

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСОВУВАННЯ СИНТЕТИЧНИХ АЛМАЗІВ У ПОЛІУРЕТАНОВИХ КОМПОЗИЦІЯХ ДЛЯ РОЗРОБКИ НОВОЇ ВИСОКОТЕПЛОПРОВІДНОЇ СИСТЕМИ ІЗОЛЯЦІЇ ПОТУЖНИХ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ

Розглянуто та проаналізовано компоненти сучасної ізоляції високовольтних електричних машин. Обґрунтовано доцільність підвищення теплопровідних властивостей системи ізоляції обмоток статора потужних турбогенераторів. Наведено та проаналізовано основні способи поліпшення теплопередачі в системі ізоляції статорної обмотки турбогенератора. Розглянуто перспективи використання композитного матеріалу на основі поліуретану з домішками синтетичних алмазів для розробки нової системи високотеплопровідної ізоляції потужних електричних машин. Описано технологію, за якою було створено дослідний зразок ізоляційного матеріалу із застосуванням алмазного порошку в поліуретановій композиції. Проведено лабораторні дослідження електрофізичних параметрів зразка розробленого ізоляційного матеріалу, які показали перспективність цього напрямку вдосконалення ізоляції.

Ключові слова: ізоляція, теплопередача, коефіцієнт теплопровідності, модифіковані поліуретани, алмазний наповнювач.

На сучасному етапі розвитку світової енергетики існує великий попит на підвищення ефективності експлуатації високовольтних електричних машин з урахуванням загальних та експлуатаційних затрат, терміну експлуатації, навантажувальної здатності та потужності. Причини цього очевидні, а саме: підвищення попиту на електроенергію, збільшення вартості сировини та підвищення витрат на обслуговування. У світовій електроенергетиці в останні десятиліття спостерігається тенденція до виробництва потужних турбогенераторів із повітряним і водневим охолодженням. Зростання потужності електротехнічного обладнання обмежується гранично допустимим струмом навантаження. При цьому тепло, яке генерується у провідниках, відводиться у навколишнє середовище через корпусну ізоляцію, яка, в даному випадку, є тепловим бар'єром.

У сучасному електромашинобудуванні і апаратобудуванні широко застосовують різноманітні ізоляційні матеріали. Усі вони відрізняються один від одного електричними, механічними і хімічними властивостями. Окрім відповідності загальним вимогам міжнародних стандартів (наприклад, ІЕС216), кожен окремий компонент ізоляції повинен перевірятися для того типу навантаження, який він нестиме, з урахуванням нових явищ, що виникають при підвищеній температурі. Разом з такими найважливішими електричними характеристиками електроізоляційних матеріалів як електрична міцність, питомий електричний опір, діелектрична проникність і значення діелектричних втрат найважливішою характеристикою є теплопровідність.

Сучасна пазова ізоляція потужних турбогенераторів має відносно низьку питому теплопровідність. Значення коефіцієнта теплопровідності ізоляції знаходяться в інтервалі 0,25 - 0,30 Вт/(м·К), тоді як міді і сталі вони перевищують їх у 1500 і 300 разів відповідно [1]. У результаті низька теплопровідність ізоляції обмежує ефективність системи охолодження і, як наслідок, припустиму питому потужність і ККД устаткування. Необхідність підвищення потужності електротехнічного устаткування обумовила необхідність створення систем ізоляції з поліпшеними теплопровідними властивостями.

Існує декілька основних способів поліпшення теплопередачі в системі ізоляції статорної обмотки турбогенератора: зменшення товщини корпусної ізоляції; збільшення допустимої робочої температури корпусної ізоляції; підвищення коефіцієнта теплопровідності корпусної ізоляції. Перший спосіб вимагає істотного збільшення досягнутого рівня тривалої електричної міцності корпусної ізоляції, що в осяжному майбутньому практично неможливо через оптимальний (з точки зору вмісту слюди) склад сучасних слюдопластових стрічок. Подальше підвищення робочої напруженості та пов'язане з цим потоншення ізоляції може привести разом із проблемами електричного старіння до істотного зниження механічних характеристик корпусної ізоляції та ускладнення проблеми нанесення протикоронного покриття, що неминуче негативно позначиться при монтажі обмоток. Для реалізації другого способу підвищення теплопередачі необхідне застосування ізоляційних матеріалів із більш високим класом нагрівостійкості, що супроводжується певними складнощами. Турбогенератори проєктуються таким чином, що їхня система ізоляції відповідає класу нагрівостійкості F (155 °C), хоча

вони працюють у класі В (130 °С). Через цю давню традицію мати один тепловий клас у запасі генератори з підвищеним струмовим навантаженням повинні модернізуватися до теплового класу Н (180 °С) [5]. Шлях, пов'язаний із застосуванням корпусної ізоляції, що має підвищену теплопровідність, найбільш реалістичний.

До складу сучасної системи ізоляції високовольтних електричних машин входять: слюдяна стрічка (близько 65 %), компаунд (25 %), склотканини та інші допоміжні матеріали [4, 6, 7]. Ці матеріали хоч і мають відмінні електроізоляційні властивості, однак одночасно мають відносно низьку теплопровідність.

Для поліпшення теплопровідних властивостей скло- та слюдинітових або склотекстолітових підкладок, просочених смолою, вводять різні наповнювачі. Наповнювачами можуть бути оксиди, нітриди та карбіди металів, а також деякі неметалічні оксиди, нітрид і карбіди. Наприклад, оксид алюмінію, магнію, цирконію й інших металів, а також нітрид бору, нітрид алюмінію, нітриди інших металів, карбіди металів і алмази природного або синтетичного походження. Частиці наповнювача можуть бути різної фізичної форми і матеріалів, мати стехіометричні й нестехіометричні змішані оксиди, нітриди і карбіди. Конкретніші приклади: AlN, Al₂O₃, MgO, ZnO, BeO, BN, SiC, SiO, Si₃N₄ і SiO₂ зі змішаними стехіометричними й нестехіометричними комбінаціями [2, 3].

В якості сполучного або просочуючого матеріалу використовують різні органічні мономери та олігомери. Зокрема, для отримання сполучного може використовуватися продукт реакції епіхлоргідрину з двохатомним фенолом у співвідношенні 1-2 і більше молі епіхлоргідрину на 1 моль двохатомного фенолу. Реакція протікає в лужному середовищі при тривалому невеликому нагріві (50 °С), продукт взаємодії промивають для видалення солі і луку. Гліциділові похідні бісфенолів є біфункціональними по епоксидних групах і при затвердінні дозволяють отримувати сітчасті полімери з різною структурою і властивостями [8]. Інші гліциділові ефіри, що використовуються в електротехнічній промисловості, отримують шляхом взаємодії епіхлоргідрину з продуктами конденсації фенолів і формальдегіду. Також можуть використовуватися епоксидні похідні циклу аліфатичного ряду, що не є гліциділовими ефірами. Ще один тип епоксидних олігомерів, які придатні для застосування в електротехнічній промисловості, – епоксидовані полібутадієни [9]. Їхня перевага – можливість отримання на їхній основі еластичних полімерів. Окрім епоксидних полімерів застосовуються продукти затвердіння інших типів термореактивних смол, наприклад поліефірні, фенольні (фенолформальдегідні полімери, поліфенілені), ціаністі ефіри, поліаміди, силікони, різні вінілові похідні. Представляють інтерес епоксидні смоли з рідкокристалічною будовою. Вони забезпечують підвищену теплопровідність композицій у порівнянні з аморфними епоксидними полімерами. Широко використовуються композиції на основі складних поліефірів. Ця група полімерів синтезується шляхом взаємодії двохосновних карбонових кислот з двохатомними спиртами. Можливе використання трьохфункціональних мономерів, таких як гліцерин і лимонна кислота. Найчастіше використовують олігоефіри, що містять ненасичені карбонові кислоти, наприклад, малеїнову. При затвердінні ненасичених поліефірних смол в полімері утворюється просторова сітка поперечних хімічних зв'язків. Часто в ненасичені смоли вводять інші олігомери з кратними зв'язками, наприклад стирол. Другий етап полімеризації таких композицій може проходити при кімнатній температурі за участю ініціаторів (органічних пероксидів) [11]. Малеїновий ангідрид і фумарова кислота вносять в структуру початкового олігомеру подвійні зв'язки, здатні до поперечного зшивання. Структура полімеру може регулюватися зміною співвідношення ненасичених і жирних карбонових кислот. В якості гліколів у таких композиціях використовують етилгліколь, пропіленгліколь, діетиленгліколь та інші компоненти, що містять гідроксили. В якості реакційного розчинника, що входить в структуру полімеру на другому етапі затвердіння, використовують стирол, вінілтолуол, діалілілфталат, метилметакрилат. Інший тип поліефірів – насичені (так звані алкідні) смоли. Їх отримують із багатофункціональних спиртів і насичених карбонових кислот, у тому числі довголанцюгових [9].

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.

Основна мета оптимізації складу слюдопластових ізоляційних стрічок – створення композицій з максимальним відносним вмістом компонентів із найбільшим значенням коефіцієнта теплопровідності λ_i , відповідно, з мінімальним вмістом компонентів із найменшим значенням коефіцієнта теплопровідності λ . 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 коефіці-

ента теплопровідності усієї композиції і, відповідно, до поліпшення електричних характеристик корпусної ізоляції. Для виготовлення корпусної ізоляції стрижнів обмотки статора доцільно застосовувати нову технологію «Просочення під тиском у вакуумі». При цьому використовується тільки та кількість смоли, яка потрібна для просочення стрічки окремого стрижня. Оскільки стрижень інjektується смолою в закритій прес-формі, не потрібно додаткової смоли.

Концепція створення високотеплопровідної наповненої корпусної ізоляції полягає в застосуванні дрібнодисперсних діелектричних наповнювачів із високим значенням теплопровідності. Такий шлях був вибраний головним чином при створенні непросочених («сухих») стрічок, призначених для технології вакуумного нагнітального просочення. Застосування діелектричних наповнювачів мікронних розмірів призводить до зростання теплопровідності наповненої стрічки в порівнянні з ненаповненою у декілька разів.

Для підвищення теплопровідності просочуючих компаундів перспективним є застосування нових матеріалів та нанотехнологій. Наприклад, по цьому напрямку ведуться роботи у фірмі «Hitachi» (Японія). Компаунд створений методами нанотехнології із суміші мономерів 4,4'-дифеніл-дигліциділ-ефіру і 3,3',5,5' тетраметил-4,4' 'дифеніл-дигліциділ-ефіру. У результаті синтезу формується орієнтована молекулярна структура, що має об'ємні утворення («мезогрупи»), найбільш сприятливі для поширення теплового потоку, унаслідок чого значення коефіцієнта теплопровідності збільшується в 4-5 разів у порівнянні із звичайним епоксидним компаундом. Іншим способом підвищення теплопровідності просочуючих компаундів є додавання до складу дрібнодисперсних діелектричних наповнювачів, що характеризуються високою теплопровідністю. Проте введення в просочуючі компаунди порошкових добавок мікронних розмірів призводить до певних проблем, головним чином, технологічного характеру. Це, у свою чергу, призводить до практичної неможливості створення наповнених просочуючих лаків, призначених для виробництва заздалегідь просочених ізоляційних стрічок. Також для підвищення теплопровідності різних полімерних матеріалів окрім добавок мікронних розмірів можуть бути використані наномодифікуючі домішки (вуглецеві нанотрубки, нано- Al_2O_3 , нано- SiO_2 та ін.). Модифікація нанорозмірними домішками призводить до формування особливої надмолекулярної структури полімерів, яка змінює їхні фізико-хімічні та діелектричні властивості. Зокрема, відбувається збільшення теплопровідності та стійкості до дії поверхневих часткових розрядів. Проте питання впливу нанорозмірних часток на властивості електричної ізоляції до теперішнього часу не повністю вивчене і вимагає подальших досліджень.

При створенні сучасних систем ізоляції перспективним є використання модифікованого поліуретану. До поліуретанів відносяться високомолекулярні з'єднання, що містять значну кількість уретанових груп, незалежно від будови іншої частини молекул. Зазвичай ці полімери отримують при взаємодії поліізоціанатів із речовинами, що мають декілька гідроксильних груп, наприклад з гліколями. Такі речовини можуть містити й інші реакційно-здібні групи, зокрема аміни і карбоксильні. Тому в поліуретанах окрім уретанових груп можна виявити амідні, ефірні (прості і складні) групи, а також ароматичні та аліфатичні радикали. Ці полімери називають іноді «поліуретанами», іноді – «ізоціанатними полімерами» [10]. Поліуретанові матеріали характеризуються комплексом цінних експлуатаційних властивостей: високою міцністю, високим відносним подовженням, стійкістю до гідролітичної дії і стійкістю до дії деяких видів агресивних середовищ. Проте основним недоліком поліуретанових матеріалів є їхня низька стійкість до термічної деструкції, причому поліуретани є горючими полімерами. Тому підвищення стійкості поліуретанів до дії високих температур є актуальним завданням. Зниження впливу цього недоліку на працездатність полімерів у процесі їхньої експлуатації здійснюють за рахунок модифікації [8, 10].

Також для розробки нових систем високотеплопровідної ізоляції перспективним є використання синтетичних алмазів в якості матеріалу наповнювача.

Основні властивості алмазу: найвища серед мінералів твердість, найбільш висока теплопровідність серед всіх твердих тіл $900 - 2300 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, великі показник заломлення і дисперсія. Алмаз є діелектриком. Коефіцієнт теплопровідності синтетичних алмазів при звичайних температурах від 1250 до $1750 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, при наднизьких температурах до $17000 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ [12].

За технологією, розробленою спільно фахівцями Інституту проблем безпеки атомних електростанцій та Інституту надтвердих матеріалів НАН України, було виготовлено дослідний зразок ізоляційного матеріалу (діаметр 250 мм , товщина $9,51 \text{ мм}$, маса 835 г) для створення нової системи високотеплопровідної ізоляції (рис. 1).

Для виготовлення електроізоляційного композитного матеріалу був використаний уретановий олігомер на основі поліуретану. В якості наповнювача застосовувалися синтетичні алмази марки

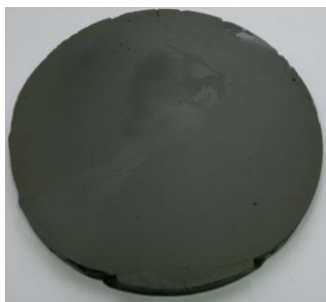


Рис. 1. Дослідний зразок ізоляційного матеріалу

АСМ 0,5/0 [12]. Необхідна кількість алмазу вводилася в розчин уретанового олігомеру у хлористому метилені (масова концентрація розчину 40 %). Маса алмазів становила 5 – 50 % від маси полімеру. Після видалення 50 % розчинника концентрований розчин, що утворився, був залитий у форму з антиадгезійним покриттям. Видалення залишку розчинника проводилося при температурі 40 °С і тиску 0,1 атм. Остаточне затвердіння матеріалу виконувалося при температурі 40 °С упродовж 12 год.

Грошова вартість синтетичних алмазів марки АСМ 0,5/0 (25 г), витрачених на зразок ізоляційного матеріалу, може варіюватися залежно від використаних матеріалів і процентної частки домішок у них.

У загальному випадку коефіцієнт теплопровідності матеріалу залежить від температури, тиску і роду речовини [14]. Для визначення коефіцієнта теплопровідності нових зразків потрібний експеримент. У більшості випадків він заснований на вимірюванні теплового потоку і градієнта температур у заданому зразку. Коефіцієнт теплопровідності при цьому визначається із співвідношення [14]

$$\lambda = \frac{|\bar{q}|}{|\text{grad } t|} \quad (1)$$

З рівняння (1) виходить, що коефіцієнт теплопровідності чисельно дорівнює кількості теплоти, яка проходить в одиницю часу через одиницю ізотермічної поверхні при температурному градієнті, рівному одиниці [14].

Експериментальні дослідження теплопровідності дослідного зразка проводилися із залученням фахівців Інституту технічної теплофізики НАН України на установці ИТ-7С, яка у 2010 р. пройшла модернізацію й переатестацію в «Українському державному науково-виробничому центрі стандартизації, метрології і сертифікації».

Вимірювання коефіцієнта теплопровідності дослідного зразка здійснювалося методом пластини. Метод полягає у створенні стаціонарної різниці температур між двома поверхнями зразка матеріалу (пластини), вимірюванні цієї різниці температур, щільності теплового потоку крізь зразок і товщину цього зразка та обчисленні коефіцієнта теплопровідності зразка за результатами вимірювань. Застосування цього методу нормується відповідно до [15].

Вимірювання коефіцієнта теплопровідності проводилися на робочому зразку в сухому стані в діапазоні значень температури від 20 до 140 °С. Оскільки впродовж 1-го циклу досліджень було виявлено наявність тепловиділення у зразку при значенні середньої температури зразка від 60 °С і вище (що свідчить про полімеризацію зв'язуючого полімеру – «старіння» зразка), був проведений повторний цикл досліджень у діапазоні значень середньої температури зразка від 20 до 140 °С вже за відсутності тепловиділення. Результати досліджень наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Результати досліджень теплопровідності дослідного зразка ізоляційного матеріалу

Середня температура зразка, °С	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)	
	1 цикл	Повторний цикл (після повної полімеризації)
19,8	0,414	0,461
39,5	0,428	0,466
59,3	0,432	0,471
79,0	0,437	0,472
98,9	0,450	0,475
118,7	0,457	0,474
138,5	0,467	0,467

З викладеного можна зробити висновок, що для стабілізації властивостей дослідного матеріалу перед використанням на об'єкті доцільно його піддавати повній полімеризації («старінню») – витримці при максимальному температурному навантаженні відповідно до технології виготовлення.

Для лабораторного визначення об'ємного опору, діелектричної проникності і тангенса кута діелектричних втрат дослідного зразка було застосовано схему, наведену на рис. 2. На плоскій поверхні зразка А з обох боків накладалися щільно прилеглі плоскі електроди. З одного боку був розміщений

круговий високовольтний електрод Б діаметром приблизно 100 мм, а з іншого боку – низьковольтний електрод В, оточений охоронним електродом Г. За допомогою такої системи електродів усередині зразка створювалося плоско-паралельне електричне поле. Дослідження проводилися при температурі 20 °С.

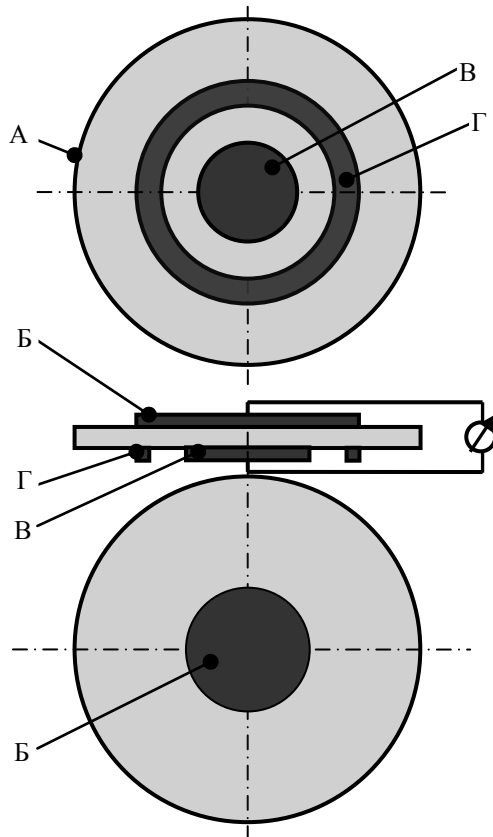


Рис. 2. Схема вимірювань електрофізичних параметрів дослідного зразка ізоляції: А – дослідний зразок високотеплопровідного матеріалу; Б – високовольтний електрод; В – низьковольтний електрод; Г – охоронний електрод.

«Вектор-2М»; високовольтна міра ємності (максимальна напруга 30 кВ, електрична ємність 51,3 пФ, тангенс кута діелектричних втрат менше 0,001 %). Під час досліджень напруга на зразку ступінчасто підвищувалася до 4900 В, а потім змінювалася у протилежному напрямку. Вимірювалися електрична ємність C між електродами Б і В і тангенс діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta$. За отриманою величиною C з урахуванням діаметра низьковольтного електрода В ($D_3 = 51,3$ мм) і товщини зразка ($d = 9,51$ мм) розраховувалося значення діелектричної проникності.

При розрахунках використовувалася формула ємності плоско-паралельного конденсатора з круговими електродами, низьковольтний електрод якого оточений охоронним електродом:

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S_3}{d}, \quad (4)$$

де ε – діелектрична проникність, яку необхідно визначити, відн. од.; $\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – діелектрична проникність вакууму.

Звідси отримуємо вираз для обчислення діелектричної проникності

$$\varepsilon = \frac{4Cd}{\varepsilon_0 \pi D_3^2}. \quad (5)$$

Отримані результати вимірювань і обрахунків наведено в табл. 2.

Проведені дослідження електрофізичних параметрів зразка розробленого ізоляційного матеріалу підтвердили їхню відповідність вимогам до ізоляції високовольтних електротехнічних пристроїв. Таким чином, створений ізоляційний матеріал відповідає вимогам електричної стійкості й має підвищені теплопровідні властивості.

Вимірювання об'ємного опору було виконано за допомогою мегометра шляхом подавання на електроди Б і В напруги 100, 500 і 1000 В. У всіх трьох випадках отримані значення опору зразка перевищували максимальні значення, що можуть бути визначені для даного пристрою (2000 МОм).

У загальному вигляді об'ємний опір для ділянки ізоляції постійного поперечного перетину S_3 завтовшки d (форма плоского конденсатора) визначається як

$$R_v = \rho_v \frac{d}{S_3}, \quad (2)$$

де ρ_v – питомий об'ємний опір, Ом·м; S_3 – площа поверхні низьковольтного електрода, м²; d – товщина зразка, м.

Звідки:

$$\rho_v = R_v \frac{S_3}{d}. \quad (3)$$

Таким чином, отримуємо орієнтовне значення питомого об'ємного опору дослідного зразка ізоляції $4,18 \cdot 10^8$ Ом·м.

Вимірювання діелектричних характеристик (діелектричної проникності ε і тангенса діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta$) дослідного зразка здійснювалося при змінній напрузі промислової частоти за прямою схемою. При цьому використовувалися: джерело високої напруги типу «АІД»; вимірювач діелектричних параметрів

Таблиця 2. Дані вимірювань та обчислень електрофізичних параметрів дослідного зразка

Напруга, В	Ємність, пФ	Діелектрична проникність, відн. од.	Тангенс кута діелектричних втрат, відн. од.
800	15,32	8,28	0,2083
2900	18,21	9,84	0,1390
4900	18,30	9,89	0,1439
4380	18,27	9,87	0,1431
2120	18,21	9,84	0,1393
900	18,17	9,82	0,1397

Висновки та рекомендації

1. В умовах сьогодення перед енергетикою існує проблема підвищення ефективності експлуатації високовольтних електричних машин з урахуванням загальних та експлуатаційних затрат, терміну експлуатації, навантажувальної здатності та потужності. Причини цього очевидні, а саме: підвищення попиту на електроенергію, збільшення вартості сировини та підвищення витрат на обслуговування. Зростання потужності електротехнічного обладнання обмежується гранично допустимим струмом навантаження. При цьому тепло, яке генерується у провідниках, відводиться в навколишнє середовище через корпусну ізоляцію, яка в даному випадку є тепловим бар'єром, що обмежує ефективність системи охолодження і тим самим обмежує вихідну потужність, навантажувальну здатність і ККД електротехнічного обладнання. Тому для підвищення потужності електротехнічного устаткування доцільно створення систем ізоляції з поліпшеними теплопровідними властивостями.

2. Сучасна пазова ізоляція потужних турбогенераторів має відносно низьку питому теплопровідність. Значення коефіцієнта теплопровідності ізоляції знаходяться в інтервалі 0,25 - 0,30 Вт/(м·К), тоді як міді і сталі вони перевищують їх у 1500 і 300 разів відповідно. Існує декілька основних способів поліпшення теплопередачі в системі ізоляції статорної обмотки турбогенератора: зменшення товщини корпусної ізоляції; збільшення допустимої робочої температури корпусної ізоляції; підвищення коефіцієнта теплопровідності корпусної ізоляції. Шлях, пов'язаний із застосуванням корпусної ізоляції, що має підвищену теплопровідність, найбільш реалістичний.

3. 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.

4. Для створення нових систем високотеплопровідної ізоляції було визначено перспективним використання композитного матеріалу на основі модифікованого поліуретану з домішками синтетичних алмазів.

5. Фахівцями Інституту проблем безпеки атомних електростанцій НАН України та Інституту надтвердих матеріалів НАН України було розроблено технологію, за якою було виготовлено дослідний зразок ізоляційного матеріалу для створення нової системи високотеплопровідної ізоляції високовольтних електричних машин. Для виготовлення дослідного зразка був використаний електроізоляційний композитний матеріал на основі поліуретану. В якості наповнювача застосовувалися синтетичні алмази марки АСМ 0,5/0.

6. Проведені дослідження електрофізичних параметрів зразка розробленого ізоляційного матеріалу підтвердили їхню відповідність вимогам до ізоляції високовольтних електротехнічних пристроїв. Були визначені параметри ізоляційного матеріалу: теплопровідність 0,46 - 0,48 Вт/(м·К), що у 2 - 2,5 раза перевищує теплопровідність сучасної високовольтної слюдяної ізоляції; питомий об'ємний опір понад $4 \cdot 10^8$ Ом·м; відносна діелектрична проникність на рівні 9,8 - 9,9; тангенс діелектричних втрат не вище 13 - 15 %. Таким чином, створений ізоляційний матеріал відповідає вимогам електричної стійкості й має підвищені теплопровідні властивості.

7. При застосуванні нової високотеплопровідної системи ізоляції обмотки статора турбогенераторів із непрямим повітряним або водневим охолодженням можливо досягнути підвищення потужності на 20 % за рахунок підвищення ефективності охолодження без змін.

8. Доцільно розробити програму науково-дослідних робіт по створенню нових інноваційних високотеплопровідних систем ізоляції турбогенераторів і гідрогенераторів, а також інших потужних електричних машин на основі нових композитних матеріалів із використанням різноманітних домішок.

9. Застосування нової системи високотеплопровідної ізоляції дозволить створювати енергетичні високовольтні електричні машини з підвищеними потужністю, ККД та коефіцієнтом використання встановленої потужності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Андреев А.М., Азизов А.Ш., Костельов А.М. Теплопроводность системы изоляции статорной обмотки мощных турбогенераторов с воздушным охлаждением // Электротехника. – 2009. – № 3. – С. 10 – 14.
2. Tari M., Yoshida K., Sekito S., Hatano H. Impacts on turbine generator design by the application of increased thermal conducting stator insulation // CIGRE Session. – 2002 August, Paper No. 11 – 105.
3. Tari M., Yoshida K., Sekito S. A High voltage insulating system with increased thermal conductivity for turbine generators // Conf. IEEE 2003. – P. 613 – 617.
4. Папков А.В., Мельниченко А.П., Пак В.М., Кушмов И.Е. Современные электроизоляционные материалы для систем изоляции вращающихся электрических машин // Электротехника. – 2009. – № 3. – С. 4 – 9.
5. Joho R., Baumgartner J., Hinkel T. Type-tested air-cooled turbo-generator in the 500 MVA range // CIGRE Session 2000, Paper No. 11 – 101.
6. Allison J., Brutsch R. Selection and Application of Insulating Materials // Their Importance in VPI Insulation for Rotating Machines, Coil Winding, Insulation & Electrical Manufacturing Conference in Berlin, 1998. – P. 137 – 144.
7. Пак В.М., Трубочёв С.Г. Новые материалы и системы изоляции высоковольтных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 416 с.
8. Зеленев Ю.В., Ивановский В.А., Шевелев А.Ю. и др. Управление свойствами полимерных систем при их физической модификации // Пластические массы. – 2000. – № 2. – С 41 – 44.
9. Агапов В.М., Салазкин С.Н., Сергеев В.А. и др. Синтез и структура полиариленафиркетон и полиариленафирсульфонов, содержащих металлы VI группы // Высокомолекулярные соединения. – 1992. – Сер А. – Т. 34, № 6. – С. 3 – 12.
10. Сафонов Г.П., Папков А.В., Воробьев П.В. Перспективные электроизоляционные материалы для систем изоляции электрических машин // Электротехника. – 2011. – № 4. – С. 23–26.
11. Новиков В.У., Козицкий Д.В. и др. Мультифрактальная параметризация деформированной структуры эпоксиполимеров // Материаловедение. – 2001. – № 11. – С. 2 – 10.
12. Новиков Н.В. Физические свойства алмаза: справочник. – К.: Наук. думка, 1987. – 188 с.
13. Федоренко Г.М., Колесник Г.А. Высоковольтная система изоляции с повышенной теплопроводностью для турбогенераторов // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2010. – Вип. 25. – С. 38 – 41.
14. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия. – 1975. – 488 с.
15. *Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. ДСТУ Б В.2.7-105-2000 (ГОСТ 7076-99).*

О. Г. Кенсицкий, А. В. Выговский, Д. И. Хвалин

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Лысогорская, 12, корп. 106, Киев, 03028, Украина

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ АЛМАЗОВ В ПОЛИУРЕТАНОВЫХ КОМПОЗИЦИЯХ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ НОВОЙ ВЫСОКОТЕПЛОПРОВОДНОЙ СИСТЕМЫ ИЗОЛЯЦИИ МОЩНЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

Рассмотрены и проанализированы компоненты современной изоляции высоковольтных электрических машин. Обоснована целесообразность повышения теплопроводных свойств системы изоляции обмоток статора мощных турбогенераторов. Приведены и проанализированы основные способы улучшения теплопередачи в системе изоляции статорной обмотки турбогенератора. Рассмотрены перспективы использования композитного материала на основе полиуретана с примесями синтетических алмазов для разработки новой системы высоко-теплопроводной изоляции мощных электрических машин. Описана технология, по которой был создан опытный образец изоляционного материала с применением алмазного порошка в полиуретановой композиции. Проведены лабораторные исследования электрофизических параметров образца разработанного изоляционного материала, которые показали перспективность этого направления совершенствования изоляции.

Ключевые слова: изоляция, теплопередача, коэффициент теплопроводности, модифицированные полиуретаны, алмазный наполнитель.

O. G. Kensytskyi, A. V. Vygovskiy, D. I. Khvalin

Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Lysogirska str., 12, building 106, Kyiv, 03028, Ukraine

PERSPECTIVES OF APPLICATION OF SYNTHETIC DIAMONDS IN POLYURETHANE COMPOSITIONS FOR DEVELOPMENT OF NEW HIGH THERMAL CONDUCTIVITY SYSTEM OF ISOLATION OF POWERFUL TURBOGENERATORS

Reviewed and analyzed components of modern high-voltage insulation of electrical machines. The expediency of increasing of heat-conducting properties of the system of isolation of stator winding of powerful turbogenerators is justified. The main ways of improving heat transfer in the insulation system the stator windings of the turbogenerators are presented and analyzed. Perspectives of application of composite material based on polyurethane with additives of synthetic diamonds for development of new high thermal conductivity system of isolation of powerful electrical machines are analyzed. The technology by which was created the prototype of the insulating material with the application of diamond powder in a polyurethane composition is described. Executed laboratory experimental researches of the electrophysical parameters of the sample developed insulating material. That showed the perspective of this direction of perfection of isolation.

Keywords: isolation, heat transfer, coefficient of thermal conductivity, modified polyurethanes, diamond filler.

REFERENCES

1. *Andreev A.M., Azizov A.S. Kostelyov A.M.* Thermal conductivity of the insulation system of the stator winding of powerful turbo generators with air cooling // *Elektrotechika*. – 2009. – № 3. – P. 10 – 14. (Rus)
2. *Tari M., Yoshida K., Sekito S., Hatano H.* Impacts on turbine generator design by the application of increased thermal conducting stator insulation // *CIGRE Session*. - 2002 August, Paper No. 11 – 105.
3. *Tari M., Yoshida K., Sekito S.* A High voltage insulating system with increased thermal conductivity for turbine generators // *Conf. IEEE 2003*. – P. 613 – 617.
4. *Papkov A.V., Mel'nichenko A.P., Pak V.M., Kuimov I.E.* Modern insulating materials for insulation systems for rotating electrical machines // *Elektrotechika*. – 2009. - № 3. – P. 4 – 9. (Rus)
5. *Joho R., Baumgartner J., Hinkel T.* Type-tested air-cooled turbo-generator in the 500 MVA range // *CIGRE Session*. – 2000, Paper No. 11 – 101.
6. *Allison J., Brutsch R.* Selection and application of insulating materials // *Their Importance in VPI Insulation for Rotating Machines, Coil Winding, Insulation & Electrical Manufacturing Conference in Berlin, 1998*. – P. 137 – 144.
7. *Pak V.M., Trubachjov S.G.* New materials and insulation systems of high voltage electrical machines. – Moskva: Energoatomsdat, 2007. – 416 p. (Rus)
8. *Zelenev U.V., Ivanjvskiy V.A., Shevelev A.U. et al.* Management by properties of polymeric systems at their physical modification // *Plasticheskiye massy*. – 2000. – № 2. – P. 41 – 44. (Rus)
9. *Ahapov V.M., Salazkin S.N., Sergeev V.A. et al.* Synthesis and structure polyaryleneetherketones and polyaryleneetherphenylenes that contain metals of group VI // *Vysokomolekulayrnye soedineniyai*. – 1992. – Ser. A. – T. 34, № 6. – P. 3 – 12. (Rus)
10. *Safonov G.P., Papkov A.V., Vorobyov P.V.* Perspective insulating materials for insulation systems of electrical machines // *Elektrotechika*. – 2011. – № 4. – P. 23 – 26. (Rus)
11. *Novikov V.U., Kozitskiy D.V. et al.* Multifractal parameterization of the deformed structure epoxy polymers // *Materialovedenie*. – 2001. - № 11. – P. 2 – 10. (Rus)
12. *Novikov N.V.* The physical properties of diamond. Reference book. – Kyiv: Naykova dumka. – 1987 – 188 p. (Rus)
13. *Fedorenko G. M., Kolesnic G.A.* High-voltage insulation system with high thermal conductivity for turbo generators // *Pratsi Instytutu elektrodunamiky NAN Ukrainy*. – 2010. – Iss. 25. – P. 38 – 41. (Rus)
14. *Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S.* *Teploperedacha*. – Moskva: Energija, 1975. – 488 p. (Rus)
15. *Materials and wares building. Method for determining thermal conductivity and thermal resistance at a stationary thermal mode.* DSTU B V.2.7-105-2000 (GOST 70076-99). (Rus)

Надійшла 13.03.2017
Received 13.03.2017