

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
Міністерство освіти і науки України

Г. В. Безпрозванних, О. В. Рогинський

**КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ
ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКОВОЛЬТНОЇ
КОМПОЗИТНОЇ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ
ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН**

МОНОГРАФІЯ

Харків
Друкарня Мадрид
2023

УДК 621.315

Б39

Рецензенти:

В. Ф. Болюх, д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ» (м. Харків)
О. М. Петренко, д-р техн. наук, доцент, Харківський національний
університет міського господарства імені О. М. Бекетова,
(м. Харків)

Публікується відповідно до рішення вченої ради Національного
технічного університету «Харківський політехнічний інститут»,
протокол № 2 від 04. 02. 2022 г.

Безпрозваних Г. В. Конструктивно-технологічні
Б39 рішення підвищення електричних характеристик
високовольтної композитної електроізоляційної системи
електричних машин : монографія / Г. В. Безпрозваних,
О. В. Рогинський. Харків : Друкарня Мадрид, 2023. 137 с.

ISBN 978-617-8254-06-3

В монографії визначено вплив електрофізичних характеристик та товщини діелектричного бар'єру на розподіл електричного поля у високовольтній композитній ізоляції електричних машин. Експериментально підтверджено, що композитна ізоляція з підвищеним вмістом слюдинітового бар'єру і склотканиною меншої товщини має на (8–16)% вищі значення короточасної електричної міцності. Доведено ефективність виявлення технологічних дефектів на підставі порівняння амплітуди імпульсів часткових розрядів. Обґрунтовано методику моніторингу стабільності технологічного процесу виготовлення електроізоляційних систем, що базується на застосуванні контрольних карт кумулятивних сум опору ізоляції. Для аспірантів, студентів, спеціалістів, інженерів та дослідників в галузі електроізоляційної, кабельної та оптоволоконної техніки.

Іл. 44. Табл. 14. Бібліогр. 139 найм.

УДК 621.315

ISBN 978-617-8254-06-3

© Безпрозваних Г. В., Рогинський О. В., 2023
© НТУ «ХПІ», 2023
© ТОВ «Друкарня Мадрид», 2023

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 ВИСОКОВОЛЬТНА КОМПОЗИТНА ІЗОЛЯЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН, ВИМОГИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ	9
1.1 Види електричної ізоляції високовольтних електричних машин	10
1.2 Корпусна термореактивна композиційна ізоляція електричних машин високої напруги на основі просочених стрічок	17
1.3 Конструкторські та технологічні рішення вирівнювання електричного поля на виході обмотки з паза високовольтних електричних машин	26
1.4 Висновки за розділом 1	35
РОЗДІЛ 2 РЕГУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ У ВИСОКОВОЛЬТНОЇ КОМПОЗИТНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН	38
2.1 Математична модель накопичення поверхневого заряду на плоскій границі розділу двох діелектриків	39
2.2 Вплив електрофізичних характеристик і товщини діелектричного бар'єра на розподіл електричного поля у високовольтній композитній ізоляції	43
2.3 Верифікація математичної моделі розподілу електричного поля у високовольтній термореактивної композитної ізоляції електричних машин	47
2.4 Електричне поле у пазовій частині електричних машин високої напруги	53
2.5 Регулювання електричного поля у лобовій частині електричних машин високої напруги	57
2.6 Експериментальна перевірка стабільності нелінійних властивостей напівпровідних протиковоронних покриттів у процесі прискореного електричного і теплового старіння	63
2.7 Висновки за розділом 2	66

РОЗДІЛ 3 ТЕХНОЛОГІЧНІ ДЕФЕКТИ У ВИСОКОВОЛЬТНІЙ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНІЙ СИСТЕМІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН, ДІАГНОСТИЧНІ ОЗНАКИ ТА ТЕХНІКА ВИЯВЛЕННЯ	68
3.1 Типові технологічні дефекти у електроізоляційній системі електричних машин	70
3.2 Чутливість часового тренду опору ізоляції до технологічних дефектів у електроізоляційній системі електричних машин	73
3.3 Ефективність виявлення технологічних дефектів у композитній електроізоляційній системі електричних машин за характеристиками часткових розрядів	78
3.4 Діелектрична спектроскопія термореактивної композитної електроізоляційної системи електричних машин	85
3.5 Сукупні характеристики корпусної електроізоляційної системи у режимі вимірювань параметрів індуктивності та добротності	92
3.6 Висновки за розділом 3	97
РОЗДІЛ 4 МОНІТОРИНГ СТАБІЛЬНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН	99
4.1 Статистичні характеристики для оцінки стабільності технологічного процесу	100
4.2 Опір ізоляції як інтегральний показник стабільності технологічного процесу виготовлення електроізоляційних систем	102
4.3 Статистичний аналіз за опором ізоляції стабільності технологічного процесу виготовлення електроізоляційних систем	106
4.4 Контрольні карти кумулятивних сум для оцінки стабільності технологічного процесу виготовлення електроізоляційних систем	113
4.5 Висновки за розділом 4	115
ВИСНОВКИ	118
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	121

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

ВЕС – високовольтна електрична ізоляція

ВНП – вакуумно-нагнітальне просочення

CuSum – кумулятивна сума

ЕМ – електрична машина

MR – розмах, що ковзає

ТЕД – тяговий електричний двигун

ЧР – часткові розряди

ВСТУП

Розвиток електроенергетики вимагає постійного введення нових потужностей генеруючого електроустаткування. В даний час в Україні частка обладнання гідро- та теплоелектростанцій, яка відслужила вже понад 30 років, становить приблизно 68 %. Тому гостро стоїть питання про технічне переозброєння станцій на базі сучасного електроенергетичного обладнання, зокрема, генераторів з підвищеними техніко-економічними показниками. Удосконалення конструкцій генераторів тісно пов'язане зі зростанням електродинамічних, теплових й термомеханічних навантажень, що потребує вирішення низки важливих прикладних задач, в тому числі в області впровадження нових електроізоляційних матеріалів з адаптованими технологічними процесами виготовлення систем ізоляції статорних обмоток, а також розробки і широкого впровадження сучасних систем моніторингу для виявлення дефектів на технологічній стадії виготовлення високовольтних термореактивних електроізоляційних систем.

Працездатність електричних машин високої напруги, в першу чергу, визначається надійністю систем ізоляції обмотки статора. Згідно зі статистичними дослідженням, проведеними в Північній Америці (США і Канада), понад 37 % відмов генераторів і електродвигунів з повітряним охолодженням і до 56 % відмов гідрогенераторів пов'язані безпосередньо з проблемами електричної ізоляції статорів цих машин.

Для нових електричних машин високої напруги підвищення ресурсу необхідно передбачити на стадії проєктування за рахунок застосування електроізоляційних систем з підвищеною електричною міцністю і класом нагрівостійкості ізоляції. Найбільш

виправданими є системи корпусної термореактивної ізоляції на основі попередньо просочених склослюдинітових стрічок або непросочених з вакуумно-нагнітальним просоченням у епоксидному компаунді з покриттям пазової та лобової частин протикоронними покриттями.

Так, за рахунок зниження товщини ізоляції на 15–20 % потужність електричних машин може бути підвищена в тих же габаритах на 4–10 %, що відповідає зниженню витрат чорних і кольорових металів при їх виробництві на 3–8 %. Підвищення допустимого перегріву обмоток на 20°С дозволяє збільшити потужність електричних машин на 13–15 %, тобто на 10–12 % знизити їх матеріаломісткість. Від технологічності електроізоляційних матеріалів багато в чому залежить ступінь механізації та автоматизації обмотувально-ізолювальних робіт, тривалість технологічного циклу виготовлення електроізоляційної системи та електричної машини в цілому.

Поліпшення експлуатаційних та енергетичних характеристик електричних машин постійного і змінного струму високої напруги пов'язано зі зростанням електродинамічних, теплових й термомеханічних навантажень на електроізоляційну систему. Вдосконалення та впровадження сучасних систем високовольтної термореактивної композитної електроізоляційної системи особливо гостро стоїть в умовах імпортозаміщення.

Сучасні високовольтні системи композитної ізоляції електричних машин, які складаються зі склослюдопаперових стрічок (сухих або попередньо просочених), повинні мати високу електричну і механічну міцність, досить низьку вартість при збереженні високих техніко-експлуатаційних характеристик, бути нагріво-, вологостійкими та технологічними. Застосування ізоляції класу нагрівостійкості Н (180 °С) підвищує надійність електричних

машин, дозволяє при тих же розмірах реалізувати більшу електричну потужність.

Особливо високі вимоги до сучасних електроізоляційних систем ставляться в зв'язку з проєктуванням та виготовленням потужних турбогенераторів з повітряним охолодженням. Корпусна ізоляція обмотки статора є найбільш навантаженим елементом, що піддається одночасному впливу електричного поля, температури і термомеханічних напружень. Допустима робоча напруженість електричного поля корпусної ізоляції в області однорідного електричного поля (плоскої сторони стрижня) досягає значень (3,0–3,2) кВ/мм для ізоляції, що виготовлена з композитної термореактивної ізоляції на основі шлюдопластових стрічок з підвищеним вмістом діелектричного бар'єру методом гідростатичного режиму в бітумних автоклавах без попереднього опресування. Ізоляція в прямолінійній частині в меншій мірі схильна до впливу електричного поля. Найбільш напруженою в електричному сенсі частиною є місце виходу стрижня з паза, що потребує регулювання електричного поля для зменшення вірогідності виникнення пробою газових включень всередині твердої ізоляції або електричних розрядів в газі по поверхні твердого діелектрика.

Таким чином, виникає необхідність вирішення важливої науково-прикладної задачі щодо впровадження сучасних електроізоляційних матеріалів, що забезпечують високі електричні характеристики високовольтних електроізоляційних композитних систем з адаптованою технологією та сучасними системами моніторингу на технологічній стадії виготовлення електричних машин.

Розділ 1

ВИСОКОВОЛЬТНА КОМПОЗИТНА ІЗОЛЯЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН, ВИМОГИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ

Прогрес у електромашинобудуванні, в тому числі і електричних машин високої напруги, визначається якісним рівнем електроізоляційних матеріалів, які в порівнянні з магнітними і провідниковими мають найбільші резерви для вдосконалення. Ефективність електроізоляційних матеріалів реалізується, головним чином, за допомогою композитних електроізоляційних систем. Вони в значній мірі визначають експлуатаційні, енергетичні характеристики, довговічність і надійність електричних машин.

Підвищення рівня властивостей систем ізоляції і нагрівостійкості дозволяє збільшити електричні, фізико-механічні та теплові навантаження на ізоляцію, тобто підвищити питомі характеристики електричних машин або збільшити термін їх служби. В результаті досягається відносне скорочення витрат електротехнічної сталі, чорних і кольорових металів, обмотувальної міді на одиницю потужності електрообладнання.

До електричних машин (ЕМ) високої напруги відносяться турбогенератори, гідрогенератори, синхронні компенсатори, синхронні і асинхронні двигуни великої потужності з номінальною напругою 3 кВ й вище. Надійність і довговічність електричних машин обумовлена, головним чином, їх технічними показниками і якістю електроізоляційних матеріалів [1–16].

Так, в даний час відбувається повернення до повітряного охолодження в турбогенераторах на новому технічному рівні і, перш

за все, із застосуванням сучасних схем охолодження, більш сучасної термореактивної корпусної ізоляції обмотки статора, нової ізоляції ротора, електротехнічної сталі зі зменшеними питомими втратами, новітніми конструктивними матеріалами й технологіями [1-2, 4-8].

Основною особливістю роботи електричної ізоляції машин високої напруги є складні умови експлуатації. Електрична ізоляція піддається впливу перенапруг, ударним динамічним навантаженням, високої робочої температури і перепадів температури, вібрації, зволоженню. Електрична ізоляція повинна мати комплекс електричних, механічних, теплових, хімічних властивостей та бути технологічною для забезпечення працездатності електричної машини.

Вибір ізоляції впливає як на розміри, масу, вартість, надійність і довговічність електричної машини, так і на технологічність її виготовлення. Статистика відмов електричних машин показує, що значна частина їх відбувається в основному через приховані дефекти в ізоляції обмоток. Так, наприклад, аналіз відмов асинхронних двигунів показав, що (85...95) % відмов пов'язано з обмоткою статора (міжвиткове замикання – 93 %, міжфазне – 5 %, замикання на корпус – 2 %) [3, 11-18].

1.1 Види електричної ізоляції у високовольтних електричних машинах

За призначенням у ЕМ електрична ізоляція поділяється на наступні види [9-10, 19-21].

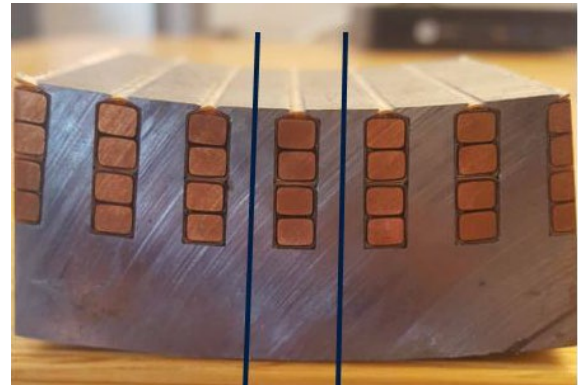
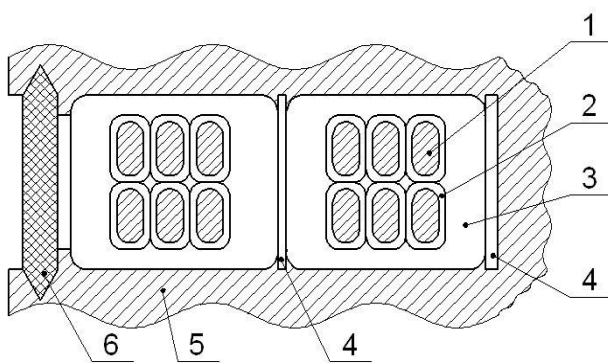
1. Корпусна (головна) ізоляція, яка відокремлює провідники від магнітопроводу (осердя) (рис. 1.1). Високовольтна корпусна ізоляція тривалий час працює в області сильного електричного поля: робоча напруженість електричного поля перевищує

напруженість початку часткових розрядів у повітряних включеннях.

2. Міжфазна ізоляція і ізоляція з'єднань обмотки, яка розділяє різні фази і кінцеві елементи обмотки фази, що знаходяться в роботі під різними потенціалами.

3. Ізоляція витка, яка розділяє витки у одній секції або котушці обмотки (рис. 1.1).

4. Ізоляція елементарних провідників, яка розділяє провідники у одному витку або у стрижні (одновиткова котушка) обмотки (рис. 1.1).



1 – провідник мідний, 2 – ізоляція між елементарними провідниками, 3 – корпусна ізоляція (головна), 4 – ізоляція між витками, 5 – сталь статора, 6 – клин

Рисунок 1.1 – Конструкція ізоляції паза обмотки статора генератора

Провідникова ізоляція забезпечує ізоляцію кожного елементарного провідника один від одного. Вона наноситься на провід у вигляді емалі, волокнистих плівкових матеріалів у процесі його виготовлення на кабельному заводі. При виготовленні обмотки з голих шин або стрічок провідникову ізоляцію наносять на електромашинобудівному заводі. У стрижневих обмотках фазних роторів асинхронних двигунів роль провідникової ізоляції виконує корпусна ізоляція стрижнів.

Виткова ізоляція забезпечує ізоляцію витків кожної котушки одна від одної. В обмотках із круглого проводу виткова ізоляція не використовується. Її роль у таких обмотках виконує провідникова ізоляція. Виткова ізоляція застосовується в багатовиткових котушках високовольтних машин і машинах спеціального виконання.

Міжфазна ізоляція забезпечує ізоляцію кожної фази обмотки від інших фаз. Міжфазна ізоляція застосовується тільки в обмотках машин змінного струму, котушки яких не ізолюються до укладання у пази. У двошарових обмотках міжфазна ізоляція у пазовій частині встановлюється у вигляді проміжних прокладок між сторонами котушок. У лобових частинах міжфазну ізоляцію встановлюють між котушками різних фаз у вигляді прокладок з листового ізоляційного матеріалу. При ізолюванні перед укладкою котушок з гільзової або безперервної ізоляцією роль міжфазної ізоляції грає корпусна.

Корпусна (зовнішня) ізоляція ізолює всі витки котушки від корпуса й інших металевих частин машини. Корпусна ізоляція обов'язкова для всіх обмоток (крім короткозамкнених обмоток роторів асинхронних машин і демпферних синхронних). Умовно корпусну ізоляцію котушок розділяють по призначенню на три види: стягуючу, основну корпусну й покривну.

Конструкція ізоляції обмоток визначається номінальною напругою, конструкцією електричної машини й конфігурацією її пазів. Термін служби електричної машини в нормальних умовах (15-20) років визначається головним чином терміном служби ізоляції.

У різних типах електричних машин застосовуються всі або частина з наведених вище видів ізоляції.

Так, в потужних турбо-, гідрогенераторах, синхронних компенсаторах застосовується обмотка статора (рис. 1.2)

стрижневого типу, яка включає корпусну, міжфазну ізоляцію та ізоляцію елементарних провідників.

Конструктивно корпусна ізоляція статорних обмоток в турбо- та гідрогенераторах однакова, але в турбогенераторах товщина ізоляції на (10-20) % більша навіть за однакових значень номінальної напруги. Причина – підвищені вимоги до надійності потужних блоків турбогенераторів [19-20].

Збільшення одиничних потужностей генераторів призвело до значного збільшення як електричних, так і механічних навантажень, що діють на ізоляцію. Основними факторами, що визначають умови роботи ізоляції обмотки статора в процесі експлуатації генераторів, є: номінальна напруга; номінальний струм; робочі градієнти електричного поля в ізоляції в нормальних умовах роботи; імпульсний градієнт електричного поля, що впливає на ізоляцію в умовах комутаційних і грозових перенапруг; механічні дії на ізоляцію в нормальних умовах роботи і в режимах раптових коротких замикань; робоча температура в самій нагрітій точці; навколишнє середовище.

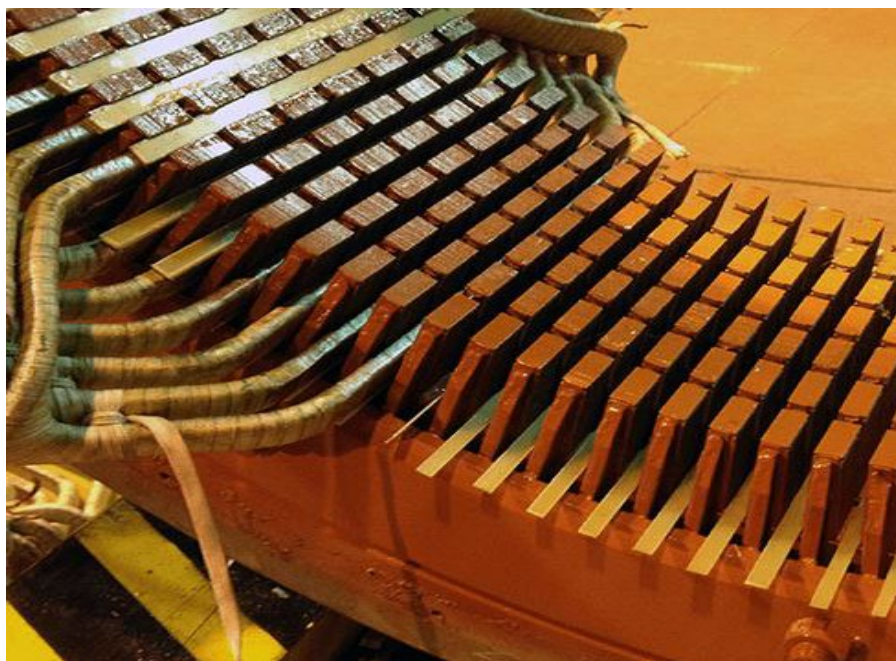


Рисунок 1.2 – Фрагмент обмотки в статорі генератора

При коротких замиканнях механічні навантаження на ізоляцію зростають більш ніж в 50 раз і при збільшенні потужності генераторів до максимальної складають $9 \cdot 10^2 \text{ Н/см}^2$ [9].

Основні вимоги до ізоляції зводяться до наступного. Перш за все, ізоляція повинна бути однорідною для забезпечення механічного тимчасового опору розриву в поздовжньому напрямку при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ не менше $8 \cdot 10^3 \text{ Н/см}^2$ та не менше $4 \cdot 10^3 \text{ Н/см}^2$ при температурі $100 \text{ }^\circ\text{C}$, що обумовлює співвідношення між товщиною між підкладками на основі склотканини, слюдяною паперу та сполучної. Робоча температура не нижче класу В – $130 \text{ }^\circ\text{C}$ (таблиця 1.1).

Середнє значення електричної міцності, що визначено на відрізках натурних стрижнів з товщиною ізоляції від 3 до 4 мм при плавному підйомі напруги при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ не менше 28 кВ/мм , при $100 \text{ }^\circ\text{C}$ – не менше 25 кВ/мм .

За напруженості електричного поля 10 кВ/мм та робочій температурі ізоляція повинна зберігати властивості не менше 250 годин. Робочий градієнт напруженості електричного поля – не менше $2,5 \text{ МВ/м}$.

Тангенс кута діелектричних втрат повинен бути не більше (4-5) % при температурі $20 \text{ }^\circ\text{C}$ і не більше 10 % при температурі $130 \text{ }^\circ\text{C}$. Приріст тангенсу кута діелектричних втрат при підйомі напруги до робочої повинен бути не більше 2 % за температури $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Одночасно ізоляція повинна бути в механічному сенсі гнучкою: напруга здвигу ізоляції відносно провідників повинна бути не менше $10 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$. Теплопровідність ізоляції – не менше $0,25 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ [9].

Ізоляція повинна бути стійкою до циклічних впливів температури в діапазоні від 40 до 155 °С. Після 1200 циклів ізоляція повинна мати електричну міцність не нижче встановлених норм контрольної випробувальної напруги. Ізоляція повинна також витримувати не менше 500 000 вібрацій з відносною деформацією $1 \cdot 10^{-5}$ відносних одиниць при напрузі 24 кВ.

Таблиця 1.1 – Температурний індекс, нагрівостійкість і характеристика основних груп електроізоляційних матеріалів [9]

Температурний індекс	Температура, °С, (клас нагрівостійкості)	Характеристика основних груп електроізоляційних матеріалів
ТІ90	90 (Y)	Волоконні непросочені матеріали з целюлози, бавовни, шовку, полістирол, поліетилен
ТІ105	105 (A)	Просочені волоконні матеріали з целюлози, бавовни або шовку, гетинакс, текстолит
ТІ120	120 (E)	Лавсанові плівки і деякі інші синтетичні плівки, а також склотекстоліт на бакелітовій смолі
ТІ130	130 (B)	Клеєні слодянні матеріали (міканіти) і матеріали на основі азбесту, скловолокно, вживане з органічними зв'язуючими і просочуючими складами
ТІ155	155 (F)	Матеріали на основі слоуди, азбесту і скловолокна, вживані в поєднанні з синтетичними зв'язуючими і просочуючими складами
ТІ180	180 (H)	Матеріали на основі слоуди, азбесту і скловолокна, вживані в поєднанні з кремнійорганічними зв'язуючими і просочуючими складами
ТІ200	200 (200)	Поліаміди, композиційні матеріали з нагрівостійкими органічними зв'язуючими
ТІ220	220 (220)	Поліаміди, фторопласти, матеріали з кремнеземних ниток з кремнійорганічними зв'язуючими
ТІ250	250 (250)	Діелектрики неорганічного походження: електрокераміка, слоуда без зв'язуючих компонентів, фторопласт -4

Протягом всього строку експлуатації ізоляція повинна витримувати стиснення, що пульсує, з амплітудними значеннями від $3,5 \cdot 10^5$ до $10,0 \cdot 10^5$ Н/м². Ізоляція повинна витримувати ударно циклічні навантаження в кількості 200 000 ударів з енергією $5 \cdot 10^5$ Н/м² та бути волого- й маслостійкою.

Для поліпшення теплопровідних властивостей ізоляції на основі склослюдинітових стрічок, просочених смолою, вводять різні наповнювачі. Наповнювачами можуть бути оксиди, нітриди та карбіди металів, а також деякі неметалічні оксиди. Наприклад, оксид алюмінію, магнію, цирконію й інших металів. Сьогодні у світовій практиці реалізуються три основні напрями підвищення теплопровідності ізоляції, що вміщує слюду: оптимізація складу існуючих ізоляційних стрічок; створення наповнених ізоляційних стрічок; розробка модифікованого високотеплопровідного компаунду [22-27].

Основна мета оптимізації складу ізоляційних стрічок – створення композиції з максимальним відносним вмістом компонентів із найбільшим значенням коефіцієнта теплопровідності λ і, відповідно, з мінімальним вмістом компонентів із найменшим значенням коефіцієнта теплопровідності. При цьому технологічні та електричні властивості стрічки не повинні погіршуватися. Оскільки мінімальне значення коефіцієнта теплопровідності у складі ізоляційної стрічки має епоксидний компаунд ($\lambda \leq (0,17-0,21)$ Вт/(м·К)), то зниження його вмісту приведе до підвищення коефіцієнта теплопровідності усієї композиції і, відповідно, до поліпшення електричних характеристик корпусної ізоляції [22-27].

Сучасна пазова ізоляція потужних турбогенераторів має відносно низьку питому теплопровідність. Значення коефіцієнта

теплопровідності ізоляції знаходяться в інтервалі 0,25 Вт/(м·К), тоді як міді і сталі перевищують у 1500 і 300 разів відповідно. Поліпшення теплопередачі в системі ізоляції статорної обмотки турбогенератора можливо здійснити зменшенням товщини корпусної ізоляції; збільшенням допустимої робочої температури корпусної ізоляції; підвищенням коефіцієнта теплопровідності корпусної ізоляції [23-24].

1.2 Корпусна термореактивна композиційна ізоляція електричних машин високої напруги на основі просочених стрічок

Корпусна ізоляція є найбільш навантаженим елементом, на який одночасно впливає сильне електричне поле, температура та циклічні термомеханічні навантаження, електродинамічні зусилля, котрі обумовлюють появу вібрацій [18, 21].

Функція розподілу пробивних напруг корпусної ізоляції стрижнів ЕМ при частоті 50 Гц задовільно описується нормальним законом розподілення (рис. 1.3) [4-6]. Крива 1 отримана за результатами випробувань 270 стрижнів, тобто ізоляція 4-х машин; крива 2 – емпірично [6]

$$P_s(U) = 1 - [1 - P_1(U)]^S, \quad (1.1)$$

де $P_1(U)$ – вірогідність пробою ізоляції окремого стрижня, $P_s(U)$ – вірогідність пробою корпусної ізоляції ЕМ, S – кількість стрижнів в машині.

Термореактивна ізоляція Termolastic з сухої скломікастрічки з наступним вакуумно-нагнітальним просоченням термореактивною сполучною розроблена фірмою Westinghouse

(США) у 1949 році. Термореактивна ізоляція Місарал з просочених термореактивної сполучною склослюдовмістких стрічок з наступним опресуванням гідростатичним способом у бітумі розроблена фірмою General Electric (США) у 1958 році [1, 4-5, 9].

Сучасна корпусна електрична ізоляція електричних машин виконується на основі слюди у вигляді стрічок: слюдинітові або слюдопластові відповідно (таблиця 1.2) [9-10, 28-35]. Для електричних машин високої напруги застосовується тільки слюдинітові стрічки на основі слюди мусковіт.

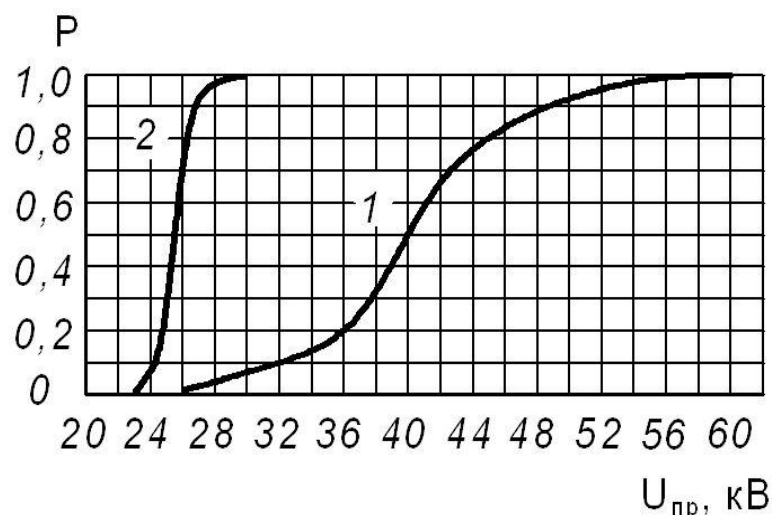


Рисунок 1.3 – Функція розподілу пробивних напруг нової корпусної ізоляції стрижнів (крива 1) та цілих машин (крива 2) на лінійну напругу 6,6 кВ

Слюдинітовий папір отримують термохімічним способом, а слюдопластовий – гідродинамічним. В обох випадках слюдяний скрап попередньо нагрівають до високої температури. При цьому отримані елементарні лусочки слюди мають розмір в поперечнику (0,008-0,8) мкм і товщину (0,2-4) мкм. Далі на машинах з виробництва паперу з лусочок відливають папероподібний матеріал – слюдяний папір [9-10].

Вміст слюди у високовольтної ізоляції, її хімічний склад і розміри лусочок визначають тривалу електричну міцність: збільшення розміру лусочок збільшує шлях розряду; зменшення товщини лусочок також призводить до зростання електричної міцності.

Для забезпечення гнучкості, механічної міцності та технологічності слюдяні стрічки армують стрічками на основі скла. При намотуванні слюдяних стрічок потрібна велика механічна міцність при натягу стрічок, яку один слюдяний папір не може забезпечити.

Необхідну механічну міцність забезпечує підкладка. У більшості типів ізоляції в якості підкладок застосовуються скловолокнисті матеріали різних типів (склотканина, скломарля) і різної товщини: від 0,02 до 0,05 мм. Окремі фірми для деяких типів ізоляції застосовують матеріали з паперу на основі синтетичних волокон [28-31].

Підкладка на основі склотканини не забезпечує електричну міцність ізоляції по причині пористої структури, яка навіть при просоченні має електричну міцність нижче, ніж слюдострічка. Композиційна ізоляція, що виконана із застосуванням скловолокнистих матеріалів, які грають роль армуючого матеріалу, відрізняється більш високою механічною міцністю: підвищується межа міцності при розтягуванні і вигині, твердість ізоляції, тобто характеристики, що визначають надійність ізоляції в експлуатації. Скловолокнисті матеріали відрізняються високою термічною стійкістю. В діапазоні температури (130-155) °С, що є граничними для обмоток турбогенераторів і електричних машин, скляні волокна не зазнають структурних змін, не втрачають вихідних

властивостей і не виділяють продуктів термічної деструкції протягом тривалого часу [9-10].

Таким чином, до складу вихідного стрічкового матеріалу (стрічки) входять підкладка і діелектричний бар'єр, комплексне функціональне призначення котрих є забезпечення теплової стійкості, електричної, механічної міцності та технологічності.

Папір на основі слюди містить від 25 % до 35 % повітряних включень, що обумовлює зменшення електричної й механічної міцності. При просочуванні пори заповнюються просочувальним складом, який перешкоджає виникненню іонізаційних процесів і розвитку розрядів по поверхні пластинок і лусочок слюди. Крім того, просочувальний склад пов'язує один з одним лусочки слюди і окремі шари ізоляції, склеює ізоляцію з плетеним стрижнем. Просочувальна рідина в значній мірі визначає механічні характеристики, зокрема, міцність, еластичність і електричні характеристики: тангенс кута діелектричних втрат, електричну міцність, опір ізоляції.

Таблиця 1.2 – Порівняльні характеристики слюдяного паперу на основі слюди мусковіт [10]

Показник	Тип			
	слюдинітова	слюдинітова	слюдопластова	слюдопластова
Номінальна поверхнева густина, г/м ²	75	120	160	180
Розривна міцність, Н/см	5	9,5	4,5	5,2
Здатність до просочування, с	35	80	29	35
Пористість по Герлею, с/100 мл	1200	2500	400	500
Питома електропровідність водної витяжки, мкСм/м	2250	2430	920	950

За наявності сполучної стрічка називається попередньо просоченою, при відсутності сполучної рідини – сухою [9-10, 28-29].

Для ізоляції електричних машин на основі слюдопаперових стрічок застосовують сполучні на основі епоксидних смол: мають високі механічні властивості, адгезію до різних матеріалів, нагрівостійкість (клас В і F), короностійкість та низький коефіцієнт усадки (3-5) % [31, 33-34]. Для просочення ізоляції статорних обмоток турбо- і гідрогенераторів широко застосовуються епоксидні і епоксіноволачні смоли [9-10].

Загальна технологія виготовлення попередньо просоченої композитної ізоляції на основі стрічок складається з просочення слюдяного паперу (**діелектричний бар'єр**) епоксіноволачними смолами з прискорювачами твердіння, видалення летких речовин і армування стрічкою на основі скла (**підкладка**) або синтетичними паперами та полімерними плівками [9].

Як правило, в процесі виготовлення стрічок ці стадії здійснюються одночасно. Стадія просочення слюдопаперу є найбільш важливою частиною технології. Для освоєння слюдострічок з підвищеною поверхневою густиною використовується папір з поліпшеною здатністю до просочення [10]. Необхідно відмітити, що в наступний час ведуться наукові дослідження щодо модифікації властивостей слюдопаперу для поліпшення здібності до просочення завдяки введенню наночасток, наприклад, оксиду титану [26–27]. Найбільші переваги для виготовлення термореактивної композитної високовольтної ізоляції мають попередньо просочені склослюдинітові стрічки з підвищеним вмістом слюдяного бар'єру (таблиця 1.3) [10].

Таблиця 1.3 – Властивості попередньо просочених слюдопаперових стрічок

Показник	«Вон Рол Изола», Самикатерм 366.28	«Ізовольта». CALMICAGLAS 2005	Слюдинітова, ЛСЕН -526Г, «Елінар»	Слюдопластова, Елмікатерм 55409, «Елінар»
Товщина, мм	0,18±0,02	0,18±0,02	0,16±0,02	0,18±0,02
Поверхнева густина (загальна), г/м ²	265±26	258±23	216±15	247±22
Поверхнева густина слюдяного паперу, (мусковіт), г/м ²	120±7	120±10	85±5	120±8
Поверхнева густина склотканини, г/м ²	32±3	33±3	45±4	38±4
Вміст сполучної, г/м ²	113±20	110±15	86±10	89±10
%	42	40	40	36
Руйнівна міцність, Н/см	≥150	≥150	≥140	≥140
Текучість, %	≥45	≥45	≥45 -70	≥45 -70
Клас ізоляції по нагрівостійкості	F	F	F	F

Застосування попередньо просочених епоксіноволачними смолами з прискорювачами твердіння слюдинітових стрічок дозволяє підвищити теплові навантаження на ізоляцію і скоротити цикл виготовлення виключенням з технології попереднього опресування ізоляції в механічних пресах та значно знизити ймовірність пошкодження слюдяного бар'єру, тим самим збільшити тривалу електричну міцність ізоляції [30, 33].

Застосування більш м'якого гідростатичного режиму в бітумних автоклавах без попереднього опресування призводить до підвищення електричної міцності стрижнів гідрогенератора на

(15-20) %, а кількість браку при випробуваннях високою напругою знижується в 3–5 рази [9].

Поліпшення властивостей слюдяного паперу значно збільшує електричну міцність конструкції ізоляції. Найбільші закордонні електромашинобудівні фірми домоглися збільшення робочих градієнтів електричного поля в корпусній ізоляції статорних обмоток турбо- та гідрогенераторів до (3-3,2) МВ/м [33-34]. Значною мірою такий прогрес став можливий завдяки переходу на нові ізоляційні матеріали з підвищеним вмістом слюдяного бар'єру (таблиця 1.3) [28-30].

З огляду на те, що властивості всіх розроблених систем ізоляції приблизно однакові, а для їх виготовлення застосовуються матеріали, що складаються з одних і тих же компонентів, більшість електро-машинобудівельних фірм відмовилися від власних розробок.

Електроізоляційні матеріали та просочувальні склади отримують у відомих виробників. Основним постачальником матеріалів на основі слюдомістких (50-60 % світового ринку) є фірма Isovolta (Австрія) (табл. 1.4): Poroband, Porofab, Porofas для вакуумно-нагнетального просочення (VPI); Calmicafab, Calmica, Calmicaglos для Resin-Rich-технології. Так, фірма VonRoll Isola (Швейцарська Республіка) поставляє матеріали: Samicarog для вакуумно-нагнетального просочення; стрічки Samicatherm, Filosam, Samicaflex для Resin-Rich-технології [28-29].

Таблиця 1.4 – Системи електричної ізоляції високовольтних електричних машин провідних світових виробників [9]

Фірма (країна)	Система ізоляції та електроізоляційні матеріали
«General Electric» (США)	Стрічки на основі тільки паперу типу Samica з просоченням епоксидною смолою без розчинника, з високою ударною в'язкістю.
Alsthom (Франція)	Isotenax-N. Стрічки на основі паперу типу Samica, просоченої лаком на основі бісфенольної і новолачної смол (розробка нового паперу Samica з більш великими лусочками слюди). Porozival. Стрічки на основі паперу Kogemica, призначені для вакуумно-нагнітательного просочення. Durival. Стрічки на основі паперу типу Samica, просочені епоксіноволачною сполучною.
Toshiba (Японія)	Tosrich. Стрічки на основі паперу типу Samica і Kogemica, просочені епоксіноволачною смолою. Tostait-1. Стрічки на основі паперу типу Samica і Kogemica, призначені для вакуумно - нагнітательного просочення стрижневих обмоток. Tostait-2. Стрічки на основі паперу типу Samica і Kogemica, призначені для вакуумно-нагнітательного просочення двигунів високої напруги.
Mitsubishi (Японія)	Стрічки на основі інтегрованого слюдяного паперу типу Kogemica з наступним вакуумно-нагнітательним просоченням модифікованою епоксидною смолою бісфенол А з ангідридним отверджувачем. Resin-Rich. Стрічки на основі паперу Samica, просочені епоксіноволачною смолою.
Van Roll Isola (Швейцарія)	Samicaterm. Стрічки на основі паперу типу Samica, просочені епоксіноволачною смолою
Siemens (Німеччина)	Micalastic. Стрічки на основі паперу типу Kogemica для вакуумно-нагнітательного просочення
Isovolta (Австрія)	Vacuvolt. Стрічки на основі паперу типу Kogemica для вакуумно-нагнітательного просочення.

Технологія виготовлення обмоток генераторів і електричних машин високої напруги ведеться за двома напрямками.

1. Ізоляція, яку виготовляють з просочених склослюдомістких стрічок, з подальшим обпресуванням в прес-формі або гідростатичним шляхом в бітумному котлі (ізоляція слюдотерм, ВЕС-2).

2. Ізоляція, яку виготовляють з сухих слюдомістких стрічок, з подальшим вакуумно-нагнітальним просоченням епоксидним компаундом (ізоляція типу «Моноліт» [9], (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Загальний вигляд термореактивної ізоляції «Моноліт-4» після запікання

Так, термореактивна ізоляція типу "Слюдотерм" [9-10] в своїй основі має просочену склослюдинітову стрічку товщиною 0,17 мм, яку накладають на пазову частину обмоток котушок (при стрижневий обмотці, яка ізолюється стрічкою, накладають кілька шарів на пазові і лобові частини). Лобову частину котушок

ізолюють, в першу чергу, різними еластичними матеріалами у вигляді слюдопластострічки, ескапонової (матеріал на основі синтетичного каучуку) та інших стрічок. Накладення стрічки відбувається в розігрітому стані для розм'якшення до необхідної еластичності сполучної, яким просякнута стрічка.

1.3 Конструкторські та технологічні рішення вирівнювання електричного поля на виході обмотки з паза високовольтних електричних машин

У сучасних генераторах застосовується безперервна електрична ізоляція, котра у пазовій та лобовій частинах виконується з одного матеріалу. Струмопровідна частина стрижнів виконується з шин прямокутного перерізу, внаслідок чого головна корпусна ізоляція у пазу знаходиться в різко неоднорідному електричному полі [35-43].

При виготовленні та експлуатації високовольтних електричних машин однією з важливих проблем є зменшення рівня поверхневих розрядів на обмотці статора [38-43]. За даними виробників, до 60 % проблем, що виникають при експлуатації, пов'язані саме з розвитком поверхневих розрядів [40-41]. Усунення коронування повітряних проміжків в електричній машині здійснюється шляхом використанням двох різних за функціями і характеристиками видів покриттів. Пазове покриття наноситься на прямолінійну частину елементів обмотки статора (стрижня або котушки). Таке покриття має провідні властивості та забезпечує контакт у багатьох точках між покриттям і стінками паза і усуває різницю потенціалів між поверхнею ізоляції і стінкою паза [38-40]. Друге протикоронне лобове покриття обмотки статора електричних машин, що починається від кінця пазового

покриття, призначене для ослаблення крайового ефекту на кінці пазового покриття [44-48].

У системі струмопровідна частина (I) – ізоляція (II) – прямокутні мідні провідники (III) (рис. 1.5, а) при припущенні, що електричне поле є плоским, двомірним, потенціал φ визначається на підставі рівняння Лапласа

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0, \quad (1.2)$$

отримано картину електростатичного поля (рис. 1.5, б) [9] чисельним методом скінчених різниць, який широко застосовується для розрахунку магнітних полів електричних машин [49-51].

Граничні умови при розрахунках прийнято наступними: відносний потенціал мідної поверхні $\varphi=0$ (область 1-7, рис. 1.5, а), потенціал поверхні заліза торця статора (область 4-5-6, рис. 1.5, а) і стінок паза $\varphi=1$. На інших границях (області 1-2-3-4 та 6-

7 рис. 1.5, а) $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$. На границях розділу діелектричних середовищ з різною діелектричною проникністю задано умови безперервності потенціалу та стрибка нормальної похідної [52-54]

$$\varepsilon_- \frac{\partial \varphi_-}{\partial n} = \varepsilon_+ \frac{\partial \varphi_+}{\partial n}. \quad (1.3)$$

Коефіцієнт нерівномірності $k_{\text{нер}}$ електричного поля біля кромки в повітрі (рис. 1.5, б, $\varphi=0,1$) дорівнює 10 [9]. Навіть за відсутності технологічних дефектів виготовлення напруженість в цій області перевищує середнє значення в 10 разів. Для

електричної машини на лінійну напругу 6 кВ напруженість електричного поля в цій області становитиме 17 кВ/мм, що сприяє розвитку часткових розрядів повітряних проміжків [55-61].

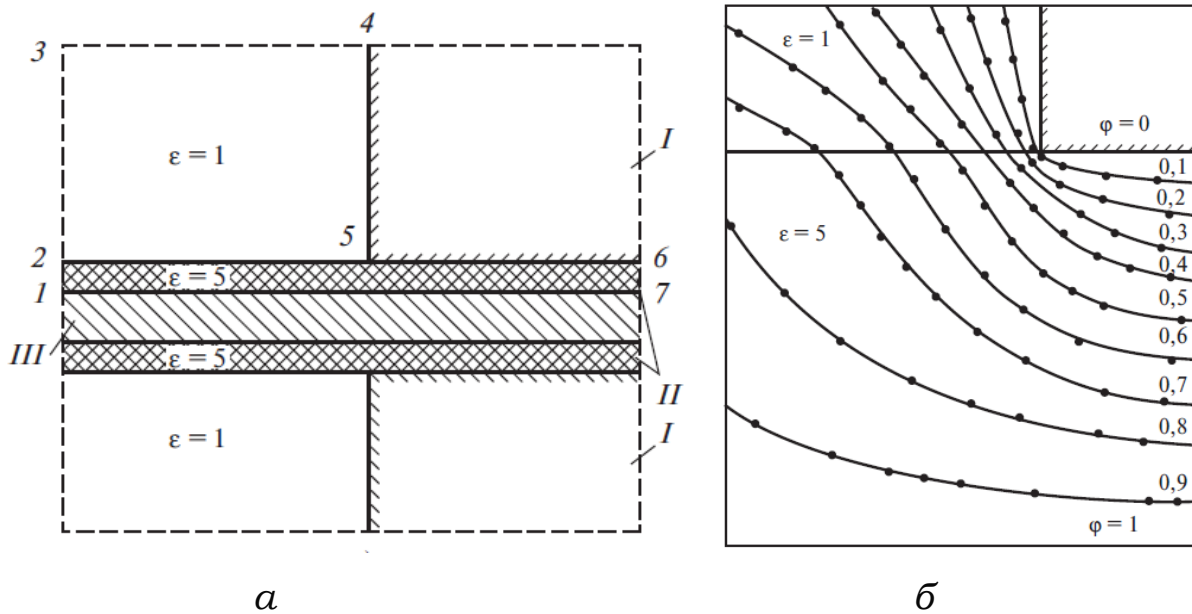


Рисунок 1.5 – Схематичне уявлення виходу котушки з паза та картина електричного поля [9]

Для зменшення максимальної напруженості електричного поля кути прямокутних мідних проводів виконуються заокругленими з відповідним радіусом r (рис. 1.6) або на ізоляцію накладається прокладка з фольги [55,61].

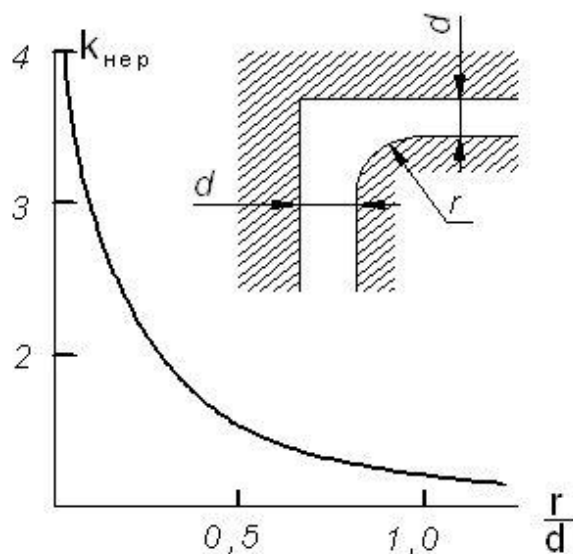


Рисунок 1.6 – Вплив радіусу заокруглення r на нерівномірність розподілу електричного поля в пазу статора

Наявність повітряного зазору d між ізоляцією та стіною паза призводить до виникнення часткових поверхневих розрядів по поверхні ізоляції. Для усунення розрядів в пазовій частині застосовуються конструктивні рішення, зокрема, провідні покриття, які забезпечують зменшення вірогідності виникнення поверхневих розрядів по поверхні ізоляції (позиція 1, рис. 1.7) [38-40].

У лобовій частині (позиція 2, рис. 1.7) для вирівнювання електричного поля при виході обмотки з паза застосовують ємнісне регулювання введенням провідних та напівпровідних екранів (рис. 1.8) або покриття ізоляції напівпровідними лаками [44-48].

Недоліком ємнісного регулювання електричного поля у лобовій частині є технологічна складність виготовлення. При наявності дефектів та слабких місць в прошарках ізоляції між екранами відбувається шунтування бездефектних ділянок ізоляції.

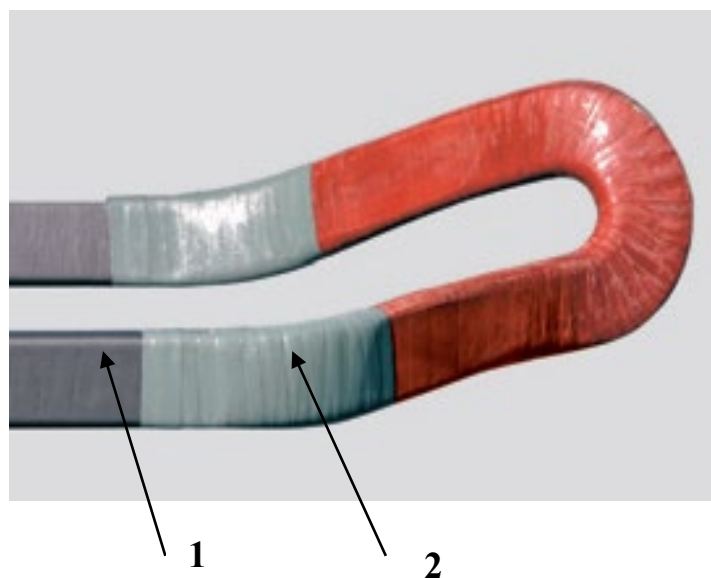


Рисунок 1.7 – Конструктивні рішення щодо регулювання електричного поля у пазовій та лобовій частинах обмоток

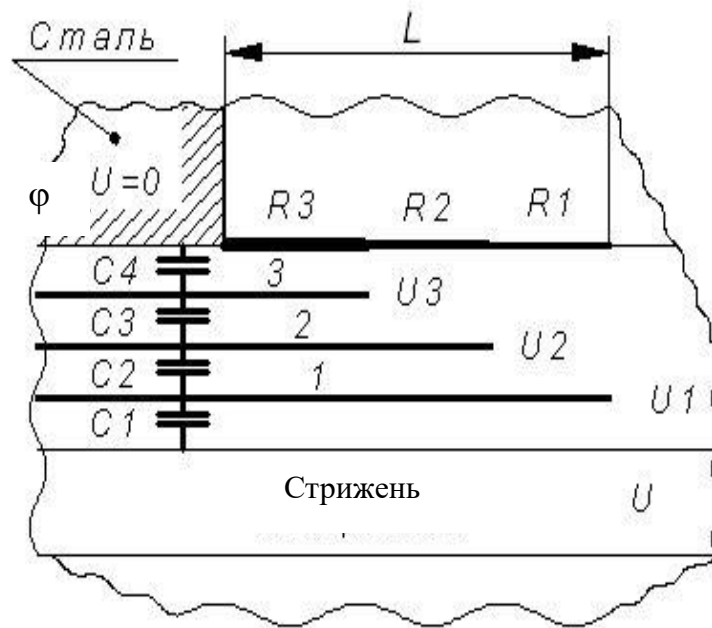


Рисунок 1.8 – Ємнісне регулювання електричного поля у лобовій частині обмоток (R_1, R_2, R_3 – опори та C_1, C_2, C_3 – ємності екранів)

Застосування електричної ізоляції, стійкої до дії поверхневих розрядів (трекінгостійкої), не знімає питання щодо регулювання електричного поля для зменшення вірогідності виникнення розрядів у повітряних проміжках у лобовій частині обмоток. Покриття ділянок ізоляції напівпровідними покриттями у наступний час є найбільш ефективним методом регулювання електричного поля. Напівпровідні покриття відносяться до елементів електроізоляційних конструкцій високовольтних електричних машин.

За відсутності покриття у лобовій частині поздовжня складова електричного поля на поверхні ізоляції з краю зовнішнього електрода секції обмотки перевищує напругу іонізації повітря навіть при нарузі на внутрішньому електроді (провіднику) меншому, ніж робоче, що призводить до появи в цій області інтенсивних розрядних процесів [41-43]. Такі розряди перешкоджають проведенню випробувань ізоляції і сприяють

поступовому її старінню при експлуатації. Усунення іонізації повітря у лобовій частині обмотки досягається застосуванням протикоронного покриття, що призначене для вирівнювання розподілу напруги по поверхні ізоляції і зниження поздовжньої складової напруженості електричного поля до рівня, що забезпечує відсутність іонізації [62].

Для запобігання крайових розрядів по поверхні ізоляції статорних обмоток високовольтних електричних машин застосовують напівпровідні протикоронні покриття з нелінійною вольт -амперною характеристикою [33-35]. Покриття виконуються у вигляді емалей та стрічок. Для придання властивостей напівпровідника в склад додається порошок карбїду кремнію (SiC) [45-48].

У таблиці 1.5 наведено ефективність застосування напівпровідного покриття, наповнювачем в котрому застосовано порошок карбїду кремнію з вмістом (60-80) % зерен діаметром більше 20 мкм з коефіцієнтом нелінійності $\alpha > 2,6$ см/кВ. Випробування виконано на макетах ізоляції з сухих або просочених стрічок, на котру намотувалася напівпровідна стрічка з нахлестом в (1/4-2/3) ширини стрічки [48].

Напівпровідні стрічки мають більш високі механічні характеристики та не пошкоджуються при укладці обмотки, що має місце при застосуванні емалей. Після нанесення напівпровідних емалей потрібен час (до 24 годин) для сушки, власно полімеризації, що призводить до зростання у часі технологічного циклу виготовлення електроізоляційних систем. Стрічкові варіанти напівпровідникового покриття незамінні при виготовленні термореактивної ізоляції високовольтних електричних машин методом вакуумно-нагнітального просочення

(ВНП), оскільки покриття на основі емалі наносяться після технологічної стадії ВНП. В статорі з повністю укладеної обмотки існують недоступні місця для нанесення покриття, що унеможливає випробування електричних машин.

Таблиця 1.5 – Ефективність напівпровідних покриттів у вигляді стрічок для вирівнювання електричного поля у високовольтній ізоляції [48]

Ізоляція	Середня товщина ізоляції, мм	Довжина покриття, мм	Напруга початку коронування, кВ	Напруга перекриття, кВ
Просочені стрічки	2,0	79,0	27,0	51,0
Сухі стрічки	2,8	61,0	21,0	49,5
Сухі стрічки	2,3	100,0	20,4	61,0

Стрічкові покриття мають більш високі значення напруги виникнення коронних розрядів [48]. Важливо забезпечення стабільності нелінійних властивостей в процесі експлуатації електричних машин високої напруги (рис. 1.9) [46, 62-63].

Стрічки з нелінійними вольт-амперними характеристиками (рис. 1.10, а) виготовляються провідними світовими фірмами [39-40].

Конструктивно стрічки складаються з підкладки, наприклад, на основі поліетилентерефталатної плівки, сполучної на основі епоксидних компаундів та наповнювача на основі карбиду кремнію у відповідному співвідношенні, яке ефективно вирівнює електричне поле для запобігання виникненню зовнішніх поверхневих (коронних) розрядів.

Залежність поверхневої провідності напівпровідного покриття від напруженості електричного поля описується залежністю (рис. 1.10, б) [48, 64-69]

$$\gamma = \gamma_0 \cdot e^{\beta E}, \quad 1(4)$$

де γ – поверхнева провідність, См, при напруженості електричного поля E ,

γ_0 – поверхнева провідність за відсутності прикладеного електричного поля,

β – коефіцієнт нелінійності, який враховує нелінійну залежність поверхневої провідності від електричного поля напівпровідного покриття.



Рисунок 1.9 – Фотографія протикоронного покриття пазової (верхня частина) та лобової (нижня) частин після 1080 годин теплового старіння [46]

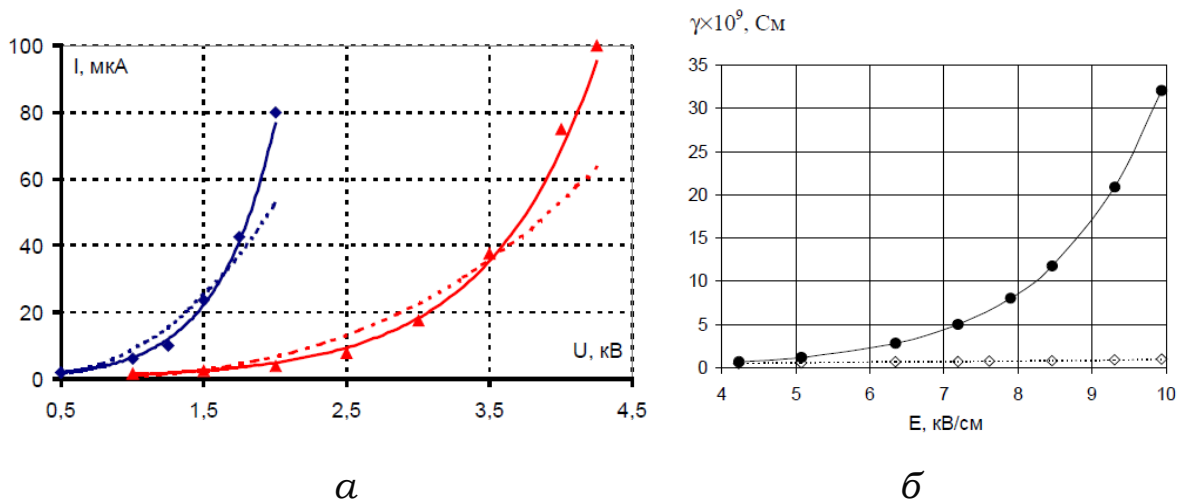


Рисунок 1.10 – Вольт -амперні характеристики (а) та залежності поверхневої провідності (б) напівпровідних стрічок різних виробників при дії електричного поля постійної напруги після циклу вакуумно-нагнітального просочення [46]

Номинальна напруга в турбогенераторах найбільш висока і досягає 24 кВ, в гідрогенераторах – 18 кВ. Провідні світові виробники виготовляють турбогенератори на лінійну напругу до 27 кВ [1-5]. Тенденція до зниження матеріаломісткості на (30-60) % електричних машин високої напруги призводить до зростання напруженості електричного поля в електричній ізоляції при робочих умовах і, відповідно, випробуваннях [6-8].

Це призводить, по -перше, до зростання електричного навантаження в покритті, а по-друге, до зниження в 2-3 рази розрядної напруги у газовому охолоджуючому середовищі і створенні під дією часткових розрядів [42-43, 60] підвищеного вмісту озону, який різко прискорює хімічне руйнування органічних компонентів покриття та ізоляції при переході до повітряного охолодження (замість водневого при тиску 3-4 атм.) у великих турбогенераторах.

1.4 Висновки за розділом 1

Пріоритетний напрямок модернізації систем електричної ізоляції електричних машин високої напруги полягає у застосуванні сучасних електроізоляційних матеріалів з підвищеним коефіцієнтом теплопровідності на основі стрічкових матеріалів.

У свою чергу, застосування нових електроізоляційних матеріалів потребує вдосконалення та підвищення рівня технології їх переробки. Для нових електричних машин підвищення ресурсу необхідно і можливо передбачити вже на стадії проектування за рахунок застосування нових електроізоляційних конструкцій з підвищеною електричною міцністю і класом нагрівостійкості ізоляції.

Забезпечення надійності і довговічності електричних машин високої напруги при комплексному впливі електричних, механічних, теплових та інших факторів на електричну ізоляцію в експлуатації потребує вдосконалення складу корпусної електричної ізоляції з відповідною технологією виготовлення, що спрямована на зведення до мінімуму обсягу зовнішніх та внутрішніх газових порожнин, збереження цілісності і електричної міцності слюдяних бар'єрів та удосконалення методів контролю монолітності термореактивної ізоляції за електричними характеристиками.

Найбільш виправданими сучасними електроізоляційними системами, що забезпечують ресурс та надійність роботи електричних машин, є системи корпусної термореактивної ізоляції на основі попередньо просочених склослюдинітових стрічок або не просочених з вакуумно-нагнітальним просоченням в епоксидному

компаунді з покриттям пазової та лобової частин протикоронними покриттями.

Виходячи з проведеного огляду вимог до комплексу характеристик електричної ізоляції електричних машин високої напруги, сучасних термореактивних електроізоляційних систем, методів регулювання електричного поля у пазової та лобової частинах статорних обмоток, необхідно вирішити наступні задачі:

- визначити вплив електрофізичних характеристик та товщини діелектричного бар'єру на розподіл електричного поля у високовольтної композитної ізоляції електричних машин на підставі математичної моделі накопичення поверхневого заряду на плоскій границі розділу підкладка – діелектричний бар'єр;
- виконати верифікацію математичної моделі впливу діелектричного бар'єру на короткочасну та тривалу електричну міцність термореактивної композитної ізоляції електричних машин;
- розробити методичку розрахунку розподілу електричного потенціалу по поверхні ізоляції уздовж лобової частини стрижнів високовольтної електричної машини при застосуванні напівпровідних покриттів та виконати експериментальну перевірку стабільності нелінійних властивостей покриттів у процесі тривалого електричного й теплового старіння;
- довести ефективність виявлення технологічних дефектів у електричної ізоляції на підставі реєстрації часткових розрядів у високовольтної композитної електроізоляційної системі на стадії виготовлення електричних машин;

- виконати моделювання частотних залежностей сукупних діелектричних характеристик на основі схеми заміщення та довести необхідність застосування діелектричної спектроскопії для контролю термореактивної композитної електроізоляційної системи на технологічній стадії виготовлення електричних машин;
- обґрунтувати доцільність застосування опору ізоляції у якості інтегрального показника стабільності технологічного процесу виготовлення електроізоляційних систем;
- довести методику контролю стабільності технологічного процесу виготовлення електроізоляційних систем на застосуванні методу контрольних карт опору ізоляції.

Розділ 2

РЕГУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ У ВИСОКОВОЛЬТНІЙ КОМПОЗИТНІЙ ІЗОЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Сучасні високовольтні системи композитної ізоляції електричних машин складаються зі стрічкових склослюдопаперових матеріалів (сухих або попередньо просочених) [9-10, 28-29]. Основною функцією такої ізоляції є збереження тривалої електричної міцності у умовах тривало діючих теплових, механічних і термомеханічних впливів. Високовольтна ізоляція повинна також мати необхідний рівень технологічності і досить низьку вартість при збереженні високих техніко -експлуатаційних характеристик.

Застосування у якості діелектричного бар'єра слюдопаперу є економічно вигідним, так як він виготовляється з відходів дефіцитної і досить дорогої так званої щипаної слюди [9]. Стрічкова ізоляція на основі слюдинітового та слюдопластового паперу має більшу рівномірність по товщині, підвищену і більш рівномірну електричну міцність у порівнянні з матеріалами на основі щипаної слюди. Поєднання високої еластичності і механічної міцності дозволяють забезпечити отримання щільної, монолітної термореактивної ізоляції [9]. Плоскі слюдяні частки утворюють діелектричний бар'єр і, в залежності від призначення такої комбінованої ізоляції, зв'язуються різними складами рідин, що просочують. Останні можуть бути введені до складу стрічки або заздалегідь, тоді стрічка називається попередньо просоченої (Resin Rich), або вводиться в сухі стрічки після їх обробки в процесі вакуумного просочення під нагнітанням [29-29].

В якості рідин, що просочує, використовуються епоксидні смоли (діанові, циклоаліфатичні і епоксіноволачні), які мають високі

механічні властивості, добру адгезію до різних матеріалів, достатню нагрівостійкість (клас нагрівостійкості В і F) і короностійкість, володіють незначним коефіцієнтом усадки (3-5) % [9].

Механічну міцність забезпечує підкладка на основі склотканини, яка є матеріалом, що забезпечує механічну міцність у такій системі. Так само в ній знаходиться велика частина сполучного складу рідини в разі стрічки, що попередньо просочена. Ізоляція, виконана із застосуванням скловолокнистих матеріалів, має підвищену межу міцності при розтягуванні і вигині. Скловолокнисті матеріали відрізняються високою термічною стійкістю [10].

Електричні характеристики багатошарової композитної ізоляційної системи визначаються як частковим вмістом окремих компонентів, так і їх електрофізичними властивостями.

2.1 Математична модель накопичення поверхневого заряду на плоскій границі розділу двох діелектриків

Високовольтна термореактивна композитна ізоляція електричних машина може бути представлена у вигляді двох шарів діелектрика: слюдопаперової стрічки (1) у якості діелектричного бар'єра та підкладки (2) на основі склотканини з просочувальним складом (3) (рис. 2.1).

У разі застосування слюдопаперу, товщина якого становить сотні мікрометрів, анізотропія властивостей слюди у такому випадку слабо виражена [65].

Найбільш поширений підхід при моделюванні накопичення поверхневого заряду на межі поділу двох діелектричних середовищ заснований на теорії Максвелла-Вагнера для міжфазної поляризації [64-67, 71-73].

Гіпотетична конфігурація границі розділу двох плоских ізотропних діелектриків з електродами видається конденсатором Максвелла (рис. 2.2) [70]: ϵ_1, γ_1 – діелектрична проникність та питома провідність слюдопаперової стрічки товщиною h_1 ; ϵ_2, γ_2 – еквівалентні діелектрична проникність та питома провідність підкладки на основі склотканини з просочувальним складом товщиною h_2 відповідно.

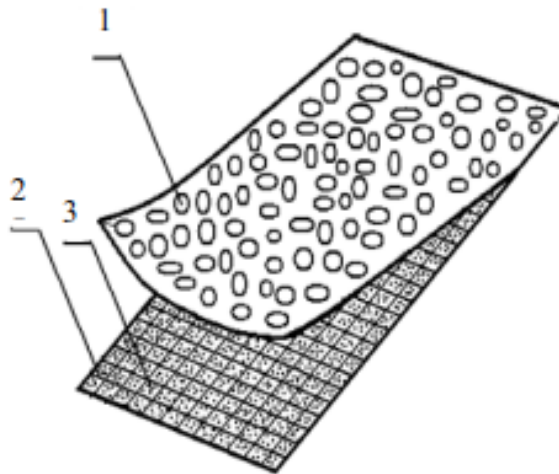


Рисунок 2.1 – Схематичне уявлення трьох компонентної ізоляції двошарової стрічкою [70]

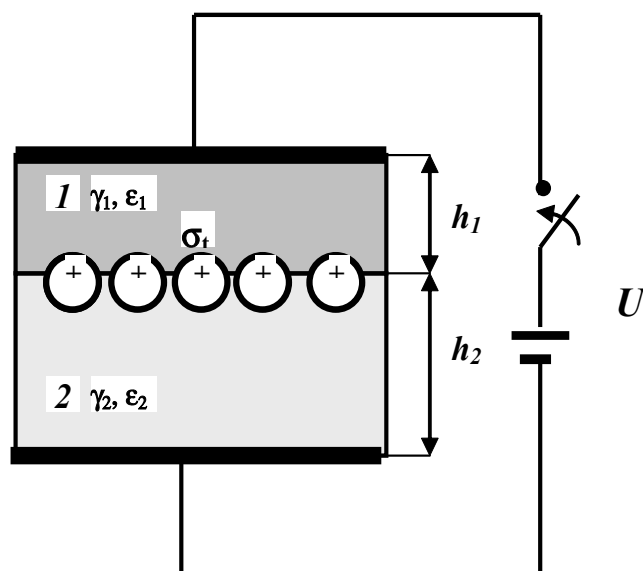


Рисунок 2.2 – Представлення накопичення поверхневих зарядів на границі розділу двох ізотропних діелектриків з різними електрофізичними характеристиками та товщиною при включенні під постійну напругу [70]

У такій системі властивості ізоляції змінюються в залежності від ступінчастої функції на границі розділу середовищ [64]. Розглянемо підключення такого уявного конденсатора до джерела постійної напруги (рис. 2.2) [70].

На поверхні розділу діелектриків діелектрична проникність ϵ (або вектор поляризації) змінюється стрибкоподібно [64]. Стрибок нормальної складової вектора електричного зміщення \vec{D} дорівнює поверхневої густини електричних зарядів [64]. Тангенціальна складова вектора напруженості електричного поля неперервна на будь-якій поверхні розділу середовищ [64]. Для границі розділу слою паперова стрічка (в якості діелектричного бар'єра) (символи 1) – підкладка на основі склотканини з просочувальним складом (символи 2)

$$D_{2n} - D_{1n} = \sigma, \quad E_{1t} = E_{2t}, \quad (2.1)$$

де D_{2n} , D_{1n} – нормальні складові вектора електричного зміщення; ϵ_1 , ϵ_2 – діелектричні проникності діелектриків, σ – поверхнева густина електричних зарядів; E_{1n} , E_{2n} – нормальні, E_{1t} , E_{2t} – тангенціальні складові вектора напруженості електричного поля першого і другого діелектриків відповідно.

У момент включення конденсатора до джерела напруги U поверхнева густина σ електричних зарядів дорівнює нулю, в результаті відповідно до (2.1) напруженість електричного поля в шарах пропорційна діелектричній проникності [64]

$$E_{1n} \epsilon_1 = E_{2n} \epsilon_2. \quad (2.2)$$

У наступний момент часу на розподіл електричного поля в шарах починає впливати струм провідності з відповідною густиною J

$$J_1 = \gamma_1 E_1, \quad J_2 = \gamma_2 E_2 \quad (2.3)$$

де γ_1 , γ_2 – питомі провідності кожного з діелектриків, См/м.

Густина струму в шарах діелектриків не однакова (електрофізичні властивості діелектриків різні), що обумовлює накопичення на границі розділу діелектриків просторового заряду. Перехідний процес закінчується при врівноваженні густини струмів J_1 і J_2 , а також стабілізації поверхневого заряду на межі поділу діелектриків. Для усталеного режиму напруженість електричного поля в шарах пропорційна питомій провідності

$$\gamma_1 E_1 = \gamma_2 E_2 . \quad (2.4)$$

З початкового моменту і до досягнення сталого стану загальний струм в першому і другому діелектриках однаковий і має дві складові: активну, яка обумовлена струмом провідності (струмом витоку), і реактивну, що обумовлена струмом зміщення (струмом абсорбції). Густина загального струму визначається

$$J = \gamma_1 E_1 + \varepsilon_0 \varepsilon_1 \frac{dE_1}{dt} = \gamma_2 E_2 + \varepsilon_0 \varepsilon_2 \frac{dE_2}{dt} , \quad (2.5)$$

де $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична постійна.

Сума падінь напруги на кожному з шарів дорівнює прикладеній напрузі на постійному струмі

$$E_1 h_1 + E_2 h_2 = U , \quad (2.6)$$

де h_1, h_2 – товщина діелектриків.

При об'єднанні (2.5) і (2.6) диференціальне рівняння щодо E_1 має вигляд

$$\frac{dE_1}{dt} \varepsilon_0 (\varepsilon_1 h_2 + \varepsilon_2 h_1) + E_1 (\gamma_1 h_2 + \gamma_2 h_1) = \gamma_2 U , \quad (2.7)$$

рішення якого шукається у вигляді

$$E_1(t) = A e^{-\left(\frac{\gamma_1 h_2 + \gamma_2 h_1}{\varepsilon_0 (\varepsilon_1 h_2 + \varepsilon_2 h_1)}\right) t} + U \frac{\gamma_2}{(\gamma_1 h_2 + \gamma_2 h_1)} , \quad (2.8)$$

де A – постійна інтегрування, яка з урахуванням початкових умов в момент часу $t = 0$ і (2.2) та (2.6) визначається

$$A = U \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1 h_2 - \varepsilon_2 h_1} - \frac{\gamma_2}{\gamma_1 h_2 + \gamma_2 h_1} \right). \quad (2.9)$$

Після підстановки (2.9) в (2.8) напруженість електричного поля в першому та другому шарах двошарового діелектрика з часом змінюється відповідно до (2.10) – (2.11) [70]

$$E_{1t} = U \cdot \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1 h_2 + \gamma_2 h_1} + U \frac{h_1 \cdot (\varepsilon_2 \gamma_1 - \varepsilon_1 \gamma_2)}{(\varepsilon_1 h_2 + \varepsilon_2 h_1) \cdot (\gamma_1 h_2 + \gamma_2 h_1)} e^{-t/\tau} \right), \quad (2.10)$$

$$E_{2t} = U \cdot \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_1 h_2 + \gamma_2 h_1} + \frac{h_2 \cdot (\varepsilon_1 \gamma_2 - \varepsilon_2 \gamma_1)}{(\varepsilon_1 h_2 + \varepsilon_2 h_1) \cdot (\gamma_1 h_2 + \gamma_2 h_1)} e^{-t/\tau} \right), \quad (2.11)$$

де τ – стала часу, с

$$\tau = \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_1 h_2 + \varepsilon_2 h_1}{\gamma_1 h_2 + \gamma_2 h_1}. \quad (2.12)$$

Густина загального струму, яка складається з струму абсорбції J_{abs} і струму витоку J_{cond} , обумовленого наявністю вільних зарядів, визначається [70]

$$J(t) = J_{abs} + J_{cond} = U \cdot \left(\frac{h_1 h_2 (\varepsilon_1 \gamma_2 - \varepsilon_2 \gamma_1)}{(\varepsilon_1 h_2 + \varepsilon_2 h_1)^2 (\gamma_1 h_2 + \gamma_2 h_1)} \exp(-t/\tau) + \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_1 h_2 + \gamma_2 h_1} \right). \quad (2.13)$$

Зміна в часі густини поверхневих зарядів $\sigma(t)$ на границі розділу двох діелектриків [70]

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_1 \gamma_2 - \varepsilon_2 \gamma_1}{\gamma_1 h_2 + \gamma_2 h_1} \cdot U (1 - e^{-t/\tau}). \quad (2.14)$$

2.2 Вплив електрофізичних характеристик і товщини діелектричного бар'єра на розподіл електричного поля у високовольтній композитній ізоляції

На рис. 2.3 представлені результати моделювання для двох випадків: криві 1 – у разі ідентичності електрофізичних характеристик бар'єру і підкладки:

$$\varepsilon_1=\varepsilon_2=4,5, \gamma_1=\gamma_2=2 \cdot 10^{-13} \text{ См/м};$$

$$\text{криві 2, 2' – різних: } \varepsilon_1=4,5, \underline{\varepsilon}_2=3,8, \gamma_1=2 \cdot 10^{-13} \text{ См/м},$$

$$\gamma_2=2 \cdot 10^{-12} \text{ См/м}.$$

Індекси 1 відносяться до бар'єра, 2 – до підкладки.

[Діелектрична проникність та питома провідність підкладки на основі склотканини та просочувального складу в загальному випадку мало відрізняються [10], тому еквівалентні значення цих електрофізичних параметрів вибираються рівними значенням підкладки на основі склотканини]. Товщина діелектричного бар'єра дорівнює $h_1=0,100$ мм, скловолокнистої підкладки – $h_2=0,050$ мм. Крива 2 відповідає розподілу електричного поля в бар'єрі, крива 2' – в підкладці (рис. 2.3, б). Розрахунки виконані для середньої напруженості електричного поля $E_{mid}=15$ кВ/мм у композитній ізоляції [70].

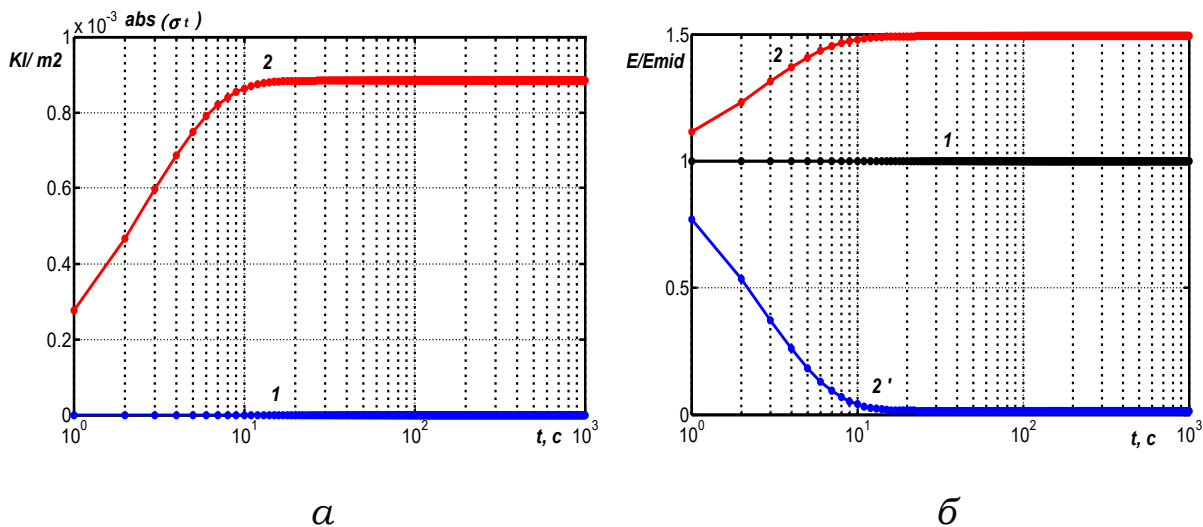


Рисунок 2.3 – Розподіл густини поверхневих зарядів (а) і напруженості електричного поля, (б) на границі розділу підкладка – діелектричний бар'єр [70]

За умови ідентичності електрофізичних характеристик поверхневі заряди не накопичуються на границі розділу діелектричних середовищ (крива 1, рис. 2.3, а) і напруженість електричного поля дорівнює середньому значенню: $E = E_{mid} = 15$ кВ/мм (крива 1, рис. 2.3, б). Перехідний процес – відсутній.

У разі різних характеристик спостерігається перехідний процес тривалістю близько 10 с. У сталому режимі поверхнева густина зарядів становить 0,85 мКл/м² (крива 2, рис. 2.3, а). Напруженість електричного поля в діелектричному бар'єрі перевищує середнє значення на 50% (крива 2, рис. 2.3, б), в підкладці – мізерно мала (крива 2', рис. 2.3, б).

На рис. 2.4 показана динаміка змінення у часі розподілу електричного поля при варіюванні питомої провідності, відносної діелектричної проникності та товщини діелектричного бар'єра [70].

На рис. 2.4, а при незмінній товщині бар'єру та підкладки криві 1 і 2 відповідають:

$$\varepsilon_1=4,5, \varepsilon_2=3,8, \gamma_1=2 \cdot 10^{-13} \text{ См/м}; \gamma_2=2 \cdot 10^{-12} \text{ См/м};$$

криві 1' і 2' – $\varepsilon_1=4,5, \varepsilon_2=3,8, \gamma_1=2 \cdot 10^{-13} \text{ См/м}, \gamma_2=2 \cdot 10^{-11} \text{ См/м}$. відповідно. Товщина діелектричного бар'єра прийнята рівною $h_1=0,100$ мм, підкладки – $h_2=0,050$ мм. Частка вмісту слюди в даному випадку становить 67 % від загального обсягу композитної ізоляції.

Вплив на розподіл електричного поля відносної діелектричної проникності та товщини бар'єру показано на рис. 2.4, б.

$$\text{Криві 1 і 2 відповідають характеристикам: } \varepsilon_1=4,5, \varepsilon_2=3,8, \\ \gamma_1=2 \cdot 10^{-13} \text{ См/м}; \gamma_2=2 \cdot 10^{-12} \text{ См/м}, h_1=0,050 \text{ мм}, h_2=0,100 \text{ мм}.$$

Криві 1' и 2': $\varepsilon_1=3,8, \varepsilon_2=4,5, \gamma_1=2 \cdot 10^{-13} \text{ См/м}; \gamma_2=2 \cdot 10^{-12} \text{ См/м},$
 $h_1=0,100 \text{ мм}, h_2=0,050 \text{ мм}.$

Криві 1'' і 2'': $\varepsilon_1=4,5, \varepsilon_2=3,8, \gamma_1=2 \cdot 10^{-13} \text{ См/м}; \gamma_2=2 \cdot 10^{-12} \text{ См/м},$
 $h_1=0,100 \text{ мм}, h_2=0,050 \text{ мм}$ [70].

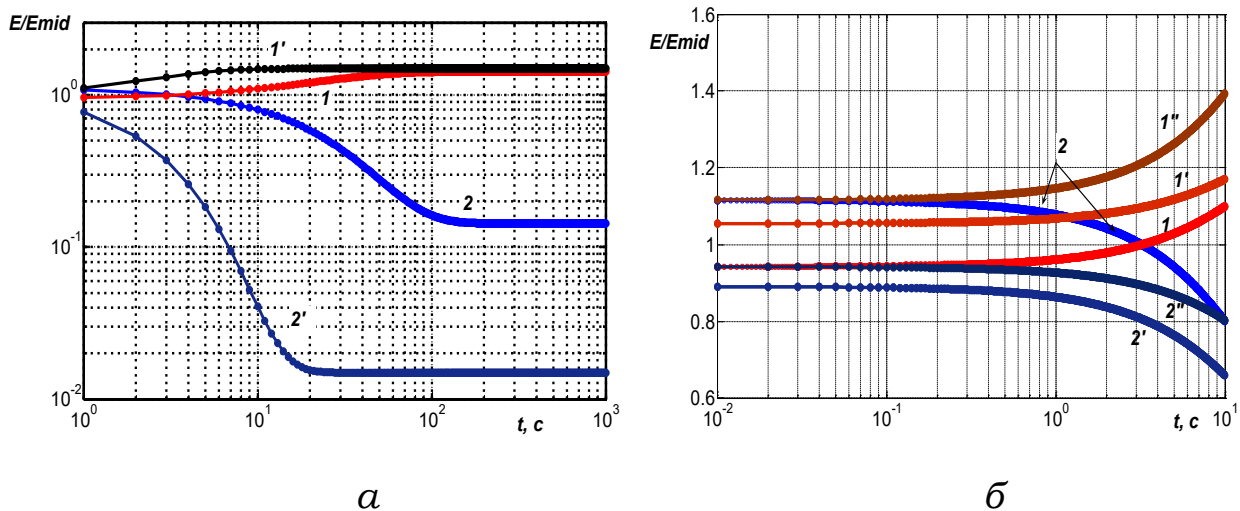


Рисунок 2.4 – Вплив на розподіл електричного поля електрофізичних характеристик і товщини компонентів на границі розділу підкладки – діелектричний бар’єр [70]

В області малих часів перехідного процесу (10 мс – 1 с) на характер розподілу електричного поля істотно впливає співвідношення між діелектричною проникністю бар’єру і підкладки при їх незмінній товщині.

У разі, коли $\epsilon_1 > \epsilon_2$, та $h_1 < h_2$, напруженість електричного поля у підкладці перевищує середнє значення в 1,10 рази (на 10 %), в той час як в бар’єрі – менше середнього значення на 5 % (порівняйте криві 2 і 1 рис. 2.4, б): підкладка навантажується в більшій мірі [70].

Збільшення товщини діелектричного бар’єра (частки вмісту) за умови, що $\epsilon_1 < \epsilon_2$ та $h_1 > h_2$, призводить до підвищення напруженості електричного поля у бар’єрі та «розвантажує» в електричному відношенні підкладку (порівняйте криві 1' і 2' на рис. 2.4, б).

Збільшення товщини (частки вмісту) з одночасним збільшенням діелектричної проникності діелектричного бар’єра ($h_1 > h_2$ та $\epsilon_1 > \epsilon_2$) призводить до зростання напруженості

електричного поля у бар'єрі на 10 % та зменшенню в підкладці на 10 % відповідно (порівняйте криві 1" та 2", рис. 2.4, в).

Таким чином, умова $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ та $h_1 > h_2$ (збільшення частки діелектричного бар'єру в композитній стрічці) забезпечує найбільш сприятливий розподіл електричного поля в компонентах композитної ізоляції. У такому випадку слюдопаперова стрічка виконує функції діелектричного бар'єру – забезпечує електричну міцність, а підкладка на основі склотканини з просочувальним складом – механічну міцність відповідно. Даний факт особливо важливий при роботі під змінною напругою: діелектричний бар'єр забезпечує тривалу електричну міцність композитної ізоляції [70].

2.3 Верифікація математичної моделі розподілу електричного поля у високовольтній термореактивній композитній ізоляції електричних машин

Експериментальна перевірка впливу діелектричного бар'єру на тривалу електричну міцність зразків композитної високовольтної ізоляції виконана на зразках спеціально виготовлених макетів. Для випробування стрічок у стані отвердіння виготовлено по 5 макетів з кожної склослюдопаперової стрічкою різної товщини різних виробників: 1. $h=0,15$ мм, 2. $h=0,14$ мм, 3. $h=0,14$ мм, 4. $h=0,18$ мм, 5. $h=0,18$ мм (таблиця 2.1) [70].

Макети являють мідні шини розміром $6 \times 30 \times 800$ мм, які ізолювані на стрічкоізолюючому верстаті ЛІСП-4 з підігрівом стрічки до температури $(50-60)^\circ\text{C}$ і натягом $(40-60)$ Н.

Макети, закриті планками по широким гранях, опресовані гідростатичним способом.

Короткочасна електрична міцність готових макетів визначена при випробуваннях при ступінчастому підйомі напруги промислової частоти (рис. 2.5). На зразки, що занурені в трансформаторне масло, подано початкову напругу 13 кВ, а далі напруга підвищувалась зі швидкістю 1 кВ/6 хв. Випробування тривали до повного пробою зразків [70].

Коректність адекватності результатів моделювання на постійному струмі експериментальним дослідженням на змінному припустима, тому що в області малих часів перехідного процесу проявляється вплив, як електрофізичних характеристик, так і часткового вмісту діелектричного бар'єра на розподіл електричного поля у композитній ізоляції (див. рис. 2.4, а, б). [Тривала електрична міцність на змінному струмі частоти 50 Гц менше у порівнянні з постійним за рахунок більших діелектричних втрат, зумовлених процесом поляризації] [68].

На рис. 2.5 наведені результати випробувань короткочасної електричної міцності макетів у залежності від товщини композитної ізоляції [70].

Найменший розкид значень пробивної електричної міцності мають системи, товщина ізоляції котрих становить $h=0,14$ мм (крива 3, рис. 2.5, а), що може бути пов'язано з більш рівномірною товщиною склослюдопаперової стрічки за рахунок застосування іншого типу складу рідини, що просочує. Нахил інтегральної функції розподілу електричної міцності макетів з даною системою ізоляції істотно відрізняється від інших (порівняйте криву 3 з кривими 1, 2, 4, 5 рис. 2.5, а).

Таблиця 2.1 – Електричні та фізико-механічні характеристики склослюдопаперових стрічок в початковому стані відповідно до технічного опису

№ п/п	Показник	Стрічка під номером 1	Стрічка під номером 2	Стрічка під номером 3	Стрічка під номером 4	Стрічка під номером 5
1	Товщина, мм	0,15	0,14	0,14	0,18	0,18
2	Масова доля компонентів, % - летучих речовин - в'язуча речовина	0,81 33,7	1,02 35,05	1,0 39,6	1,0 39,4	0,82 36,0
3	Електрична міцність, кВ/мм	48,6	35,4	40	38,1	35,6
4	Руйнівне навантаження при розтягуванні, Н/см	140,5	179,0	182,0	205,8	176,4
5	Плинність сполучної речовини, %	70,1	56,7	50,1	68,7	56,3

Для зразка композитної ізоляції, товщина котрої становить $h=0,15$ мм (крива 1, рис. 2.5, а), спостерігається найбільше значення короткочасної електричної міцності: на рівні 50 % ймовірності середнє значення дорівнює 28,75 кВ/мм (рис. 2.5, б). В даному макеті застосована стрічка з підвищеним вмістом слюдинітового бар'єру і склотканина меншої товщини (відповідно до технічного опису на стрічку).

Для визначення тривалої електричної міцності готові макети піддавалися безперервній витримці під напругою промислової частоти за напруженості електричного поля 15 кВ/мм.

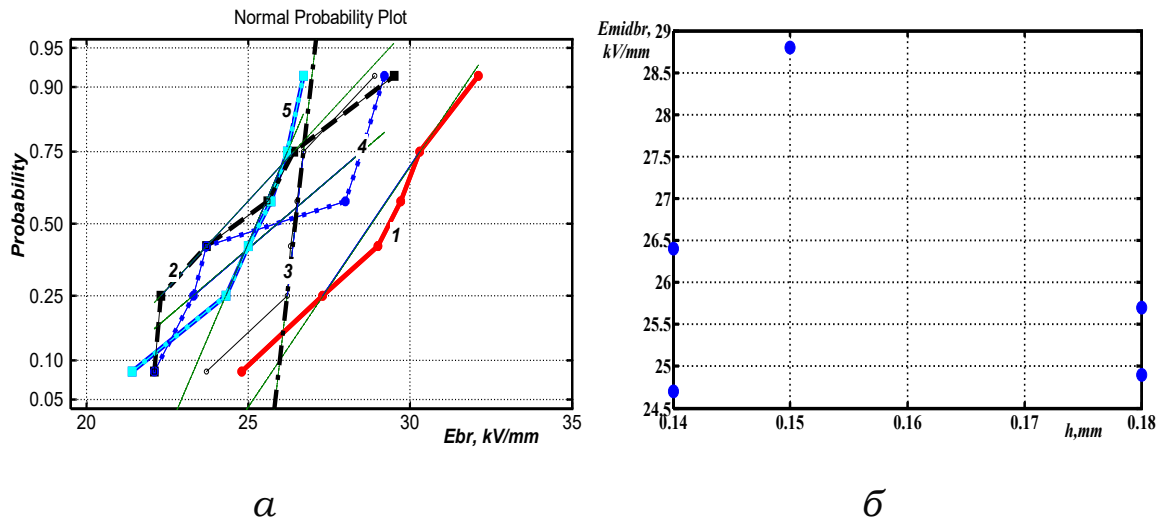


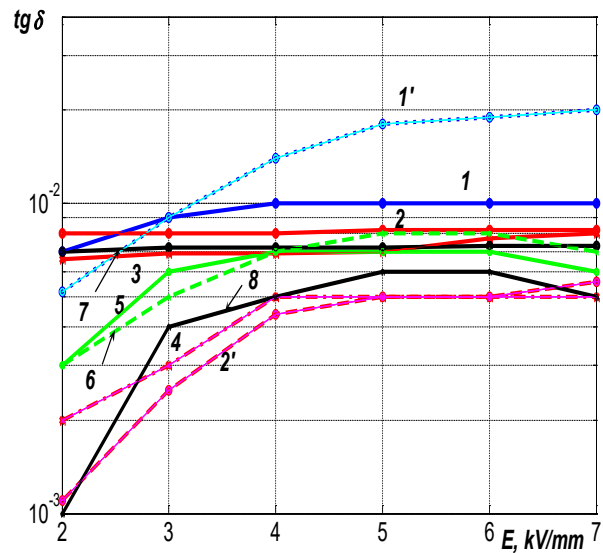
Рисунок 2.5 – Вплив слодинітового бар'єру на короткочасну електричну міцність композитної високовольтної ізоляції електричних машин [70, 74]

Випробування на тривалу електричну міцність макетів доводять (таблиця 2.2), що підвищення вмісту слодинітового бар'єру призводить до зменшення розкиду значень довготривалої електричної міцності [70, 74].

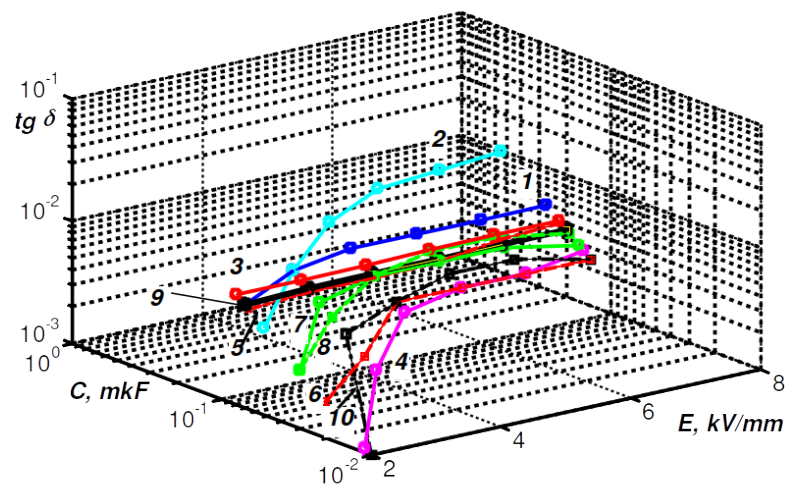
Стрічки з підвищеним вмістом слодинітового бар'єру мають менший вміст в'язучої речовини та меншу розривну механічну міцність (дивись таблицю 2.1). У такому випадку електроізоляційна система є більш жорсткою, що потребує налагодження технологічного процесу виготовлення високовольтних електроізоляційних систем з підвищеним вмістом слодинітового бар'єру. Застосування стрічки під номером 1 з підвищеним вмістом слодинітового бар'єру не представляється можливим на існуючому стрічкоізолюючому верстаті [74].

На рис. 2.6 наведено результати досліджень впливу напруженості електричного поля промислової частоти на тангенс кута діелектричних втрат (рис. 2.6, а, б) та електричної ємності (рис. 2.6, б) термореактивної композитної ізоляції макетів, що

виготовлені зі стрічок різної товщини. Криві на рис. 2.6 відповідають товщині стрічки: 1, 2-0,15 мм; 3, 4, 5, 6-0,18 мм; 7,8, 9, 10-0,14 мм [70,74].



а



б

Рисунок 2.6 – Залежність від напруженості електричного поля тангенсу кута діелектричних втрат та ємності макетів із стрічками різної товщини різних виробників [74]

Таблиця 2.2 – Результати випробувань на довготривалу електричну міцність зразків макетів за напруженості електричного поля 15 кВ/мм промислової частоти

Зразки макетів зі стрічками	№ зразка	Час витримки до настання пробою
1	61	57год. 52хв.
	55	60год 00хв.
	106	63год. 00хв.
	03	63год. 27хв.
	36	108год. 19хв.
	58	>147год.
2	71	34год. 04хв.
	10	94год. 57хв.
	108	117год. 25хв.
	12	133год. 57хв.
	147	>147год.
	51	>147год.
3	14	60год. 28хв.
	3	87год. 19хв.
	152	108год. 16хв.
	88	114год. 04хв.
	118	126год. 18хв.
	94	>147год.
4	8	28год. 27хв.
	62 ⁴	66год. 41хв.
	30 ⁴	71год. 12хв.
	70 ⁰	85год. 59хв.
	117 ⁰	126год. 18хв.
	7	>147год.
5	22	43год. 16хв.
	130 ⁰	63год. 44хв.
	63 ⁴	85год. 39хв.
	116	111год. 44хв.
	5	124год. 29хв.
	68 ⁰	126год. 18хв.

2.4 Електричне поле у пазовій частині електричних машин високої напруги

Незалежно від конструкції обмотки і електричних навантажень обертових електричних машин високої напруги при робочій напрузі виникають поверхневі часткові розряди (ЧР) у пазовій частині і місці виходу обмотки з паза статора. Причина появи таких зовнішніх ЧР полягає у різниці потенціалів між поверхнею ізоляції і сердечником статора та різкому стрибку напруги електричного поля у місці виходу обмотки з паза у лобовій частині [38, 42–43, 62]. Розряди, що виникають при порушенні контакту між сердечником і пазовим покриттям, являють собою дугу, струм котрої становить ($10^{-4} - 10^{-2}$) А, через яку замикається ємнісний струм, що протікає скрізь ділянку пазового покриття, що не контактує зі стінками паза.

Крайові розряди у місці виходу обмотки з паза викликаються різкою нерівномірністю електричного поля на поверхні ізоляції вже при низькій напрузі, інтенсивність яких збільшується зі зростанням напруги, а в подальшому розвиваються розряди, що ковзають. Для електричних машин високої напруги краєм електрода є кінець пазового покриття, що виходить за межі сердечника [62].

Найбільш ефективним методом регулювання електричного поля в пазовій частині і в місці виходу обмотки з паза є застосування напівпровідних покриттів та покриттів, що проводять електричний струм. Такі покриття забезпечують зменшення рівня часткових розрядів в повітряних зазорах між поверхнею ізоляції і стінками пазів і усувають розряди, що ковзають, по поверхні ізоляції в місцях виходу обмоток з паза статора [62].

Для визначення розподілу електричного поля у паза статора електричної машини (рис. 2.7, а) застосовуємо метод конформних перетворень (рис. 2.7, б) [54, 62]. Вихідній системі електродів

(стрижня та паза), що розташована у комплексній площині \underline{W} (рис. 2,7, а), відповідає більш проста конфігурація у комплексній площині \underline{Z} (рис. 2,7, б). Шукане відображення здійснює функція, похідна котрої має вигляд [54, 62]

$$\frac{d\underline{W}}{d\underline{Z}} = j \frac{h}{\pi} \frac{\sqrt{\underline{Z}+1}}{\underline{Z} \sqrt{\underline{Z}-1}}, \quad (2.15)$$

а сама конформна функція перетворення

$$\underline{w} = j \frac{h}{\pi} \left[\ln(\underline{z} + \sqrt{(\underline{z}+1) \cdot (\underline{z}-1)}) + \frac{1}{2j} \ln \frac{\sqrt{(\underline{z}+1) \cdot (\underline{z}-1)} - j}{\sqrt{(\underline{z}+1) \cdot (\underline{z}-1)} + j} + h + jh \right], \quad (2.16)$$

де h – товщина ізоляції.

Конформна функція перетворення \underline{W} (рис. 2.7, а) дозволяє побудувати електричне поле у площині \underline{W} залежності від номеру силової лінії ψ ($0 \leq \psi \leq \infty$) та еквіпотенційної поверхні φ ($0 \leq \varphi \leq \pi$) при прикладеній фазній напрузі U_0 (потенціалі, див. рис. 2.8) [54, 62]

$$E_w = \frac{U_0}{h} \sqrt{\frac{e^{-2\psi} - 2e^\psi \cdot \cos\varphi + 1}{e^{-2\psi} + 2e^\psi \cdot \cos\varphi + 1}}. \quad (2.17)$$

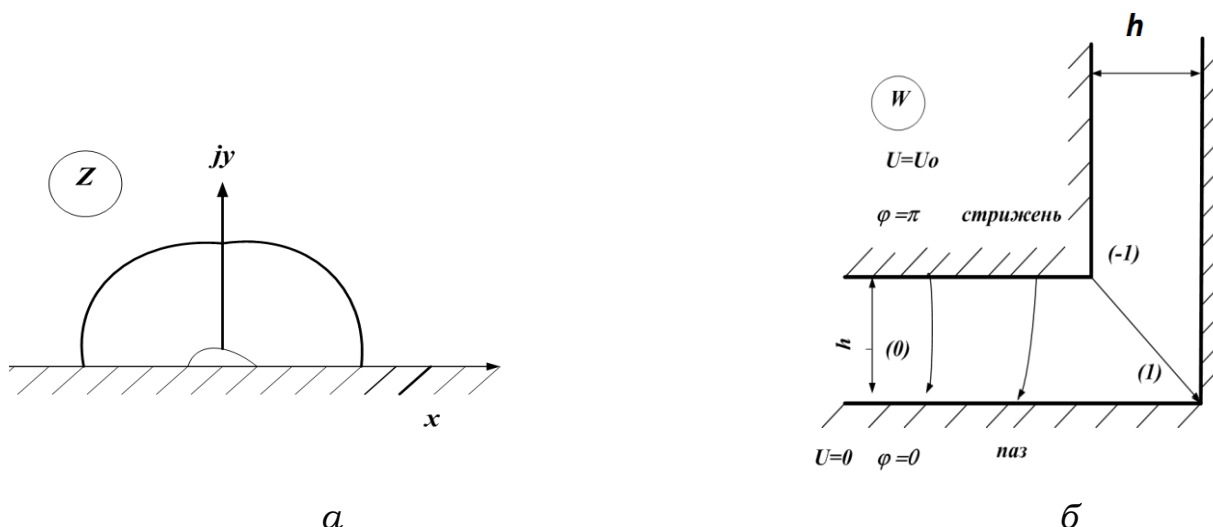


Рисунок 2.7 – Модель для розрахунку електричного поля в пазу статора електричної машини методом конформних перетворень

В куту паза $\varphi=0$ та $\psi=0$ напруженість електричного поля

$$E_w = \frac{U_0}{h} \sqrt{\frac{1-2+1}{1+2+1}} = 0 .$$

В куту струмопровідного стрижня $\varphi=\pi$ та $\psi=0$

$$E_w = \frac{U_0}{h} \sqrt{\frac{1+2+1}{1+2+1}} = \infty .$$

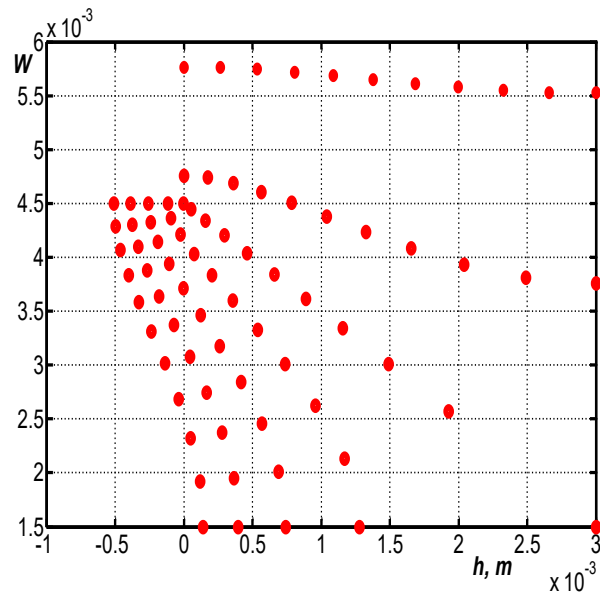
За умови $\psi=\infty$ та будь-яких значеннях φ , тобто при достатньому віддаленні від кута струмопровідного стрижня, електричне поле – однорідне.

$$E_w = E_{midl} \frac{U_0}{h} \sqrt{\frac{1}{1}} = \frac{U_0}{h} .$$

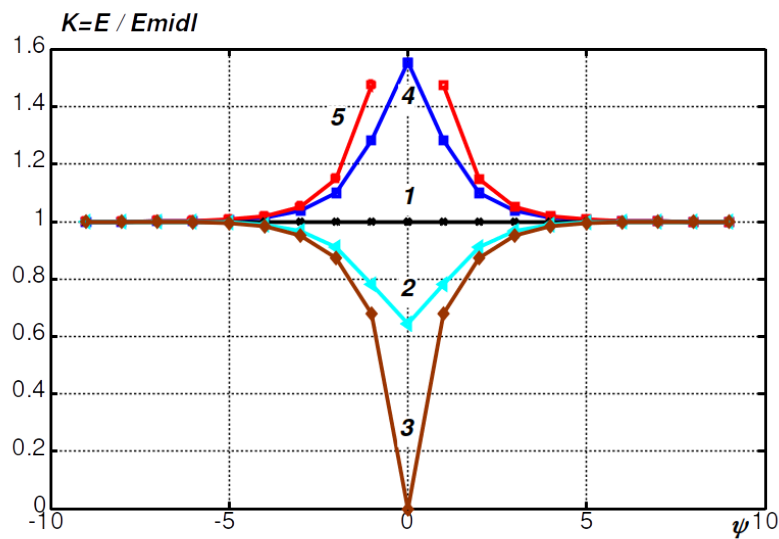
На рис. 2.8, б представлено результати розрахунку електричного поля у пазу статорної обмотки турбогенератора на лінійну напругу 20 кВ у вигляді залежності від номеру силової лінії ψ коефіцієнту нерівномірності електричного поля K , який дорівнює відношенню максимальної напруженості поля E_m , що має місце у пазу, до напруженості E_{midl} однорідного поля. Криві відповідають: 1 – $\varphi=\pi/2$ та $\psi \rightarrow \infty$; 2 – $\varphi=\pi/4$ та $\psi=0$; 3 – $\varphi=0$ та $\psi=0$; 4 – $\varphi=3/4\pi$ та $\psi=0$; 5 – $\varphi=\pi$ та $\psi=0$.

Пазова частина секції обмотки статора встановлюється у паз сердечника вільно. Існуючі нерівності і розкид у розмірах паза сердечника і секції обумовлюють наявність деякого повітряного зазору (не більше 1 мм) між поверхнею ізоляції і сердечником. Утворюється двошарова ізоляційна система: тверда ізоляція – газоподібний діелектрик (повітря). Пробій повітряного прошарку (частковий розряд), що знаходиться в умовах сильного неоднорідного електричного поля, відбудеться за напруги, менше робочої [59-60].

Поверх ізоляції стрижня наноситься напівпровідне покриття, що електричне з'єднується зі стінками паза. Таке покриття з низьким значенням питомого поверхневого опору забезпечує контакт у багатьох точках між покриттям і стінками паза, тобто вся поверхня пазової частини виявляється заземленою. У результаті усувається різниця потенціалів між поверхнею ізоляції і стінкою паза. Зазвичай це стрічка або лак на основі графіту.



а



б

Рисунок 2.8 – Електричне поля у пазу електричної машини [62]

З однієї сторони, провідність покриття повинна бути достатньою, щоб усувати часткові розряди у пазу, які розвиваються при виникненні різниці потенціалів між поверхнею ізоляції і статором. З іншої, – не повинна бути меншою від визначеного рівня, при якому відбувається замикання листів статора, що, в свою чергу, призводить до появи вихрових струмів і зростанню втрат. Питомий поверхневий опір пазового покриття ρ_s лежить в діапазоні (10^2 – 10^4) Ом, що забезпечує зменшення ймовірності пробією повітряних зазорів між стрижнем і стінкою паза.

2.5 Регулювання електричного поля у лобовій частині електричних машин високої напруги

У лобових частинах стрижні з ізоляцією знаходяться у газовому середовищі. Більша частина напруги падає на газові проміжки. У цьому випадку складова напруженості електричного поля уздовж поверхні стає менше критичної напруженості початку іонізації повітря або водню [7-8,62]. Пазове покриття виходить за межі паза для усунення коронування у місці виходу обмотки з паза, де напруженість електричного поля у повітрі досить висока для розвитку розрядних процесів. При відсутності захисних заходів у місці виходу стрижня з паза відбувається різкий стрибок напруженості електричного поля, який може привести до виникнення зовнішніх крайових розрядів (корони і розрядів уздовж поверхні твердої ізоляції) на поверхні лобової частини котушки або стрижня електричної машини. Для усунення ефекту коронування необхідно забезпечити плавний розподіл

електричного потенціалу по поверхні ізоляції лобових частин стрижнів.

У лобовій частині застосовують протикоронне покриття, що має великі значення питомого поверхневого опору (10^5 - 10^9) Ом [47-48]. У лобових частинах напівпровідний шар накладається на довжині 20,0-25,0 см. Для цього застосовують напівпровідні покриття, виконані на основі емалі [44-45], в яких наповнювачами є провідні порошки: сажа або графіт з лінійною вольт -амперною характеристикою. Дисперсність сажі або графіту істотно впливає на експлуатаційні властивості протикоронного захисту [46-47, 75].

Покриття створює ділянку довжиною l_s з питомим поверхневим опором ρ_s (рис. 2.9), причому поверхневий опір покриття значно менше поверхневого опору ізоляції ρ_{sins} . Так як $\rho_s \ll \rho_{sins}$, то складова напруженості електричного поля E_{Os} уздовж поверхні ізоляції в точці O зменшується. Але у кінця покриття (в точці K) утворюється нова область з різко неоднорідним полем.

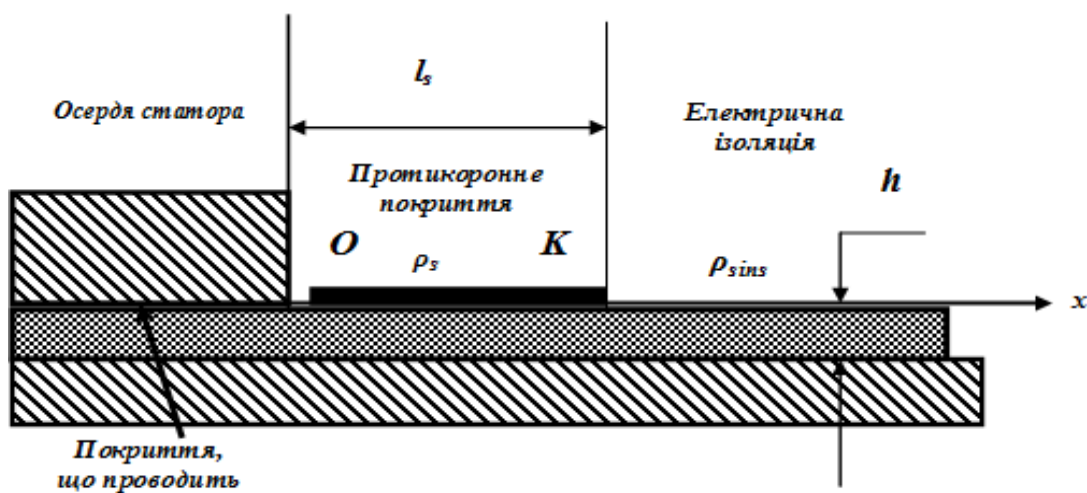


Рисунок 2.9 – Схематичне представлення фрагменту лобової частини стрижня з ізоляцією та протикоронним покриттям [62]

За відсутності напівпровідного покриття напруженість електричного поля в точці О [62, 76]

$$E_{OO} = U_O \sqrt{\omega \rho_{sins} C_s} = U_O \sqrt{\omega \rho_{sins} \epsilon_o \epsilon / h}, \quad (2.18)$$

де U_O – потенціал (напруга) в точці О; $\omega = 2\pi \cdot f$ – кругова частота; $C_s = \epsilon_o \epsilon / h$ – ємність ізоляції товщиною h з діелектричної проникністю ϵ ; $\epsilon_o = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична постійна.

За наявності напівпровідного покриття напруженість електричного поля [62]

$$E_{Os} = U_O \sqrt{\omega \rho_s \epsilon_o \epsilon / h}, \quad (2.19)$$

тобто покриття забезпечує зниження E_{OO} у $\sqrt{\rho_{sins} / \rho_s}$ разів.

Ємнісні струми, що протікають в напівпровідному покритті, викликають падіння напруги вздовж покриття, внаслідок чого E_K стає менше у порівнянні з E_{OO} , тобто за відсутності покриття. Напруженість електричного поля біля краю покриття визначається [62]

$$E_K = 2U_O \sqrt{\omega \rho_{sins} \epsilon_o \epsilon / h} \exp(-\sqrt{\omega \rho_s \epsilon_o \epsilon / 2h} \cdot l_s). \quad (2.20)$$

Умовою для вибору значень питомого поверхневого опору ρ_s напівпровідного покриття є виконання: $E_{Os} \leq E_{Od}$, яке разом з (2.18) для визначення напруженості електричного поля у точці О дає можливість визначити верхнє граничне значення питомого поверхневого опору напівпровідного покриття [62]

$$\rho_s \leq \frac{E_{Od} h}{\omega \epsilon_o \epsilon U_{so}^2}, \quad (2.21)$$

де U_{so} – розрахункове значення напруги E_{Od} , – допустима напруженість електричного поля у точці О (в повітрі, при найбільшій робочій напрузі промислової частоти, яке визначається, наприклад, на підставі емпіричного закону Пашена для газоподібних діелектриків) [59-60]. Підбором значень l_s і ρ_s можна домогтися

зниження напруженості електричного поля E_{00} і E_K до допустимих рівнів, при яких відсутні поверхневі розряди [62].

Вибір довжини покриття l_s визначається з умови [62]

$$l_s \geq \sqrt{\frac{2h}{\omega\rho_s\varepsilon_o\varepsilon}} \ln\left(\frac{2U_{so}}{E_{Kd}} \sqrt{\frac{\omega\rho_{ins_s}\varepsilon_o\varepsilon}{h}}\right). \quad (2.22)$$

Допустиме значення напруженості електричного поля у точці K залежить від товщини ізоляції h ; електрофізичних характеристик ізоляції і напівпровідного покриття відповідно.

На рис. 2.10 показано вплив питомого поверхневого опору протикоронного покриття ρ_s на розподіл потенціалу вздовж напівпровідного покриття (криві 1, 2 і 3) і по поверхні ізоляції (криві 1', 2' і 3') обмотки статора високовольтної електричної машини на лінійну напругу $U_l = 20$ кВ вздовж лобової частини стрижнів. Криві 1 і 1' відповідають значенням питомого поверхневого опору протикоронного покриття $\rho_s = 5 \cdot 10^6$ Ом; криві 2 і 2' – $\rho_s = 5 \cdot 10^7$ Ом; криві 3 і 3' – $\rho_s = 5 \cdot 10^8$ Ом (рис. 2.10).

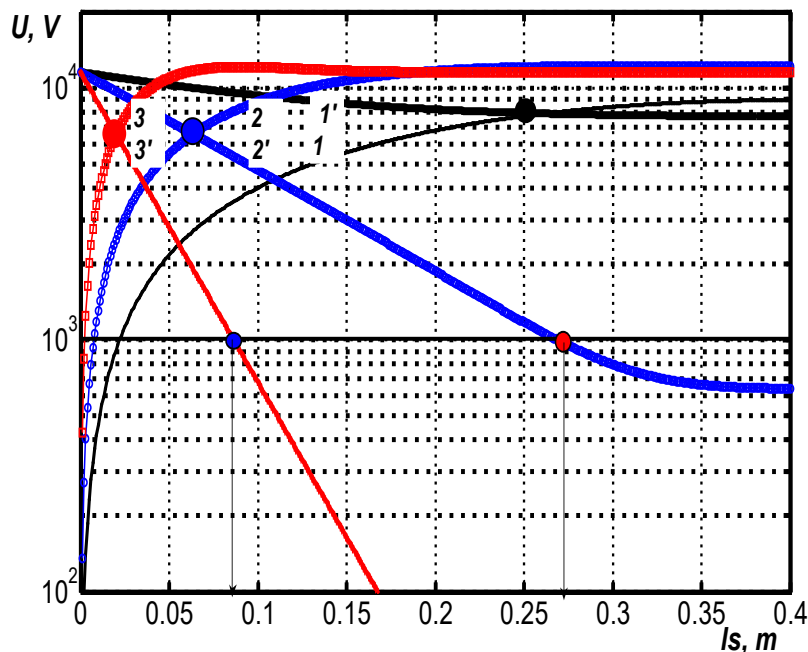


Рисунок 2.10 – Розподіл потенціалу по поверхні протикоронного покриття (криві 1, 2 і 3) і ізоляції (криві 1', 2' і 3') відповідно [62]

Збільшення питомого поверхневого опору ρ_s від $5 \cdot 10^6$ Ом до $5 \cdot 10^8$ Ом призводить до перетину кривих розподілу потенціалу по поверхні протикоронного покриття та ізоляції, тобто рівності потенціалів, при значно менших, більш ніж в 25 разів, значеннях відстані l_s (порівняйте криві 1, 1' і 3, 3', рис. 2.10).

Довжина напівпровідного покриття, що забезпечує зменшення потенціалу в точці K , не менше ніж в 10 разів відносно максимального значення у точці O , може бути прийнята рівною 27,5 см і 7 см для покриттів зі значеннями питомого поверхневого опору $5 \cdot 10^7$ Ом і $5 \cdot 10^8$ Ом відповідно (див. криві 2' і 3', рис. 2.10). У такому випадку напруга на поверхні ізоляції не перевищує 1 кВ. Для напівпровідного покриття з питомим поверхневим опором $5 \cdot 10^6$ Ом ефективність вирівнювання електричного поля вкрай низька (див. криву 1', рис. 2.10).

Відповідність між розрахунковими (криві 1 і 2) і експериментальними (точки під номерами 3, 4, 5 і 6) результатами розподілу електричного потенціалу по поверхні протикоронного покриття уздовж лобової частини приведена на рис. 2.11 [62].

У зразках стрижнів гідрогенератора СВ-1500 / 110-116 застосовано протикоронне покриття на основі нелінійного компаунда (символи під номерами 3 і 4) і у вигляді стрічки (символи під номерами 5 і 6). Випрямлена прикладена напруга становить 10,5 кВ (символи під номерами 3 і 5 на рис. 2.11) і 15,75 кВ (символи під номерами 4 і 6 на рис. 2.11) відповідно. Модельні залежності розподілу потенціалу вздовж напівпровідного покриття (криві 1 і 2, рис. 2.11) для обмотки статора високовольтної електричної машини на лінійну напругу 20 кВ відповідають питомому поверхневому опором $5 \cdot 10^8$ Ом (крива 1) і $5 \cdot 10^7$ Ом (крива 2) відповідно [62].

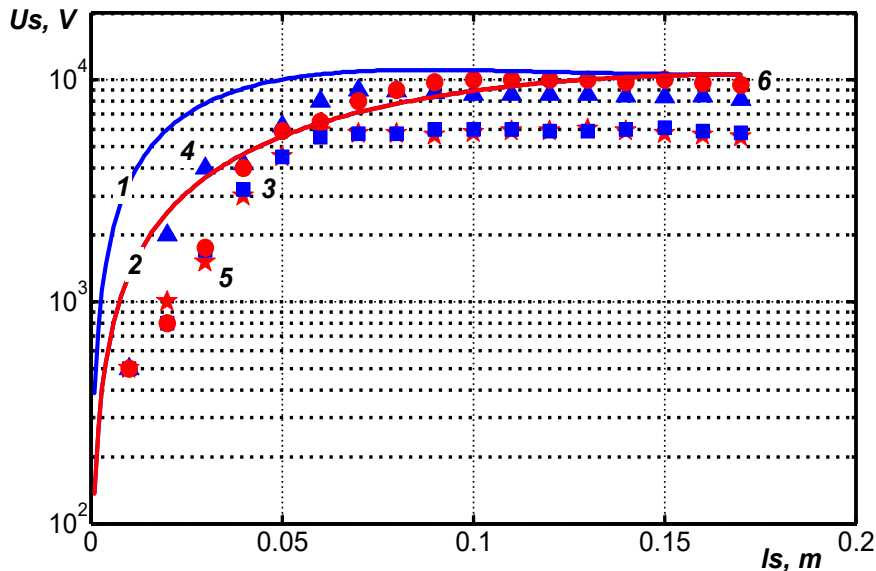


Рисунок 2.11 – До достовірності результатів розрахунку розподілу потенціалу по поверхні протикоронного покриття уздовж лобової частини стрижнів високовольтної електричної машини [62]

Для усунення ефекту коронування необхідно забезпечити плавний розподіл електричного потенціалу по поверхні ізоляції лобових частин стрижнів, при якому складова напруженості електричного поля уздовж поверхні менше критичної напруженості початку іонізації повітря або водню (менше 2 кВ/мм – див. розділ 3).

Практичне виконання стабільних напівпровідних покриттів в умовах виробництва представляє значні труднощі, що обумовлено, перш за все, нерівномірністю розподілу частинок сажі в об'ємі лаку. Внаслідок чого значення питомого опору відхиляються від визначених. В умовах експлуатації при підвищеній температурі в основі лаку відбувається додаткова полімеризація, що призводить до поступового підвищення питомого опору. Зволоження, випадкові механічні ушкодження напівпровідного покриття призводять до прояву додаткової нерівномірності розподілу електричного поля, що викликає місцеве коронування. В результаті коронування сажа вигорає.

Для захисту напівпровідного покриття від зовнішніх впливів у лобовій частині покриття розташовують під останнім зовнішнім шаром склослюдянитової стрічки.

2.6 Експериментальна перевірка стабільності нелінійних властивостей напівпровідних противокоронних покриттів у процесі прискореного електричного і теплового старіння

Найбільш бажаними є нелінійні покриття з різко вираженою наростаючою залежністю питомої поверхневої провідності від напруженості електричного поля, що виготовляються у вигляді лакового покриття або стрічки (дивись розділ 1).

На рис. 2.12 наведено експериментальну залежність від напруженості електричного поля промислової частоти питомого поверхневого опору протикоронного покриття на основі нелінійного компаунда (крива 1) і покриття у вигляді стрічки (крива 2) [62,77].

Перевірка стабільності нелінійних властивостей покриттів проведена за результатами тривалого електричного й теплового старіння спеціально виготовлених зразків. Зразки в кількості 10 штук для кожного типу покриття піддані електричному старінню при напруженості електричного поля 2,5 кВ/см промислової частоти протягом 220 годин з подальшим тепловим старінням за температури 175 °С протягом 100 годин.

Електричне старіння проведено в два цикли: перший – 60 годин, другий – 160 годин. У початковому стані і після кожного циклу електричного й теплового старіння проведені вимірювання питомого поверхневого опору на випрямленій випробувальній напрузі.

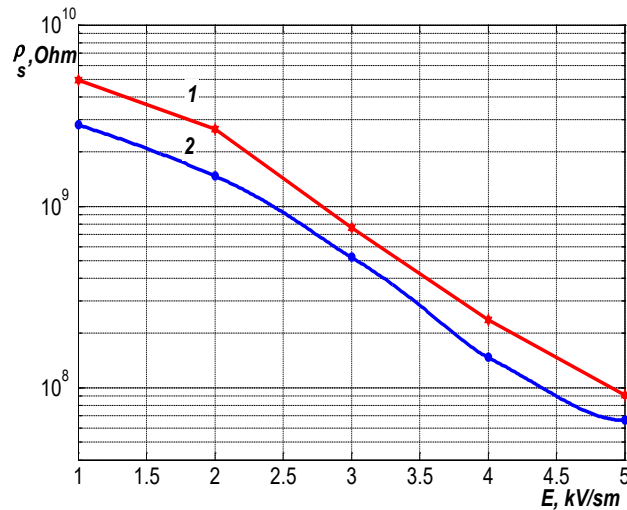


Рисунок 2.12 – Вплив напруженості електричного поля на питомий поверхневий опір нелінійного протикоронного покриття [77]

На рис. 2.13 представлена динаміка змінення питомого поверхневого опору зразків нелінійного протикоронного покриття у процесі старіння (ρ_{sa}) щодо вихідного, до старіння, стану (ρ_s) в залежності від напруженості електричного поля. Цифри на рис. 2.13 відносяться: до протикоронного покриття на основі нелінійного компаунда – 1, 2, 3; протикоронного нелінійного покриття у вигляді стрічки в один шар в напівперекриття – 4, 5, 6 і в два шари в напівперекриття – 7, 8, 9 після циклів електричного і теплового старіння відповідно.

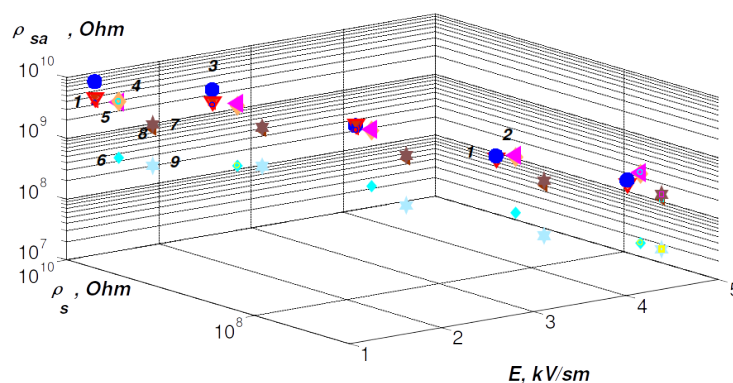


Рисунок 2.13 – Динаміка змінення питомого поверхневого опору протикоронних напівпровідних покриттів в процесі тривалого електричного і теплового старіння зразків [62]

Для нелінійного покриття у вигляді компаунда відзначається зростання питомого поверхневого опору після циклів старіння, що пов'язано, вочевидь, з додатковою полімеризацією компаунда під дією електричного і теплового впливу, які виступають у ролі ініціаторів процесу полімеризації.

Для нелінійного покриття у вигляді стрічки після циклів електричного старіння також відзначається зростання питомого поверхневого опору щодо вихідного стану. Після теплового старіння – незначне зменшення ρ_{si} . Важливо, що у всьому діапазоні напруженості електричного поля зберігається нелінійність питомого поверхневого опору покриттів. Нижня границя ρ_{si} після теплового старіння відповідає 10^7 Ом (див. рис. 2.13, цифри 3, 6 і 9), що свідчить про достатню ефективність регулювання електричного поля (див. криві 1 і 2, рис. 2.11).

Стабільність властивостей нелінійних протикоронних напівпровідних покриттів підтверджується результатами випробувань зразків стрижнів гідрогенератора СВ -1500 / 110 - 116 у початковому стані і після комплексного впливу електричного поля промислової частоти напруги $2,5 \cdot U_n / \sqrt{3}$, і температури 120°C протягом 260 годин. У початковому стані: розподілом електричного потенціалу уздовж нелінійного протикоронного покриття по довжині лобовій частині (див. рис. 2.11). Після комплексного впливу:

візуальною відсутністю світіння при подачі випробувальної напруги, що перевищує номінальну на 50 %;

візуальною відсутністю розрядів, що ковзають, при випробуванні ізоляції пазової частини стрижнів випробувальною напругою $(3 \cdot U_l + 3)$ кВ; зовнішнім виглядом покриття; високими значеннями напруги перекриття по ізоляції.

2.7 Висновки за розділом 2

Отримано розподіл електричного поля у високовольтній композитній ізоляції електричних машин на основі запропонованої математичної моделі накопичення поверхневого заряду на плоскій границі розділу підкладка – діелектричний бар'єр.

Встановлено, що у сталому режимі напруженість електричного поля у бар'єрі перевищує середнє значення напруженості на 50 % в залежності від електрофізичних характеристик і товщини компонентів.

У області малих часів перехідного процесу (до 1 с) істотний вплив на характер розподілу електричного поля в композитній ізоляції надає відносна діелектрична проникність бар'єра. Застосування діелектричного бар'єра з більшою діелектричною проникністю і більшим частковим вмістом у порівнянні з підкладкою призводить до зростання на (5 – 10) % напруженості електричного поля щодо середнього значення. У такому випадку спостерігається в більшій мірі рівномірний розподіл електричного поля в компонентах на границі розділу компонентів.

Експериментальні дослідження короткочасної електричної міцності макетів склослюдопаперових стрічок у термореактивному стані узгоджуються з результатами моделювання. Композитна ізоляція на основі склослюдинітової стрічки з підвищеним вмістом слюдинітового бар'єру і склотканиною меншої товщини має на (8–16) % вищі значення короткочасної електричної міцності.

Застосування ізоляція на основі склослюдинітової стрічки з підвищеним вмістом слюдинітового бар'єру потребує спеціального технологічного обладнання.

Запропоновано методику для розрахунку розподілу електричного потенціалу по поверхні ізоляції уздовж лобової

частини стрижнів високовольтної електричної машини при застосуванні напівпровідних покриттів, що забезпечують вирівнювання електричного поля і усунення розрядів, що ковзають.

Отримано розподіл електричного потенціалу по поверхні протикоронного покриття та ізоляції у лобовій частині стержня високовольтної електричної машини при варіаціях питомого поверхневого опору напівпровідного покриття.

Запропонована методика може бути застосована для обґрунтування довжини покриття у лобовій частині високовольтних електричних машин в залежності від електрофізичних характеристик покриття, електричної ізоляції і товщини.

Отримані розрахункові дані узгоджуються з експериментальними дослідженнями розподілу потенціалу по поверхні протикоронного напівпровідного нелінійного покриття уздовж лобової частини зразків стрижнів гідрогенератора на лінійну напругу 10,5 кВ.

Виконано експериментальну перевірку стабільності нелінійних властивостей спеціально виготовлених зразків покриття в процесі тривалого електричного і теплового старіння, а також зразків стрижнів гідрогенератора СВ -1500 / 100 -12 у початковому стані і після комплексного впливу електричного поля напругою 26,25 кВ промислової частоти і температури 120 °С протягом 260 годин.

Розділ 3

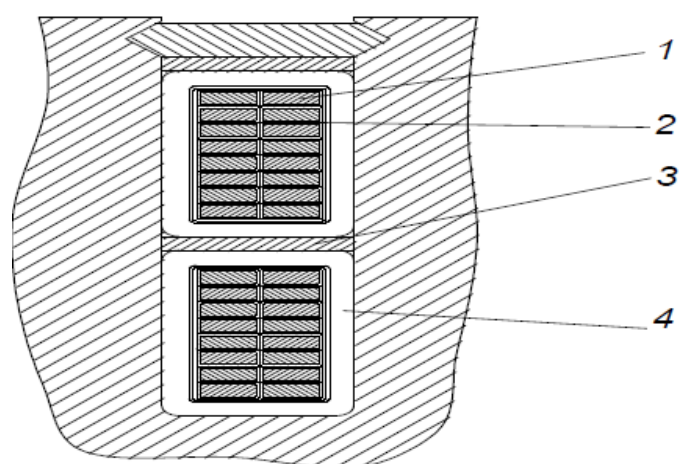
ТЕХНОЛОГІЧНІ ДЕФЕКТИ У ВИСОКОВОЛЬТНІЙ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНІЙ СИСТЕМІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН, ДІАГНОСТИЧНІ ОЗНАКИ ТА ТЕХНІКА ВИЯВЛЕННЯ

Ізоляція високовольтної електричної машини повинна зберігати високу надійність протягом всього періоду експлуатації, тому до неї пред'являються різнобічні вимоги, головною з яких є висока електрична міцність.

На технологічній стадії виготовлення електричної машини ізоляційні матеріали доводиться неодноразово згинати, формувати, надавати потрібну конфігурацію, обпресовувати, домагаючись монолітності шарів ізоляції. Під час укладання обмотки у пази її ізоляція (рис. 3.1) піддається вигинам, розтягуванням, іноді ударам та інших механічних впливів. Тому до ізоляційних матеріалів, що застосовуються у електричних машинах, крім високої електричної міцності, пред'являють також ряд вимог, визначених технологією виготовлення власне ізоляції: матеріал повинен легко формуватися і зберігати після формування додані йому властивості, які не повинні пошкоджуватися при перегибах і розтягненнях, при стисненні, опресуванні і укладанні у пази.

У більшості використовуваних у даний момент потужних електричних машинах застосована термореактивна ізоляція. Вона утворюється намотуванням на окремі стрижні витків слюдинітових стрічок на скловолокнистій підкладці з подальшим просоченням і запіканням обмотаних стрижнів у прес-формах. Найбільш широке застосування знайшло вакуумно-нагнітальне просочення ізоляції [9,33]. Налаштування технологічного процесу просочення повинно забезпечувати найменшу кількість газових

включень та інших дефектів (рис. 3.2) у електроізоляційній системі, що обумовлює високу електричну міцність композитної ізоляції та значно підвищує напругу іонізації повітряних включень у твердої ізоляції.



1– елементарні провідники витків обмотки фази, 2 –ізоляція витка, 3 –ізоляція між витками, 4 – корпусна ізоляція

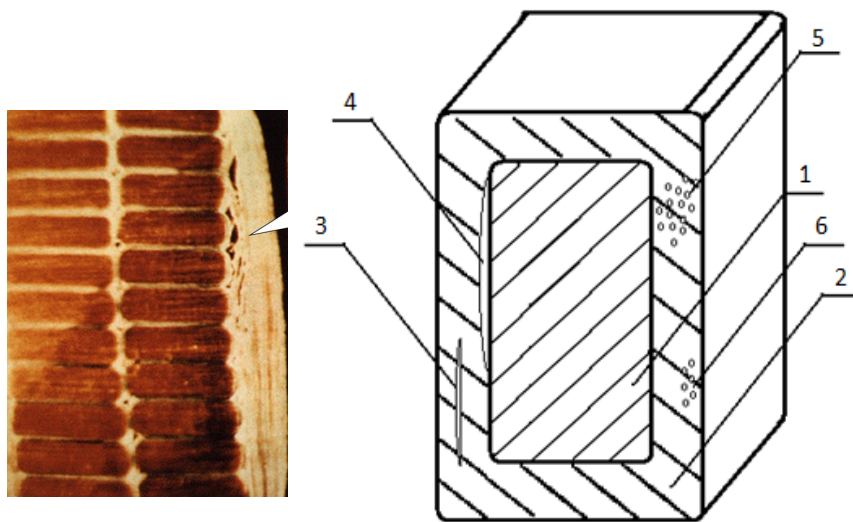
Рисунок 3.1 – Конструкція ізоляції паза обмотки статора генератора



Рисунок 3.2 – Дефект, що обумовлено недостатньо якісним процесом ізолювання і просочення електроізоляційної системи [78]

3.1 Типові технологічні дефекти у електроізоляційній системі електричних машин

У кожного виробника електричних машин застосовується своя конструкція і технологія виготовлення виткової і корпусної високовольтної ізоляції, що відрізняється від інших виробників за типами і товщиною застосовуваних матеріалів, за кількістю шарів і загальною товщиною ізоляції, за тривалістю і значеннями температурних впливів при її виготовленні [7-9]. Незалежно від технології виготовлення високовольтної композитної термореактивної електроізоляційної системи можна виділити найбільш типові види технологічних дефектів (рис. 3.3).



1 – струмоведуча частина, 2 – корпусна ізоляція,
3 – розшарування ізоляції; 4 – відшарування ізоляції від
струмопровідної частини, 5 – наскрізна не просочена ізоляція,
6 – збіднені сполучною зовнішні шари

Рисунок 3.3 – Види дефектів в ізоляції статорних обмоток

1. Тріщини і мікротріщини являють собою вузьку щілину, що йде по лінії розриву шарів композитної ізоляції. Мікротріщина, як правило, має форму усіченої піраміди і може бути як наскрізною, так і непрямою. Довжина L мікротріщини лежить

в межах $L = (3-7) h$, де h – товщина ізоляції. Причиною утворення такого виду дефекту, в більшій мірі, є неприпустимий вигин або скручування при укладці стрижня (рис. 3.4).

Діагностичними ознаками прояву тріщини є значний струм витоку, що не усувається сушінням. Критерієм відбраковування – послідовний пробій 2-х, 3-х та 4-х стрижнів при випробуваннях з поступовим зменшенням пробивної напруги.

2. Складчастість шарів виражається в порушенні прямолінійності шарів стрічки, і, як наслідок, це призводить до розриву слюдинітового паперу. небезпечними є складки, які мають радіус 2 мм і менше. Причини утворення: порушення технології виготовлення стрижня у вигляді зсуву шарів ізоляції при пресуванні або стиснення до купи стрічок при намотуванні. Діагностичними ознаками є порушення структури на мікрошліфі близько пробитої ділянки ізоляції.



Рисунок 3.4 – Прихована тріщина поблизу головки у лобових частинах обмотки статора з термореактивною ізоляцією (видно розряд з електрода на мідь обмотки крізь пошкоджену ізоляцію) [78]

3. Розшарування ізоляції (рис 3.3, позиція 3), тобто втрата монолітності, проявляється у утворенні тонких часткових проміжків між шарами. Ширина щілин порівнянна з висотою стрижня, а довжина може досягати сотень міліметрів. Причини

утворення: застосування некондиційних стрічок і компаундів при виготовленні термореактивної ізоляції, порушення режимів нагріву і пресування. Діагностичні ознаки: ізоляція м'яка на дотик; глухий звук при простукуванні; високий рівень і характерний спектр часткових розрядів; мікроскопічні дослідження шліфів ізоляції. Необхідно відмітити, що такий вид технологічного дефекту в експлуатації проявляється у вигляді пробою ізоляції на корпус через зниження електричної міцності або через її руйнування частковими розрядами.

Причиною виникнення дефектів у вигляді розшарувань (рис. 3.3, позиція 4) є, головним чином, термомеханічні напруження, однак механізм їх утворення з'ясований недостатньо [35]. Дефекти такого типу не знижують безпосередньо електричної міцності ізоляції, проте сприяють руйнуванню ізоляції обмотки статора у умовах експлуатації.

4. Спухання ізоляції лобових частин, тобто збільшення товщини лобової частини стрижня у порівнянні з шириною паза з виникненням округлості поперечного перерізу. Основною причиною утворення є низька якість стрічки та недостатнє охолодження лобової частини. Товщина стрижня у такому разі може перевищувати розмір паза в 1,3 рази і більше. В експлуатації такий дефект проявляється у вигляді пробою на активну сталь та міжфазним коротким замиканням у лобових частинах.

5. Недостатня полімеризація сполучного (рис. 3.3, позиція б): причиною утворення є застосування некондиційних стрічок та порушення режимів пресування і тиску при виготовленні стрижнів. Діагностичною ознакою такого дефекту є те, що ізоляцію легко розмотувати.

3.2 Чутливість часового тренду опору ізоляції до технологічних дефектів у електроізоляційній системі електричних машин

Випробування електричних машин проводиться на всіх етапах. На стадії проектування проводять випробування макетних і дослідних зразків електричних машин для перевірки відповідності вихідних показників і характеристик машини вимогам технічного завдання. На стадії виготовлення випробування окремих вузлів машини (наприклад, обмотки) проводяться після завершення окремих технологічних операцій. Після складання машини випробування проводять для перевірки відповідності її вихідних показників вимогам технічних умов. Випробування електричних машин є частиною загального технологічного процесу [80-89].

Так, на всіх етапах виготовлення тягових електричних двигунів (ТЕД): перед просоченням якоря та котушок, після термообробки (запикання) якоря і котушок, у готовому двигуні, – перевіряються значення опору ізоляції і електрична міцність [81, 84].

В ТЕД застосовується ізоляція класу нагрівостійкості Н (180 °С), що значно підвищує надійність машин такого типу та дозволяє при тих самих габаритах реалізувати більшу потужність. Такі системи ізоляції повинні мати напрацювання не менше 50 тис. годин при температурі 180 °С та витримувати перенапруги вище 10 кВ. Для електричної ізоляції з високим вмістом слюди та епоксидного компаунду, що застосовується для просочення, застосовуються технології вакуумно-нагнітального просочення та попередньо просочених стрічок. Процедура вакуумно-нагнітального просочення гарантує високу механічну міцність, особливо лобової частини обмотки, та високу електричну міцність.

Під час просочення ізоляційної системи вимірюються в'язкість смоли, температура просочення та твердіння, час витримки під тиском та надмірний тиск [9-10].

Контроль опору ізоляції здійснюється після кожного технологічного етапу виготовлення електроізоляційної системи, у тому числі і в зібраній електричній машині після проведення циклу прийнятно-здавальних випробувань [81, 86].

Перевірку чутливості опору ізоляції до виявлення технологічних дефектів виконано для трьох варіантів корпусної ізоляції додаткових полюсів магнітної системи тягового електродвигуна постійного струму ТЕД-800 (Таблиця 3.1 – Таблиця 3.3).

Технологічний процес виготовлення 6 зразків кожного для трьох варіантів корпусної ізоляції, які відрізняються числом шарів і типом ізоляційних стрічок, – ідентичний.

Вимірювання опору ізоляції виконані у початковому стані (після виготовлення), після циклу теплового старіння протягом 6 годин при температурі 180 °С, після витримки у нормальних умовах протягом 8 годин [90]. Вимірювання опору ізоляції виконано тераомметром МІ 2077 при постійній напрузі 2500 В [91].

У таблиці 3.1 – таблиці 3.3 представлено результати вимірювань, а на рис. 3.5, а, б, в – статистичні характеристики опору ізоляції трьох варіантів корпусної ізоляції відповідно.

Для всіх трьох варіантів електроізоляційної системи у початковому стані характерно високе значення опору ізоляції (див. значення Var 1 на рис. 3.5, а, б, в). Після нетривалого теплового старіння протягом 8 годин опір ізоляції для всіх зразків значно, в 100 і більше разів, зменшився (див. значення Var 2 на рис. 3.5, а, б, в).

Таблиця 3.1 – Динаміка змінення опору ізоляції першого варіанту корпусної ізоляції

Значення опору ізоляції у початковому стані R_{ins} , МОм (Var 1)	Значення опору ізоляції після теплового старіння R_{ins} , МОм (Var 2)	Відновленні значення опору ізоляції після витримки у нормальних умовах R_{ins} , МОм (Var 3)
685000	1580	212000
2110000	1740	267000
1030000	846	344000
710000	714	535000
344000	2360	407000
760000	2380	365000

Таблиця 3.2 – Динаміка змінення опору ізоляції другого варіанту корпусної ізоляції

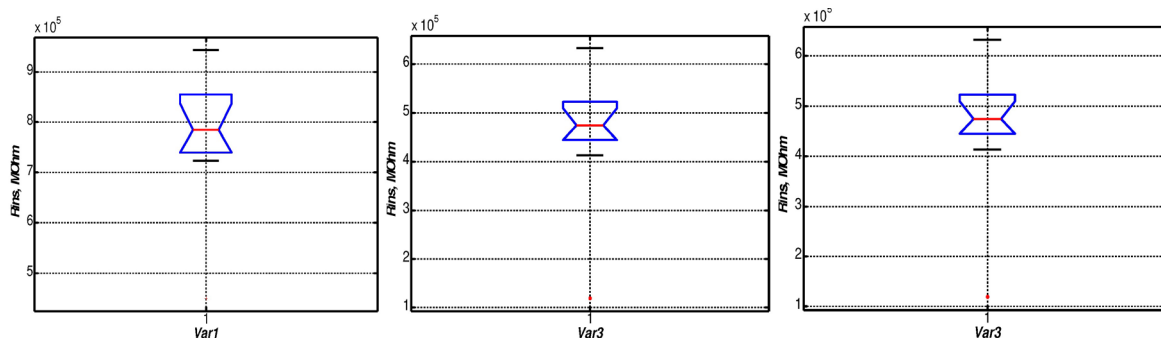
Значення опору ізоляції у початковому стані R_{ins} , МОм (Var1)	Значення опору ізоляції після теплового старіння R_{ins} , МОм (Var 2)	Відновленні значення опору ізоляції після витримки у нормальних умовах R_{ins} , МОм (Var 3)
378000	2850	397000
535000	675	289000
412000	449	201000
639000	889	566000
303000	296	172000
619000	975	267000

Таблиця 3.3 – Динаміка змінення опору ізоляції третього варіанту корпусної ізоляції

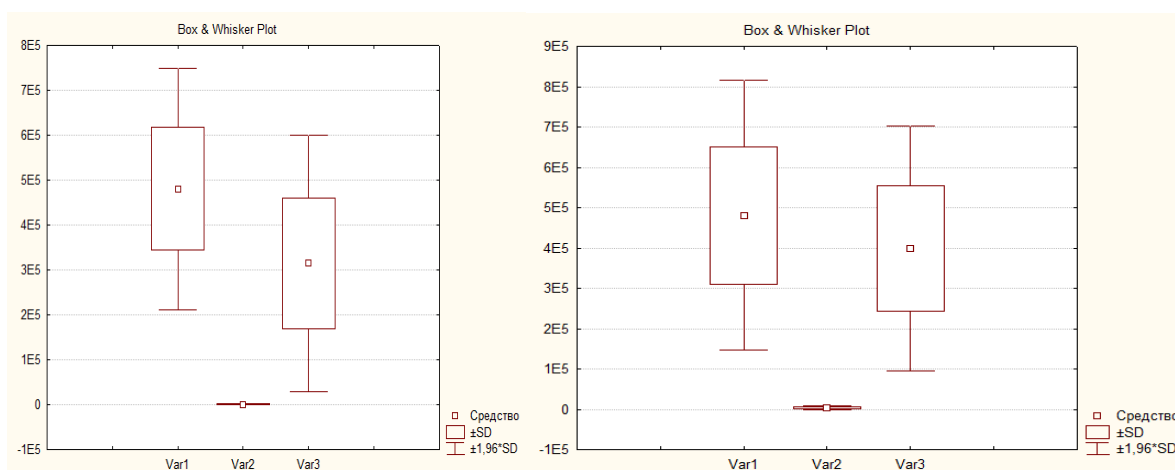
Значення опору ізоляції у початковому стані R_{ns} , МОм (Var 1)	Значення опору ізоляції після теплового старіння R_{ns} , МОм (Var 2)	Відновленні значення опору ізоляції після витримки у нормальних умовах R_{ns} , МОм (Var 3)
396000	504	572000
556000	4540	311000
176000	3330	221000
534000	2220	324000
574000	341	358000
649000	6370	607000

Такий характер часового тренду під дією температури опору ізоляції зразків всіх трьох варіантів корпусної ізоляції може бути пов'язано з неповною полімеризацією [92-93].

У товщі композитної ізоляції присутні повітряні проміжки, які не заповнені рідиною, що просочує. Питомий об'ємний опір повітря у неіонізованому стані становить $\rho_v \sim 10^{16}$ Ом м. Випробувальна напруга 2500 В не може призвести до іонізації повітряних проміжків (див. підрозділ 3.3). Рідина, що просочує, має значно менший питомий опір (див. розділ 1). Після теплового старіння під дією температури, що виступає у якості ініціатора, повітряні проміжки заповнено рідиною, що просочує. Після витримки у нормальних умовах відбувся процес додаткової полімеризації терморективної композитної ізоляції, в результаті чого опір ізоляції відновився до значень, близьких до старіння (див. значення Var 3 на рис. 3.5, а, б, в).



а



б

в

Рисунок 3.5 – Часові статистичні характеристики опору ізоляції трьох варіантів корпусної ізоляції

Таким чином, наявність повітряних проміжків у твердої композитної високовольтної електроізоляційної системи може бути непрямо проконтрольовано за результатами вимірювань опору ізоляції у початковому стані, після додаткового нетривалого теплового старіння та витримки у нормальних умовах. Така техніка виявлення повітряних проміжків доречна тільки на стадії застосування нових електроізоляційних матеріалів, конструкцій та технологій при виготовленні високовольтних електричних машин.

3.3 Ефективність виявлення технологічних дефектів у композитній електроізоляційній системі електричних машин за характеристиками часткових розрядів

Динаміка змінення опору ізоляції доводить, що в товщі твердої ізоляції присутні повітряні проміжки. При експлуатації під змінною напругою промислової частоти у повітряних включеннях виникають часткові розряди (Partial discharges: ЧР). Системи високовольтної ізоляції завжди мають деякий фоновий рівень ЧР, що не виявляє будь-якого істотного впливу на ресурс електроізоляційної конструкції. У той же час часткові розряди руйнують високовольтну ізоляцію, приводячи до відкладенню вуглецю навколо дефекту. Це так званий «прихований» період розвитку дефекту. Розвиток зони дефекту, рано чи пізно, призводить до дугового пробою всього ізоляційного проміжку. Реєстрація часткових розрядів, оцінка їх амплітуди є ефективним способом виявлення дефектів у високовольтній ізоляції на самих ранніх стадіях розвитку, у тому числі і на технологічній стадії виготовлення [56-57, 59, 60].

Часткові розряди характеризуються такими параметрами: напруга початку ЧР; амплітуда уявного заряду; частота імпульсів ЧР. У сучасних системах діагностики застосовуються: максимальна амплітуда імпульсів ЧР позитивної і негативної полярності, яка вимірюється в мілівольтах (мВ); рівень ЧР позитивної і негативної полярності (пКл); амплітудно-фазові діаграми імпульсів ЧР (залежність числа розрядів з певними значеннями уявного заряду від фази напруги промислової частоти – так звані PD-діаграми) [94-107].

Для часткових розрядів відсутні стандартні нормовані значення. Наявні локальні норми і рекомендації справедливі тільки для невеликих груп електроізоляційних конструкцій [95-97].

З цієї причини у більшості випадків кількісна оцінка стану ізоляції електричних машин за параметрами часткових розрядів може проводитися тільки порівнянням з результатами попередніх вимірювань, виконаних на цьому ж обладнанні [95-97, 101-104].

Напруга U_x , що припадає на повітряне включення товщиною x (причому $x \ll h$), яке розташовано у товщі ізоляції (рис. 3.6, а), за прикладеної змінної напруги U промислової частоти до ізоляції товщиною h [60], становить

$$U_x = U \frac{1/(\omega C_x)}{1/(\omega C_x) + 1/(\omega C_{h-x})} = U \frac{\epsilon x}{h + (\epsilon - 1)x}, \quad (3.1)$$

де ϵ – діелектрична проникність діелектрика, $C_x = \epsilon_0 S_x / x$ – ємність включення; $C_{h-x} = \epsilon \epsilon_0 S_x / (h-x)$ – ємність частини ізоляції напроти включення; C_0 – загальна ємність ізоляції (рис. 3.6, б).

При досягненні напруги U_x на включенні рівня пробивної напруги U_{xbr} включення проб'ється

$$U_x \geq U_{xbr}. \quad (3.2)$$

Враховуючи, що при цій напрузі пробивається тільки частина x ізоляційного проміжку h , розряд називають частковим. Відповідне значення напруги на електродах, при якому починає виконуватися умова (3.2), і є напруга початку ЧР [55, 59, 60, 101-105].

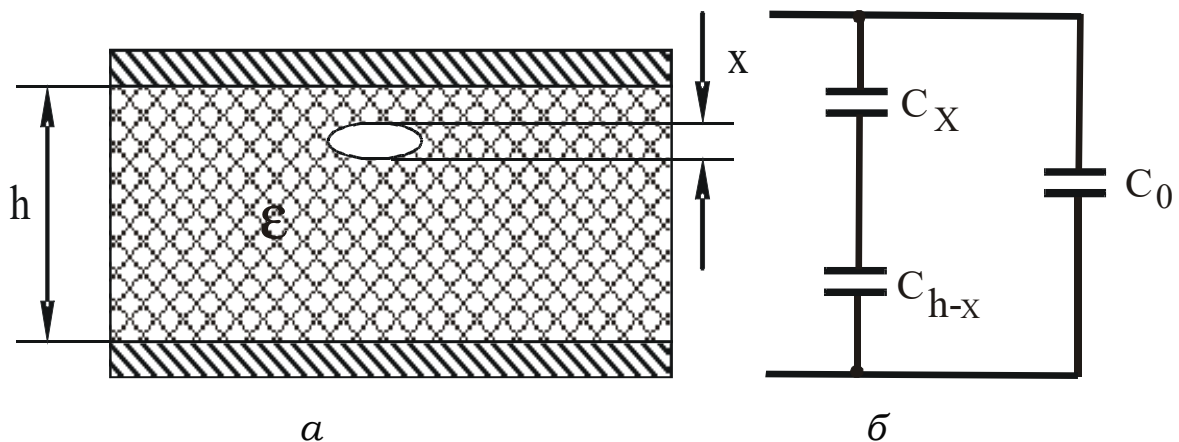


Рисунок 3.6 – Модель для розрахунку напруги початку ЧР [60]

На рис. 3.7 представлено результати розрахунків на підставі (3.1) – (3.2). Напруга на ізоляції (рис. 3.2, а): 2,5 кВ (крива 2), 5 кВ (крива 4) для товщини ізоляції, яка дорівнює 1,8 мм; 2,5 кВ (крива 3) і 5 кВ (крива 5) для товщини ізоляції, яка дорівнює 1,4 мм відповідно.

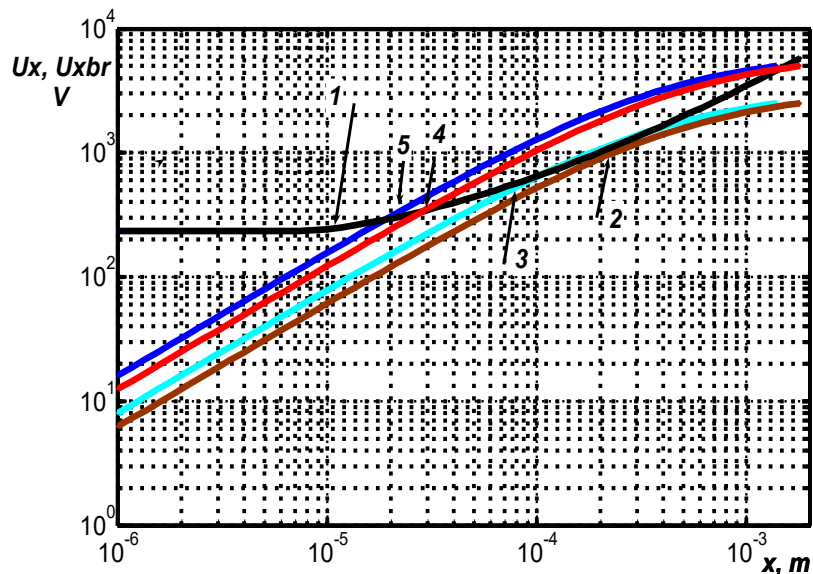


Рисунок 3.7 – Залежності від товщини (x) повітряного включення його пробивної напруги U_{xbr} і розрахункових напружень U_x на включеннях [60]

Діелектрична проникність $\epsilon=4,5$ (характерні значення для композитної склослюдинітової ізоляції електричних машин).

За напруги 5 кВ ЧР у ізоляції товщиною 1,8 мм можливі, якщо в ній є повітряні включення товщиною від 0,03 мм і більше, тобто від 30 мкм (див. рис. 3.7, крива 4). Для композитної ізоляції меншої товщини (1,4 мм) при прикладеній нарузі 5 кВ активізуються повітряні включення товщиною від 20 мкм (див. рис. 3.7, крива 5).

На рис. 3.8 наведено вплив діелектричної проникності композитної ізоляції товщиною 1,8 мм на розрахункові напруги U_x на повітряних включеннях.

Крива 2 відповідає діелектричній проникності $\epsilon=4,5$; крива 3 – $\epsilon=4,8$ при прикладеній напрузі 5 кВ. Збільшення діелектричної проникності композитної ізоляції, тобто частки вмісту слюди, призводить до зміщення кривої $U_x(x)$ у область менших значень розмірів повітряних включень (див. криву 3 на рис. 3.8), що активізуються.

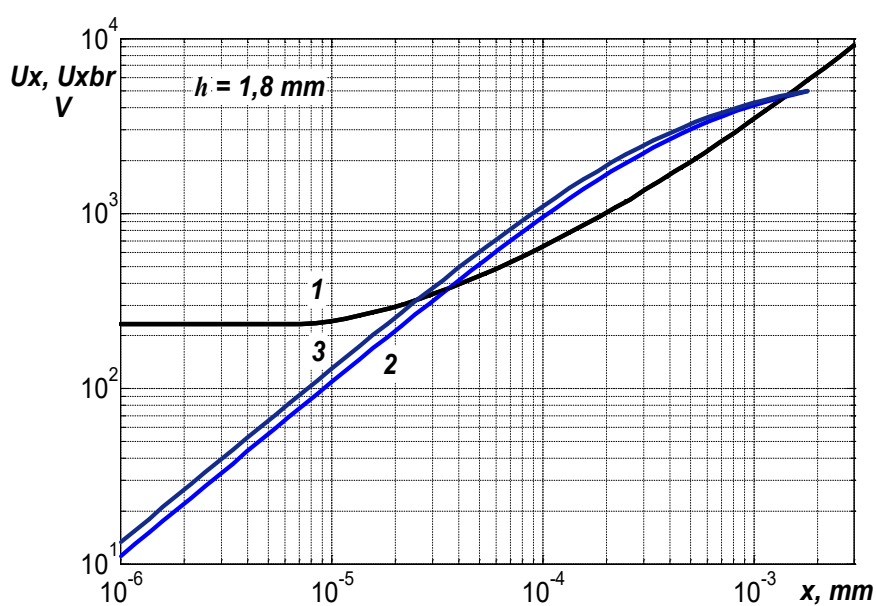


Рисунок 3.8 – Вплив діелектричної проникності композитної ізоляції на розрахункові напруги U_x на включеннях [60]

Експериментальні дослідження по виявленню технологічних дефектів проведені для 5-ти макетів однакової товщини високовольтної композитної корпусної ізоляції обмотки статора турбо- і гідрогенераторів. Ізоляція макетів виконана склослюдянитовими стрічками різної товщини різних виробників (по 6 зразків для кожного макета).

Техніка контролю ЧР ґрунтується на використанні портативного аналізатора з комплектом епоксидно-слюдяних конденсаторів ємністю 80 пФ як ємнісних датчиків, які

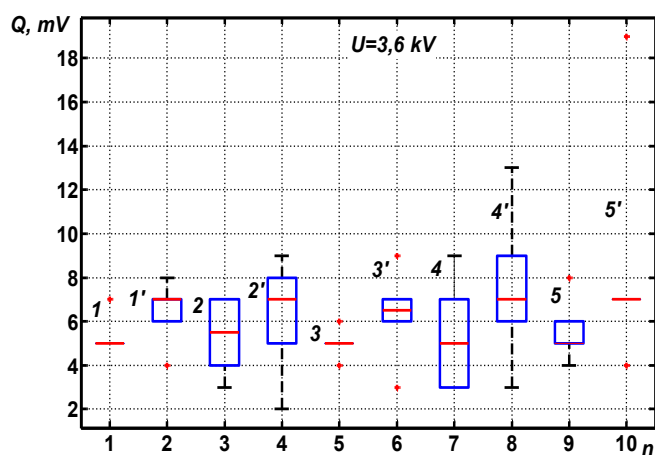
дозволяють вимірювати ЧР у високочастотному діапазоні, у якому амплітуда ЧР значно перевищує амплітуду перешкод [95-97, 105-106]. Це дозволяє автоматично надійно розділяти сигнали ЧР і перешкоди. Принцип дії системи заснований на детектуванні імпульсів напруги часткових розрядів, що виникають всередині ізоляції, за допомогою датчиків ЧР, з подальшим їх аналого -цифровим перетворенням за допомогою вимірника ЧР і відображенням амплітуди ЧР як позитивної, так і негативної полярності.

Ефективний спосіб визначити стан ізоляційної системи – порівняння результатів з базою даних [95-97], представлених у таблиці 3.4.

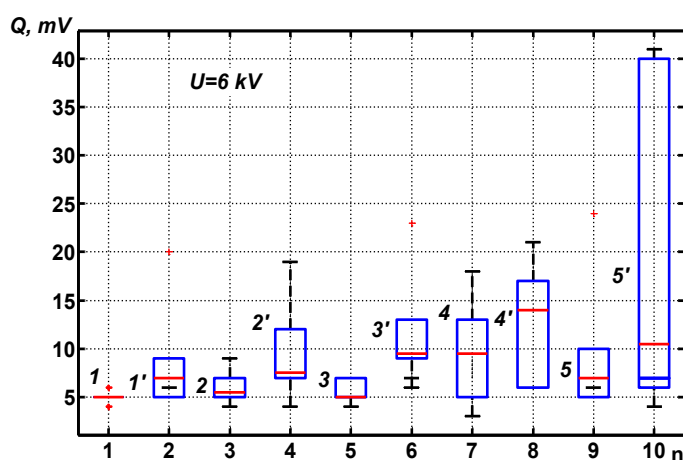
Таблиця 3.4 – Оцінка стану ізоляції за максимальним значенням амплітуди імпульсів ЧР [95-97]

Категорія ЧР	Амплітуда імпульсів ЧР
Незначний	(0 -45) мВ
Низький	(46 -98) мВ
Типовий	(99 -210) мВ
Помірний	(211 -412) мВ

На рис. 3.9 наведені результати вимірювань максимальної амплітуди імпульсів ЧР позитивної і негативної полярності у макетах з високовольтною твердою композитною ізоляцією на основі склослюдинітових стрічок за напруги 3 кВ (рис. 3.9, а) і 6 кВ (рис. 3.9, б).



a

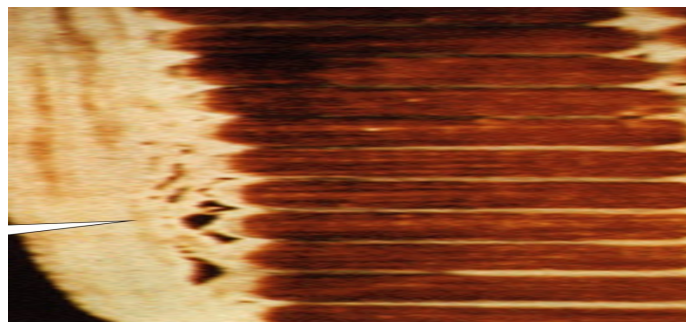


б

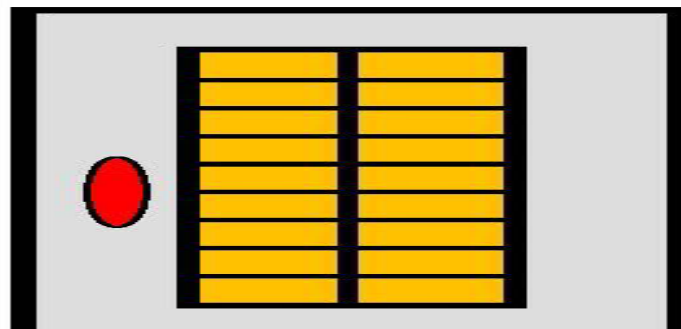
Рисунок 3.9 – Статистичний графік максимальної амплітуди імпульсів часткових розрядів у залежності від прикладеної напруги промислової частоти в композитній твердій високовольтній ізоляції електричних машин [60]

Товщина стрічок: 1. $h=0,14$ мм, 2. $h=0,14$ мм, 3. $h=0,15$ мм, 4. $h=0,18$ мм, 5. $h=0,18$ мм. Амплітуда імпульсів ЧР позитивної полярності позначена як 1, 2, .., 5; амплітуда імпульсів ЧР негативної полярності: 1', 2', ..., 5' відповідно. Імпульси ЧР негативної полярності виникають при позитивній напівхвилі випробувальної напруги промислової частоти, позитивної – при негативній напівхвилі напруги. Порівняння позитивних і негативних імпульсів ЧР вказує на те, що розряди виникають саме всередині ізоляції для макетів (рис. 3.10, а), товщина стрічок у яких менше 0,18 мм.

Амплітуда розрядів позитивної і негативної полярності практично однакова (порівняйте 1 і 1', 2 і 2', 3 і 3', 4 і 4', рис. 3.9, б). Ці результати узгоджуються з розрахунковими залежностями (див. рис. 3.7, рис. 3.8). Для зразків зі склослюдинітової стрічки, товщина котрої становить 0,18 мм, амплітуда імпульсів негативної полярності практично в 4 рази перевищує амплітуду імпульсів позитивної полярності (порівняйте 5 і 5', рис. 3.9, б).



а



б

Рисунок 3.10 – Місця ймовірного розташування технологічних дефектів у композитній високовольтній ізоляції обмоток електричних машин

Таке розходження пояснюються місцем розташування технологічного дефекту у вигляді розшарування на границі розділу провідник – композитна ізоляція (рис. 3.10, б). При напрузі 6 кВ амплітуда імпульсів розрядів досягає верхнього значення 40 мВ у категорії ЧР як незначний рівень (див. Таблицю 3.4).

3.4 Діелектрична спектроскопія термореактивної композитної електроізоляційної системи електричних машин

Ізоляція стрижнів (катушок) машин потужністю понад 5 МВт і напругою більше 6 кВ для контролю технології виготовлення піддається додатковому випробуванню [81]: вимірювання тангенса кута діелектричних втрат $\operatorname{tg}\delta$ ізоляції в залежності від прикладеної випробувальної напруги за нормальної температури повітря [108-110]. Вимірювання тангенса кута діелектричних втрат ізоляції проводиться мостом Шеринга на частоті 50 Гц. Такі випробування дозволяють побічно судити про наявність повітряних включень, обумовлених розшаруванням термореактивної ізоляції у результаті її неповної полімеризації. Вимірювання тільки на одній частоті 50 Гц не дозволяють у повній мірі виявити залишкову вологу і розшарування термореактивної композитної ізоляційної системи ТЕД. Висока експлуатаційна надійність тягових електричних двигунів визначається якістю ізоляції обмоток, яка повинна мати високу вологостійкість.

У останнє десятиліття значний теоретичний і експериментальний розвиток отримала діелектрична спектроскопія. У діелектричній спектроскопії виконується аналіз функції комплексної діелектричної проникності ϵ^* ізоляції за діапазоном частот і напруги [111-115]

$$\epsilon^{\circ} = \epsilon' - i\epsilon'' = \epsilon - i\sigma / \omega\epsilon_0, \quad (3.3)$$

де $\epsilon' = \epsilon$ – дійсна частина комплексної діелектричної проникності, що визначає електричну ємність ізоляції; ϵ'' – уявна частина, яка визначає втрати енергії у ізоляції; σ – питома об'ємна провідність матеріалу ізоляції, См/м; ω – кругова частота прикладеного струму, рад/с; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична постійна.

Тангенс кута діелектричних втрат визначає втрати на електропровідність і поляризацію

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}. \quad (3.4)$$

Особливістю асинхронних електричних машин є те, що фази обмотки статора з'єднані у «зірку» і не мають виведення нульової точки (глухе з'єднання фаз обмотки). Для контролю стану та виявлення технологічних дефектів у високовольтній ізоляційній системі в готовій машині для вимірювання ємності та тангенсу кута діелектричних втрат фазної ізоляції доцільно застосовувати двоелектродне підключення двох фаз до вимірювального ланцюга. Це метод сукупних вимірювань без закорочення інших фаз, що не беруть участі у вимірах. Для цього необхідно виконати три виміри (індекси *a*, *b*, *c* у (3.5, 3.6), за результатами яких на підставі рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь для ємностей і тангенса кута діелектричних втрат (3.5-3.6) визначаються діелектричні параметри ізоляції обмоток кожної з фаз (індекси 1, 2, 3 в (3.5 – 3.6), з'єднаних у «зірку» [112, 116])

$$\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{C_a}, \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{C_b}, \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{C_c}, \quad (3.5)$$

$$\operatorname{tg} \delta_1 \frac{C_2}{C_1 + C_2} + \operatorname{tg} \delta_2 \frac{C_1}{C_1 + C_2} = \operatorname{tg} \delta_a; \operatorname{tg} \delta_1 \frac{C_3}{C_1 + C_3} + \operatorname{tg} \delta_3 \frac{C_1}{C_1 + C_3} = \operatorname{tg} \delta_b;$$

$$\operatorname{tg} \delta_2 \frac{C_3}{C_2 + C_3} + \operatorname{tg} \delta_3 \frac{C_2}{C_2 + C_3} = \operatorname{tg} \delta_c. \quad (3.6)$$

За двоелектродної схеми підключенні однієї з фаз і корпусу вимірюються сукупні характеристики ємності *C* і тангенса кута діелектричних втрат *tgδ* корпусної ізоляційної системи трьох фаз [112, 116-117].

На рис. 3.11 представлена схема заміщення обмоток статора асинхронної машини [115]. Обмотки з'єднані за схемою «зірка».

Нульова точка O недоступна для вимірювань. На схемі позначені: R_1, L_1, R_2, L_2 – опори і індуктивності обмоток кожної з фаз; C_3, R_3 – ємність кожної з фаз відносно корпусу (ємність корпусної електроізоляційної системи) і еквівалентний опір кожної з фаз. Резистор R_3 , що включено паралельно, відображає опір витoku ізоляції (при вимірах на постійній напрузі) або еквівалентний опір діелектричних втрат (при вимірах на змінній напрузі). Спрощена двохелементна схема заміщення корпусної ізоляції не відображає релаксаційних процесів в ізоляції, пов'язаних з накопиченням об'ємних зарядів.

Комплексний опір фази A визначається [115]

$$\underline{Z}_A = R_1 + j\omega L_1 + \left[\frac{R_3(-j\frac{1}{\omega C_3})}{R_3 - j\frac{1}{\omega C_3}} \right] \parallel \left[R_2 + j\omega L_2 + \frac{R_1}{2} + \frac{j\omega L_1}{2} + \frac{\frac{R_3(-j\frac{1}{\omega C_3})}{2}}{\frac{R_3}{2} - j\frac{1}{\omega C_3}} \right], \quad (3.7)$$

де знаком \parallel позначено паралельне з'єднання фрагментів схеми заміщення.

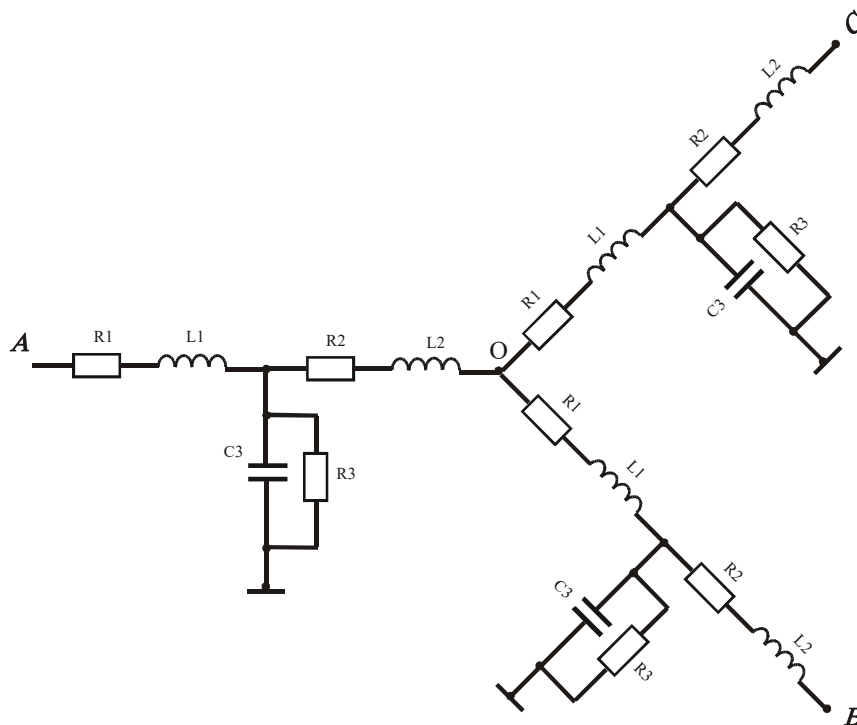


Рисунок 3.11 – Схема заміщення обмоток статора асинхронної електричної машини [115]

За умови припущення щодо однаковими омичних опорів і індуктивності половин обмоток кожної з фаз $R1=R2=R_L$, $L1=L2=L$, можна визначити комплексний опір і провідність половини обмотки

$$Z_L = \frac{1}{2} \left(\frac{R_L}{2} + \frac{j\omega L}{2} \right), Z_c = r - \frac{j}{\omega \cdot C}, Y_c = \frac{1}{Z_c}. \quad (3.8)$$

Комплексний опір Z_{LC} (комплексна провідність Y_{LC}) другої половини обмотки і двох половин двох інших обмоток та загальний опір обмотки Z та двох половин двох інших обмоток

$$Z_{LC} = Z_L + \frac{Z_L + Z_C}{2}, Y_{LC} = \frac{1}{Z_{LC}}, Z = Z_L + Z_{CLC}$$

$$Y_{C_{LC}} = Y_C + Y_{LC}, Z_{CLC} = \frac{1}{Y_{CLC}}, Z = Z_L + Z_{CLC}. \quad (3.9)$$

Шукані сукупні діелектричні характеристики ізоляційної системи обмоток щодо корпусу [115]

$$R_e = \text{real}(Z), C_e = -\frac{\omega}{\text{imag}(Z)}, \text{tg}\delta_e = R_e \cdot C_e \cdot \omega. \quad (3.10)$$

Модельні частотні залежності сукупних діелектричних характеристик корпусної електроізоляційної системи наведено на рис. 3.12-рис. 3.14, що побудовані на підставі (3.7-3.10) [115].

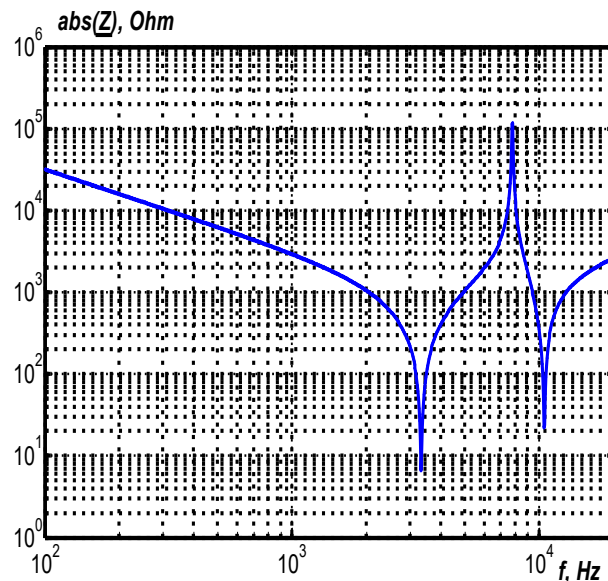
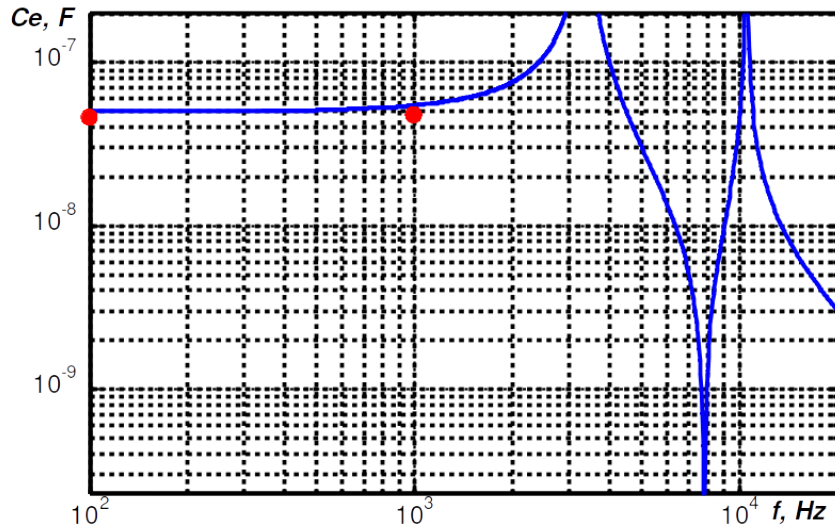
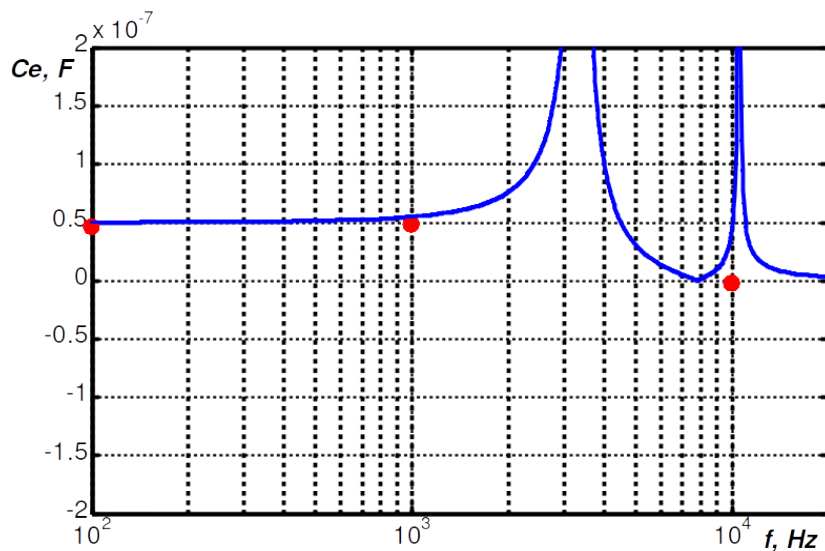


Рисунок 3.12 – Залежність від частоти модуля загального опору обмотки Z та двох половин двох інших обмоток



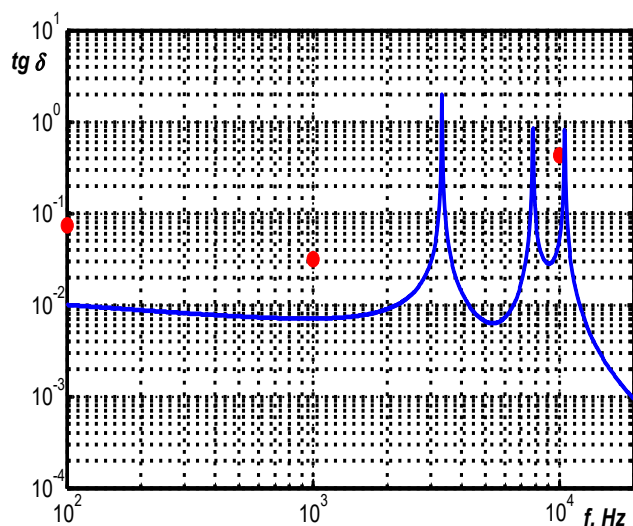
а – подвійний логарифмічний масштаб



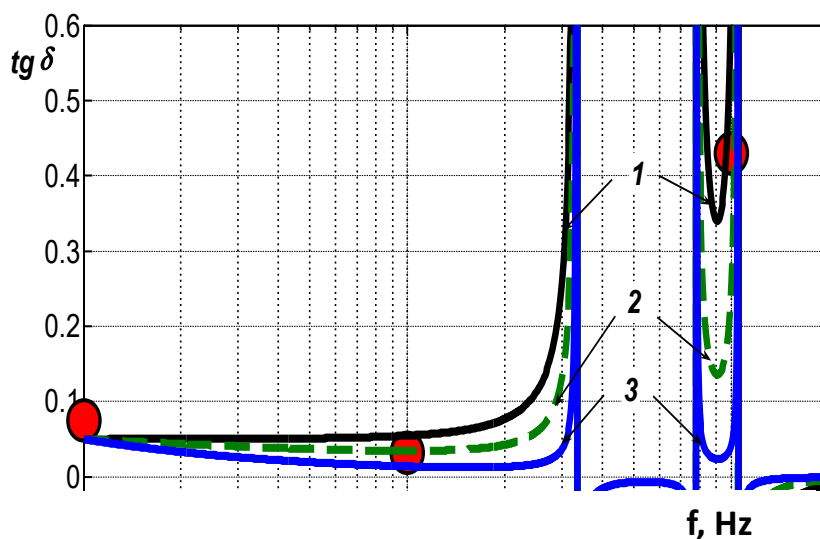
б – рівномірний масштаб по вертикальній вісі

Рисунок 3.13 – Залежність від частоти ефективної ємності обмоток щодо корпусу (ємність корпусної електроізоляційної системи): точки – експериментальні дані; суцільна лінія – розрахунок за схемою заміщення рис. 3.10 [115]

У діапазоні частоти від 1 до 10 кГц обмотки мають дві резонансних частоти. Перша – в області 4,2 кГц; друга – поблизу частоти 10 кГц. Вимірювання поблизу частоти 10 кГц дуже чутливі до рівня діелектричних втрат у ізоляції (рис. 3.13).



a – у подвійному логарифмічному масштабі при постійному значенні $tg\delta$ термореактивної композитної ізоляції



б – у рівномірному масштабі по вертикальній осі

Рисунок 3.14 – Залежність від частоти тангенсу кута діелектричних втрат обмоток щодо корпусу: точки – експериментальні дані; суцільна лінія – розрахунок за схемою заміщення рис. 3.10 [115].

При зміні $tg\delta$ власне ізоляції від 7,4 % до 1,2 % (тобто майже в 6 разів (див. рис. 3.13, частота 10 кГц) результат вимірювання параметра $tg\delta_{10\text{кГц}}$ всієї обмотки змінюється в десятки-сотні разів (рис. 3.12).

На рис. 3.14, б криві 1-3 побудовані у припущенні: крива 1 – при постійному значенні $\operatorname{tg}\delta$ термореактивної композитної ізоляції; 2 і 3 – при ступеневому законі зміни тангенса кута діелектричних втрат ізоляції: 2 – при $\operatorname{tg}\delta = \operatorname{tg}\delta_0 (f_0/f)^{0,2}$; 3 – при $\operatorname{tg}\delta = \operatorname{tg}\delta_0 (f_0 / f)^{0,4}$, де індекси «0» відповідають значенням частоти 100 Гц (рис. 3.15).

У таблиці 3.5 наведені результати вимірювань сукупних діелектричних характеристик корпусної ізоляційної системи обмоток асинхронної машини. Вимірювання виконані на трьох частотах: 100 Гц, 1 кГц і 10 кГц. Перші дві частоти виявилися нижчими, а третя – вище власної резонансної частоти (таблиця 3.5).

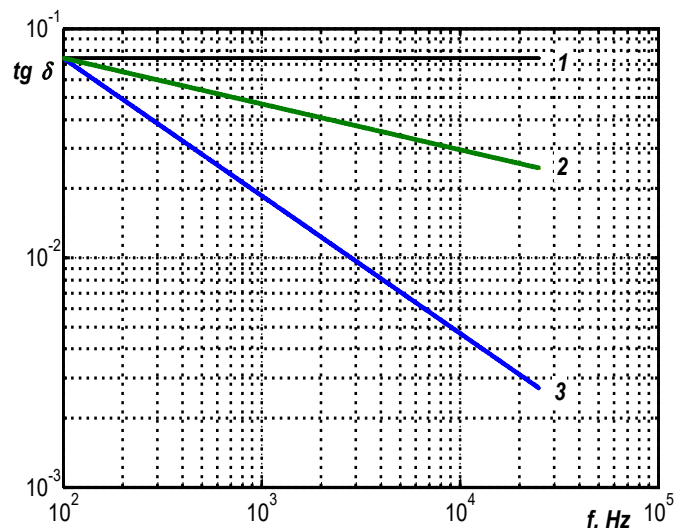


Рисунок 3.15 – Залежності від частоти тангенса кута діелектричних втрат корпусної термореактивної ізоляції, що покладено в основу при розрахунку частотних залежностей ємності і тангенса кута діелектричних втрат електроізоляційної системи обмоток

Значить, власна резонансна частота обмоток (перша резонансна частота) знаходиться у діапазоні 1-10 кГц. При вимірах на частоті, вище резонансної, вимірюються сукупні параметри як основного, так і паразитного ланцюгів. Так, при контролі ємності і тангенса кута діелектричних втрат $\operatorname{tg}\delta$ корпусної електроізоляційної системи на частоті 10 кГц (вище резонансної) показання вимірювача імітанса стають негативними: $C = -2,8639 \text{ нФ} < 0$.

Таблиця 3.5 – Сукупні діелектричні параметри корпусної системи асинхронної машини

Асинхронний двигун, напруга 1,875 кВ, потужність 1200 кВт Клас ізоляції Н	Частота вимірювань, кГц					
	0,1		1		10	
	С, нФ	tgδ, %	С, нФ	tgδ, %	Абсолютне значення С, нФ	tgδ, %
	45,639	7,435	47,473	3,151	2,8639	43,016

3.5 Сукупні характеристики корпусної електроізоляційної системи у режимі вимірювань параметрів індуктивності та добротності

У випадку, коли проводяться вимірювання ланцюга фаза – фаза (наприклад, А – О – В, рис. 3.11) за двохелектродною схемою підключення, також визначаються сукупні параметри індуктивності і добротності обмоток статора, з'єднаних послідовно, асинхронної машини [117]. Обмотки з'єднані за схемою «зірка». Нульова точка О недоступна для вимірювань. Третя фаза С взаємодіє з першими двома через ємнісні струми на корпус.

Добротність Q , що характеризує втрати енергії у ланцюгах з індуктивностями, є величиною, обернено пропорційною тангенсу кута втрат [118]

$$Q_e = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta} \quad (3.11)$$

Вимірюючи добротність котушок, можна оцінювати і діелектричні втрати у корпусної електроізоляційної системі.

У таблиці 3.6 наведено частотні характеристики двох зразків асинхронного тягового двигуна, що знаходяться у експлуатації. Результати представляють усереднені значення 10-кратних вимірювань [117].

За умови, що частота вимірювань менше резонансної, відмінність у результатах вимірювання добротності обмоток двох фаз, з'єднаних послідовно, зразків електричної машини – незначна. На резонансній частоті 10 кГц добротність корпусної ізоляційної системи фаз відрізняється більш ніж у 1,1 і 1,2 рази для першого і другого зразків відповідно. Середнє значення добротності обмоток двох фаз, з'єднаних послідовно, на резонансній частоті дорівнює 1,23 і 1,63 для першого та другого зразків електричних машин відповідно. Очевидно, що ізоляція першого двигуна має більше дефектів, ніж другого: для неї середнє значення добротності на резонансній частоті у 1,34 рази менше.

За значенням тангенса кута діелектричних втрат на резонансній частоті корпусна ізоляція обох електричних машин практично однакова: 42 % – для першого, 43 % – для другого. Це означає, що теплове старіння корпусної ізоляції відбулося у них приблизно однаково. При частотах, менше резонансної,

відмінність у властивостях корпусної ізоляції проявляється більш виражено.

Таблиця 3.6 – Сукупні параметри корпусної електроізоляційної системи електричних машин

Зразок асинхронного тягового двигуна на напругу 1410 В, потужність 410 кВт	Частота вимірювань, кГц					
	0,1		1		10	
Сукупні діелектричні параметри корпусної системи трьох фаз	C, нФ	tgδ, %	C, нФ	tgδ, %	C, нФ	tgδ, %
	Зразок 1					
	45,80	10,89	48,18	5,25	2,750	42,22
	Зразок 2					
	45,639	7,435	47,473	3,151	2,863 9	43,016
Сукупні параметри індуктивності та добротності обмоток двох фаз, що з'єднані послідовно	L, мГн	Q	L, мГн	Q	L, мГн	Q
	Зразок 1					
A-O-B	66,68	35,65	63,33	24,05	60,78	1,3013
B-O-C	66,75	35,76	63,38	24,04	65,12	1,2244
A-O-C	66,77	35,57	63,38	23,72	61,10	1,1695
Зразок 2						
A-O-B	66,18	35,56	62,85	25,71	70,72	1,4647
B-O-C	66,07	35,51	62,76	25,57	73,29	1,8145
A-O-C	66,15	35,17	62,81	25,64	75,30	1,6077

Для першого зразка: $tg\delta_{0,1кГц}=10,9\%$ і $tg\delta_{1кГц}=5,3\%$, для другого: $tg\delta_{0,1кГц}=7,4\%$ і $tg\delta_{1кГц}=3,2\%$ відповідно. Зростання тангенса кута діелектричних втрат із зменшенням частоти характерно для ізоляції, що зволожена [118]. Очевидно, що для першого зразка двигуна ізоляція зволожена у більшій мірі. Причиною цього можуть бути мікротріщини, що володіють гігроскопічними властивостями, які утворюються на стадії виготовлення, та в процесі експлуатації електричних машин [118]. Перший зразок двигуна має всі ознаки погіршення технічного стану як за результатами обстежень добротності на резонансній частоті, так і тангенса кута діелектричних втрат при частотах, менших резонансної. Очевидно, що перший зразок електричної машини необхідно направити у ремонт в першу чергу. Параметри другого зразка можна виміряти, наприклад, через рік.

За наявності швидкого дрейфу параметрів за результатами обстежень слід прийняти рішення про необхідність ремонту.

Вочевидь, у процесі експлуатації наведених асинхронних тягових двигунів [119] відбулося додаткове твердіння електроізоляційної системи, зокрема, рідини, що просочує, з виділенням низькомолекулярних речовин. Застосування компаундів на основі ненасичених олігоєфірімідів у активному розчиннику, низьков'язких однорідних сумішей епоксидних діанових смол і ангідриду карбонової кислоти знімає ці питання [120]. Так, компаунд Елпласт 180 ІД відповідає класу нагрівостійкості Н. Максимальна тривала температура експлуатації – 180 °С. Компаунди твердіють за три стадії. Під час першої стадії матеріали всіх трьох марок витримують при температурі 130 °С протягом 2 годин. Далі, в другу стадію, підтримують температуру 160 °С протягом 4 годин. Під час

завершальної стадії компаунд Елпласт 180 ІД витримують при 180 °С протягом чотирьох годин. Затвердіння при цьому відбувається у товстому шарі і, як правило, здійснюється за один цикл.

На рисунку 3.16 наведено $C - tg\delta$ діаграму зразків дископодібної форми діаметром 10 см та товщиною 1мм компаундів Елпласт ІД 180 (криві 1-3), отриманих методом занурення, та на основі епоксидних смол (крива 4) за температури вимірювань 20 °С.

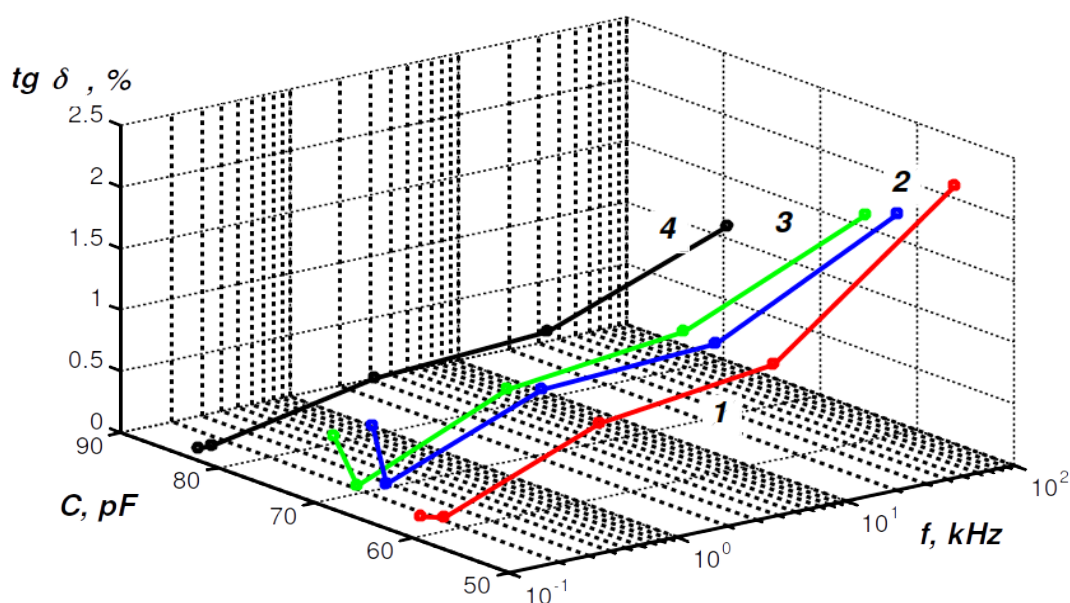


Рисунок 3.16 – Частотні залежності ємності C та тангенсу кута діелектричних втрат $tg\delta$ зразків термореактивних компаундів класу нагрівостійкості Н [120]

Для компаунду на основі діанових смол $tg\delta$ має у меншій мірі виражену частотну залежність, що, вочевидь, пов'язано з меншим вмістом низькомолекулярних речовин у процесі твердіння. Візуальний огляд зразків показує, що зразки компаундів Елпласт ІД 180 мають у більшій мірі неоднорідність по товщині та світовий колір.

3.6 Висновки за розділом 3

Наявність повітряних проміжків у твердій композитній високовольтній електроізоляційній системі може бути непрямо проконтрольовано за результатами вимірювань опору ізоляції, що потребує проведення додаткового теплового старіння та витримки у нормальних умовах.

Критичні (грубі) технологічні дефекти всередині ізоляції, розвиток яких у експлуатації може привести до аварійних режимів роботи електричної машини, повинні бути виявлені на стадії виготовлення електроізоляційної системи та електричної машини в цілому.

Показана ефективність виявлення технологічних дефектів у твердій композитній корпусній ізоляції обмотки статора турбо- і гідрогенераторів. На підставі порівняння амплітуди імпульсів часткових розрядів позитивної і негативної полярності встановлено ймовірне місце розташування технологічних дефектів у корпусній ізоляції.

Результати проведених досліджень підтверджують ефективність реєстрації часткових розрядів у високовольтній твердій ізоляції для виявлення технологічних дефектів на стадії виготовлення електроізоляційних конструкцій, а також для налаштування самого технологічного процесу.

Результати моделювання частотних залежностей сукупних діелектричних характеристик на основі схеми заміщення обмоток статора при з'єднанні «зіркою» асинхронних електричних машин свідчать про наявність двох резонансних частот у діапазоні 1 і 10 кГц. На частоті 10 кГц тангенс кута діелектричних втрат всієї електроізоляційної системи обмоток змінюється у десятки-сотні разів, що дає можливість контролювати стан композитної ізоляції на цій частоті. Наявність залишкової вологи у корпусній ізоляції призводить до зростання $tg\delta$ корпусної композитної термореактивної системи зі зменшенням частоти.

Достовірність результатів чисельного розрахунку сукупних діелектричних параметрів корпусної електроізоляційної системи з класом нагрівостійкості ізоляції Н трьох фаз підтверджується проведеними експериментальними дослідженнями зразка високовольтного асинхронного тягового двигуна.

Діелектрична спектроскопія сукупних діелектричних характеристик на змінній напрузі дозволяє оцінити стан корпусної термореактивної електроізоляційної системи на кінцевій стадії виготовлення електричних машин.

Виконано аналіз характеристик корпусної електроізоляційної системи у режимі вимірювань сукупних параметрів індуктивності і добротності на резонансній частоті зразків електричного двигуна.

Встановлено, що ступінь теплового старіння корпусної ізоляції порівнюваних електричних машин у режимі вимірювання ємності, яка оцінюється за параметром тангенса кута діелектричних втрат на резонансній частоті, практично однакова. За величиною добротності на резонансній частоті у режимі вимірювання індуктивності – різна.

Добротність є чутливим параметром до виявлення технологічних дефектів у композитній ізоляції електричних машин. Параметр добротності обмоток на резонансній частоті можна розглядати в якості діагностичної ознаки у оцінці технічного стану ізоляції електричних машин.

Комплексні діагностичні обстеження корпусної електроізоляційної системи у режимі вимірювання добротності на резонансній частоті і в режимі вимірювання тангенса кута діелектричних втрат для частот, менше резонансної, дозволяють виявити процеси теплового старіння і зволоження ізоляції та оцінити технічний стан електричних машин як на технологічній стадії виготовлення, так і в експлуатації.

Розділ 4

МОНІТОРИНГ СТАБІЛЬНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Удосконалювання високовольтних електроізоляційних композиційних систем електричних машин здійснюється шляхом створення нових, більш прогресивних, матеріалів і технологічних процесів [120-121]. Електроізоляційні системи складають приблизно 0,03 % від маси електричних машин, але мають виняткову важливість і впливають на можливості конструкторських рішень і технології виготовлення електричних машин, в результаті – на їхню питому масу і габаритні розміри, на надійність і довговічність. Моніторинг якості продукції у процесі її виробництва завжди гостро стоїть перед виробниками.

Основними параметрами технологічного процесу являються точність, стабільність та продуктивність.

Ступінь відповідності параметрів виготовленої електроізоляційної системи та електричної машини в цілому параметрам, які вказані у нормативно-технологічній документації, визначається систематичними або випадковими похибками виробництва при відповідній стабільності технологічного процесу.

Важливим параметром є також технологічність конструкції електроізоляційної системи, яка може оцінюватися як якісно, так і кількісно на підставі розрахунку відповідних показників [4-10].

При проведенні аналізу точності і стабільності технологічних процесів використовують, як правило, методи прикладної статистики, теорії планування експерименту, кореляційного і регресійного аналізу [122-124].

В умовах сучасного виробництва у більшій мірі використовуються методики та процедури, засновані на статистичному аналізі характеристик виробів [125-130].

4.1 Статистичні характеристики для оцінки стабільності технологічного процесу

Для статистичної оцінки точності і стабільності технологічних процесів стандартами передбачено низку показників і характеристик. Застосовуються геометричні, фізичні та інші параметри.

Розсіювання значень параметрів внаслідок наявності похибок, що виникають внаслідок дії причин випадкового (випадкова складова сумарної похибки) і систематичного (систематична складова) характеру, з достатнім ступенем адекватності може бути апроксимоване нормальним законом розподілу [124]

$$y(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(X - \mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (4.1)$$

де X – змінна випадкова величина; μ – математичне сподівання випадкової величини X ; σ – середньоквадратичне відхилення випадкової величини.

Математичне сподівання μ характеризує положення кривої розподілу на відліковій шкалі параметра, який аналізується, а середньоквадратичне відхилення σ – ступінь розсіювання випадкової величини X щодо математичного очікування μ .

Нормальний закон (4.1) характеризує розподіл генеральної сукупності, утвореної безліччю значень параметрів аналізованого технологічного процесу. При цьому джерелом інформації про фактичний розподіл служить взята з генеральної сукупності вибірка обсягом n одиниць електроізоляційної системи або електричної машини, за якою розраховується експериментальний розподіл у якості оцінки теоретичного розподілу.

Оцінками параметрів теоретичного розподілу є статистичні характеристики: вибіркве середнє арифметичне значення \bar{X} у якості оцінки математичного очікування μ ; вибіркве середнє квадратичне відхилення S у якості оцінки σ [124]

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}, \quad (4.2)$$

Розмах R застосовується у якості характеристики розсіювання, що визначається як різниця між максимальним і мінімальним значеннями параметрів у вибірці.

Оцінка точності і стабільності технологічних процесів проводиться з використанням отриманих вибіркових статистичних характеристик \bar{X} і S шляхом визначення показників – коефіцієнтів точності K_T , налаштованості K_n і стабільності K_c через зіставлення їх з встановленим у нормативно-технічній документації полів допуску δ на параметр [126]

$$K_T = \frac{6S}{T} \leq 1; \quad K_n = \frac{\bar{X} - X_\delta}{T} \rightarrow 0; \quad K_c = \frac{S_{t1}}{S_{t2}} \rightarrow 1, \quad (4.3)$$

де $T = T_v - T_n$ – допуск виробу з контрольованим параметром (різниця між верхнім і нижнім значеннями); S_{t1} – середнє квадратичне відхилення у фіксований момент часу t_1 ; S_{t2} – середнє квадратичне відхилення у фіксований момент часу t_2 .

Точність технологічного процесу оцінюють виходячи з наступних критеріїв: при $K_T \leq 0,75$ – технологічний процес точний; при $K_T = (0,75-0,98)$ – вимагає уважного спостереження; при $K_T > 0,98$ – незадовільний. Оцінку стабільності технологічного процесу електроізоляційної системи необхідно вести за електричним параметром, який у найбільшій мірі є контрольованим на технологічній стадії виготовлення електричних машин.

4.2 Опір ізоляції як інтегральний показник стабільності технологічного процесу виготовлення електроізоляційних систем

Проведення електричних випробувань електричних машин необхідно на всіх етапах. На стадії проектування проводять випробування макетних і дослідних зразків електричних машин для перевірки відповідності вихідних показників і характеристик машини вимогам технічного завдання. На стадії виготовлення випробування окремих вузлів машини (наприклад, обмотки) проводяться після завершення окремих технологічних операцій. Після складання машини випробування проводять для перевірки відповідності її вихідних показників вимогам технічних умов. На всіх технологічних етапах виготовлення як електроізоляційної системи, так і електричної машини в цілому, контролюється опір ізоляції.

Приймально -здавальним випробуванням піддають кожен електричну машину. Програми цих випробувань значно коротше, ніж приймальних (приймальні випробування проводяться на дослідному зразку продукції з метою приймання її для серійного виробництва. Програма цих випробувань найбільш докладна.). Метою приймально-здавальних випробувань є встановлення придатності кожної виготовленої машини до експлуатації за мінімально можливий час випробувань. У програму приймально-здавальних випробувань електричних машин входить обов'язкове вимірювання опору ізоляції. Опір ізоляції R_{ins} можна розглядати в якості критерію оцінки однорідності електроізоляційних систем на технологічній стадії виготовлення електричних машин. Це значення вказується у нормативно -технічній документації [81-83].

Середні вимоги до опору ізоляції обмоток становлять для машин низької напруги близько 0,5 МОм і для машин високої напруги – більше 1 МОм. Так, для високовольтних електроізоляційних систем тягових електричних машин опір

ізоляції R_{ins} щодо корпусу (нижні порогові значення R_{insn}) повинен бути не менше 40 МОм на постійній напрузі 2500 В. Верхнє значення опору ізоляції не регламентується [129].

Таким чином, опір ізоляції є інтегральною статистичною характеристикою, яка залежить, перш за все, від електрофізичних властивостей композитної системи, технологічного процесу виготовлення складальних одиниць і самої електричної машини в цілому. Слід зазначити, що особливістю технологічного процесу виготовлення ізоляційних систем електричних машин, в тому числі і тягових, є високий рівень ручного виробництва.

Вимірювання проводиться по черзі для кожного електричного кола, що має самостійні виводи початку і кінця, при з'єднанні всіх інших ланцюгів з корпусом. Так, вимірювання опору ізоляції електричних машин, що мають глухе сполучення фаз всередині, проводиться для всієї обмотки по відношенню до корпусу [129].

Перед вимірюванням опору ізоляції вимірюється температура обмоток машини.

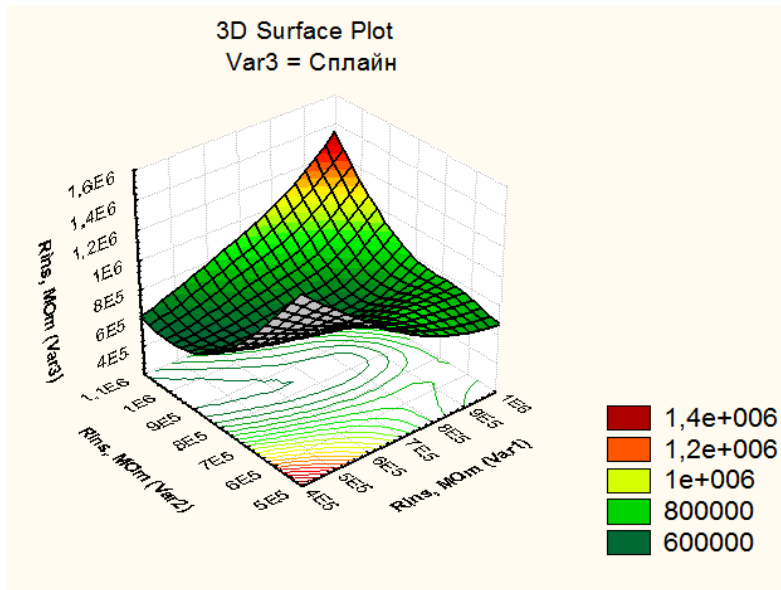
Вимірювання опору ізоляції вважається закінченим тільки тоді, коли показання приладу (мегомметра) перестануть змінюватися. Після закінчення вимірювання опору ізоляції кожний ланцюг слід розрядити його електричним з'єднанням із заземленим корпусом машини. Тривалість з'єднання з корпусом повинна бути не менше 3 хвилин незалежно від потужності.

Для оцінки стану ізоляції отримані результати вимірювань опору ізоляції порівнюються з аналогічними даними попередніх випробувань і з допустимими значеннями відповідно до нормативно-технічної документації [129].

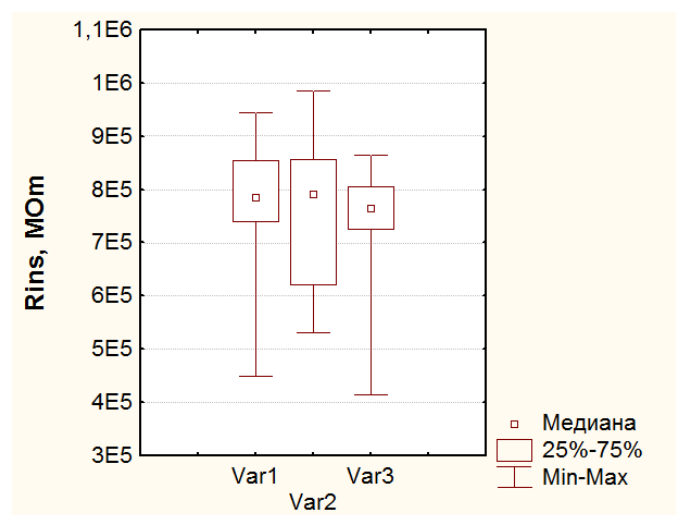
Нижче наведено аналіз стабільності технологічного процесу, що виконано для трьох варіантів корпусної ізоляції магнітної системи тягового електродвигуна постійного струму. У кожному

з трьох варіантів корпусної ізоляції – по 12 зразків, які відрізняються числом шарів і типом ізоляційних стрічок. Вимірювання опору ізоляції виконані тераомметром МІ 2077 за постійної напруги 2500 В [127].

На рис. 4.1, а представлені результати вимірювань, а на рис. 4.1, б – статистичні характеристики опору ізоляції трьох варіантів корпусної ізоляції [127].



а



б

Рисунок 4.1 – Вибірки опору ізоляції трьох варіантів корпусної ізоляційної системи [127]

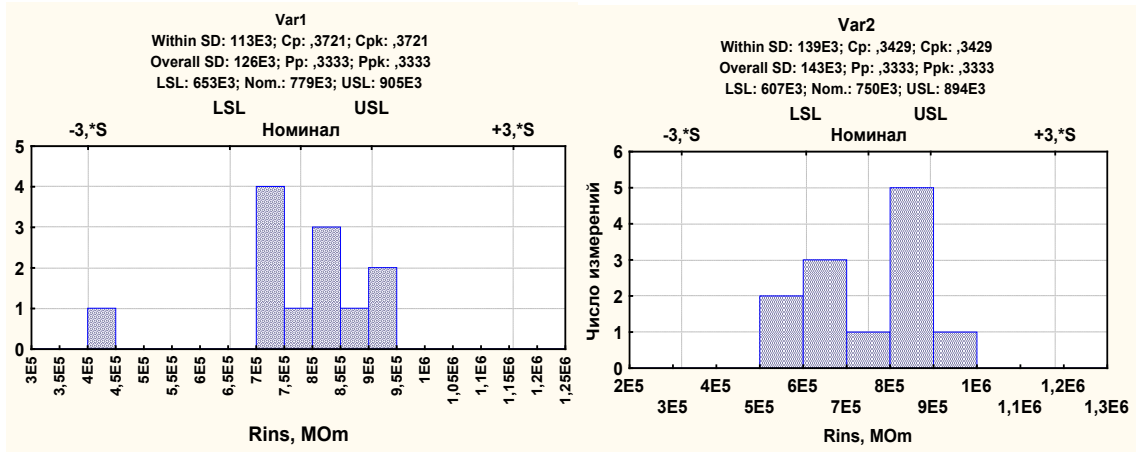
Нижня сторона прямокутника (рис. 4.1, б) відповідає 25-відсотковій точці, верхня – 75-відсотковій. Квадрат всередині прямокутника – медіана, верхня і нижня горизонтальні лінії – мінімальне і максимальне значення для вибірки відповідно.

Статистичний розкид виміряних значень опору ізоляції (рис. 4.1, б) у межах кожного варіанта ізоляційної системи пов'язаний, принаймні, з двома причинами [130]:

- Перша обумовлена неминучими випадковими похибками вимірювань і неможливістю абсолютно точного відтворення умов випробувань, зокрема, у підтримці постійної температури.
- Друга причина – більш глибока і полягає у тому, що опір ізоляції відображає наявні структурні і технологічні дефекти у ізоляційній системі, і пов'язана з неоднорідністю матеріалу ізоляції, технологічним обладнанням, кваліфікацією персоналу.

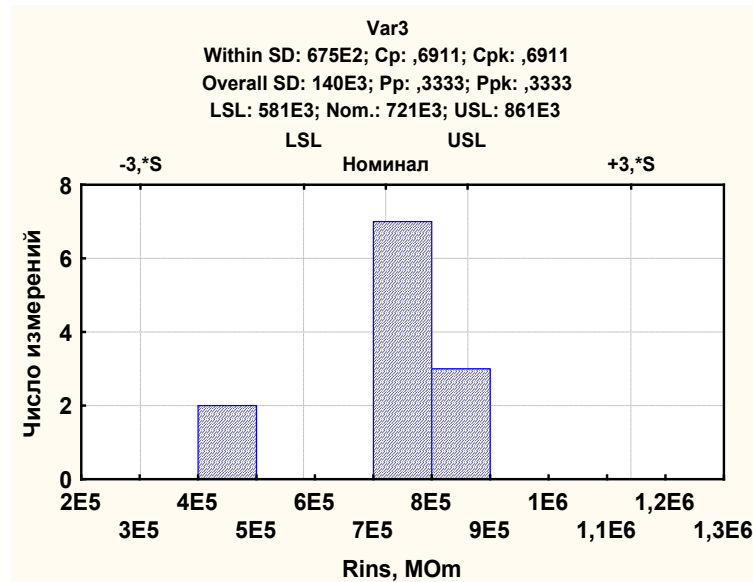
Для всіх трьох варіантів опір ізоляції лежить у межах $\pm 3S$ щодо номінального (середнього) значення для кожної вибірки (рис. 4.2), що відповідає концепції «Шість сигм» [131].

Концепція «Шість сигм» має на увазі такий рівень ефективності процесу, при якому на кожен мільйон виробничих операцій припадає 3,4 дефекту. Саме такий показник якості компанія Motorola у 1980-х роках встановила для всіх виробничих процесів як досягнення мети, і з тих пір ця концепція є торговою маркою концерну.



а

б



в

Рисунок 4.2 – До однорідності вибірок опору ізоляції різних варіантів корпусної ізоляційної системи [127]

Методику «шести сигм» запозичили і популяризували такі відомі компанії як General Electric, Honeywell, Microsoft. У всякому випадк , дефекти – головна мішень концепції «Шість сигм» [131].

4.3 Статистичний аналіз за опором ізоляції стабільності технологічного процесу виготовлення електроізоляційних систем

В умовах поточного моніторингу одним з основних інструментів є контрольні карти (або контрольні карти Шухарта), котрі дозволяють аналізувати статистичні характеристики досліджуваного виробничого процесу [132]. Основна ідея побудови таких карт полягає у графічному відображенні значень деяких статистичних даних, наприклад, вибіркового середнього, вибіркового розмаху, значень окремих спостережень, ковзних розмахів, і візуальному контролю над їх зміненням протягом усього технологічного процесу.

Якщо єдиним джерелом варіації параметрів процесу служать випадкові чинники, то на графіку, що показує цей процес у часі, буде помітний випадковий характер поведінки результатів виміру опору ізоляції електроізоляційних систем. Згідно статистичної теорії [124], якісні ознаки підпорядковуються біноміальному закону розподілу, а кількісні – нормальному. При контролі за якісною ознакою, враховуючи, що ймовірність появи дефекту менш 0,10, як наближення до біноміального розподілу використовують розподіл Пуассона.

Знання характеру прояву випадкової варіації налагодженого процесу лежить в основі теорії контрольних карт: якщо результати вимірювань опору ізоляції не поведуться випадковим чином, то це означає, що присутні невідповідні фактори.

Контрольні карти є невід'ємною частиною промислової статистики і активно використовуються для контролю та аналізу стабільності технологічного процесу.

Так, карта Шухарта вимагає даних, що одержані вибірково з процесу через приблизно рівні інтервали часу. Карта Шухарта – це графік значень певних характеристик підгруп у залежності від їх номерів (рис. 4.3). Вона має центральну лінію (*CL*), що відповідає еталонному значенню опору ізоляції. При оцінці того, чи перебуває технологічний процес у статистично керованому стані, еталонним зазвичай є середнє арифметичне розглянутих даних. При управлінні процесом еталонним служить довгострокове значення характеристики, встановлене у технічних умовах, або її номінальне значення, засноване на попередній інформації про процес.

Карта Шухарта має дві контрольні границі, що статистично визначаються. Центральна лінія (*CL*) задає цільове значення параметра або заданої функції від нього. Верхня *UCL* (upper control limit) і нижня *LCL* (lower control limit) лінії визначають допустимі межі змінення і лежать, відповідно, вище і нижче центральної лінії. Якщо отримані значення не виходять за допустимі межі, то процес знаходиться у стані статистичної керованості (рис. 4.3). Контрольні границі знаходяться на відстані $\pm 3\sigma$ від центральної лінії, де σ – генеральне стандартне середньоквадратичне відхилення використовуваної статистики. Мінливість всередині підгруп є мірою випадкових варіацій.

Для отримання оцінки обчислюють вибіркоче стандартне відхилення або множать вибіркочий розмах на відповідний коефіцієнт [132]. Цей захід не включає міжгрупових варіацій, а оцінює тільки мінливість всередині підгруп.

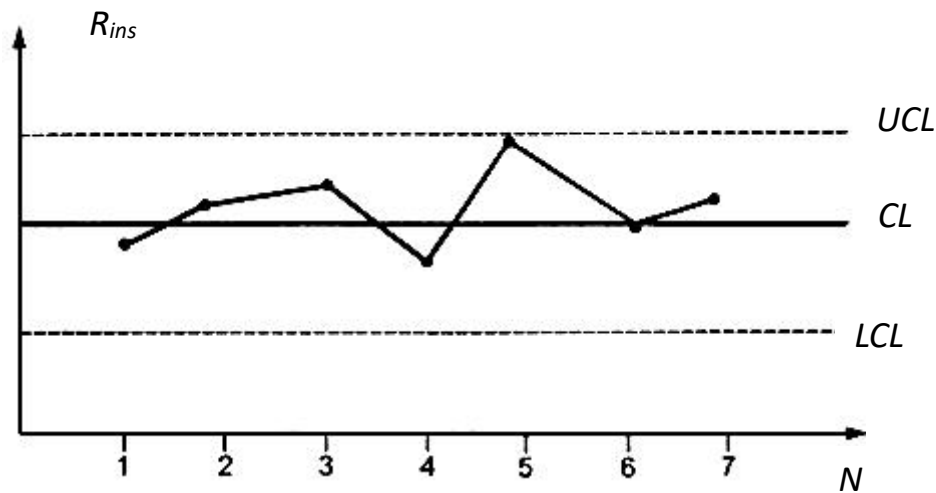


Рисунок 4.3 – Якісний вигляд контрольної карти Шухарта [132]

Контроль технологічного процесу повинен базуватися не на декількох, а на одному значенні опору ізоляції при проведенні випробувань кожної електроізоляційної системи. По-перше, прилад вимірює тільки одне значення опору ізоляції. По-друге, проведення декількох вимірювань на одному і тому ж зразку економічно недоцільно та призводить до старіння ізоляції при прикладанні високої напруги 2500 В протягом 1 хв. Відповідно до вищезазначеного доводиться аналізувати технологічний процес на основі індивідуальних значень опору ізоляції. Контрольні карти можуть бути побудовані для окремих спостережень, які отримано при контролі електроізоляційних систем на стадії виготовлення [127].

Контрольні карти індивідуальних значень (рис. 4.4) дозволяють виявити відхилення ($R_{sns}=X$) або ковзні розмахи (MR) опору ізоляції, які обумовлені не випадковими причинами технологічного процесу при виготовленні однотипних електроізоляційних систем [127].

При використанні карт індивідуальних значень контрольні границі розраховують на основі міри варіації, що отримано по ковзному розмаху, зазвичай, двох спостережень. Розмах, що ковзає, (MR) являє собою абсолютне значення різниці вимірів у послідовних парах (різниця першого і другого вимірів $|X_1 - X_2|$, другого і третього $|X_2 - X_3|$ і т. п.).

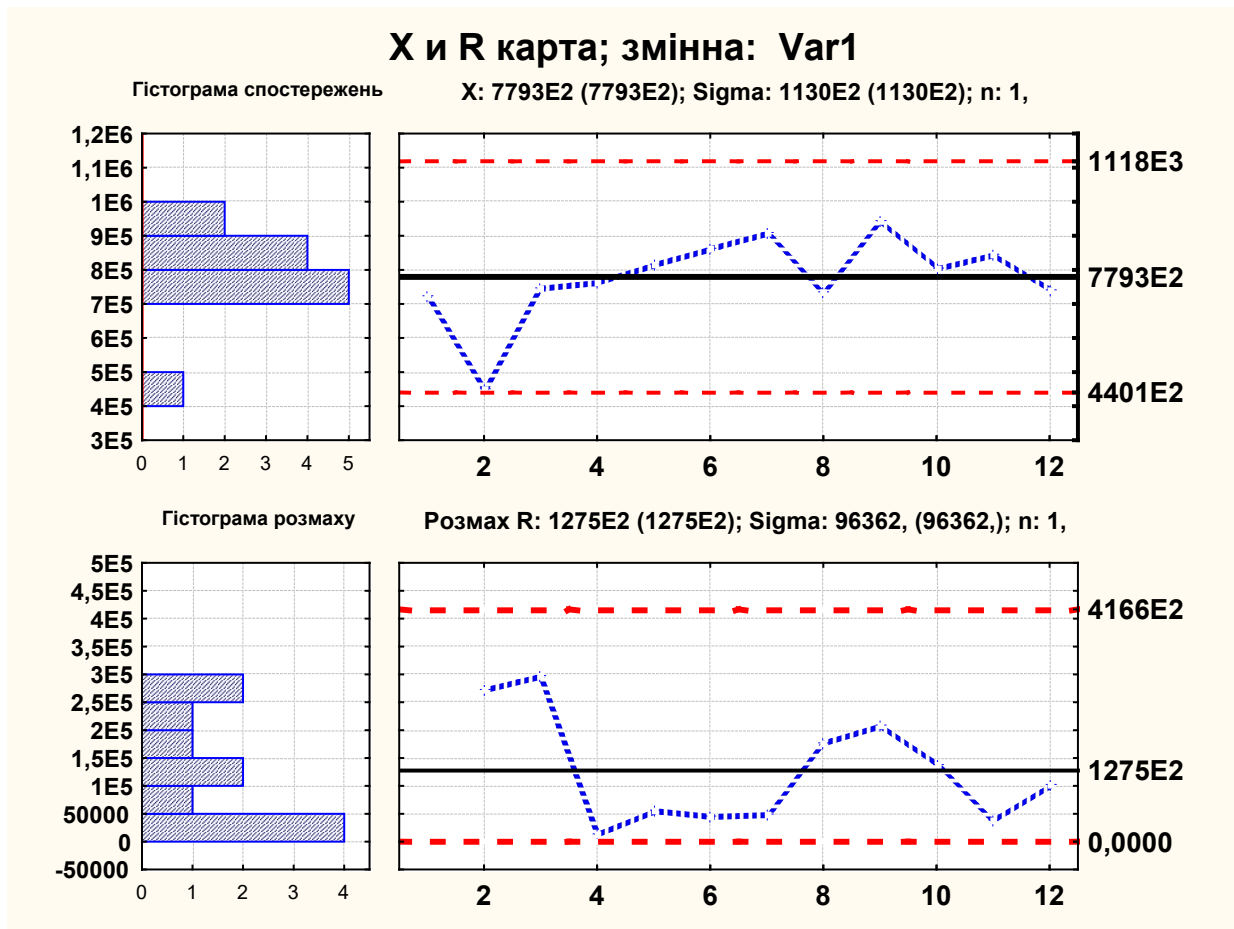


Рисунок 4.4 – Контрольна карта індивідуальних значень опору ізоляції та ковзних розмахів для варіанта 1 корпусної ізоляційної системи [127]

Число ковзних розмахів на 1 менше, ніж загальне число виміряних значень. На основі ковзних розмахів обчислюється середній ковзний розмах \bar{MR} опору ізоляції, який використовують для побудови контрольних карт. Також, за всіма даними, обчислюють загальне середнє значення опору ізоляції $\bar{X} = \bar{R}_{ins}$:

$$\bar{X} = \bar{R}_{ins} = (\sum R_{ins}) / N \quad \bar{MR} = (\sum MR_{ins}) / (N - 1), \quad (4.4)$$

Нижня і верхня границі на карті (рис. 4.4, штрих пунктирні лінії) знаходяться на відстані 3σ від середнього значення (центральна лінія). При цьому не спостерігається ні систематичних зсувів (трендів), ні будь-яких інших ознак виходу процесу з-під контролю: точки обох карт рівномірно (на основі візуального аналізу) вагаються щодо відповідних середніх ліній. Точки на обох контрольних картах знаходяться всередині контрольних меж. Значення другого виміру знаходиться досить близько до нижньої контрольної межі, проте на тлі загальної позитивної картини це не є тривожною подією.

Для завдання критеріїв пошуку серій точок область індивідуальної контрольної карти над центральною лінією і під нею ділиться на три "зони": А, В і С (таблиця 4.1) [127].

За замовчуванням зона А визначається як область, що розташована на відстані від 0 до 3σ по обидва боки від центральної лінії. Зона В – область, що відстоїть від центральної лінії на відстані від 1σ до 2σ , а зона С – як область, що розташована між центральною лінією по обидві її сторони і обмежена прямою, проведеної на відстані 1σ від центральної лінії. Залежно від кількості точок і їх розташування у одній із зон контрольної карти, встановлено сім критеріїв. При виконанні того чи іншого критерію у таблиці результатів тестування рядок, що відповідає цьому критерію, виділяється червоним кольором, а замість **OK** у стовпчиках вказуються номери точок, які потрапили у зону ризику.

Результати тестування (таблиця 4.1), виконані для MR –

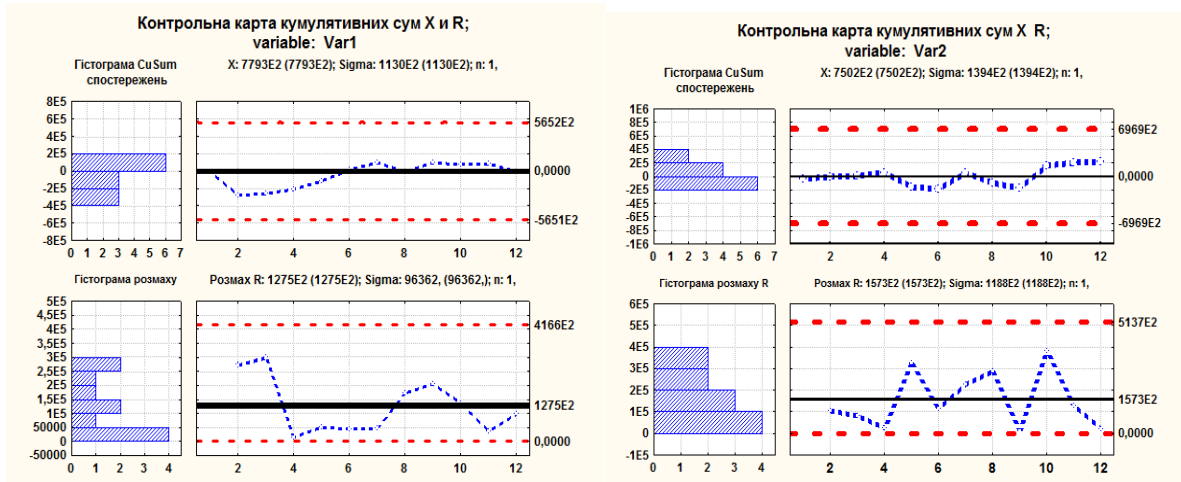
контрольної картки (рис. 4.4) і для двох інших варіантів корпусної ізоляції, показують, що за всіма критеріями тестування технологічного процесу за опором ізоляції показники, що досліджуються, перебувають у статистично керованому стані. Сигналу про необхідність вжиття заходів попереджувального характеру не виявлено.

Таблиця 4.1 – Результати статистичного тестування технологічного процесу виготовлення електроізоляційної системи [127]

Зони А/В/С: 3,0/2,0/1,0 σ	Змінення опору ізоляції <i>MR</i> -карта Центральна лінія 127545,45 МОм, $\sigma=96361,95$ МОм	
	від виборки	до виборки
9 точок з однієї сторони від центральної лінії	ОК	ОК
6 точок зростання/ зниження	ОК	ОК
14 точок чергуються вверх і вниз	ОК	ОК
2 з 3-х точок в зоні А або за її межами	ОК	ОК
4 з 5-ти точок в зоні В або за її межами	ОК	ОК
15 точок в зоні С	ОК	ОК
8 точок за межами зони С	ОК	ОК

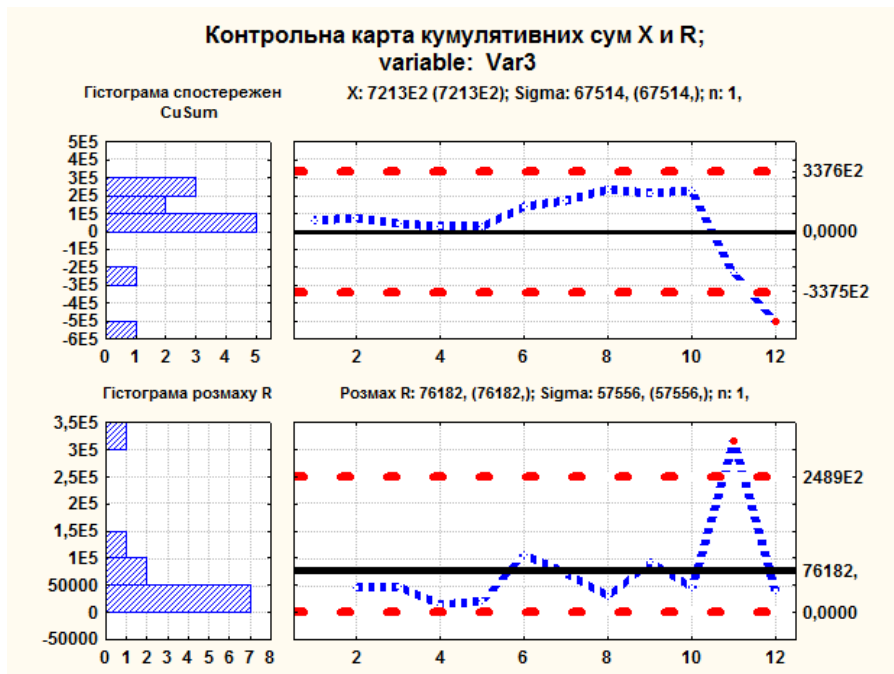
4.4 Контрольні карти кумулятивних сум для оцінки стабільності технологічного процесу виготовлення електроізоляційних систем

Більшу чутливість до збурень технологічного процесу мають контрольні карти кумулятивних сум (CuSum) [133], які представляють накопичені суми відхилень окремих значень опору ізоляції від середнього значення (рис. 4.5).



а

б



в

Рисунок 4.5 – Контрольні карти кумулятивних сум і розмахів, що ковзають, опору ізоляції трьох варіантів корпусної ізоляційної системи [127]

За умови адекватного налаштуванні алгоритм кумулятивних сум виявляє малі, але стійкі змінення процесу з більшою ймовірністю, ніж стандартний алгоритм Шухарта.

В основу алгоритму покладено процедура, що запропонована Пейджем [134] для виявлення змінення середнього значення процесу за умови, що дисперсія його залишається постійною.

Для ряду вимірних значень опору ізоляції після отримання чергового значення обчислюється статистика, що представляє собою оцінку ставлення густини розподілу вірогідності опору ізоляції до змінення середнього ($f_1(X)$) до густини після визнання середнього $f_1(\bar{X})$

$$S(X_i) = \frac{f_1(X)}{f_1(\bar{X})} \quad (4.5)$$

У разі нормально розподілених значень опору ізоляції ця статистика має вигляд

$$S(X_i) = (X_i - \frac{\bar{m}_1 - \bar{m}_2}{2}) (\frac{\bar{m}_2 - \bar{m}_1}{\bar{S}^2}) \quad (4.6)$$

де \bar{m}_1 , \bar{m}_2 – оцінки середнього значення опору ізоляції, \bar{S}^2 – оцінка дисперсії.

Статистика (4.6) має позитивний дрейф після змінення середнього і негативний – до змінення середнього.

Обчислюються вирішальні функції g^+_{i-1} , g^-_{i-1} , перша з яких призначена для виявлення збільшення середнього, друга – для виявлення зменшення середнього

$$g^+_{i-1} = g^-_{i-1} = 0, \\ g^+_{i-1} = \min \{0, g^+_{i-1} + S(X_i) - \bar{m}_1 + K\} \quad (4.7)$$

Значення вирішальних функцій порівнюються з порогом R_{insn} , при зменшенні котрого вважається, що процес вийшов з під контролю

$$g^+_{i-1} = \min \{0, g^+_{i-1} + S(X_i) - \bar{m}_1 + K\} \leq R_{insn} \text{ або}$$

$$g^-_{i-1} = \min \{0, g^-_{i-1} + (\bar{m}_1 - K) - S(X_i)\} \leq R_{insn}, \quad (4.8)$$

Значення K і R_{insn} – параметри настройки алгоритму. У [125] пропонується застосовувати значення

$$K = \frac{\sigma}{2}, \quad R_{insn} = 4\sigma, \quad (4.9)$$

де σ – стандартне середньоквадратичне відхилення послідовності вимірювань.

Наведені на рис. 4.5 контрольні карти кумулятивних (накопичених) сум опору ізоляції для трьох варіантів корпусної ізоляції дозволяють проаналізувати стабільність технологічного процесу виготовлення електроізоляційних систем [135-139]. Аналіз доводить, що для двох систем ізоляції (рис. 4.5, а та рис. 4.5, б) технологічний процес стабільний. Для третьої спостерігається тренд кумулятивних сум опору ізоляції (рис. 4.5, в). Так, для 12-о CuSum спостереження відзначається вихід за нижню межу і для 11-о – за верхню для MR , що може служити ознакою початку розладнання технологічного процесу. При цьому для такого варіанту проявляється також тренд вибірових значень CuSum, що вимагає з'ясування причин його появи [127].

4.5 Висновки за розділом 4

Моніторинг стабільності технологічного процесу виготовлення високовольтної електроізоляційної системи повинен враховувати особливості виготовлення, зокрема, відсутність автоматизації на технологічній стадії ізолювання та обмежені обсяги електричних параметрів, що контролюються, на технологічній стадії виготовлення.

Показано, що контроль стабільності технологічного процесу виготовлення електроізоляційних систем повинен базуватися на застосуванні статистичних характеристик.

Обґрунтовано застосування опору ізоляції у якості інтегрального параметру стабільності технологічного процесу виготовлення високовольтних електроізоляційних систем електричних машин.

Статистичне регулювання технологічного процесу базується на застосуванні методу контрольних карт й спрямоване на виявлення розладнання процесу у ході виробництва і запобігання появи дефектних високовольтних електроізоляційних систем.

На підставі аналізу контрольних карт індивідуальних значень опору ізоляції трьох варіантів корпусної ізоляції магнітної системи тягового електродвигуна постійного струму показано, що за всіма критеріями технологічний перебуває у статистично керованому стані.

Доведено, що контрольні карти кумулятивних сум є більш чутливими до варіабельності технологічного процесу при обмежених обсягах значень опору ізоляції високовольтних електроізоляційних систем.

Побудова і аналіз спеціальних графіків індивідуальних значень і кумулятивних сум опору ізоляції, розмаху, що ковзає,

дозволяють з'ясувати, чи знаходиться технологічний процес виготовлення електроізоляційних систем тягових електричних машин у статистично керованому стані.

Представлена процедура моніторингу може використовуватися для аналізу стабільності технологічних процесів виготовлення високовольтних електроізоляційних систем турбо- і гідрогенераторів.

ВИСНОВКИ

У монографії, на підставі аналітичного огляду літературних джерел, проведено ґрунтовний аналіз вимог до комплексу характеристик електричної ізоляції електричних машин високої напруги, сучасних термореактивних електроізоляційних систем, методів регулювання електричного поля у пазовій та лобовій частинах статорних обмоток електричних машин високої напруги.

Показано, що корпусна термореактивна композиційна ізоляція електричних машин високої напруги на основі просочених стрічок є найбільш навантаженим елементом, що потребує визначення впливу конструктивних та технологічних факторів на електричні характеристики високовольтної електроізоляційної системи на основі склослюдинітових стрічок.

Представлено методи поліпшення теплопровідних властивостей ізоляції на основі склослюдинітових стрічок для забезпечення комплексу енергетичних характеристик високовольтних електричних машин.

Визначено вплив електрофізичних характеристик та товщини діелектричного бар'єру на розподіл електричного поля у високовольтній композитній ізоляції електричних машин на підставі математичної моделі накопичення поверхневого заряду на плоскій границі розділу компонентів. Застосування слюдопаперового бар'єра з більшою діелектричною проникністю і більшою часткою вмісту в композитній стрічці, в порівнянні з підкладкою, забезпечує найбільш сприятливий розподіл електричного поля у компонентах композитної ізоляції.

Експериментально підтверджено, що композитна ізоляція на основі склослюдинітової стрічки з підвищеним вмістом слюдинітового бар'єру і склотканиною меншої товщини має на (8-16) % вищі значення короточасної електричної міцності. Застосування ізоляції на основі склослюдинітової стрічки

з підвищеним вмістом слюдинітового бар'єру потребує спеціального технологічного обладнання.

На підставі розробленої методики отримано розподіл електричного потенціалу по поверхні напівпровідного протикоронного покриття та ізоляції у залежності від значення питомого поверхневого опору покриття в лобовій частині стрижня високовольтної електричної машини, що узгоджується з експериментальними дослідженнями зразків стрижнів гідрогенератора.

Виконані експериментальні дослідження зразків стрижнів гідрогенератора на лінійну напругу 10,5 кВ доводять ефективність працездатності методики. Експериментально підтверджено стабільність нелінійних властивостей спеціально виготовлених зразків протикоронного покриття у процесі тривалого електричного і теплового старіння, а також зразків стрижнів гідрогенератора СВ -1500 / 110-116 у початковому стані і після комплексного впливу електричного поля напругою 26,25 кВ промислової частоти і температури 120 °С протягом 260 годин.

Показано, що технологічні дефекти всередині твердої композитної корпусної ізоляції обмотки статора, розвиток яких у експлуатації може привести до аварійних режимів роботи турбо- і гідрогенераторів, ефективно виявляються на підставі порівняння амплітуди імпульсів часткових розрядів позитивної і негативної полярності.

Теоретично та експериментально підтверджено доцільність застосування діелектричної спектроскопії для виявлення процесів зволоження та розшарування композитної ізоляції при недостатньої полімеризації корпусної термореактивної електроізоляційної системи на кінцевій технологічній стадії виготовлення електричних машин.

Встановлено наявність двох резонансних частот у звуковому діапазоні при моделюванні частотних залежностей електричної ємності та тангенсу кута діелектричних втрат електроізоляційної системи на основі схеми заміщення обмоток статора при з'єднанні «зіркою». Показано, що на верхній резонансній частоті тангенс кута діелектричних втрат всієї електроізоляційної системи обмоток змінюється в десятки-сотні разів, що дає можливість контролювати стан композитної ізоляції. Достовірність результатів чисельного розрахунку сукупних діелектричних параметрів корпусної електроізоляційної системи трьох фаз підтверджено експериментальними дослідженнями зразків високовольтного асинхронного двигуна.

Представлено моніторинг стабільності технологічного процесу виготовлення високовольтної електроізоляційної системи, що враховує технологічні особливості виготовлення та обмежені обсяги електричних параметрів, що контролюються.

Запропоновано опір ізоляції у якості інтегрального параметру стабільності технологічного процесу виготовлення та обґрунтовано методику моніторингу стабільності технологічного процесу виготовлення високовольтних електроізоляційних систем електричних машин, що базується на застосуванні контрольних карт кумулятивних сум.

Доведено, що контрольні карти кумулятивних сум є більш чутливими до варіабельності технологічного процесу виготовлення високовольтних електроізоляційних систем при обмежених обсягах значень опору ізоляції.

Показано, що побудова і аналіз спеціальних графіків індивідуальних значень і кумулятивних сум опору ізоляції, розмаху, що ковзає, дозволяють контролювати стабільність технологічного процесу виготовлення електроізоляційних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Vukosavic S. N. *Electrical Machines*. New York: Springer - Verlag, 2013. 650p. doi.org/10.1007/978 -1 -4614 -0400 -2
2. Puranik K.K. Important aspect of inter turn insulation in high voltage motors. *Res. J. Eng. Sci.* 2013. No 2. P. 15–18.
3. Rusu -Zagar C., Notingher P.V., Stancu C. Ageing and degradation of electrical machines insulation. *Materials, Methods and Technologies; Science Events Ltd.*: Burgas, Bulgaria, 2014; Volume 8.
4. Stone G.C., Boulter E.A., Culbert I., Dhirani H. *Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing and repair*. IEEE Press: John Wiley & Sons, 2004. 389 p. DOI:10.1002/047168290X.
5. Juvinall R. C., Marshek K. M. *Fundamentals of machine component design*. IEEE Press: John Wiley & Sons, 2006. vol. 83.
6. Barré O., Napame B. The insulation for machines having a high lifespan expectancy, design, tests and acceptance criteria issues. *MDPI:Machines*. 2017. Vol. 5. No 7. DOI:10.3390/machines5010007
7. Grubenik W., Robert J., Korbler B. A new approach in insulation systems for rotating machines. *EIC EME Conference*. Werndorf. Austria. 2006.
8. Dal Mult G., Oldrati A., Zuninow F. New insulation systems for upgrading large turbogenerator driven by gas and steam turbines. *Proceedings of 16th International Conference DISEE*. 2001. P. 97–100.
9. Электроизоляционные материалы и системы изоляции для электрических машин. В двух книгах. Кн. 2 / В.Г. Огоньков и др.; под. ред. В.Г. Огонькова, С.В. Серебренникова. Москва: Издательский дом МЭИ, 2012. 304 с.

10. Пак В. М., Трубачев С. Г. Новые материалы и системы изоляции высоковольтных электрических машин. Москва: Энергоатомиздат, 2007. 416 с.

11. Устенко А.В., Пасько О.В. Тенденции развития тяговых двигателей подвижного состава. *Електротехніка і електромеханіка*. 2013. №1. С. 65-68.

12. Kolpakchyan P.G., Shaikhiev A.R., Kochin A.E., Perfiliev K.S., Otyuka Jan, Sukhanov A.V. The Determination of the Asynchronous Traction Motor Characteristics of Locomotive. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. 2017. Vol. 15, No. 2. P. 130-135.

13. Яцько С.И., Карпенко В.В., Василенко Д.Ю. Исследования устойчивости систем изоляции тяговых электрических машин к воздействию климатических факторов. *Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук, 2010. № 4. С. 134-140.

14. Shanel M. Electrical insulation options for hybrid and electric vehicle applications in passenger vehicles, buses and trucks. DuPont, Technical Report, 2016, 63 p.

15. Kim H., Kong T., Lee S.B, Kang T.-J, Oh N, Kim Y., Park S., Stone G.C. Experience with stator insulation testing and turn/phase insulation failures in the power generation industry. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2018. Vol. 54. No. 3. P. 2225 - 2236. DOI: 10.1109/DEMPED.2017.8062329.

16. Tavner P., Ran L., Penman J., Sedding H. Condition monitoring of rotating electrical machines. Institution of Engineering and Technology: 2nd Revised edition, 2008. 304p.

17. Baranski M., Decner A., Polak A. Selected diagnostic methods of electrical machines insulation operating in industrial

conditions. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2014. No 5. Pp. 2047 -2054. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2014.004602>.

18. Титко А.И., Васьковський Ю.Н. Научные основы, методы и средства диагностики асинхронных двигателей. Київ, Ін-т електродинаміки НАН України, 2015. 300 с.

19. Бернштейн Л. М. Изоляция электрических машин общего назначения. Ленинград: Энергия, 1981. 180с.

20. Ваксер Н.М. Изоляция электрических машин. Ленинград: издательство ЛПИ, 1985. 85 с.

21. IEC 60034-18-1:2010 Rotating electrical machines. Part 18 - 1: Functional evaluation of insulation systems. General guidelines, 2010, 33 p.

22. Danikas M.G., Sarathi R. Electrical machine insulation: Traditional insulating material, nanocomposite polymers and the question of electrical trees. *Funktechnikplus J.* 2014. Vol. 1. P. 7-32.

23. Федоренко Г.М., Колесник Г.А. Высоквольтная система изоляции с повышенной теплопроводностью для турбогенераторов. *Праці інституту електродинаміки НАН України*. 2010. № 25. С. 38-41.

24. Gröpper P., Hildinger T., Pohlmann F., Weidner J.R. Nanotechnology in high voltage insulation systems for large electrical machinery – First results. *Proceedings of the CIGRE Session 2012*, Paris, France, 26 -31 August, 2012. 15 p.

25. Liu Y., Nguyen H., Bazzi A. M., Cao Y. Torque enhancement and re-rating of medium-voltage induction machines using nanostructured stator winding insulation. *2017 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)*. 2017. P. 232-237. DOI:10.1109/ESTS.2017.8069286.

26. Hildinger T., Weidner J. R. Progress in development of a nanocomposite stator winding insulation system for improved

generator performance. *2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*. 2017. P. 139 -142. DOI: 10.1109/EIC.2017.8004655.

27. Brithinee W., Winkeler M., Tuckwell S. Impact of nanoparticles on primary and secondary motor insulation in stators. *2016 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*. 2016. P. 596-600.

28. VonRoll ISOLA. Electrical Insulation Material. Resin-Rich Insulation Systems for high voltage rotating machines . V.R.I. 2003.- 27 p.

29. V. Roll. Mica products for electrical insulation, Von Roll, Tech. Rep. URL: www.vonroll.com

30. Andraschek N., Wanner A.J., Ebner C., Riess G. Mica/Epoxy - composites in the electrical industry: applications, composites for insulation, and investigations on failure mechanisms for prospective optimizations. *MDPI: Polymers*. 2016. 8. 201. DOI: [10.3390/polym8050201](https://doi.org/10.3390/polym8050201).

31. Manufacturing high temperature mica product. Available online: <https://micasheets.wordpress.com/2015/09/30/mica-tape-electrical-insulation/> (accessed on 17 February 2017).

32. Stone G. C. Condition monitoring and diagnostics of motor and stator windings. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2013. Vol. 20, No 6. P. 2073-2080. DOI: 10.1109/TDEI.2013.6678855.

33. Hakayma A. Development of global vacuum pressure impregnation insulation system for turbine generators. *Proc. World Geometrical Congress 2000*. Kyushu-Tohoku. P. 3253-3257. DOI:10.1109/ISEIM.1998.741853.

34. Cozonac D., Lecointe J. -P., Duchesne S., Velu G. Materials characterization and geometry of a high temperature induction machine. *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. 2014. P. 2499–2505. DOI: 10.1109/ICELMACH.2014.6960538.

35. Smith J.B.D., Emery F.T. Enhanced dielectric strength mica tape. Siemens Westinghouse Power. U.S. Patent 6,190,775 B1, 20 February 2001.

36. Stone G.C., Maughan C.V., Nelson D., Schultz R.P. Impact of slot discharges and vibration sparking on stator winding life in large generators. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2008. Vol. 24. P. 14-21. <https://doi.org/10.1109/MEI.2008.4635657>.

37. Vogelsang R., Weiers T., Fröhlich K., Brütsch R. Electrical breakdown in high -voltage winding insulation of different manufacturing qualities. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2006. Vol. 22. P. 5-12. <https://doi.org/10.1109/MEI.2006.1639024>.

38. Okamoto T., Yoshiyuki I., Kawahara M., Yamada T., Nakamura S. Development of potential grading layer for high voltage rotating machine. *IEEE International Symposium on electrical insulation*. Indianapolis, USA, 19 -22 September, 2004. P. 210-215. DOI: 10.1109/ELINSL.2004.1380524.

39. Staubach G., Schmidt F., Pohlmann H. Investigation of ideal anisotropic material properties for outer corona protection systems in large rotating machines. *2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*. 2018. P. 365 -368. <http://dx.doi.org/10.1109/EIC.2018.8481019>.

40. Khazanov A., Gegenava A., Dawson F. Considerations for maximum operational stresses in electrical insulation for high voltage machines stator windings for different rated voltages. *2020 IEEE Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference* (Knoxville, TN, USA, USA/ 22 June -3 July 2020). DOI: <https://doi.org/10.1109/EIC47619.2020.9158692>.

41. Конохов Н.Н. Особенности концентрации напряженности электрического поля в обмотках электрических машин и ее

влияние на надежность. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2006. №2. С. 32-36.

42. Андреев А.М., Андреев И.А., Белько В.О., Резник А.С., Смирнов А.Н., Степанов А.А. Моделирование электроразрядных процессов для оптимизации коронозащитной системы изоляции высоковольтных машин. *Problemele energeticii regionale*. 2020. 2 (46). С.33-42. DOI: 10.5281/zenodo.3898227.

43. Таджибаев А. И. Анализ влияния неравномерности электрического поля на повышение разрядной активности в изоляции генераторов. *International Journal "NDT Days"*. 2019. Vol. 2. Issue 5. P. 549-543.

44. Маламуд Р. Е., Багaley Ю. В. Новая противокоронная эмаль. *Электротехническая промышленность*. 1963. № 7. С. 11-15.

45. Маламуд Р. Е., Багaley Ю. В. Исследование закономерностей получения нелинейных свойств полупроводящих эмалей на основе порошков карбида кремния. *Электричество*. 1976. № 9. С. 63-66.

46. Гегенава А.Г. Свойства противокоронного покрытия статорных обмоток электрических машин высокого напряжения. *Электричество*. 2002. № 9. С. 64-66.

47. Кокцинская Е.М., Ваксер Б.Д., Гегенава А.Г., Полонский Ю.А. Разработка покрытия ленточного типа для предотвращения краевых разрядов в изоляции электрических машин высокого напряжения. *Электротехника*. 2005. №3. С. 22-25.

48. Кокцинская Е.М., Ваксер Б.Д., Полонский Ю.А. Выбор наполнителя для нелинейных противокоронных лент, используемых в электрических машинах высокого напряжения. *Электротехника*. 2007. №3. С. 13-18.

49. Мильх В.И. Система автоматизированного формирования расчетных моделей электрических машин для программной среды FEEM. *Технічна електродинаміка*. 2018. №4. С. 74-78. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.074>.

50. Мильх В. И., Полякова Н. В. Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей. *Електротехніка і електромеханіка*. 2006. № 2. С. 40-46.

51. Ковеня В.М., Чирков Д.В. Методы конечных разностей и конечных объемов для решения задач математической физики: учебное пособие / Новосибирск, Новосибирский государственный университет, 2013. 86 с.

52. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. Москва, Главная редакция физико-математической литературы, 1967. 778 с.

53. Михайлов В.М. Исходные соотношения и приближенные граничные условия для расчета поля в системах с тонкими слоями. *Електричество*. 2007. №3. С. 49-55.

54. Набока Б.Г. Расчеты электростатических полей в электроизоляционной технике: учебное пособие для студентов электроэнергетических специальностей / Київ, ИСДО, 1995. 120 с.

55. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Ленинград: Энергия, 1979. 224 с.

56. Maughan C. Partial discharge - a valuable stator winding evaluation tool. *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. 2006. P. 388-391.

57. Farahani M. Partial discharge and dissipation factor behavior of model insulating systems for high voltage rotating machines under different stresses. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2005. Vol. 21. P. 5-20.

58. Han X., Li J., Zhang L., Pang P., Shen S. A Novel PD Detection Technique for Use in GIS Based on a Combination of UHF and Optical Sensors. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2018. Vol. 99. P. 1–8. DOI: 10.1109/TIM.2018.2867892.

59. Беспрозванных А. В. Сильное электрическое поле и частичные разряды в многожильных кабелях. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 1. С. 23-29.

60. Беспрозванных А. В., Кессаев А. Г., Мирчук И. А., Рогинский А. В. Выявление технологических дефектов в высоковольтной твердой изоляции электроизоляционных конструкций по характеристикам частичных разрядов. *Електротехніка і електромеханіка*. 2019. № 4. С. 53-58. DOI: <http://dx.doi.org/10.20998/2074-272X.2019.4.08>.

61. Техніка і електрофізика високих напруг: монографія/ ред. В. О. Бржезицький, В. М. Михайлов. Харків: НТУ «ХПІ», Торнадо, 2005. 930 с.

62. Беспрозванных А.В., Рогинский А.В. Эффективность применения полупроводящих покрытий для регулирования электрического поля в высоковольтной изоляции электрических машин. *Електротехніка і електромеханіка*. 2019. № 6. С. 44-50. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.6.06>.

63. Litinsky A., Schmidt G., Pohlmann F., Hirsch H. Ageing of corona protection material on rotating machines. *2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*. 2017. P. 356-359. DOI: <https://doi.org/10.1109/EIC.2017.8004679>

64. Хиппель А.Р. Диэлектрики и волны. Москва: Издательство иностранной литературы, 1960. 439 с.

65. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. Москва: Энергия, 1973. 328 с.

66. Борисова М. Э., Койков С. Н. Физика диэлектриков: учебное пособие / Ленинград: Изд -во Ленингр. ун -та, 1979. 240 с.

67. Поплавко Ю. М. Физика диэлектриков: учебное пособие для вузов/ Киев: Вища школа, 1980. 400 с.

68. Сканава Г. И. Физика диэлектриков, область слабых полей. Москва, Ленинград: ГИТТЛ, 1949. 500 с.

69. Сканава Г. И. Физика диэлектриков, область сильных полей. Москва: ГИФМЛ, 1958. 907 с.

70. Беспрозванных А.В., Бойко А.Н., Рогинский А.В. Влияние диэлектрического барьера на распределение электрического поля в высоковольтной изоляции электрических машин. *Електротехніка і електромеханіка*. 2018. № 6. С. 63-65. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.6.09>.

71. Ребиндер П.А. О влиянии изменений поверхностной энергии на спайность, твердость и другие свойства кристаллов. *Съезд русских физиков. Перечень докладов, представленных на съезд, с кратким их содержанием*. Москва–Ленинград: ГИЗ, 1928. 29 с.

72. Гиббс Дж.В. Термодинамика. Статистическая механика. Москва: Наука, 1982. 584 с.

73. Беспрозванных А.В., Бойко А.Н. Распределение плотности поверхностных зарядов на границе раздела контактирующих изолированных проводников. *Технічна електродинаміка*. 2014. №6. С. 18-23.

74. Рогинський О.В. Вплив товщини склослюдопаперових стрічок на електричні параметри високовольтної термореактивної ізоляції обмоток статора. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доп. XXVII міжнар. наук. -практ. конф. MicroCAD–2019, у 4 ч. Ч. II, (м. Харків, 15–17 травня 2019 р.)*. Харків, 2019. С. 167.

75. Nindra B.S., Khazanov A. Semi -conducting corona suppression system for high voltage windings. *Iris Rotating Machine Conference*. San Antonio, TX, 2002. P. 1-8.

76. Набока Б.Г., Беспрозванных А.В. Методические указания к решению задач оптимизации конструкций высоковольтных изоляционных промежутков по курсу «Расчет и конструирование изоляции». Харків, 1988. 30 с.

77. Рогинський О.В. Напівпровідні покриття як фактор підвищення ефективності регулювання електричного поля в статорній обмотці високовольтної електричної машини. *Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем: зб. наук. праць III міжнар. наук. -практ. конф. ЕЕЕС -2019 (м. Харків, 12-15 листоп. 2019 р.)*. Харків, 2019. С. 139.

78. Самородов Ю.Н. Турбогенераторы: Аварии и инциденты. Техническое пособие. Москва: ЭЛЕКС -КМ, 2008. 35 с.

79. Kimura K., Kaneda Y. The role of microscopic defects in multistress aging of micaceous insulation. *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.* 1995. Vol. 2. P. 426 -432. DOI: 10.1109/94.395419.

80. Puranik K.K. Important aspect of inter turn insulation in high voltage motors. *Research Journal of Engineering Sciences*. 2013. Vol. 2. P.15-18.

81. IEC 60060 -1:2010 High -voltage test techniques. Part 1: General definitions and test requirements, 2010. 149 p.

82. IEEE Guide for testing turn insulation of form -wound stator coils for alternating -current electric machines. IEEE Std 522, 2004. 18 p.

83. IEC 60034-18-1:2010. Rotating electrical machines. Part 18-1: Functional evaluation of insulation systems. General guidelines, 2010. 33 p.

84. IEEE Standards 43-2013. Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery. IEEE Press. 2013. 37p.

85. Grubic S., Aller J. M., Lu B., Habetler T. G. A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low - voltage induction machines focusing on turn insulation problems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008. Vol. 12. P. 4127-4136. DOI: 10.1109/TIE.2008.2004665.

86. Pollak A. The use of DC current to testing condition of the insulation of electrical machines. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*. 2013. Vol. 1. P. 123-131.

87. Baranski M., Decner A., Polak A. Selected diagnostic methods of electrical machines insulation operating in industrial conditions. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical*. 2014. Vol. 5. P. 2047 -2054. DOI: 10.1109/TDEI.2014.004602.

88. Sasic M., Stone G.C. Experience with DC polarization - depolarization measurements on stator winding industry. *Proc. IEEE Electrical Insulation Conference. Ottawa, ON, Canada, June_2-5, 2013*. P. 7 -10. DOI: 10.1109/EIC.2013.6554191.

89. IEEE Standards 1434. Guide for the measurement of partial discharges in AC electric machinery. IEEE: Park Avenue, New York, USA. 2014. 89 p.

90. Rotating electrical machines - Part 18 -31: Functional evaluation of insulation systems: Test procedures for form -wound windings. Thermal evaluation and classification of insulation systems used in rotating machines. Std. IEC 60 034 -18 -31, 2012.

91. Jones D. O., Jowett J. R., Thomson S.G., Danner D. S. A Guide to diagnostic insulation testing above 1kV. Second Edition: Megger, 2002. 47 p.

92. Койков С. Н., Цикин А. Н. Электрическое старение твердых диэлектриков и надежность диэлектрических деталей. Ленинград: Энергия, 1968. 186 с.

93. Бартенев Г. М., Френкель С. Я. Физика полимеров. Ленинград: Химия. 1990. 432 с.

94. CIGRE Working Group A1.01.06 Application. Of on-line partial discharge tests to rotating machines. CIGRE. December 2010. 58 p.

95. Iris Power TGA -BTM. Periodic On-line Partial Discharge Monitoring Using a Portable Instrument for Motors and High Speed Turbine Generators. Iris Power Ver 5. 08/10. Canada, 2010.

96. Interpretation of PD results—on-line testing. Version 3.2 Iris QMS 08/10. Ver. 3.2. 2008.

97. Комментарии к применению тестирования On -line Partial Discharge (PD, тестирование частичного разряда в рабочем режиме) для изоляции вращающихся высоковольтных машин: Из-во: HVPD Ltd. 2009. 17 с.

98. IEC Standard 60270, High -voltage test techniques - Partial discharge measurements, IEC, 2000. 55 p.

99. Беспрозванных А. В., Лактионов С. В. Повышение чувствительности высоковольтной системы диагностики силовых кабелей по характеристикам частичных разрядов с помощью фильтров низких частот. *Электротехніка і електромеханіка*. 2012. № 6. С. 37-40.

100. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. Новосибирск: Наука, 2007. 55 с.

101. Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Гладченко В.Я. Методика измерения дифференциальных амплитудных спектров импульсов частичных разрядов. *Электричество*. 1990. №1. С. 71-74.

102. Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Гладченко В.Я. Диагностика высоковольтной изоляции с помощью многоканальных анализаторов. *Электричество*. 1991. № 5. С. 5-9.

103. Naboka B.G., Besprozvannyh A.V., Gladchenko V.Y. High - voltage insulation diagnostics using multichannel analyzers. *JPRS - UEE -92 -001. Science & Technology. Central Eurasia: Electronics & Electrical Engineering*. 1992. 5 p.

104. Беспрозванных А.В. Способы представления дифференциальных амплитудных спектров импульсов частичных разрядов в твердой изоляции. *Технічна електродинаміка*. 2011. № 4. С. 12-19.

105. Беспрозванных, А. Г., Кессаев А.Г. Анализ структуры поля и обоснование напряжений диагностики по частичным разрядам изоляции экранированных витых пар. *Електротехніка і електромеханіка*. 2014. № 6. С. 61-65. DOI: 10.20998/2074 - 272X.2014.6.11.

106. Renforth L. A new technique for the remote partial discharge monitoring of the stator insulation of high -voltage motors located in "Ex"(hazardous) locations. *Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC). 2012 Record of Conference Papers Industry Applications Society 59th Annual IEEE. IEEE, 2012. pp. 1-10. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/PCICON.2012.6549674>.*

107. Warren V.G. Partial discharge testing: a progress report Stator winding insulation thermal class, Iris Power, 2015.

108. Farahani M., Borsi H., Gockenbach E. Study of capacitance and dissipation factor tip -up to evaluate the condition of insulating systems for high voltage rotating machines. *Electrical Engineering*. 2007. Vol. 89, No 4. P. 263-270.

109. Farahani M., Borsi H., Gockenbach E. Dielectric response studies on insulating system of high voltage rotating machines. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2006. Vol. 13, No. 2. P. 383–393. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TDEI.2006.1624283>.

110. Younsi K., Neti P., Shah M., Zhou J.Y., Krahn J., Weeber K., Whitfield C.D. On -line capacitance and dissipation factor monitoring of AC stator insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2010. Vol. 17, No 5. P. 1441-1452. DOI: doi.org/10.1109/TDEI.2010.5595545.

111. Zaengl W. S. Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for hv power equipment. I Theoretical considerations. *IEEE Electrical Insulation Magazine*., 2003. Vol. 19, no. 5. P. 5–19. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2003.1238713>.

112. Беспрозванных А. В. Диэлектрическое сканирование поперечной структуры многожильных кабелей методом совокупных измерений. *Технічна електродинаміка*. 2008. № 3. С. 30-36.

113. Gavrilă Doina Elena Dielectric Spectroscopy, a Modern Method for Microstructural Characterization of Materials. *Journal of Materials Science and Engineering*. 2014. A4, №1. P. 18-26.

114. Беспрозванных А.В. Кессаев А. Г., Щерба М. А. Частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от степени увлажнения полиэтиленовой изоляции кабелей. *Технічна електродинаміка*. 2016. 3. С. 18-24. DOI: [10.15407/techned2016.03.018](https://doi.org/10.15407/techned2016.03.018).

115. Беспрозванных А.В., Рогинский А.В. Диэлектрическая спектроскопия корпусной термореактивной композитной электроизоляционной системы асинхронных тяговых электрических машин. *Електротехніка і електромеханіка*. 2018. № 1. С. 17-20. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.1.02>.

116. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г. Влияние паразитных емкостей на результаты измерений параметров многожильных кабелей при оценке их технического состояния. *Электричество*. 2011. №5. С. 27-36.

117. Беспрозванных А. В., Костюков И.А., Рогинский А.В. Характеристики корпусной электроизоляционной системы асинхронных электрических машин на резонансной частоте. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 4. С. 48-55. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.04.048>.

118. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г. Математические модели и методы расчета электроизоляционных конструкций: Навчальний посібник. Харків: НТУ "ХПІ", 2012. 108 с.

119. Смирнов В. П., Лексаков В. В., Шарапов Д. В., Кармаданов Е. Г. Износ изоляции тяговых электрических машин. *Наука и техника транспорта*. 2012. № 4. С. 62-64.

120. Рогинский О.В. Сучасні просочувальні компаунди з підвищеним класом нагрівостійкості для тягових електричних машин. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доп. XXVI міжнар. наук. -практ. конф. MicroCAD–2018, у 4 ч. Ч. II (м. Харків, 16–18 травня 2018 р.)*. Харків, 2018. С. 167.

121. Рогинський О.В., Беспрозванных Г.В. Підвищення надійності тягових електродвигунів за рахунок сучасних систем електричної ізоляції. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доп. XXVI міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2018, у 4 ч. Ч. II (м. Харків, 17–19 травня 2017 р.)*. Харків, 2017. С. 237.

122. Хартман К., Лецкий Э., Шефер В. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. Москва: Мир, 1977. 552 с.

123. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия. Applied Regression Analysis. 3-е изд. М.: Диалектика, 2007. 912 с.

124. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.

125. Халафян А. А. Промышленная статистика. Контроль качества, анализ процессов, планирование экспериментов в пакете STATISTICA. Москва: Либрокком, 2013. 384 с.

126. Woodall W.H. Controversies and contradictions in statistical process control. *Journal of Quality Technology*. 2000. Vol. 32. P. 341-378.

127. Беспрозванных А. В., Рогинский А. В. Мониторинг стабильности технологического процесса изготовления электроизоляционных систем тяговых электрических машин. *Электротехника і електромеханіка*. 2017. № 6. С. 65-68. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.10>.

128. Шишкин Б. В. Контрольные карты. *Международный журнал экспериментального образования*. 2016. № 6 -1. С. 129-130.

129. ДСТУ EN 60034 -1:2016 Машини електричні обертові. Частина 1. Номінальні і робочі характеристики. Введений 01.11.2017.

130. Беспрозванных А. В., Москвитин Е.С. Число двойных перегибов как индикатор степени старения кабельных бумаг. *Электротехника і електромеханіка*. 2011 . № 3. С. 62-66.

131. Eckes G. Six Sigma Team Dynamics: The Elusive Key to Project Success. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003. 262 p.

132. Шухарт У.А. Экономический контроль качества произведенного продукта. Нью-Йорк: Вэн Ноустренд К., 1931. 50 с.

133. ISO 7870 -4:2011, Cumulative sum charts - Guidance on quality control and data analysis using CUSUM techniques.
134. Page E.S. Continuous inspection schemes. *Biometrika*. 1954. Vol. 41. P. 100 -115. DOI: <https://doi.org/10.2307/2333009>.
135. Харт Х. Введение в измерительную технику. – М.: Мир, 1999. – 391 с.
136. ДСТУ ISO 10012 Системи управління вимірюваннями. Вимоги до процесів вимірювань та засобів вимірювальної техніки.
137. ДСТУ ISO/TR 10017:2005 Настанови щодо застосування статистичних методів згідно з ДСТУ ISO 9001:2001.
138. Гольцман Ф.М. Физический эксперимент и статистические выводы: Учебное пособие. – Ленинград: Изд-во Ленингр. Университета, 1982. 192 с.
139. Дьяконов В. П. Matlab 6/6.1/6.5+Simulink 4/5® Основы применения. Полное руководство пользователя. Москва: СОЛОН-Пресс, 2004. 767 с.

Наукове видання

БЕЗПРОЗВАННИХ Ганна Вікторівна

РОГИНСЬКИЙ Олександр Володимирович

**КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ
ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКОВОЛЬТНОЇ
КОМПОЗИТНОЇ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ
ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН**

Монографія

Укр. мовою

В авторській редакції

Відповідальний за випуск зав. каф. Кессаєв О. Г.
Роботу до видання рекомендував Міліх В. І.
Тех. редактор Гобельовська Л. П.

План 2022 р., поз. 2

Підп. до друку 18.01.23 р. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.
Друк цифровий. Гарнітура шкільна. Ум. друк. арк. 8,67.
Наклад 100 прим. Зам. № 004. Ціна договірна.

Матеріали надано: Видавничим центром НТУ «ХПІ».
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

Видавець та виготовлювач ТОВ «Друкарня «Мадрид»
61024, м. Харків, вул. Гуданова, 18. Тел.: 0800-33-67-62

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

Серія ДК №4399 від 27.08.12 р.

www.madrid.i.ua

info@madrid.in.ua