



**ФЕДОРЕНКО Г.М.**, докт. техн. наук,

Институт электродинамики НАН Украины, г. Киев

**ПАЩЕНКО Е.А.**, докт. техн. наук,

**САВЧЕНКО Д.А.**, инж.

Институт сверхтвёрдых материалов им. В.Н. Бакуля НАНУ, Киев

**КОСТЮЧЕНКО И.А.**, инж.,

Институт проблем безопасности АЭС НАНУ, Киев

## ВЫСОКОТЕПЛОПРОВОДНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК И ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

*Проведены эксперименты по определению теплопроводности новых изоляционных материалов с использованием модифицирующих добавок. Получен экспериментальный образец модифицирующей изоляции с повышенной теплопроводностью. Разработан способ получения модифицирующих диэлектрических добавок, существенно повышающий теплопроводность полимерных изоляционных материалов.*

**М**одернизации мощных энергетических электромашин, обеспечение особых требований к их надёжности и долговечности требуют создания и постоянного усовершенствования систем изоляции и технологий изготовления — современные высокотеплопроводные полимерные материалы, вакуумно-нагнетательная пропитка обмоток электрической машины.

Используемая изоляция в мощных турбогенераторах имеет относительно низкую удельную теплопроводность. Коэффициент теплопроводности изоляции "Изопролент — F"  $0,15-0,2$  Вт/(м·К) и "Micadur — compact industry" (МСИ) напряжением до 15 кВ температурного класса нагревостойкости F (155°C) составляет  $0,4-0,5$  Вт/(м·К). Необходимость создания мощных турбогенераторов потребовала разработки систем изоляции с улучшенными теплопередающими свойствами [3].

Система изоляции на базе "МСИ" в сочетании с вакуумно-нагнетательной пропиткой превышает теплопроводность изоляции "Изопролент — F" в 2 раза —  $\lambda = 0,45$  Вт/(м·К). В результате чего выходная мощность турбогенератора с непрямым воздушно/водородным охлаждением может быть увеличена на 10—15 % без каких-либо изменений в самой обмотке [1].

Улучшения свойств изоляции были достигнуты с течением времени. Сначала использовались для изоляции натуральные материалы, такие как: шёлк, шерсть, целлюлоза и лён вместе с натуральными лаками и нефтепродуктами. В результате оптимизации натуральные материалы были заменены на асбест, кварц и другие минералы [6].

Слюда использовалась в изоляции высоковольтных электрических машин, из-за её высоких

механических и электрических свойств.

Состав самой современной системы изоляции для высоковольтных электрических машин, состоит из слюды, связующих смол и подложки (стеклоткань, ПЭТ-пленка или полиэфирного волокна) [5].

Для улучшения теплопроводящих и электроизоляционных свойств, в стеклослюдитовые или стеклотекстолитовые подложки пропитанные смолой, вводят различные наполнители. Наполнителями могут быть: оксиды металлов, нитриды металлов и карбиды металлов, а также некоторые неметаллические оксиды, нитриды и карбиды. Например, оксид алюминия, магнезия, циркония, а также нитрид бора, нитрид алюминия и алмазы природного или синтетического происхождения [8]. Частицы наполнителя могут быть различной формы и состава, в том числе стехиометрические и нестехиометрические смешанные оксиды, нитриды и карбиды. Более конкретные примеры:  $AlN$ ,  $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $ZnO$ ,  $BeO$ ,  $BN$ ,  $SiC$ ,  $SiO$ ,  $Si_3N_4$  и  $SiO_2$  [2].

Целью создания высокотеплопроводной изоляции — это повышение коэффициента теплопроводности изоляции в 2—4 раза. Наиболее перспективным путем решения этой задачи представляется разработка композиционных материалов на основе полимерных связующих с высоким уровнем диэлектрических свойств, наполненных



**ФЕДОРЕНКО Г.М.**



**ПАЩЕНКО Е.А.**



**КОСТЮЧЕНКО И.А.**



**САВЧЕНКО Д.А.**



порошками модифицирующих добавок. Сочетание высокой теплопроводности модифицирующих добавок и связующего полимера потенциально способны обеспечить получение композиционного материала с необходимым сочетанием свойств [9].

Это возможно сделать путем нанесения модифицирующих добавок на пластины из полимерного материала в таких вариантах: *a* – на одну сторону пластины; *b* – между двумя пластинами; *в* – с двух сторон пластины, как показано на Рис. 1.

Полученная экспериментальным путём изоляция имеет настолько малую толщину – 0,3–0,4 мм, что для прибора ИТ-λ-400 измеряющего теплопроводность материала даёт большую погрешность.

В общем случае коэффициент теплопроводности материала зависит от температуры, давления и рода вещества. Определение коэффициента теплопроводности новых образцов определяется экспериментальным путём. Он основан на измерении теплового потока и градиента температур в заданном образце. Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  Вт/(м·К) определяется из соотношения:

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

Из уравнения (1) следует, что коэффициент теплопроводности численно равен количеству теплоты, которое проходит в единицу времени через единицу изотермической поверхности при температурном градиенте, равном единице [7].

Для ориентировочной оценки коэффициента теплопроводности образцов состоящих из *n* слоёв различных веществ можно воспользоваться эквивалентным тепловым сопротивлением:

$$R_{\Sigma} = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}, \quad (2)$$

Тогда эквивалентный коэффициент теплопроводности:

$$\lambda_{\Sigma} = \frac{\delta_{\Sigma}}{R_{\Sigma}}, \quad (3)$$

где  $\delta_{\Sigma}$  – суммарная толщина образца.

Приведены расчёты суммарного коэффициента теплопроводности образцов показанных на Рис. 1.

**A:**  $\lambda_1=0.32$  Вт/(м·°C);  $\lambda_2= 2000$  Вт/(м·°C);  $\delta_1= 0.3 \cdot 10^{-3}$  м;  $\delta_2= 0.5 \cdot 10^{-6}$  м;

$$R_1 = (\delta_1/\lambda_1) + (\delta_2/\lambda_2) = 9.375 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{м};$$

$$R_{\Sigma} = R_1 = 2.813 \cdot 10^{-3}$$

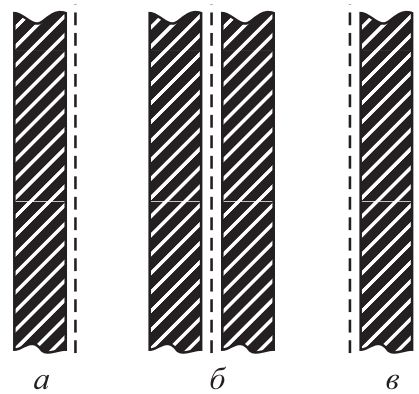


Рис. 1. Варианты нанесения наномодифицированных добавок композиции на подложку

$$\lambda_{\Sigma} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{R_{\Sigma}} = 0.321, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}),$$

**Б:**  $\lambda_1=0.32$  Вт/(м·°C);  $\lambda_2= 2000$  Вт/(м·°C);  $\delta_1= 0.3 \cdot 10^{-3}$  м;  $\delta_2= 0.5 \cdot 10^{-6}$  м;

$$R_1 = 2(\delta_1/\lambda_1) + (\delta_2/\lambda_2) = 1.875 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{м};$$

$$R_{\Sigma} = R_1 = 1.875 \cdot 10^{-3}$$

$$\lambda_{\Sigma} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{R_{\Sigma}} = 0.16, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}),$$

**В:**  $\lambda_1=0.32$  Вт/(м·°C);  $\lambda_2= 2000$  Вт/(м·°C);  $\delta_1= 0.3 \cdot 10^{-3}$  м;  $\delta_2= 0.5 \cdot 10^{-6}$  м;

$$R_1 = (\delta_1/\lambda_1) + 2(\delta_2/\lambda_2) = 9.375 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{м};$$

$$R_{\Sigma} = R_1 = 2.813 \cdot 10^{-3}$$

$$\lambda_{\Sigma} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{R_{\Sigma}} = 0.321, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}),$$

где  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности полимерного материала;  $\lambda_2$  – коэффициент теплопроводности модифицирующего порошка;  $\delta_1$  – толщина пластины полимерного материала;  $\delta_2$  – толщина слоя модифицирующего порошка;  $R_1$  – тепловое сопротивление материала;  $R_{\Sigma}$  – суммарное тепловое сопротивление;  $\lambda_{\Sigma}$  – суммарный коэффициент теплопроводности.

Были получены такие значения

A)  $\lambda_1 = 0,321$  Вт/(м·К);

Б)  $\lambda_2 = 0,16$  Вт/(м·К);

В)  $\lambda_3 = 0,321$  Вт/(м·К).

На данный момент разрабатывается изоляционный материал на основе полимеров, наполненных модифицирующими добавками с последующей полимеризацией.

Для проведения экспериментальных измерений теплопроводности требуется изготовить об-

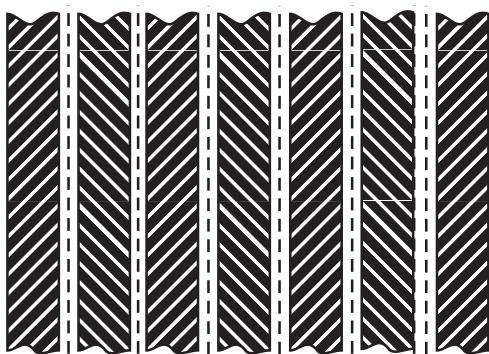


Рис. 2. Многослойная изоляция

разец диаметром 250 мм и толщиной 7 мм. Увеличение толщины изоляции необходима. Принимаем вариант: слоистый (совмещение нескольких слоев изоляционного материала с суммарной толщиной в 7 мм) набираем из слоёв в 0,3 мм толщиной, как показано на Рис. 2. Рассчитаем количество порошка модифицирующих добавок, которое пойдёт на образец данного типа:

$$n = 7/0,3 = 23,33,$$

где  $n$  — количество слоёв.

С учётом прессовки берём с запасом 24 слоя, на один слой приходится 0,031 г порошка модифицирующих добавок.

$$S_1 = 75 \text{ мм}^2; S_2 = 0.035 \text{ мм}^2;$$

$$\lambda_1 = 0.03 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C}); \lambda_2 = 2000 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C});$$

$$d_1 = 250 \text{ мм}; R_1 = 2 \cdot 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{м}; R_2 = 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

$$V = (S_1 \delta_1) + (S_2 \delta_1) = 1.876 \cdot 10^4;$$

$$\lambda_{\Sigma} = \left[ \frac{S_1 \lambda_1 d_1 + S_2 \lambda_2 d_1}{V} \right] = 0.963 \text{ ,Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

$$R_{\Sigma} = \left[ \frac{S_1 R_1 d_1 + S_2 R_2 d_1}{V} \right] = 1.999 \cdot 10^{10},$$

где  $S_1$  —

площадь сечения пластин изоляции из полиуретана;  $S_2$  — площадь сечения напыления из наномодифицированных добавок;  $\lambda_1$  — коэффициент теплопроводности сечения пластин изоляции из полиуретана;  $\lambda_2$  — коэффициент теплопроводности слоя наномодифицированных добавок;  $\lambda_{\Sigma}$  — коэффициент теплопроводности изоляции повышенной теплопроводности;  $V$  — полный объём изоляции в пазу;  $d_1$  — диаметр образца;  $R_1$  — удельное электрическое сопротивление пластин изоляции полиуретана;  $R_2$  — удельное электрическое сопротивление слоя модифицирующих добавок;  $R_{\Sigma}$  — удельное сопротивление изоляции повышенной теплопроводности;

Полученные значения теплопроводности но-

вых систем изоляции являются ориентировочными, так как при изменении структуры изоляционных материалов с применением модифицирующих добавок физические свойства композиционных материалов изменяются, и для определения таких параметров, как теплопроводность и удельная электрическая проводимость требуется проведение экспериментов.

В результате проведенных расчётов получена система изоляции с коэффициентом теплопроводности 0,963 Вт/(м·К), что в 1,93 раза превышает теплопроводность изоляции "МСІ". Разработанная система изоляции, в сравнении с изоляцией "Изопроленг-Ф", позволит увеличить коэффициент теплопроводности изоляции генераторов в 3 раза, что позволит повысить выходную мощность генераторов с косвенным охлаждением на 25–35 % [1].

#### Выводы.

1. Разработана компьютерная модель расчётов, которая позволит в перспективе оценить удельную теплопроводность нового типа изоляции стержней мощных турбогенераторов, гидрогенераторов и других энергетических электрических машин в 1,5 — 2,5 раза превышающих удельную теплопроводность "МСІ".

2. Компьютерные методы моделирования позволяют обосновывать и предлагать композитные оптимизированные составы высокотеплопроводной изоляции, включающие модифицирующие добавки, позволяющие повысить коэффициент теплопроводности изоляции 2 — 3 раза.

3. Проведены вычислительные эксперименты по определению теплопроводности новых экспериментальных систем изоляции с применением модифицирующих диэлектрических добавок. В результате было установлено, что при нанесённом слое толщиной в одну крупницу добавок модифицирующего порошка размером 0,5 микрон на поверхность полимера, получается суммарный коэффициент теплопроводности изоляции 0,321 Вт/(м·К). Для изоляции, состоящей из 24 слоёв с прослойками модифицирующих добавок, коэффициент теплопроводности составляет 0,963 Вт/(м·К). Тем самым представленные результаты показали целесообразность проведения дальнейших исследований в направлении создания композиционных материалов на базе



имеющихся изоляционных материалов с введением в их структуру модифицирующих добавок с применением различных полимерных материалов.

4. Все полученные и представленные результаты являются ориентировочными, так как при изменении структуры изоляционных материалов с применением модифицирующих добавок физические свойства композиционных материалов изменяются, и для определения таких параметров, как теплопроводность и удельная электрическая проводимость требуется проведение экспериментов.

7. Снижение рабочей температуры обмоток позволяет продлить ресурс изоляции, улучшить термомеханические условия их эксплуатации, повысить нагрузочную способность и маневренные возможности машины в целом [4].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шидловский А.К., Федоренко Г.М. Инновационно-технологические приоритеты модернизации в электроэнергетике // Электротехника. — 2004 — № 6. — С. 3–6.  
 2. Федоренко Г.М., Колесник Г.А. Высоковольтная система изоляции с повышенной теплопроводностью для турбогенераторов. // Праці ІЕД НАН України. — 2010. — Випуск 25, — С. 38–41.

нераторов. // Праці ІЕД НАН України. — 2010. — Випуск 25, — С. 38–41.

3. Андреев А.М., Азизов А.Ш., Костелёв А.М. Теплопроводность системы изоляции статорной обмотки мощных турбогенераторов с воздушным охлаждением // Электротехника. — 2009. — № 3. — С. 10 — 14.

4. Ващенко В.Е., Ковшиков И.Б., Фоменко А.А. Высоковольтная изоляция класса нагревостойкости "F" для обмоток мощных электрических машин // Новини енергетики", 2001. — № 9. — С. 10 — 13.

5. Tari M., Yoshida K., Sekito S. A High Voltage Insulating System with Increased Thermal Conductivity for Turbo Generators // Conf. IEEE 2003. P 613 — 617.

6. Stephan C.—E., Liptak G., Schuler R. An improved insulation system for the newest generation of stator windings of rotating machines. CIGRE Session 1994, Paper 11–101.

7. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. — М: Энергия, 1975. — 488 с.

8. Новиков Н.В. Физические свойства алмаза. Справочник. Киев: Наук.думка., 1987. — 188 с.

9. Брык М. Т., Баглей Н. Н., Смирнов Е. Н. и др. Исследование взаимодействия между олигомерами и поверхностью алмазных порошков, содержащих функциональные группы // Докл. АН СССР . — 1983. — 272, № 6. — С. 1399–1402.

© Федоренко Г.М., Пащенко Е.А., Костюченко И.А., Савченко Д.А., 2012

