausomybės, kai įrenginyje nėra akivaizdžių defektų, parodytos 10 pav.

Eksploatuojant įrenginius ekstremaliomis sąlygomis, kai juos veikia dažnos perkrovos, trumpieji jungimai, viršįtampiai, vibracijos ir pan., izoliacijoje ga-

li atsirasti nedidelių defektų, kurie keičiasi, didėja ir esant normalioms darbo sąlygoms. Nuo įrenginio darbo sąlygų priklauso defekto didėjimo greitis. Periodiškai matuojant dujų kiekį galima nustatyti dujų pokytį. Dujų kiekio pokytį lemia įrenginio darbo sąlygos bei defekto didėjimo greitis. Įvertinus defekto didėjimo greitį kietojoje ar skystojoje izoliacijoje, dujų kiekio pokytis nuo eksploataavimo trukmės, apskaičiuotas pagal sudarytą modelį, parodytas 11 pav. (defektas kietojoje izoliacijoje) ir 12 pav. (defektas skystojoje izoliacijoje).

Pagal dalinių išlydžių proceso imitavimo modeliu nustatytas funkcines ar statistines charakteristikas gali būti nustatoma dujų koncentracija esant ribinėms

(lengvoms ir sunkioms) įrenginio darbo sąlygoms. Pagal defekto kitimo greitį sudaromos dujų koncentracijos pokyčio priklausomybės nuo eksploataavimo trukmės, kai įrenginyje atsiranda defektas.

Analizuojant praktikoje išmatuotą dujų koncentraciją keičiantis eksploataavimo trukmei buvo palygintos modelių apskaičiuotos nomogramos ir periodinės kontrolės rezultatai.

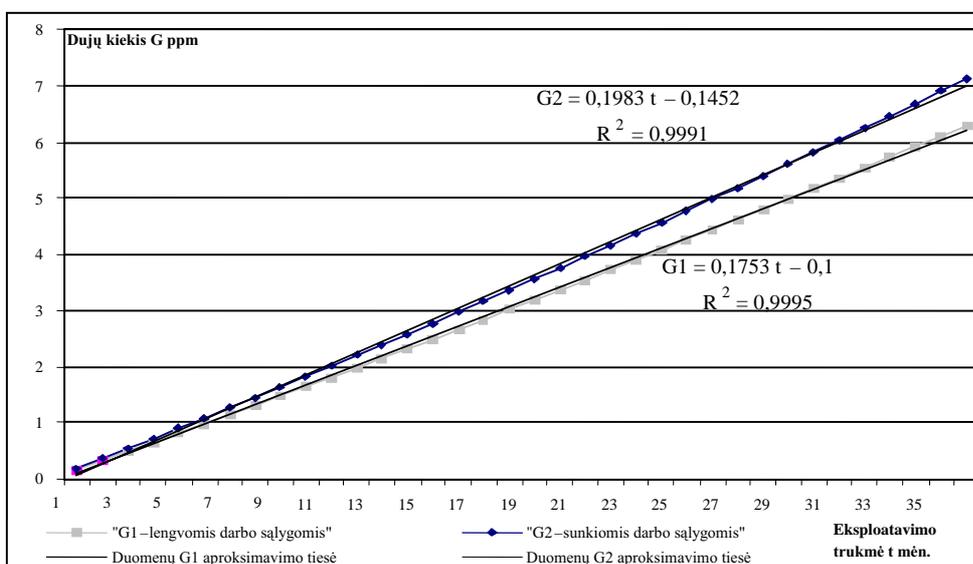
Pagal dujų išsiskyrimo pobūdį, defektas gali būti dėl kibirkščiavimų ir įkaitimų, kai magnetiniai šuntai arba aktyviosios dalies elementai užsitrupina į baką. Be to, tokios konstrukcijos transformatoriuose galimas žemosios įtampos išvadų lanksčių ryšių perkaitimas. Pagal dujų kiekį alyvoje galima spręsti apie

kietosios izoliacijos perkaitimą.

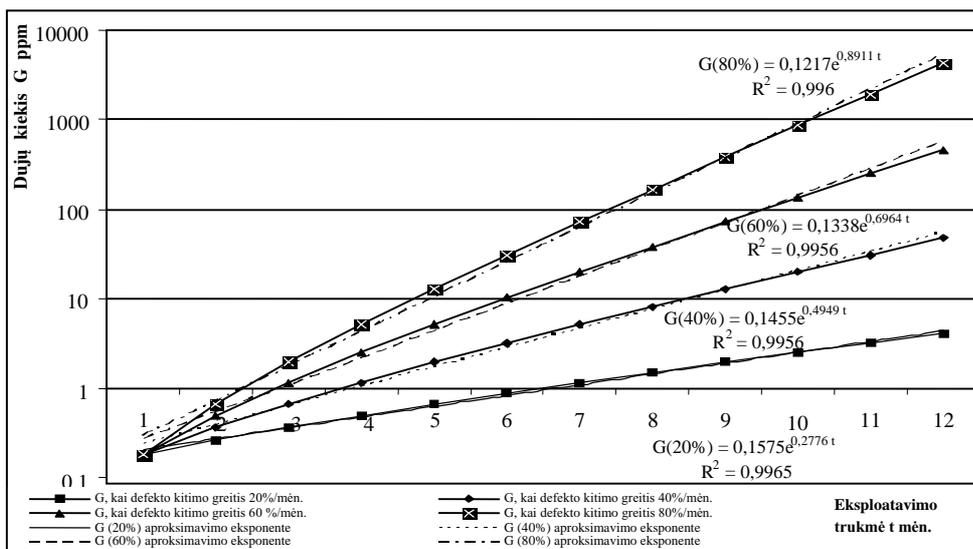
Galios transformatoriui pasinaudojus sudarytu procesų imitavimo izoliacijoje modeliu, buvo apskaičiuotos defekto kitimo charakteristikos. Charakteristikos modeliuotas imitaujant 0,1 mm ir 0,25 mm skersmens defektą. Defekto kitimo greitis – 40%/mėn. Eksperimentinės dujų koncentracijos kitimo charakteristikos, apskaičiuotos pasinaudojus sudarytu modeliu, parodytos 13 pav.

Periodiškai kontroliuojant dujų kiekį skystojoje izoliacijoje, pagal nustatytą dujų kiekio pokytį per atitinkamą laiką galima įvertinti įrenginio darbo sąlygas, defekto atsiradimą bei kitimo greitį ir prognozuoti leistiną įrenginio darbo trukmę.

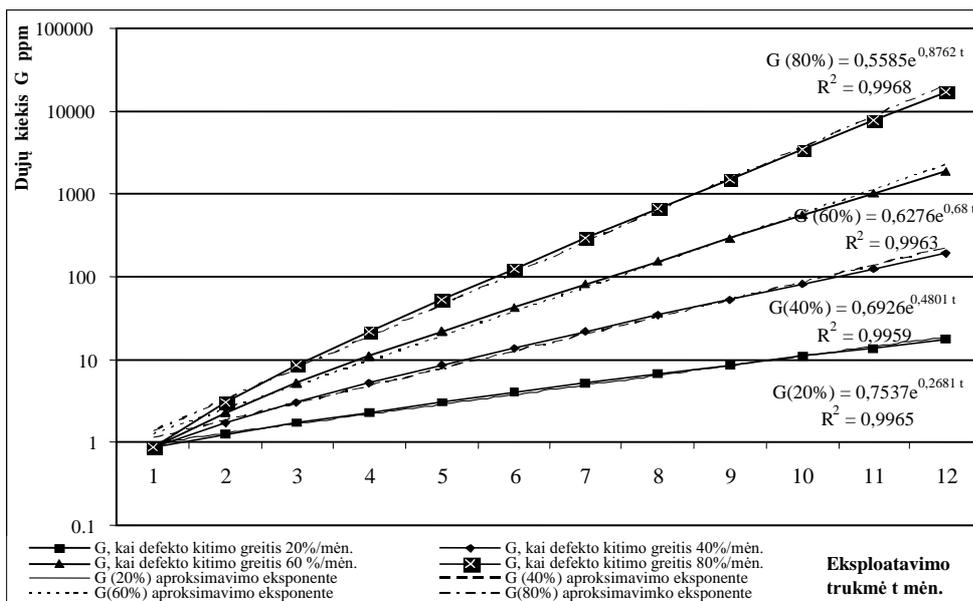
Sudarytas matematinis procesų imitavimo izoliacijoje modelis gali būti panaudotas nustatant galimo defekto pobūdį ir kitimo greitį. Modelio panaudoji-



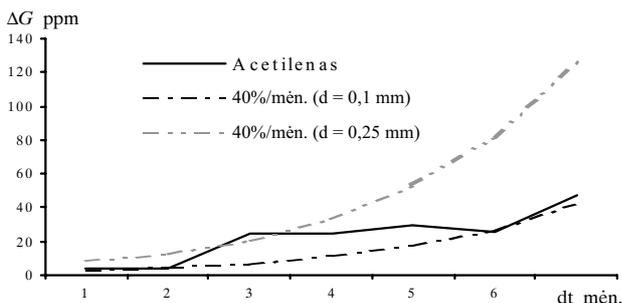
10 pav. Dujų kiekio pokytis nuo dalinių išlydžių poveikio trukmės nesant pavojingų defektų



11 pav. Dujų kiekio pokytis nuo dalinių išlydžių poveikio trukmės atsiradus defektui kietojoje izoliacijoje



12 pav. Dujų kiekio pokytis nuo dalinių išlydžių poveikio trukmės atsiradus defektui skystoje izoliacijoje



13 pav. Eksperimentinės ir teorinės dujų koncentracijos kitimo charakteristikos

mo pavyzdyje eksperimentinė kitimo charakteristika (ištinė linija) atitinka defekto, kurio skersmuo apie 0,1 mm, didėjimą 40% per mėnesį greičiu (skiriamoji linija). Per pirmąjį mėnesį kitimo greitis artimesnis didesnio defekto teorinei charakteristikai (dviguba skiriamoji linija). Galima daryti išvadą, kad teorinių charakteristikų parametrai turi būti tikslinami atliekant daugiau matavimų. Pagal šias charakteristikas galima prognozuoti atsiradusio defekto kitimo greitį.

7. IŠVADOS

1. Sudarytas kombinuotosios (skystosios ir kietosios) izoliacijos modelis dalinių išlydžių procesams imituoti bei išsiskyrusių dujų kiekiui nustatyti.

2. Pagal dujų kiekio pokytį įrenginio izoliacinėje alyvoje tarp dviejų periodinių matavimų galima įvertinti eksploataavimo sąlygas per šį periodą.

3. Įrenginių izoliacijoje atsiradusius defektus ir jų kitimo greitį galima nustatyti pagal periodiškai kontroliuojamų dujų, ištirpusių izoliacinėje alyvoje, kiekio pokytį.

4. Sudarytas charakteristikų pokyčių izoliacijoje įvertinimo modelis, naudojamas kartu su periodine kontrolės sistema, gali padidinti įrenginio darbo patikimumą. Pagal pokyčio dydį arba charakteristikų kitimo greitį galima nustatyti atsiradusį defektą, įvertinti įrenginio darbo sąlygas bei prognozuoti patikimo darbo trukmę.

Gauta
2003 02 14

Literatūra

1. Кучинский Г. С., Кизеветтер В. У., Пинталь Ю. С. Изоляция установок высокого напряжения. Москва: Энергоатомиздат, 1987. С. 368.
2. Сви П. М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения. Москва: Энергоатомиздат, 1988. С. 128.
3. Kreuger F. H. Partial discharges detection high voltage equipment. Butterworth & Co (Publishers) Ltd, 1989. 192 p.
4. Гречко О. Н., Калачева Н. И. Современные тенденции в развитии системы контроля и диагностики состояния силовых трансформаторов 110–750 кВ // Энергетика. 1996. № 5. С. 98–112.
5. Keliauskas, Morkvėnas A., Sučila V. Dalinių išlydžių aukštosios įtampos izoliacijoje tyrimas // Elektrotechnika. 1996. T. 20(29).
6. Соколов С. С. Актуальные задачи развития методов и средств диагностики трансформаторного оборудования под напряжением // Энергетика. 1997. № 1. С. 155–168.
7. Аракельян В. Г., Дарьян Л. А. Теория и практика создания сигнализатора горючих газов для мониторинга маслonaполненного оборудования // Электротехника. 1997. № 2. С. 49–55.
8. Дарьян Л. А., Аракельян В. Г. Особенности разрушения изоляционных жидкостей под действием частичных разрядов // Электротехника. 1997. № 5. С. 58–61.
9. Аракельян В. Г., Дарьян Л. А. Теория и практика создания сигнализатора горючих газов для мо-

ниторинга маслонеполненного оборудования // Электротехника. 1997. № 2. С. 49–55.

10. Markevičius L., Morkvėnas A., Sučila V. Aukštosios įtampos įrenginių būklės kontrolės sistema // Energetika. 2000. Nr. 3. P. 84–88.

**Žydrūnas Čeponis, Kęstutis Jasiūnas,
Alfonas Morkvėnas, Renata Stanionienė**

A STUDY OF THE PROCESS OF PARTIAL DISCHARGES IN COMPOSITE INSULATION

S u m m a r y

The processes of partial discharges in paper-oil insulation and their influence on the changes of gas content in oil insulation were analysed. A composite (liquid and solid) insulation model for simulation of partial discharges and estimation of dissolved gas quantities was compiled. The functional dependences of partial discharges on the influencing factors and the possible geometric parameters of defects were investigated. The exploitation time influence on the gas quantity alterations was established under regular work conditions and in case of defects.

Key words: partial discharges, process of partial discharges, model of composite insulation, defects insulation

**Жидрунас Чяпонис, Кястутис Ясюнас,
Альфонсас Морквенас, Рената Станёнене**

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В КОМБИНИРОВАННОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Р е з ю м е

В статье рассматриваются процессы частичных разрядов в комбинированной изоляции и их влияние на изменения концентрации образовавшегося в трансформаторном масле газа. Разработана модель комбинированной изоляции для исследования процессов частичных разрядов и выделения газов. Исследовано влияние величины дефекта и других факторов на процесс формирования частичных разрядов и газа. Определены зависимости изменения количества образовавшегося газа в разных условиях работы электрооборудования и скорости изменения дефекта.

Ключевые слова: частичные разряды, процесс образования частичных разрядов, модель комбинированной изоляции, дефекты изоляции