

ISSN 0013-5860





ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ —  
КОЛЛЕКТИВНЫЙ ЧЛЕН АКАДЕМИИ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ НАУК РФ  
Издаётся с января 1930года

МЕДАЛЬ  
“ЗА ЗАСЛУГИ В  
ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ”



## УЧРЕДИТЕЛИ

ДЕПАРТАМЕНТ МАШИНОСТРОЕНИЯ МИНПРОМА РФ (г. МОСКВА)  
АО «ЭЛЕКТРОВЫПРЯМИТЕЛЬ» (г. САРАНСК)  
АООТ «ХОЛДИНГОВАЯ КОМПАНИЯ «ЭЛЕКТРОЗАВОД» (г. МОСКВА)  
АО «ЭЛЕКТРОНИКА» (г. ВОРОНЕЖ)  
АО «ВЭЛНИИ» (г. НОВОЧЕРКАССК)  
АССОЦИАЦИЯ ИНЖЕНЕРОВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ (г. МОСКВА)  
АССОЦИАЦИЯ «АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД» (г. МОСКВА)  
НТА «ПРОГРЕССЭЛЕКТРО» (г. МОСКВА)  
АО «РОСЭЛЛПРОМ» (г. МОСКВА)

## СОВЕТ УЧРЕДИТЕЛЕЙ

ЧИБИРКИН В.В., МАКАРЕВИЧ Л.В., МЕЩЕРЯКОВ В.М., СОРИН Л.Н.,  
КОВАЛЕВ Ф.И. (председатель совета), ЮНЬКОВ М.Г., ПОДАРУЕВ А.И., ГЛОВАЦКИЙ А.В.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор **КОЧЕТКОВ В.Д.**

АНОШИН О.А., БЕЛКИН Г.С., БРЯНЦЕВ А.М., ДАЦКОВСКИЙ Л.Х., ДОЛКАРТ В.М., ЕВСЕЕВ Ю.А., ИНЬКОВ Ю.М.,  
КОЗЯРУК А.Е., КОПЫЛОВ И.П., ЛУРЬЕ А.И., МАВЛЯНБЕКОВ Ю.У., МОСКАЛЕНКО В.В., НИКУЛИН А.А.,  
РОЗАНОВ Ю.К., СЛЕЖАНОВСКИЙ О.В. (зам. главного редактора), ТРУБАЧЕВ С.Г., ТУБИС Я.Б.,  
ФИНКЕЛЬ Э.Э., ФЛОРЕНЦЕВ С.Н.

Содержание журнала можно бесплатно получить в INTERNET через службу ИНФОМАГ, организованную в Московском физико-техническом институте.  
Адрес сайта: <http://www.infomag.ru>

Подписаться на журнал можно в почтовых отделениях связи по объединённому каталогу Департамента почтовой связи. Подписной индекс — 71111.

В редакции можно подписаться на журнал с любого месяца и приобрести отдельные номера за прошлые и нынешний годы.

Журнал переводится на английский язык в полном объёме и выходит в США в издательстве "ALLERTON PRESS, INC" (18 West 27th Street New York N.Y. 10001).

При перепечатке ссылка на журнал «Электротехника» обязательна.  
Мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов статей.  
За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несёт.  
Рукописи статей не возвращаются.

**Издатель: ЗАО "Знак" 101000, Москва, Главпочтamt, а/я 648.**

**Адрес редакции: 111250, Москва, Красноказарменная ул., 12. Телефон/факс: (095) 361-95-96**  
**E-mail [elektrotehnika@mtu-net.ru](mailto:elektrotehnika@mtu-net.ru)**

Редактор отдела О.В. Кунавина.  
Научный редактор Л.А. Романова.  
Редактор З.П. Фёдорова

Сдано в набор 02.02.2005. Подписано в печать 01.03.2005. Формат 60×88 1/8  
Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Печ.л.8. Заказ 113.

Цена свободная. Тираж 1000 экз. Зарегистрирован Комитетом РФ по печати, регистрационный №01330.

Макет выполнен и отпечатан в ОАО «Электропривод»

Вологодская, 107078, Москва, ул. Садовая, Спасская, 1/2, стр. Библиотека

[www.booksite.ru](http://www.booksite.ru)

© «Электротехника», 2005 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

<b>Азизов А.Ш., Костельев А.М., Андреев А.М., Папков А.В., Пак В.М.</b> Влияние химического состава пропитанных сплюсодержащих лент на электрические характеристики корпусной изоляции высоковольтных электрических машин .....	2
<b>Березинец Н.И., Украинский Ю.М., Захаров В.И., Омельченко В.П.</b> Некоторые направления совершенствования систем изоляции тяговых электрических машин .....	6
<b>Левин С.М., Лавкин Н.Е., Ножевникова Т. Е., Казакова Н.Ю.</b> Высоконагревостойкие системы изоляции тяговых электродвигателей для электроподвижного состава .....	10
<b>Ваксер Б.Д., Пищулина О.П.</b> О стандартизации испытаний на электрическое старение высоковольтной статорной изоляции.....	14
<b>Ваксер Н.М., Зволинская А.Ю., Лаврентьева М.Ю., Сажин Б.И., Старовойтенков В.В.</b> Использование дилектрометрии для оценки технологических характеристик термореактивных компаундов .....	16
<b>Кокцинская Е.М., Ваксер Б.Д., Гегенава А.Г., Полонский Ю.А.</b> Разработка покрытия ленточного типа для предотвращения краевых разрядов в изоляции электрических машин высокого напряжения .....	22
<b>Борисова М.А., Галюков О.В., Полонский Ю.А., Цацынкин П.В.</b> Изменение проводимости полимерной плёнки в структуре многослойной изоляции электрических машин в процессе её изготовления .....	26
<b>Масляков С.А., Полонский Ю.А.</b> Компьютерный расчёт диэлектрической проницаемости материалов при измерениях волноводным методом в диапазоне СВЧ .....	30
<b>Папков А.В., Мельниченко А.П., Пак В.М., Куимов И.Е.</b> Новые электроизоляционные материалы для систем изоляции турбо-, гидрогенераторов и тяговых двигателей .....	34
<b>Фёдорова С.С., Драчёв А.И., Гильман А.Б., Пак В.М.</b> Влияние тонкого слоя, нанесённого методом ионно-плазменного осаждения из паров циклогексана, на электрическую прочность плёнки ПЭТФ .....	41
<b>Петров В.В., Погодина Ж.П., Пишулина О.П., Гусева Е.А.</b> Система изоляции Элмикатерм для статорных обмоток турбо- и гидрогенераторов ....	47
<b>Драчёв А.И., Пак В.М.</b> Короностойкий диэлектрический материал на основе полиимидной плёнки .....	52
<b>Хаймович Л.Л.</b> Компактная сборка лобовых частей обмотки статора турбогенераторов с изоляцией Resin Rich .....	55
<b>Глинка Т.Я., Якубец М.С.</b> Классификация степени старения изоляции обмоток электрических машин ..	60
<b>НАШИ ЮБИЛЯРЫ</b>	
<b>Виктор Миронович Нейман</b> .....	65

## CONTENTS

### INSULATING MATERIAL

<b>Azizov A.Sh., Kosteljov A.M., Andreev A.M., Papkov V.A., Pak V.M.</b> Influence of chemical structure of mica tape on electrical properties of high-voltage groundwall insulation of electrical machines .....	2
<b>Berezinets N.I., Ukrainsky Yu.M., Zakharov V.I., Omelchenko V.P.</b> Some directions of developing the insulation systems for traction electric motors .....	6
<b>Levin S.M., Lavkin N.E., Nozhevnikova T.E., Kazakova N.Y.</b> High heat resistant insulation systems of traction electric motors for electric rolling stock .....	10
<b>Vakser B.D., Pishculina O.P.</b> Optimization of voltage endurance test condition .....	14
<b>Vakser B.D., Zvolinskaya A.Yu., Lavrenteva M.Yu. Sajin B.I., Starovoitenkov V.V.</b> Use of dielectrometry for the estimation of technological characteristics of thermoreactive compounds .....	16
<b>Koktsinskaya E.M., Vakser B.D., Gegenava A.G., Polonsky Yu.A.</b> Developing of tape layer for prevention of edge discharges in insulation of high voltage electrical machines .....	22
<b>Borisova M.E., Galjukov V.O., Polonsky Yu.A., Tsatsynkin P.V.</b> Change of conductivity of the polymeric film in structure of multilayered isolation of electric machines during its manufacturing .....	26
<b>Maslyakov S.A., Polonsky Yu.A.</b> Computerized calculation of dielectric permittivity of materials using waveguide method at microwave .....	30
<b>Papkov A.V., Melnitchenko A.P., Pak V.M., Kuimov I.E.</b> New electrical insulating materials for the insulation systems of turbo-, hydrogenerators and traction electric motors .....	34
<b>Fedorova S.S., Drachev A.I., Gilman A.B., Pak V.M.</b> The influence of the thin coating obtained by the ionic - plasma deposition from cyclohexane vapours on the electric strength of PET film .....	41
<b>Petrov V.V., Pogodina Zh.P., Pishchulina O.P., Guseva E.A.</b> Insulation system Elmikaterm for stator winding of turbogenerators and hydrogenerators ..	47
<b>Drachyov A.I., Pak V.M.</b> Koronostoykiy dielectric material on base polyimide film .....	52
<b>Haymovich L.L.</b> Compact assembly of frontal parts of a winding stator turbogenerators with isolation Resin Rich .....	55
<b>Glinka T., Jakubiec M.</b> Classification of electrical machines wings' insulation degree of wear .....	60
<b>OUR YUBILYARY</b>	
<b>Victor Mironovich Neyman</b> .....	65

# **ИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

## **Влияние химического состава пропитанных слюдосодержащих лент на электрические характеристики корпусной изоляции высоковольтных электрических машин**

**АЗИЗОВ А.Ш., КОСТЕЛЬОВ А.М., АНДРЕЕВ А.М., ПАПКОВ А.В., ПАК В.М.**

Изучены эксплуатационные свойства статорной изоляции электрических машин на основе слюдосодержащей ленты с повышенным содержанием слюды (Элмикатерм 55409 производства ОАО "Холдинговая компания Элинар"). Произведена оценка длительной электрической прочности макетов при плавном повышении испытательной напряженности с различной скоростью. Определён показатель степени  $m$  "кривой жизни" изоляции на основе различных вариантов лент Элмикатерм 55409. Проведено сравнение электрических характеристик изоляции, изготовленной из различных типов слюдосодержащих лент. Установлено влияние химического состава лент на электрические характеристики корпусной изоляции электрических машин.

Произошедшее за последние годы в мировой практике усовершенствование пропитанных слюдосодержащих лент (с использованием пропиточных лаков на основе эпоксиноволачной смолы и слюдобумаг новой структуры с поверхностной плотностью более  $100 \text{ г/м}^2$ ) позволили существенно повысить эксплуатационные параметры статорной изоляции высоковольтных электрических машин. Снизилась толщина изоляции и, соответственно, улучшились ее тепло-передающие свойства, повысилась средняя напряженность электрического поля, достигнув значений  $2,8\text{--}3,0 \text{ кВ/мм}$  [1]. Вместе с тем, в ряде случаев при использовании таких лент возникает необходимость изготовления статорной изоляции с низким значением диэлектрических потерь при рабочей температуре. Одним из эффективных способов регулирования электрических характеристик статорной изоляции, наряду с усовершенствованием технологии изготовления, является оптимизация состава и структуры пропитанных слюдосодержащих лент. Ленты представляют собой сложный композиционный материал, состоящий из череду-

*Performance attributes of mica-resin groundwall insulation of electrical machines on a basis mica tape (Elmicaterm 55409 manufactures ELINAR company) are investigated. The estimation of long-term electric strength of model samples was presented with use a progressive stress test. The value of an exponent  $m$  for a "life curve" of groundwall insulation from mica tape Elmicaterm 55409 is determined. Comparison of electric characteristics of groundwall insulation the made of various types of mica tapes is carried out. Influence of chemical structure of mica tape on electrical properties of groundwall insulation is obtained.*

ющихся слоёв армирующей стеклоткани и слюдобыумаги, где в качестве связующего используются эпоксидные лаки. Использование исходных компонентов с различной структурой и свойствами (слюдобумаги с повышенными поверхностной плотностью и пропитываемостью, тонкой стеклоткани с повышенной прочностью на разрыв, пропитывающих лаков различного химического состава) позволяет целенаправленно изменять свойства слюдосодержащих лент.

В качестве объектов для исследования использовались предварительно пропитанные ленты Элмикатерм 55409 (базовый вариант и опытные образцы с изменённым структурным составом, по сравнению с базовым). В ленте Элмикатерм 55409, производимой ОАО "Холдинговая компания Элинар", используются модифицированное эпоксиноволачное связующее и слюдяная бумага с поверхностной плотностью  $85\text{--}120 \text{ г/м}^2$ , обеспечивающие содержание слюды в готовой изоляции до 45–55%, что соответствует техническому уровню аналогичной продукции ведущих зарубежных фирм.

**Технические характеристики базового варианта**

ленты Элмикатерм 55409 по  
ТУ 3492-013-00214639-2004

Толщина ленты, мм .....  $0,14 \pm 0,02$

Поверхностная плотность,  $\text{г}/\text{м}^2$ :

ленты .....  $195 \pm 25$

бумаги .....  $85 \pm 4$

стеклоткани .....  $38 \pm 4$

связующего вещества .....  $72 \pm 10$

Летучие вещества, %, не более ..... 1,5

Удельная разрушающая нагрузка на  
растяжение,  $\text{Н}/\text{см}$  ..... 150

Пробивное напряжение, кВ, не менее ..... 3,5

$\text{tg}\delta$ , не более ..... 0,02

Текущесть, не менее ..... 40

Класс нагревостойкости в системе изоляции ..... F

Опытные образцы отличаются от базового варианта ленты Элмикатерм 55409 только составом пропиточного лака – пониженным содержанием пластифицирующих добавок по сравнению с базовым вариантом (табл.1).

Испытания проводились с использованием макетов и статорных стержней гидрогенераторов. Макеты представляли собой медные шины размером  $6 \times 30 \times 800$  мм, изолированные исследованными лентами под расчётную толщину изоляции 2 мм на сторону. Гидростатическая опрессовка макетов в битумном автоклаве проводилась по штатному режиму изготовления реальных стержней в течение 6 ч при температуре  $160 \pm 5^\circ\text{C}$ . Для проведения испытаний на изоляцию макетов наносились измери-

тельные (графитовые) электроды длиной 200 мм, снажённые охранными кольцами при измерении  $\text{tg}\delta$ , и противокоронные (карборундовые) покрытия. Измерение  $\text{tg}\delta$  проводилось на частоте 50 Гц в интервале испытательной напряженности 1–5 кВ/мм в температурном диапазоне от 20 до  $155^\circ\text{C}$ . Оценка длительной электрической прочности изоляции проводилась путём статистической обработки данных по наработке до отказа макетов в среде изоляционного масла при плавном повышении испытательной напряжённости с разными скоростями ( $\dot{E}$ ). Объём выборки при испытаниях составлял не менее 10 шт. (для макетов) и не менее 2–3 шт. (для реальных стержней).

Для всех исследованных макетов увеличение испытательной напряжённости электрического поля от 1 до 5 кВ/мм практически не влияет на значение  $\text{tg}\delta$  изоляции во всём исследованном температурном диапазоне. Это свидетельствует о монолитности изоляции, изготовленной по технологии элмикатерм, что также подтверждается результатами контроля этой изоляции по характеристикам ЧР [2]. С ростом испытательной температуры наблюдается увеличение  $\text{tg}\delta$ , причём для базового варианта предварительно пропитанной ленты Элмикатерм 55409 этот рост наиболее выражен, что, по всей видимости, обусловливается более высокой сегментальной подвижностью компонентов данного материала при повышенных температурах по сравнению с другими исследованными образцами. На рис.1 приведены гра-

Таблица 1

Состав пропиточного лака исследованных  
лент Элмикатерм 55409

Тип ленты	Содержание компонентов лака, об. %		
	Эпоксидная новолачная смола	Катали- затор	Пласти- фикатор
Базовый вариант (образец №1)	82–83	1–2	15–16
Опытный вариант (образец №2)	89–90	1–2	9–10
Опытный вариант (образец №3)	98–99	1–2	0

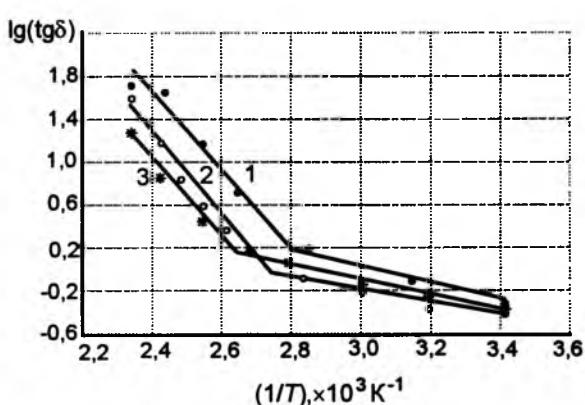


Рис.1. Зависимости  $\lg(\text{tg}\delta) = F(1/T)$  для изоляции макетов, изготовленной из предварительно пропитанных лент Элмикатерм 55409 при испытательной напряжённости 1 кВ/мм:

1 – образец №1; 2 – образец №2; 3 – образец №3

Таблица 2

**Значения температуры стеклования и энергии активации диэлектрических потерь для изоляции макетов, изготовленной из пропитанных лент Элмикатерм 55409**

Тип ленты	$T_c$ , °C	$W_{1\text{tg}\delta}$ , кДж/моль	$W_{2\text{tg}\delta}$ , кДж/моль	$\text{tg}\delta_{155^\circ\text{C}}$ , %
Образец №1	90±2	12,0±2,1	78,7±2,2	50,1±0,4
Образец №2	93±3	15,5±1,1	60,5±1,4	38,6±0,2
Образец №3	102±4	14,5±0,8	50,4±3,3	18,5±0,3

Таблица 3

**Значения температуры стеклования и энергии активации диэлектрических потерь для изоляции стержней, изготовленной из пропитанных лент Элмикатерм 55409**

Тип ленты	$T_c$ , °C	$W_{1\text{tg}\delta}$ , кДж/моль	$W_{2\text{tg}\delta}$ , кДж/моль	$\text{tg}\delta_{155^\circ\text{C}}$ , %
Образец №2	90±2	22,5±1,7	57,3±3,0	23,5±0,7
Образец №3	91±1	21,8±2,2	43,8±2,1	11,3±0,2

Таблица 4

**Оценки параметров распределений Вейбулла для  $E_{\text{пр}}$  изоляции макетов, изготовленной из лент Элмикатерм 55409**

Тип ленты	$\dot{E}$ , кВ/(мм·ч)	Параметр	
		$E_{\text{пр}63\%}$ , кВ/мм	$\beta$
Образец №1	0,470	25,62 (25,13 – 26,23)*	21,34 (14,67 – 27,10)
	0,120	23,06 (23,23 – 23,84)	25,76 (21,88 – 32,48)
Образец №3	0,470	24,37 (20,03–27,38)	31,66 (28,76–35,25)
	0,120	21,75 (21,03 – 22,16)	28,76 (18,75 – 34,25)

\* В скобках указаны доверительные границы параметров  $E_{\text{пр}63\%}$  и  $\beta$  (при  $\alpha = 0,9$ )

фики зависимостей  $\lg(\text{tg}\delta) = F(1/T)$  для изоляции макетов, изготовленной из всех вариантов пропитанной ленты Элмикатерм 55409 (табл.2). Как видно из рис.1, для всех образцов зависимости  $\lg(\text{tg}\delta) = F(1/T)$  в исследованном диапазоне температур 20–155°C могут быть представлены в виде двух отрезков прямых линий, характеризующихся разным углом наклона к оси абсцисс. По-видимому, это объясняется тем, что в разных температурных зонах на диэлектрические потери в слюдосодержащей изоляции влияют различные физические явления, происходящие за счёт изменения температуры. В низкотемпературной зоне это, главным образом, межслоевая поляризация, а в высокотемпературной – дипольно-релаксационная поляризация и ионная проводимость. Следовательно, для исследуемых макетных образцов выполняется экспоненциальное соотношение:

$$\begin{aligned} \text{tg}\delta &= A_{1\text{tg}\delta} \exp \left[ \frac{W_{1\text{tg}\delta}}{k} \left( \frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_1} \right) \right] + \\ &+ A_{2\text{tg}\delta} \exp \left[ \frac{W_{2\text{tg}\delta}}{k} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_c} \right) \right], \end{aligned}$$

где  $A_{1,2\text{tg}\delta}$  – предэкспоненциальные множители, соответствующие значениям  $\text{tg}\delta$  при температурах  $T_c$  и  $T_2 = 428$  K;  $T_c$  – температура стеклования, соответствующая точке перегиба графика  $\lg(\text{tg}\delta) = F(1/T)$ ;  $W_{1\text{tg}\delta}$  и  $W_{2\text{tg}\delta}$  – энергии активации процессов, определяющих диэлектрические потери исследуемой изоляции в низкотемпературной и высокотемпературной зонах (табл.2).

Как следует из приведенных данных, различия между базовым и опытными вариантами лент Элмикатерм 55409 проявляются в основном в высокотемпературной зоне, значения энергии активации диэлектрических потерь для низкотемпературной зоны  $W_{1\text{tg}\delta}$  отличаются незначительно. Изоляция, изготовленная из базового варианта исследуемой ленты, характеризуется максимальными значениями  $\text{tg}\delta$  во всём температурном диапазоне. Снижение концентрации пластифицирующих добавок в составе пропитывающего лака приводит к уменьшению  $\text{tg}\delta$  и энергии активации  $W_{2\text{tg}\delta}$  в высокотемпературной области и к повышению температуры стеклования. Минимальные значения  $\text{tg}\delta$  наблюдаются для макетов, изготовленных из лент Элмикатерм 55409 (образец №3), ха-

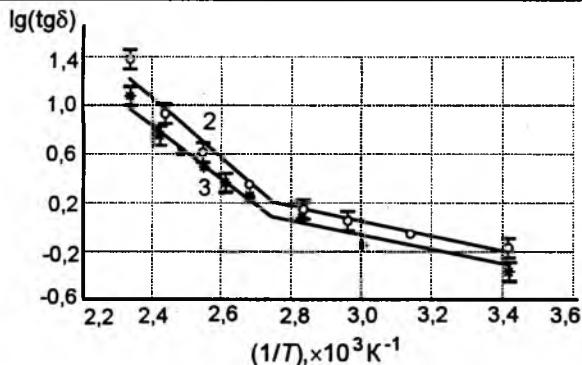


Рис.2. Зависимости  $\lg(\tan\delta) = F(1/T)$  для изоляции статорных стержней, изготовленной из предварительно пропитанных лент Элмикатерм 55409 при испытательной напряжённости 1 кВ/мм:

2 – образец №2; 3 – образец №3

рактеризующихся полным отсутствием пластификатора.

Результаты измерений  $\tan\delta$  изоляции макетов подтверждаются испытаниями корпусной изоляции реальных стержней (рис.2, табл.3). Минимальное значение  $\tan\delta$  при температуре 155°C и максимальная температура стеклования были зафиксированы для корпусной изоляции, изготовленной из непластифицированных лент (образец №3), увеличение содержания пластифицирующих добавок в пропиточном лаке приводит к росту диэлектрических потерь корпусной изоляции. Наблюдаемые различия в значениях  $\tan\delta_{155^\circ\text{C}}$  и  $W_{1\tan\delta}$ ,  $W_{2\tan\delta}$  для идентичной изоляции макетов и стержней (табл.3 и 4) очевидно обусловлены технологическими аспектами изготовления, в результате чего корпусная изоляция реальных стержней имеет более высокую монолитность по сравнению с изоляцией макетов.

Оценка длительной электрической прочности корпусной изоляции, изготовленной по технологии элмикатерм, проводилась при различных скоростях повышения испытательной напряжённости ( $\dot{E}_1 = 0,470 \text{ кВ}/(\text{мм}\cdot\text{ч})$  и  $\dot{E}_2 = 0,120 \text{ кВ}/(\text{мм}\cdot\text{ч})$ ). После пробоя изоляции исследуемых макетов были рассчитаны значения показателя степени  $m$  "кривой жизни" изоляции, общепринятой обратно степенной зависимости ресурса от напряжённости электрического поля [3,4].

На рис.3 в координатах закона Вейбулла приведены распределения значений электрической прочности изоляции макетов, изготовленной из пропитанных лент Элмикатерм 55409 (образцы

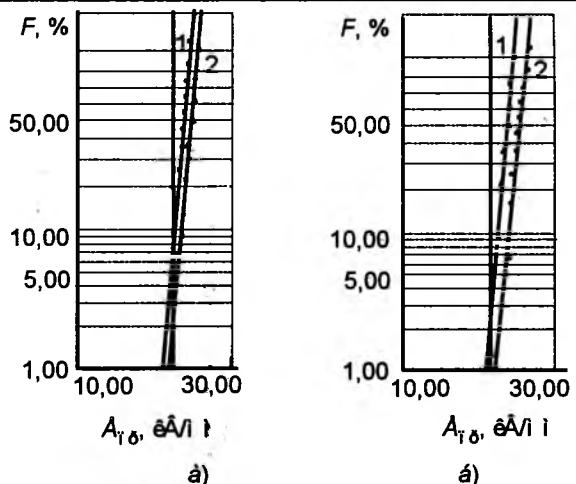


Рис.3. Распределения электрической прочности изоляции макетов, изготовленной из лент Элмикатерм 55409 (1 – вариант №1; 2 – вариант №3) при разной скорости повышения испытательной напряжённости:

а – 0,120 кВ/(мм·ч); б – 0,470 кВ/(мм·ч)

№1 и №3), при различных скоростях повышения испытательной напряженности. Электрическая прочность изоляции макетов, изготовленных из различных партий Элмикатерм 55409, при вероятности 63% ( $E_{\text{пр}63\%}$ ), совпадает в пределах погрешности эксперимента при всех исследованных значениях  $\dot{E}$ . Также в пределах доверительных границ располагаются значения коэффициента формы ( $\beta$ ) для указанных распределений. Снижение скорости повышения испытательной напряжённости приводит к уменьшению значений  $E_{\text{пр}63\%}$  для обоих типов исследуемых макетов (табл.5), причём распределения электрической прочности хорошо аппроксимируются отрезками параллельных линий (в координатах двухпараметрического закона Вейбулла). Следовательно, в исследованном диапазоне  $\dot{E}$  экспериментальные данные по длительной электрической прочности не противоречат положениям совмещённого закона старения изоляции [4], что позволяет при расчёте значений показателя степени  $m$  для слюдосодержащей изоляции, изготовленной по технологии элмикатерм, использовать следующую формулу:

$$m = \frac{\ln \dot{E}_1 - \ln \dot{E}_2}{\ln E_{\text{пр}63\%1} - \ln E_{\text{пр}63\%2}} - 1,$$

где  $\dot{E}_1 = 0,470 \text{ кВ}/(\text{мм}\cdot\text{ч})$ ,  $\dot{E}_2 = 0,120 \text{ кВ}/(\text{мм}\cdot\text{ч})$ ,  $E_{\text{пр}63\%1,2}$  – значения параметров положения для

распределений электрической прочности изоляции макетов при соответствующих скоростях повышения испытательной напряжённости.

Расчётные значения показателя степени  $m$  для изоляции макетов, изготовленной из лент Элмикатерм 55409, превышают аналогичный показатель для слюдосодержащей изоляции, изготовленной из лент с более низким слюдяным барьером [5]. Для изоляции из непластифицированных лент Элмикатерм 55409 (образец №3)  $m = 12,38 \pm 0,33$ , а для базового варианта этой ленты  $m = 11,04 \pm 0,41$ . Следовательно, независимо от химической структуры исследованных предварительно пропитанных слюдосодержащих лент Элмикатерм 55409 изготовленные из них образцы корпусной изоляции обладают высокой длительной электрической прочностью.

## Выводы

Изменение химической структуры и содержания компонентов предварительно пропитанных слюдопластовых лент Элмикатерм 55409 позволяет эффективно регулировать электрические характеристики корпусной изоляции электрических машин. Снижение концентрации пластифицирующих добавок в слюдопластовых лентах приводит к снижению диэлектрических потерь слюдосодержащей изоляции в области рабочих температур и увеличению длительной электрической прочности изоляции, что обеспечивает более высокий запас электрической прочности современной корпусной изоляции статорной обмотки высоковольтных электрических машин в процессе эксплуатации.

## Список литературы

1. Bock A. et al. Trends in Insulation Systems for Generator HV-Windings // SIGRE. 2002.11–102.
2. Пинчук Н.Д., Пинский Г.Б., Петров В.В. и др. Разработка и внедрение новых электроизоляционных материалов и систем термореактивной изоляции турбо-, гидрогенераторов // Электротехника. 2003. №4. С.17–27.
3. Койков С.Н., Цикин А.Н. Электрическое старение твердых диэлектриков и надёжность диэлектрических деталей. Л.: Энергия, 1968.
4. Dissado L.A., Fothergill J.C. Electrical Degradation and Breakdown in Polymers, 1992, Peter Peregrines.
5. Житомирский А.А. Исследования высоковольтной изоляции крупных электрических машин в условиях приближенных к эксплуатационным. Автореф. дисс...канд. техн. наук. Л., 1980.

**Азизов Андрей Шавкатович** – начальник центральной заводской лаборатории филиала ОАО "Силовые машины" "Электросила" (С.-Петербург). Окончил Ленинградский политехнический институт в 1980 г.

**Костельцов Андрей Михайлович** – заместитель начальника центральной заводской лаборатории филиала ОАО "Силовые машины" "Электросила" (С.-Петербург). Окончил Ленинградский политехнический институт в 1984 г.

**Андреев Александр Михайлович** – главный специалист по электроизоляционным материалам филиала ОАО "Силовые машины" "Электросила" (С.-Петербург), доктор техн. наук. Окончил Чувашский государственный университет в 1972 г.

**Папков Андрей Владимирович** – заместитель генерального директора ЗАО "Холдинговая компания Элинар" по техническому развитию, канд. техн. наук. Окончил Московский институт тонкой химической технологии в 1984 г.

**Пак Владимир Моисеевич** – главный специалист по электроизоляционным материалам ЗАО "Холдинговая компания Элинар", доктор техн. наук. Окончил Ленинградский политехнический институт в 1965 г.

# Некоторые направления совершенствования систем изоляции тяговых электрических машин

БЕРЕЗИНЕЦ Н.И., УКРАИНСКИЙ Ю.М., ЗАХАРОВ В.И., ОМЕЛЬЧЕНКО В.П.

Проанализировано влияние конструкционных параметров систем изоляции на технико-экономические показатели тяговых электродвигателей. Предложены пути улучшения функциональных свойств систем изоляции для перспективных и модернизируемых электрических машин.

В ряду факторов, определяющих технико-экономическую эффективность и эксплуатацию

*It analyses the effect of design parameters of the insulation systems on the technical and economical feasibilities of traction electric motors. The article offers the ways of improving the functional properties of the insulation systems for promising and modernized electrical machines.*

онную надёжность тяговых электродвигателей (ТЭД), важное место занимают показатели ис-

пользуемых систем изоляции (СИ), в свою очередь зависящие от свойств исходных материалов, их совместимости, уровня технологического обеспечения, исполнительской дисциплины и качества контроля за соблюдением технологических процессов. Остановимся на некоторых технических аспектах, характеризующих достигнутый уровень СИ ТЭД и направления их совершенствования. Из анализа показателей СИ ТЭД (проекты ОАО "ВЭлНИИ") различных поколений и типов, выполненного для якорных (статорных) обмоток, очевидна тенденция к повышению класса нагревостойкости, снижению суммарной (между медью обмотки и стеклопластиковой паза) толщины и, соответственно, росту коэффициента заполнения паза (рис.1). Это, наряду с постоянно осуществляющейся оптимизацией конструкций узлов ТЭД, определяет возрастание их технико-экономических показателей. Иллюстрацией сказанному может служить изменение удельной мощности  $P_{уд}$  ТЭД (рис.1), значения которой через линейную токовую нагрузку непосредственно связаны с указанными выше характеристиками СИ:

$$[A] = \sqrt{[A \cdot j] \frac{b_n h_n}{t_1} k_{3n}}, \quad (1)$$

где  $[A]$  – допустимые по нагреву значения линейной токовой нагрузки;  $[A \cdot j]$  – допустимые значения теплового фактора для данной СИ;  $b_n$ ,  $h_n$  – размеры паза;  $t_1$  – размер зубцового шага;  $k_{3n}$  – коэффициент заполнения паза медью, во многом определяемый толщиной СИ в пазу.

Необходимо отметить, что возможности увеличения  $[A]$  и  $P_{уд}$  за счёт повышения класса нагревостойкости СИ и снижения её толщины в большей мере могут быть реализованы в ТЭД переменного тока. В меньшей степени это относится к двигателям пульсирующего (постоянного) тока, поскольку  $[A]$  якорей ограничена условиями коммутации и допустимой окружной скоростью<sup>1</sup>. Для статорных обмоток, как показали расчёты применение вместо СИ класса нагревостойкости F (155°C) изоляционных систем классов H (180°C) и C (200°C) позволяет повысить  $[A]$  и  $P_{уд}$  на 18 и 23%, соот-

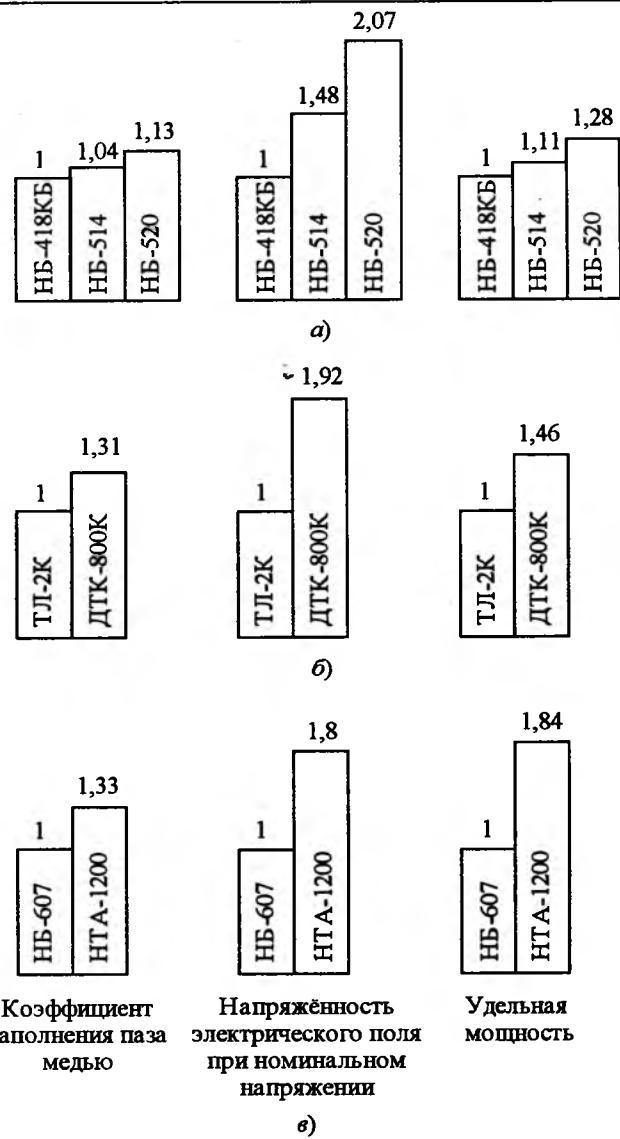
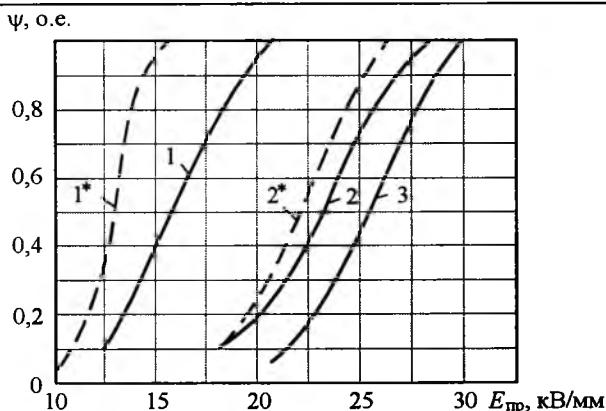


Рис.1. Соотношение параметров ТЭД электровозов:  
а – переменного тока; б – постоянного тока; в – с асинхронным приводом

ветственно. Правда, возможности СИ класса нагревостойкости С (200°C) в части предельно допустимых перегревов не могут быть использованы в полной мере, так как это приведёт к уменьшению КПД ТЭД и сверхнормативному нагреву его наружных поверхностей. Однако их применение при перегревах обмоток, соответствующих классу нагревостойкости Н (180°C), и наличии экономических предпосылок оправдано увеличением ресурса.

Уменьшение суммарной толщины изоляции обмоток ТЭД, приводящее к повышению напряжённостей электрического поля (рис.1), потребовало и более высоких электропрочностных показателей СИ. На рис.2 приведены интегральные функции распределения электрической

<sup>1</sup> Захаров В.И., Князев Н.В. Пути повышения технических показателей тяговых электродвигателей // Электровозостроение: Сб. науч. тр. ОАО "ВЭлНИИ". Новочеркасск, 1998. Т.40. С.57–72.



**Рис.2.** Интегральные функции распределения электрической прочности систем изоляции, используемых в ТЭД электровозов:

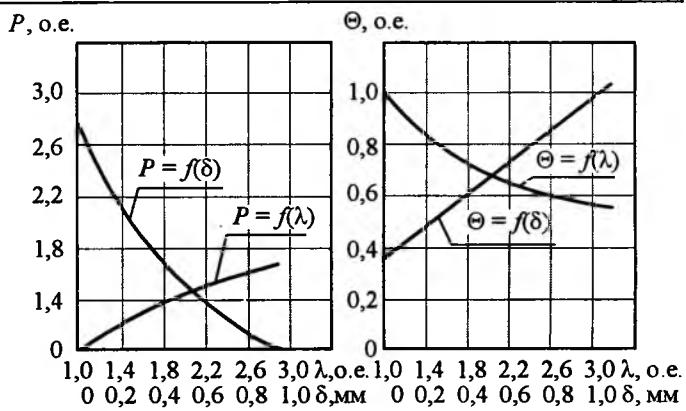
1 – система изоляции на основе стеклослюдинитовой ленты ЛСЭК-5СПЛ с пропиткой в лаке ФЛ-98, исходное состояние; 1\* – то же после эксплуатационного пробега 540000 км; 2 – система изоляции монолит-2, исходное состояние; 2\* – то же после эксплуатационного пробега 600000 км; 3 – система изоляции на основе полиимидной пленки П-ПМ180/КО с пропиткой в лаке КО-916

прочности  $E_{\text{пр}}$  СИ, применявшимся и применяемых в настоящее время. Электрическая прочность более современных систем (монолит, система на основе полиимидной пленки) существенно выше, чем у использовавшейся ранее системы на пропитанной ленте ЛСЭК-5. При этом снижение  $E_{\text{пр}}$  в процессе эксплуатации, например, СИ монолит-2 происходит гораздо медленнее, чем с ВЭС-2. К сожалению, пока отсутствуют аналогичные данные по СИ на основе полиимидной пленки.

В целом электропрочностные показатели современных СИ находятся на уровне, вполне удовлетворяющем требованиям практики проектирования и эксплуатации ТЭД, в том числе и по запасу электрической прочности. Дальнейшее их совершенствование целесообразно проводить в направлении повышения однородности электропрочностных показателей, минимизируя их размах ( $E_{\text{пр max}} - E_{\text{пр min}}$ ). Для этого необходимо располагать:

- ленточными (плёночными) материалами со стабильными электрофизическими параметрами и технологическими свойствами, обеспечивающими равномерную, плотную утяжку при изолировке;

- пропитывающим составом, предпочтительно компаундом, способным максимально



**Рис.3.** Зависимости отводимых потерь и перегревов полюсных катушек от параметров изоляции ( $P$  – отводимые потери;  $\Theta$  – перегревы катушек;  $\lambda$  – теплопроводность изоляции;  $\delta$  – толщина изоляции)

заполнять капиллярно-пористую и (или) слоистую структуру корпусной изоляции, а также неизбежные пустоты и сохраняться в них при термообработке;

– сбалансированными технологическими процессами пропитки и термообработки.

Наличие таких материалов и технологических процессов позволит получить монолитную структуру СИ с минимумом газовых включений и однородными электропрочностными свойствами. Помимо этого снизится вероятность образования частичных разрядов во внутреннем объёме СИ, являющихся основной причиной её электрического старения.

Отмеченная выше тенденция к снижению толщины СИ, как и повышение коэффициентов теплопроводности электроизоляционных материалов, способствует улучшению условий теплоотдачи. Качественные зависимости отводимых потерь и перегревов обмоток от указанных показателей СИ представлены на рис.3. Однако уменьшение толщины СИ имеет свои пределы, обусловленные, например, электрической и механической прочностью, а коэффициенты теплопроводности современных СИ отличаются незначительно. В связи с этим, повышение теплофизических показателей СИ возможно главным образом за счёт создания структуры, лишённой дополнительных тепловых сопротивлений, создаваемых газовыми (воздушными) прослойками.

Таким образом, пути совершенствования СИ ТЭД в плане электропрочностных и теплофизических параметров в принципе совпадают

и, помимо рассмотренного, позволяют достичь позитивных результатов по всему комплексу функциональных свойств, в том числе устойчивости к воздействию влажности и увеличению ресурса.

Исходя из изложенного, а также учитывая накопленный ОАО "ВЭлНИИ" опыт разработки, испытаний и наблюдений в эксплуатации, наиболее предпочтительными для вновь создаваемых или модернизируемых ТЭД являются СИ на основе слюдосодержащих лент (сухих или предварительно пропитанных) с пропиткой в компаундах вакуум-нагнетательным способом, обладающие начальной средней электрической прочностью ( $\bar{E}_{\text{пр}}$ ) не менее 30 кВ/мм (размах не более 3 кВ/мм) и коэффициентом теплопроводности примерно 0,25 Вт/(м·град). При этом степень снижения  $\bar{E}_{\text{пр}}$  в процессе эксплуатации должна быть по крайней мере не хуже, чем у хорошо себя зарекомендовавшей системы монолит-2, сохраняющей более чем восьмикратный запас электрической прочности после 2,5 млн. км пробега ТЭД с номинальным напряжением около 1 кВ.

Создание современных СИ, удовлетворяющих указанным требованиям, возможно на основе материалов со следующими основными техническими характеристиками:

Пропиточный компаунд	
Содержание летучих, %, не более	2
Электрическая прочность, кВ/мм, не менее:	
– R; M(15÷35) °C 45÷75%	25
– 48 ч (23 °C) 93%; M(15÷35) C 45÷75%	20
Удельное объёмное электрическое сопротивление, Ом·м, не менее:	
– M(15÷35) °C 45÷75% .....	$10^{13}$
– R; M(180) °C < 20% .....	$10^9$
– 48ч (23 °C) 93%; M(15÷35) °C 45÷75% .....	$10^{11}$
Цементирующая способность, Н, не менее:	
– R; M(15÷35) °C 45÷75% .....	400
– R; M(180) °C < 20% .....	220
Разрушающее напряжение при статическом изгибе, МПа, не менее:	
– R; M(15÷35) °C 45÷75% .....	15
Температура пропитки, °C, не более	50
Время желатинизации при 160 °C, мин, не более	20
Температура полимеризации, °C, не более	180
Длительность полимеризации, ч, не более	10

Вязкость по В34, с, не более:

– при (50±2) °C .....	30
– после 480 ч при (50±2) °C .....	55

Химическая природа компаунда не должна препятствовать проведению ускоренного теплового старения систем изоляции на его основе при температурах, рекомендуемых ГОСТ 10518-88.

#### Ленты непропитанные, слюдосодержащие

Толщина, мм .....	0,1±0,015; 0,13±0,02
Электрическая прочность, кВ/мм, средняя при коэффициенте вариации 5%, не менее .....	25
Содержание связующего, %, не более .....	6
Содержание слюдяной бумаги, %, не менее .....	80
Пористость по Герлею, с/100мл, не более .....	800
Удельная разрушающая нагрузка при растяжении, Н/см, не менее .....	150

Технологичность ..... Отсутствие пыления;  
Отсутствие расслоений  
(повышенная адгезия к подложке)

Способность к утяжке без образования морщин и складок

Гарантийный срок хранения, мес .....

#### Ленты пропитанные, слюдосодержащие

Толщина, мм .....	0,08±0,01; 0,1±0,01; 0,13±0,02
Электрическая прочность, кВ/мм, средняя при коэффициенте вариации 5%, не менее .....	25
Содержание связующего, % .....	35–40
Содержание слюдяной бумаги, %, не менее .....	48
Удельная разрушающая нагрузка при растяжении, Н/см, не менее .....	150
Гарантийный срок хранения, мес .....	6

Березинец Николай Иванович – заведующий лабораторией электрофизических испытаний ОАО "ВЭлНИИ", канд. техн. наук. Окончил Воронежский политехнический институт в 1977 г.

Украинский Юрий Михайлович – заведующий отделом изоляции ОАО "ВЭлНИИ". Окончил Новочеркасский политехнический институт в 1968 г.

Захаров Владимир Иванович – заведующий отделом проектирования электрических машин ОАО "ВЭлНИИ". Окончил Новочеркасский политехнический институт в 1973 г.

Омельченко Виктор Петрович – заведующий сектором изоляции электрических машин ОАО "ВЭлНИИ". Окончил Новочеркасский политехнический институт в 1972 г.

# Высоконагревостойкие системы изоляции тяговых электродвигателей для электроподвижного состава

ЛЕВИН С. М., ЛАВКИН Н. Е., НОЖЕВНИКОВА Т. Е., КАЗАКОВА Н. Ю.

Представлены результаты сравнительных испытаний систем изоляции тяговых электродвигателей нагревостойкостью до 220°C на рабочее напряжение до 4000 В. Показано, что применение обмоточных проводов с короностойкой полиимидной пленкой и непропитанных полиимидслюдосодержащих лент после пропитки обмоток в кремнийорганическом компаунде обеспечивает необходимые характеристики изоляции тяговых электрических машин.

В связи с ростом нагрузок, увеличением скорости электротранспорта повышаются требования к нагревостойкости изоляции и её надёжности. Так, для двигателей новых электропоездов, высокоскоростных электропоездов поставлены требования обеспечения нагревостойкости изоляции класса Н в соответствии с ГОСТ 2582-81. Таким образом, температура обмоток может достигать 200–220°C. Учитывая, что максимально допустимое рабочее напряжение машин составляет 4000 В, а толщина изоляции должна быть минимальной, задача разработки изоляции тяговых двигателей может быть решена только с применением новых электроизоляционных материалов, обмоточных проводов, высоконагревостойких пропитывающих составов.

Возможность использования в таких машинах полиэфиримидных компаундов, например, 3309 фирмы "Изола" (Швейцария) или Элласт-180ИД ЗАО "Электроизолит" (Россия) вызывает сомнения, так как эти компаунды, хотя и длительно работают при температуре до 180°C [1,2], значительно уступают по нагревостойкости кремнийорганическим. Это иллюстрируют данные определения потери массы компаундов при непрерывном подъёме температуры со скоростью 5°C/мин, полученные с помощью дериватографа (рис.1). Кремнийорганические компаунды 3551 фирмы "Изола" или Н62С фирмы "Ваккер" значительно превосходят по нагревостойкости полиэфиримидные составы.

Вместе с тем, температурный индекс наиболее нагревостойкого компаунда Н62С составляет примерно 230°C, а представленные на

The results of comparative tests of the insulation systems of traction electric motors with a heat resistance up to 220°C at an operating voltage up to 4000V are represented. It is shown that the use of winding wires with corona resistant polyimide film and non-impregnated polyimide mica-loaded tapes after impregnating the windings in the silicone compound provides for required insulation characteristics of traction electric motors.

рис.2 данные, показывают небольшие потери массы компаунда после его длительного старения при температурах 240 и 220°C. Данные

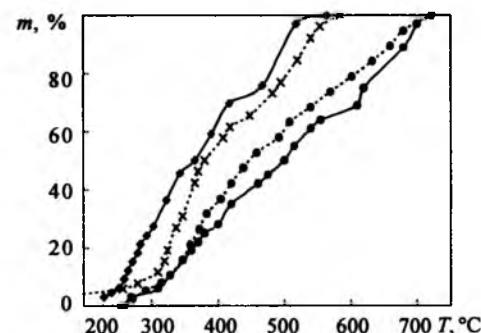


Рис.1. Сравнительные результаты определения потерь массы компаундов при непрерывном подъёме температуры со скоростью 5°C/мин:

—♦— полиэфирный компаунд Элласт 180ИД; —×— полиэфирный компаунд 3309; —●— кремнийорганический компаунд 3551; —○— кремнийорганический компаунд Н62С

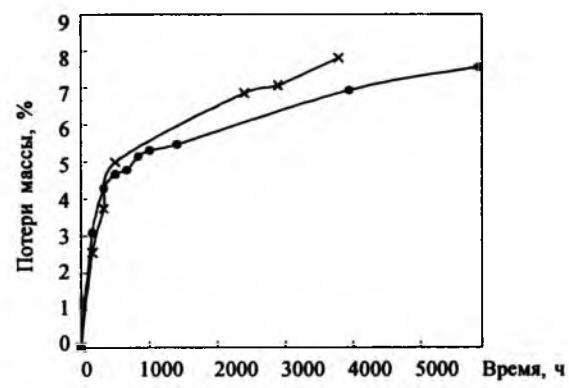


Рис.2. Изменение массы образцов компаунда Н62С в процессе его старения:  
—●— температура старения 220°C; —×— температура старения 240°C

получены путём взвешивания на аналитических весах отверждённых отливок компаунда Н62С размером 45×45×3 мм.

Для создания высоконагревостойких систем изоляции тяговых электрических машин помимо кремнийорганических пропитывающих составов необходимо применение совместно с ними непропитанных электроизоляционных лент, а также обмоточных проводов обеспечивающих высокое качество витковой изоляции.

В области изоляции обмоточных проводов в последние годы достигнут значительный прогресс за счёт применения плёнки Kapton FCR фирмы "Дюпон де Немур", обеспечивающей повышенную короностойкость провода в сравнении с ранее применяемыми проводами на полиимидной плёнке.

В [3, 4, 5] приводятся данные о применении проводов с плёнкой Kapton FCR в системах изоляции тяговых электродвигателей для подвижного состава и других электрических машинах. Представленные в табл.1 сравнительные данные испытаний серийно выпускаемых проводов ППИПК-Т и провода с короностойкой плёночной изоляцией ещё раз подтверждают значительное увеличение длительной электрической прочности при использовании в проводах короностойкой плёнки. Испытания проведены на отрезках проводов сечением 1,25×8,5 мм при напряжённости 20 МВ/м, каждый из которых выдерживали под напряжением до пробоя изоляции. Применение таких проводов технически оправдано в электрических машинах, работающих при высокой напряжённости поля, вместе с тем для машин низкого напряжения возможно применение проводов ППИПК-Т или эмальстекловолокнистых проводов с утонённой изоляцией.

Для выбора изоляционных материалов корпусной изоляции обмоток тяговых двигателей были проведены испытания различных систем изоляции на макетах. Макеты представляли собой скомплектованные отрезки проводов длиной 380 мм, поверх которых была нанесена корпусная изоляция. Макеты пропитывали вакуум-нагнетательным способом в кремнийорганических компаундах Н62С или 3551 и затем отверждали изоляцию. В качестве корпусной изоляции использовали непропитанные стеклослюдяные ленты различных производителей или их сочетали с полиимидной плёнкой. Так же были испытаны новые непропитанные поли-

Таблица 1  
Результаты сравнительных испытаний  
обмоточных проводов на длительную электрическую прочность при напряжённости 20 кВ/мм

№ образца	Время до пробоя, ч	
	Провод с изоляцией из короностойкой плёнки	Провод ППИПКТ
1	105,6	4,8
2	138,6	18,4
3	141,4	29,6
4	141,8	32,5
5	144,2	41,0
6	144,9	42,1
7	145,8	45,5
8	149,8	51,9
9	166,2	59,4
10	200,1	69,6
$\tau_{50\%}$	149,6	36,5

имидслюдосодержащие ленты, при производстве которых в качестве подложки использована короностойкая плёнка Kapton CR фирмы "Дюпон де Немур".

Варианты изоляции и результаты их испытаний в исходном состоянии представлены в табл.2 и на рис.3, 4. Полученные данные показывают, что системы изоляции с пропиткой в кремнийорганических компаундах имеют высокий уровень сопротивления изоляции и низкие значения  $t_{gb}$  вплоть до температур 220°C. Применение в конструкции полиимидной плёнки или полиимидслюдосодержащих лент приводит к значительному повышению электрической прочности изоляции. Из сравниваемых систем изоляции после теплового старения, проведённого на макетах при температуре 260°C в течение 480 ч (табл.3), наилучшие характеристики изоляции наблюдались для варианта, изготовленного на проводе ППИПК-Т с чередованием ленты Rogoband и полиимидной плёнки. После указанных воздействий характеристики изоляции данного варианта практически не изменились в сравнении с исходными. Вместе с тем, для тяговых электродвигателей на напряжение до 4000 В более перспективным представляется использование систем изоляции на проводе с короностойкой полиимидной изоляцией и корпусной изоляции из полиимидслюдосодержащих лент с подложкой из короностойкой плёнки. После пропитки в компаунде Н62С такая изоляция отличается высокой монолитнос-

Таблица 2

Сравнительные характеристики систем изоляции на рабочую температуру до 220°C в исходном состоянии

Система изоляции		$C, \text{ пФ}$		$R, \text{ Ом}$		$\text{tg } \delta, \%$		$E_{\text{пр}}, \text{ МВ/м}$
Пропитка	Тип ленты, провод	I	II	I	II	I	II	
H62C	Рогобанд, провод ПСДКТ	233	271	1,4E+12	3,6E+09	1,09	7,04	20,3
H62C	Элмикапор, провод ПСДКТ	230	250	3,0E+12	2,5E+10	1,14	4,37	15,5
H62C	Чередование ленты Рогобанд и пленки ПМ-А, провод ППИПК-Т	197	232	3,4E+12	5,0E+10	0,90	6,33	31,3
H62C	Чередование ленты Элмикапор и пленки ПМ-А, провод ППИПК-Т	208	229	3,8E+12	8,1E+09	0,47	4,84	30,2
3551	Samicaport, провод ПСДКТ	-	-	-	-	-	-	25,5
H62C	Полиимидослюдосодержащая короностойкая лента, провод с короностойкой пленкой	-	-	-	-	-	-	31,0

Примечание: I – сухая, II – увлажнённая

Таблица 3

Сравнительные характеристики систем изоляции после теплового старения в течении 480 ч при 260°C

Система изоляции		$C, \text{ пФ}$		$R, \text{ Ом}$		$\text{tg } \delta, \%$		$E_{\text{пр}}, \text{ МВ/м}$	Снижение электрической прочности при тепловом старении, %
Пропитка	Тип ленты, провод	I	II	I	II	I	II		
H62C	Рогобанд, провод ПСДКТ	171	226	5,2E+12	1,3E+09	1,97	11,80	18,6	8,4
H62C	Элмикапор, провод ПСДКТ	156	194	8,1E+12	3,8E+09	0,90	8,15	9,6	38,1
H62C	Чередование ленты Рогобанд и пленки ПМ-А, провод ППИПК-Т	141	167	7,4E+12	5,1E+11	1,09	5,51	31,7	-1,3
H62C	Чередование ленты Элмикапор и пленки ПМ-А, провод ППИПК-Т	143	161	2,3E+13	5,9E+11	0,38	3,16	27,6	8,6
3551	Samicaport, провод ПСДКТ	-	-	-	-	-	-	17,7	30,6

Примечание: I – сухая, II – увлажнённая

тью и обеспечивает высокие значения длительной электрической прочности, что подтверждают данные, представленные в табл.4, где приведены времена до пробоя систем изоляции старившихся при напряжённости 15 МВ/м.

Несмотря на то, что система изоляции на стеклослюдяной ленте Рогобанд уступает по электрическим характеристикам полимидослюдосодержащим лентам она может использоваться в полюсных катушках, где возможно применение более толстой изоляции. После пропитки в кремнийорганическом компаунде такая изоляция имеет высокую водостойкость,

что показывают данные испытаний изоляции в воде в течение 600 ч, представленные на рис.5. Высокая влагостойкость изоляции крайне важна для тяговых электродвигателей подвижного состава, работающих в жёстких условиях эксплуатации.

Проведённые работы показали, что на основе обмоточных проводов с полимидной короностойкой изоляцией, полимидослюдосодержащих короностойких материалов, пропитанных в кремнийорганическом компаунде, может быть изготовлена изоляция тяговых электродвигателей на рабочее напряжение до 4000 В нагрево-

Таблица 4

Результаты испытаний макетов на длительную электрическую прочность при напряженности 15 МВ/м

№ макета	Время до пробоя, ч		
	Полиимид-слюдосодержащая лента, провод ПСДКТ, пропитка в Н62С	Лента Poroband, провод ПСДКТ пропитка в Н62С	Полиимид-слюдосодержащая короностойкая лента, провод с короностойкой плёнкой пропитка в компаунде Н62С
1	0,6	1,6	85,7
2	1,6	7,3	87
3	1,7	14,2	149,6
4	2,9	16,8	>569
5	22,3	31,2	>569
6	59,7	74,6	>569
7	95,5	74,9	>569

Рис. 3. Зависимость сопротивления изоляции макетов пропитанных в компаунде Н62С от температуры:

-♦-- лента Poroband, провод ПСДКТ; -■-- лента Элмикапор, провод ПСДКТ; -▲-- лента Poroband, плёнка ПМ-А, провод ППИПК-Т; -×-- лента Элмикапор, плёнка ПМ-А, провод ППИПК-Т; -●-- лента полиимидослюдосодержащая короностойкая, провод с короностойкой плёнкой

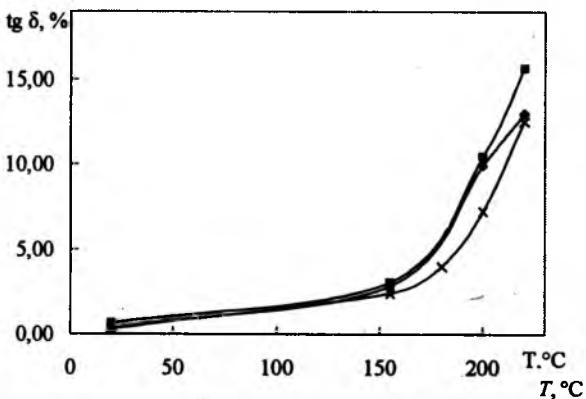


Рис. 4. Зависимость  $\text{tg}\delta$  систем изоляции, пропитанных в компаунде Н62С, от температуры:

-♦-- лента Poroband, провод ПСДКТ; -■-- лента Элмикапор, провод ПСДКТ; -×-- лента полиимидослюдосодержащая короностойкая, провод с короностойкой плёнкой

стойкостью до 220°C.

В настоящее время в филиале ОАО "Силовые машины" "Электросила" (С.-Петербург) ведётся промышленное освоение таких систем изоляции при производстве тяговых электродвигателей пассажирских электровозов и других электрических машин.

#### Список литературы

1. Сидоренко К.С., Евтушенко Ю.М., Биржин А.П., Комарова В.К. Новое поколение пропиточных компаундов // Электротехника. 2002. № 4. С.44–49.

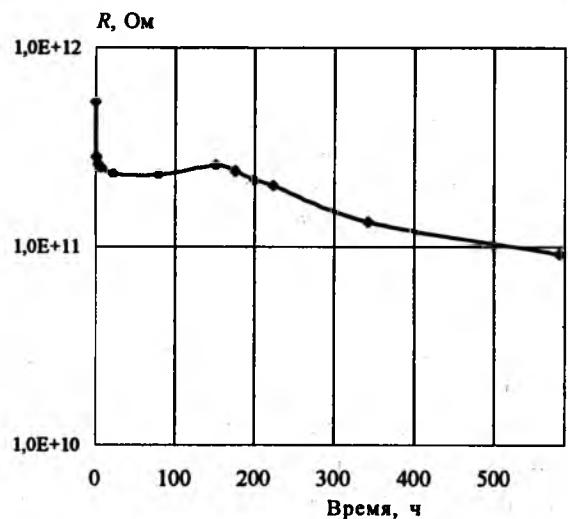


Рис. 5. Изменение сопротивления изоляции макетов на ленте Poroband, пропитанных в компаунде Н62С, в процессе выдержки в воде при комнатной температуре

2. Левин С.М., Ножевников Т.Е., Казакова Н.Ю., Лавкин Н.Е. Перспективы совершенствования систем изоляции тяговых электрических машин // Электротехника. 2004. № 4. С.31–35.

3. Katz M., Theis R.J. New High Temperature Polyimide Insulation for Partial Discharge Resistance in Harsh Environments // IEEE Electrical Insulation Mag. 1997. Vol. 13, № 4. P.24–30.

4. M. Di Lozenzo del Casale, L. Egiziano, C. Petrarca et al. Performances of Insulation Systems for Inverter – Fed Traction Motors. Incuson, 2002. P. 148 –152.

5. Timperley J. E., Gooding G.W. Application of corona resistant Polyimide Film in High Voltage Motor // EIC / EMCW, Technical Paper. P. 257–261.

**Левин Станислав Михайлович** – начальник лаборатории электрической изоляции ОАО "Силовые машины" "Электросила", С.-Петербург, канд. техн. наук. Окончил Ленинградский политехнический институт в 1974 г. Защитил диссертацию по теме "Исследование полимида-фторопластовой изоляции в условиях воздействия водных сред и других эксплуатационных факторов" в 1990 г.

**Лавкин Николай Евгеньевич** – инженер II категории лаборатории электрической изоляции ОАО "Силовые машины" "Электросила", С.-Петербург. Окончил

Санкт-Петербургский государственный технический университет в 2002 г.

**Ножевникова Тамара Евгеньевна** – ведущий инженер лаборатории электрической изоляции ОАО "Силовые машины" "Электросила", С.-Петербург. Окончила Ленинградский политехнический институт в 1972 г.

**Казакова Надежда Юрьевна** – инженер I категории лаборатории электрической изоляции ОАО "Силовые машины" "Электросила", С.-Петербург. Окончила Ленинградский сельскохозяйственный институт в 1989 г.

## О стандартизации испытаний на электрическое старение высоковольтной статорной изоляции

ВАКСЕР Б.Д., ПИЩУЛИНА О.П.

При уровнях напряжений, установленных IEEE стандартами, определяющими условия испытаний высоковольтной изоляции электрических машин на старение при совместном воздействии электрического поля и рабочей температуры, максимальная напряженность в изоляции приближается к пробивному значению. На основе известного обобщенного статистического закона электрического старения показано, что минимальный прогнозируемый по этим условиям срок службы изоляции превысит более чем на порядок реальный срок службы генераторов.

Прогресс в конструкции гидрогенераторов и турбогенераторов с воздушным охлаждением в большой мере определяется совершенствованием изоляции статорной обмотки. Снижение толщины изоляции, определяемое возможностью повышения рабочей напряжённости электрического поля в ней, позволяет повысить КПД и снизить стоимость мощных генераторов, так как улучшается заполнение паза активными материалами (меди, железо) и может быть увеличена плотность тока благодаря повышению теплопроводности. Значительно уменьшить толщину изоляции, сохранив ее надёжность и долговечность, позволяют новые материалы и технологии [1].

В определённой мере это улучшение связано с жёсткими требованиями стандартов на испытание длительной электрической прочности изоляции (Voltage Endurance Test – V.E.t.) [2,3]. Выполнение V.E.t., сочетающего воздействие высокого электрического поля и рабочей тем-

At voltage levels, estimated by IEEE standards of Voltage Endurance test, maximum stresses in insulation is close to breakdown value. It is determined, by using of well-known combined statistic law of electrical aging, that minimum duration of winding insulation life more than ten time exceeds real generator life duration. So, the demanded by the existing standards test voltage level is an ungrounded barrier on a way on generator designing improvement, connected with insulation thickness decreasing.

perature, гарантирует изготовление такой изоляции, качество которой удовлетворяет повышенным требованиям по электрической прочности и монолитности.

Однако для современных конструкций, где средние рабочие напряжённости достигают 3 кВ/мм, требования основного стандарта [2] могут привести к "замораживанию" на этом уровне электрической нагрузки в изоляции. Действительно, отношение между испытательным и рабочим (фазным) напряжением, установленное в [2], равно  $R = 3,76$ . Соответственно, среднее испытательная напряжённость составляет  $E_{cp} = 3 \cdot 3,76 = 11,3$  кВ/мм, а максимальная  $E_m = k_h E_{cp} = 2 \cdot 11,3 = 22,6$  кВ/мм (здесь  $k_h$  – коэффициент неравномерности поля на ребре проводников, близкий к 2 для типичной конструкции с толщиной изоляции около 3 мм). Это значение  $E_m$  близко к пробивной напряжённости реальной изоляции, и конструкций с большей напряжённостью, по-видимому, не смогут удов-

летьворять существующим требованиям стандартов на V.E.t. Поэтому представляется актуальным вопрос о целесообразности принятия столь высоких уровней испытательного напряжения при V.E.t. Эта проблема рассматривается в статье на базе полученных в результате ряда исследований [4–9] знаний о законах электрического старения термореактивной слюдосодержащей изоляции, позволяющих оценить срок жизни (ресурс) изоляции в условиях эксплуатации, гарантированный указанными испытаниями.

Воспользуемся известной зависимостью времени жизни от напряжения (закон электрического старения) [4–8] и статистическими соотношениями, приведёнными в [4]. Используя степенной закон электрического старения высоковольтной слюдяной изоляции

$$\tau = k U^n, \quad (1)$$

где  $\tau$  – время до пробоя;  $k$  – постоянная;  $n = 10/12$ , можно определить время жизни при рабочем напряжении  $\tau_p$ , эквивалентное длительности старения при испытательном напряжении  $\tau_u = 400$  ч (время, рекомендуемое в [2,3] для  $R = 3,76$ ):

$$\tau_p = \tau_u R^n \geq 400 \cdot 3,76^{10} = 2,25 \cdot 10^8 \text{ ч} = 2,6 \cdot 10^4 \text{ лет.}$$

Важно отметить, что эта оценка не зависит от температуры, поскольку, как установлено в [6,8], повышение температуры до 130°C не влияет на интенсивность электрического старения.

Положительный результат V.E.t., состоящий в том, что не произошло ни одного пробоя 4 испытуемых натуральных стержней (это число образцов рекомендовано в [2,3]), означает, что вероятность пробоя обмотки за время  $\tau_p$  не превышает 0,25. Однако долговечность изоляции обмотки гидрогенераторов, содержащей обычно около 1000 стержней, определяется временем до первого отказа, вызванного старением изоляции, т.е. временем, соответствующим вероятности пробоя, равной 0,001.

Этот срок можно оценить, применяя известный закон обобщенного экстремального распределения Вейбулла [4,9]:

$$F(\tau, U) = 1 - \exp(-k(\tau U)^{\beta})$$

или

$$y = \ln \ln(1-F)^{-1} = \ln k + \beta \ln t + \beta \ln \ln U, \quad (2)$$

где  $F$  – вероятность пробоя;  $k$  – параметр, зависящий от размеров объекта;  $\beta = 1,3$  – параметр

распределения, определённый экспериментально для наиболее широко используемой стеклослюдобумажной изоляции с эпоксиноволачным связующим [4].

Из соотношения (2) определяется отношение времен до пробоя при интересующих нас вероятностях  $F_1 = 0,25$  и  $F_2 = 0,001$ :

$$\frac{\tau_{1(F_1=0,001)}}{\tau_{2(F_2=0,25)}} = \exp 1/\beta (y_1 - y_2) = \\ = \exp(1/1,3)((\ln \ln(1-0,001)) - \ln \ln(1-0,25)) = 0,0128.$$

Соответственно, долговечность изоляции, выдержавшей V.E.t., составит  $\tau_{(F=0,001)} = \tau_{(F=0,25)} \cdot 0,0128 = 2,6 \cdot 10^4 \cdot 0,0128 = 333$  года. Это время на порядок превышает реальное время использования генератора, определяемое его моральным и физическим износом.

Чтобы обеспечить разумное минимальное время жизни (до первого пробоя) – 30 лет, достаточно установить отношение испытательного и рабочего напряжений  $R = 3$ . Применение этого значения  $R$  позволит успешно выполнять V.E.t. конструкций изоляции с рабочей напряжённостью, превышающей максимальную достигнутую в настоящее время на 20%. Такое улучшение использования изоляции даст значительный эффект как при изготовлении, так и при эксплуатации мощных генераторов.

Рассматривая эффективность влияния V.E.t., воспроизводящих исключительно электрическое старение, на долговечность и надёжность изоляции необходимо принять во внимание другие факторы, вызывающие её повреждение. Исследования и длительный опыт эксплуатации большого числа мощных генераторов показали, что главными причинами отказа изоляции являются поверхностные пазовые разряды (микродуги) и внутренние напряжения, вызываемые многократными тепловыми циклами.

Для предотвращения первого в пазах между сердечником и поверхностью стержня необходимо устанавливать пружины из полупроводящего материала, обеспечивающие непрерывляемый контакт между проводящим покрытием стержня и сердечником даже при наличии вибрации. Принцип конструкции, его экспертная или экспериментальная оценка могут подтвердить выполнение этого требования.

Второй из указанных факторов старения, не воспроизводимых V.E.t., может выявляться термоциклическими испытаниями с токовым нагревом проводников.

**Список литературы**

1. Ваксер Б.Д., Петров В.В., Хазанов А.И., Чибриков А.Н. Совершенствование технологии пропитанных изоляционных систем // Электросила. 2000. № 39.
  2. IEEE Std 1553-2002. IEEE trial-Use Standard for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Coils and Bars for Hydrogenerators.
  3. IEEE Std 1043-1996. IEEE Recommended Practice for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Coils and Bars.
  4. Ваксер Б.Д., Житомирский А.А., Койков С.Н., Пищулина О.П. Оценка параметров совмещенного закона электрического старения высоковольтной статорной изоляции // Электричество. 1977. № 11.
  5. Gjaja et al. A Second Generation Epoxy-Mica Paper Insulation System for Large Turbine-Generatore Stator Windings. PAS-97, Jan. 1978.
  6. Wichmann A., Grunewald P. Der Einfluß von Temperatur und mechanischer Beanspruchung auf die elektrische Lebensdauer von Epoxidharz-Glimmer-Isolierungen // ETZ-A. 1976. Bd.7.
  7. Meyer H. et al. Evaluation of an Insulation System for Stator Windings of High Voltage Machines. CIGRE, 1982. Rep.15-09.
  8. Schuler R.H., Liptak G. Long-time Functional Tests on Insulation System for High Voltage Rotating Machines. CIGRE, 1976. Rep.15-05.
  9. Simoni L., Pattini G. A New Research into the Voltage Endurance of Solid Dielectric. EI-10. №.1, March 1975.
- Ваксер Борис Давидович** – начальник бюро ОАО "Силовые машины" "Электросила" (С.-Петербург), канд. техн. наук.
- Пищулина Ольга Петровна** – инженер I категории ОАО "Силовые машины" "Электросила" (С.-Петербург).

## **Использование диэлектрометрии для оценки технологических характеристик термореактивных компаундов**

**ВАКСЕР Н.М., ЗВОЛИНСКАЯ А.Ю., ЛАВРЕНТЬЕВА М.Ю., САЖИН Б.И., СТАРОВОЙТЕНКОВ В.В.**

*Исследованы электрофизические параметры пропиточных термореактивных компаундов, показано влияние длительности старения компаунда на эти параметры и процесс его отверждения пропитанной изоляции. Найдена связь между вязкостью и полной проводимостью для компаундов полярного типа. На основании этого может быть разработан простой и оперативный способ контроля состояния компаундов в течение всего технологического цикла.*

Современная электроэнергетика развивается по пути ввода новых энергоблоков в основном средней и умеренной единичной мощности. При этом существенно увеличивается количество изготавляемых единиц оборудования и решающую роль в условиях обострившейся конкуренции приобретает повышение производительности и снижение стоимости их систем изоляции.

Одним из наиболее эффективных способов решения этой проблемы является использование технологии вакуум-нагнетательной пропитки (ВНП) полностью собранной и уложенной в сердечник обмотки, так как при этом способе изготовления существенно упрощается и ускоряется укладка обмотки в сердечник и снижается стоимость изоляционной системы [1,2].

Качество изоляции, изготовленной методом

*Explores electrophysical characteristics of impregnating thermoreactive compounds; it describes the impact of the duration of the compound's thermic ageing upon these characteristics, as well as upon the process of impregnating insulation thermosetting. We have found the connection between kinematic toughness and admittance for polar type compounds. This gave us an opportunity to develop a simple and efficient monitoring procedure for the state of compounds during the whole technological period.*

ВНП, её электрические и теплофизические характеристики, особенно её долговечность, определяются, в значительной степени, качеством пропитки – степенью заполнения больших и малых пор в изоляции пропитывающим компаундом с последующей термообработкой.

Свойства компаунда, постепенно и необратимо изменяющиеся при многократном использовании (технологическом старении), не только определяют степень заполнения им пор изоляции, но и существенно влияют на параметры процесса отверждения – температуру начала создания сетчатой структуры, скорость этого процесса и цементирующую способность пропитывающего состава. В связи с этим в работе рассматриваются две задачи:

– определение возможности создания способа непрерывного контроля важнейшего показа-

теля пропитывающей способности компаунда – его вязкости путём измерения диэлектрических характеристик, что существенно упрощает и повышает оперативность контроля;

– оценка изменения характеристик отверждения компаунда в процессе его технологического старения при температуре  $(50 \pm 5)^\circ\text{C}$ , принятой для процесса пропитки.

Исследования выполнены на ряде современных составов, имеющих разное химическое строение и различающихся по химической природе основного компонента компаунда – смолы. Исследуемые в работе компаунды разделены на три группы, каждая из которых включает близкие по химической природе компоненты:

1. Эпоксидные компаунды типа ПК-11 на основе импортной и отечественной смол, соответственно DER-330 и ЭД-22 (в неотверждённом состоянии относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 6,2 \div 6,4$ ).

2. Компаунд на основе полиэфириамида – Элласт-220 ИД (в неотверждённом состоянии  $\epsilon = 8,0 \div 8,2$ ).

3. Кремнийорганические составы отечественного (КО-50Э) и зарубежного производства – смола 3551 фирмы "Isola" на основе фенилметилвинилводородполисилоксана со встроенным катализатором (в неотверждённом состоянии  $\epsilon = 2,3 \div 2,4$ ).

### Исследование электрофизических характеристик компаундов в процессе теплового старения

Учитывая результаты исследований, проведённых на различных диэлектрических жидкостях [3], для реализации непрерывного контроля вязкости компаундов по их диэлектрическим характеристикам наибольший интерес среди последних представляет полная проводимость.

Известно, что у жидких диэлектриков электропроводность ( $\gamma$ ), обусловленная свободными зарядами (ионная, молионная), и кинематическая вязкость ( $\nu$ ) связаны правилом Вальденна–Писаржевского:  $\gamma\nu = \text{const}$  [4]. Представляет научный и практический интерес определение связи между вязкостью и полной проводимостью, зависящей от подвижности как свободных (электропроводимость), так и связанных зарядов (дипольно-релаксационная поляризация).

Установление такой связи для пропиточных компаундов различной природы и состава от-

крывает путь для разработки оперативных и простых методов непрерывного контроля состояния компаунда, в том числе степени его старения.

Значение полной проводимости, исследованной в настоящей работе, определялось в диапазоне частот  $20 \div 2 \cdot 10^4$  Гц. Установлено, что наиболее информативной характеристикой является полная проводимость на частоте 100 Гц, эта частота использовалась в дальнейшем анализе. Для измерений проводимости использовалась схема, состоящая из генератора напряжения  $U_r$  и последовательно включённого с исследуемым образцом  $C_x$  измерительного конденсатора  $C_u$ , имеющего ёмкость, на несколько порядков превышающую  $C_x$ . Это позволяет определить полную проводимость как

$$Y_u = \frac{U_u \omega C_u}{U_r},$$

где  $U_u$  – напряжение на измерительном конденсаторе.

В дальнейшем в качестве характеристики полной проводимости использовалось пропорциональное ей значение  $U_u$ . Наряду с  $U_u$  определялись также проводимость при напряжении постоянного тока, а также ёмкость  $C_x$  и  $\text{tg}\delta$  при частоте 1 кГц. Измерения проводились в интервале температур от 20 до  $50^\circ\text{C}$  для исходного состояния компаунда и в процессе его теплового старения.

Для измерения вязкости компаундов использовался вискозиметр ВПЖ-2 с диаметром капилляра 2 мм.

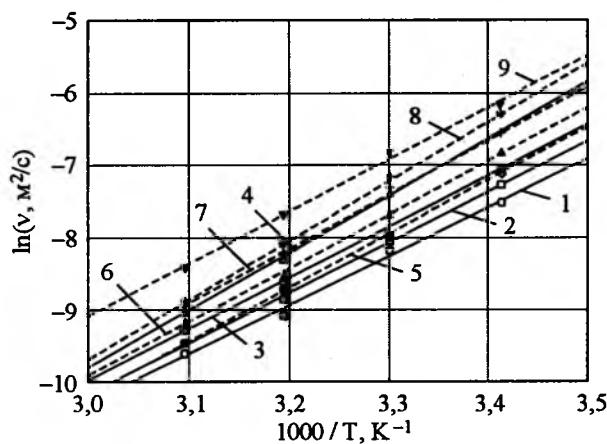


Рис.1. Зависимости  $\ln\nu = f(1/T)$  для компаунда ПК-11 (DER) (1–4) и ПК-11 (ЭД-22) (5–9):

1,5 – исходный; 2, 6 – тепловое старение 50 ч; 3 – 140 ч; 4 – 280 ч; 7 – 100 ч; 8 – 150 ч; 9 – 200 ч

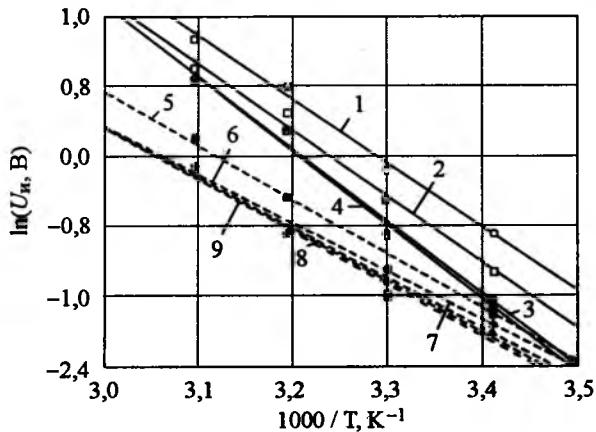


Рис.2. Зависимости  $\ln U_n = f(1/T)$  для компаунда ПК-11 (DER) (1–4) и ПК-11 (ЭД-22) (5–9):

1,5 – исходный; 2,6 – тепловое старение 50 ч; 3 – 140 ч; 4 – 280 ч; 7 – 100 ч; 8 – 150 ч; 9 – 200 ч

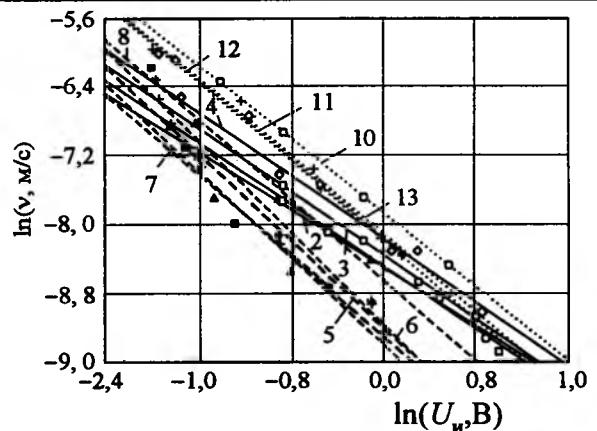


Рис.4. Зависимости  $\ln v = f(\ln U_n)$  для компаундов ПК-11 (DER) (1–4) и ПК-11 (ЭД-22) (5–9), Элласт-220 ИД (10–13):

1,5,10 – исходный; 2,6 – старение 50 ч; 3 – 140 ч; 4,12 – 280 ч; 7,11 – 100 ч; 8 – 150 ч; 9 – 200 ч; 12 – 180 ч

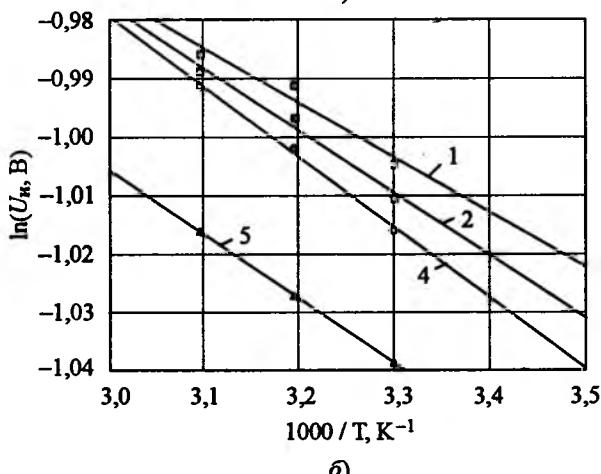
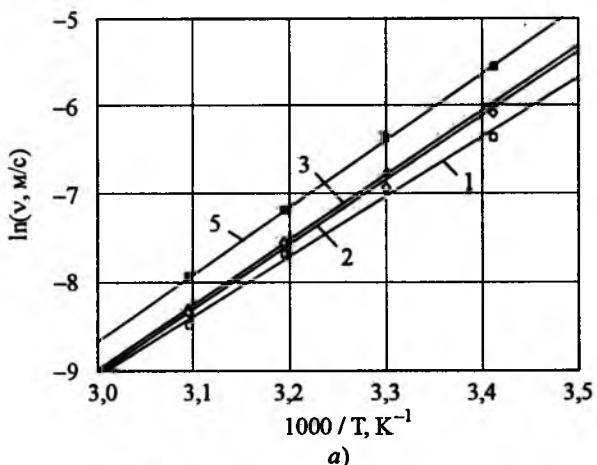


Рис.3. Зависимости  $\ln v = f(1/T)$  (а) и  $\ln U_n = f(1/T)$  (б) для смолы 3551 (Isola):

1 – исходная; 2 – тепловое старение 100 ч; 3 – 160 ч; 4 – 200 ч; 5 – 350 ч

Температурные зависимости кинематической вязкости и полной проводимости для указанных выше компаундов представлены на рис.1–3.

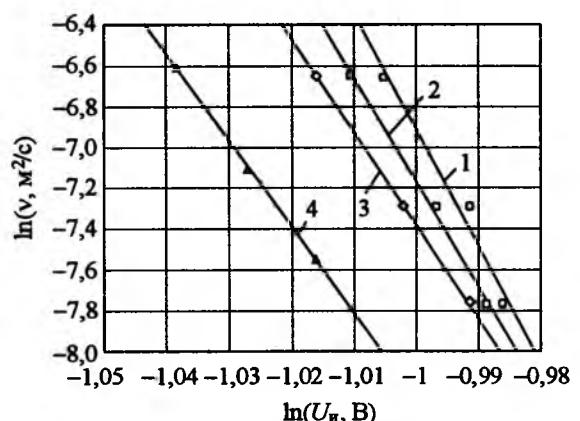


Рис.5. Зависимости  $\ln v = f(\ln U_n)$  для смолы 3551 ("Isola"):

1 – исходная; 2 – старение 100 ч; 3 – 200 ч; 4 – 350 ч

Установлено, что в полулогарифмических координатах полученные данные представляются линейными зависимостями вида  $\ln v(\ln U_n) = a - b/T$ , причём коэффициент корреляции во всех случаях не менее 0,998. Это позволяет представить связь между кинематической вязкостью и полной проводимостью для каждого состояния компаунда (степени старения) в виде функции  $\ln v = \alpha - \beta \ln U$  или

$$vU^\beta = e^\alpha = A. \quad (1)$$

Зависимости  $\ln v = f(\ln U_n)$  при различных временах старения полярных компаундов (эпоксидного и полизифиримидного) приведены на рис.4, для неполярного (кремнийорганического) – на рис.5.

Значения коэффициентов  $\beta$  и  $A$  представлены в табл.1.

Таблица 1

Коэффициент	Компаунд				
	Эпоксидный		Полиэфиримидный Элласт-220 ИД		
	ПК-11 (ЭД-22)	ПК-11 (DER)			
$\beta$ (для всех времен старения)	1,28	0,9	1,11	95	
$A$	$8,8 \cdot 10^{-5}$ ( $t=0 \div 150$ ч) $1,9 \cdot 10^{-4}$ ( $t=200$ ч)	$2,2 \cdot 10^{-4}$ ( $t=0 \div 280$ ч)	$3,2 \cdot 10^{-4}$ ( $t=0 \div 260$ ч)	$1,1 \cdot 10^{-95}$ ( $t=0$ ч) $7,0 \cdot 10^{-45}$ ( $t=100$ ч) $8,5 \cdot 10^{-45}$ ( $t=200$ ч) $10,2 \cdot 10^{-45}$ ( $t=350$ ч)	

Из данных рис.4,5 и табл.1 видно, что у всех компаундов степенной коэффициент  $\beta$  в формуле (1) сохраняется постоянным независимо от длительности старения. При этом у полярных компаундов  $\beta$  близок к 1, что указывает на сохранение правила Вальдена – Писаржевского. У кремнийорганических составов этот показатель чрезвычайно велик ( $\beta = 95$ ), что объясняется очень малыми диэлектрическими потерями ( $\operatorname{tg}\delta = 0,005 \div 0,015$ ), вследствие чего значение полной проводимости определяется только диэлектрической проницаемостью компаунда, слабо зависящей от его температуры и вязкости.

У полярных компаундов, для которых характерно существенное изменение диэлектрической проницаемости и потерь в диапазоне относительно низких температур ( $20 \div 60^\circ\text{C}$ ), наблюдается почти обратно пропорциональная связь между  $v$  и  $U_i$ , что определяет возможность использование  $U_i$  для оценки вязкости и, следовательно, состояния (старения) компаунда.

При этом у компаундов ПК-11 (DER) и Элласт-220ИД коэффициенты в соотношении (1) практически не зависят от степени старения компаундов, и её оценка может быть произведена по снижению  $U_i$ , фиксируемого при неизменной температуре. Для компаунда ПК-11 (ЭД-22) задача усложняется наличием зависимости коэффициента  $A$  от времени старения. В этом случае необходимо предварительными измерениями определить зависимость  $A$  от времени старения компаунда и вводить соответствующую поправку при расчёте вязкости по формуле (1).

#### Влияние длительности старения компаунда на процесс его отверждения

Применение диэлектрометрии для изучения кинетики отверждения широко известно [5–7].

При этом обычно используемыми характеристиками являются диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, коэффициент полной проводимости  $K_{\text{пп}}$ , равный отношению полной проводимости при низкой частоте (100 Гц) к полной проводимости на высокой частоте (100 кГц) [8].

Измерение ёмкости и  $\operatorname{tg}\delta$  проводились на частоте 1 кГц. Измерение  $K_{\text{пп}}$  и  $\operatorname{tg}\delta$  в динамическом режиме (при подъёме температуры с постоянной скоростью примерно  $1^\circ\text{C}/\text{мин}$ ) позволяет определить температуру начала отверждения  $T_{\text{н.о.}}$ . Кроме того, предполагая пропорциональность значения  $K_{\text{пп}}$  концентрации реакционных групп  $C_{\text{р.с}}$  и протекание реакции по известному закону [9]

$$C_{\text{р.с}} = A \exp(-t/\tau)$$

через  $K_{\text{пп}}$  можно определить постоянную времени химической реакции:

$$\tau = \frac{\Delta t}{\Delta \ln K_{\text{пп}}}. \quad (2)$$

Испытания проводились на стеклосялюдяных лентах, содержащих ускоритель, соответствующий компаунду (табл.2). Пропитка образцов проводилась при температуре  $50^\circ\text{C}$ .

Таблица 2

Пропиточный состав	Наименование пропитываемого материала
Смола 3551 ("Isola")	Самикапор
КО-50 Э	Элмикапор 53509-0,3У
Элласт-220 ИД	Элмикапор 53309
	без ускорителя отверждения
ПК-11(ЭД-22)	Элмикапор 53309-0,3У
ПК-11 (DER)	

### Исследование полярных компаундов (эпоксидных, полиэфиримидных)

Измерения показали, что характер температурных зависимостей исследованных диэлектрических характеристик ( $\operatorname{tg}\delta$ ,  $C$ ,  $K_{\text{пп}}$ ) одинаков. Температуры, соответствующие максимуму зависимостей  $\operatorname{tg}\delta(T)$  и  $K_{\text{пп}}(T)$  совпадают. Очевидно, при этой температуре  $T_{\text{н.о}}$  начинается интенсивное отверждение.

Необходимо отметить, что коэффициент полной проводимости является более информативным показателем отверждения, так как он позволяет получить количественную оценку постоянной времени отверждения.

Исследования показали, что влияние старения на параметры процесса термоотверждения эпоксидных компаундов ПК-11 (ЭД-22) и ПК-11 (DER) существенно различно. Для компаунда ПК-11 (DER) постоянные скорости реакции практически не изменяются вплоть до 500 ч старения, тогда как для ПК-11 (ЭД-22) даже при времени старения 100 ч  $\tau$  возрастает в 1,5 раза при 130°C и приблизительно в 4 раза – при 150°C (табл.3,4). Определение  $\tau$  этого компаунда при большем времени старения оказалось невозможным, так как зависимость  $\ln K_{\text{пп}}(t)$  становится нелинейной.

Различие интенсивности старения исследованных вариантов ПК-11 подтверждается характером изменения их вязкости от времени старения (рис.6). При этом критическое с точки зрения технологического использования значение вязкости для ПК-11(ЭД-22) достигается за время  $t \approx 230$  ч, в то время как для ПК-11(DER) в конце исследования (420 ч) оставался достаточный запас.

Таблица 3

$T, ^\circ\text{C}$	т,мин, при различных временах старения для ПК-11(DER), ч				
	0	48	186	233	520
130	6,5	6,6	7,4	7,5	8,1
150	4,8	5,1	7,6	8,2	8,2

Таблица 4

$T, ^\circ\text{C}$	т,мин, при различных временах старения для ПК-11(ЭД-22), ч		
	0	50	100
130	4,5	5,8	6,7
150	1,5	1,6	5,7

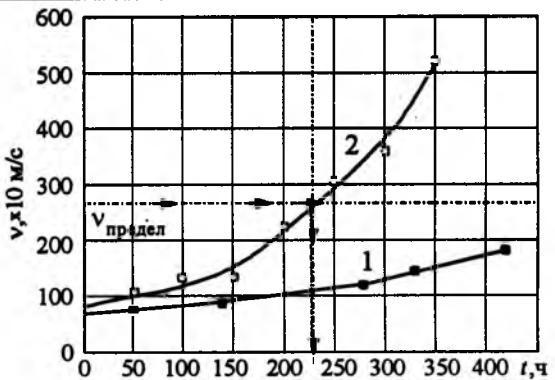
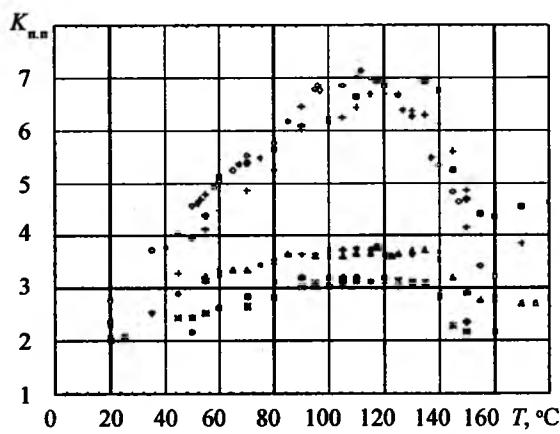


Рис.6. Зависимости вязкости от времени старения для компаунда ПК-11 (DER) (1) и ПК-11 (ЭД-22) (2)

Рис.7. Влияние времени старения на зависимость  $K_{\text{пп}}(T)$  для компаунда Элласт-220 ИД:

○ – исходный; + – старение 50 ч; ◻ – 100 ч; Δ – 200 ч;  
◆ – 280 ч; + – 350 ч; • – 500 ч

Старение компаунда на основе полиэфиримидной смолы: Элласт-220 ИД при 50°C приводит к значительному изменению характера отверждения (рис.7). При времени старения, превышающем 150 ч, максимум зависимости  $K_{\text{пп}}(T)$  становится "размытым", его значение снижается более, чем вдвое (с 7 до 3). Постоянная скорость реакции  $\tau$  при 160°C возрастает вдвое, а при 180°C – на порядок, причём резкое изменение  $\tau$  происходит при времени старения, превышающем 200 ч. Эти данные хорошо согласуются с результатами исследований в динамическом режиме и свидетельствуют о значительном изменении химической структуры.

### Исследование неполярных компаундов

Анализ полученных данных показал, что для компаундов на кремнийорганической основе ( $\epsilon = 2,3 \div 2,4$ ) судить об отверждении и измене-

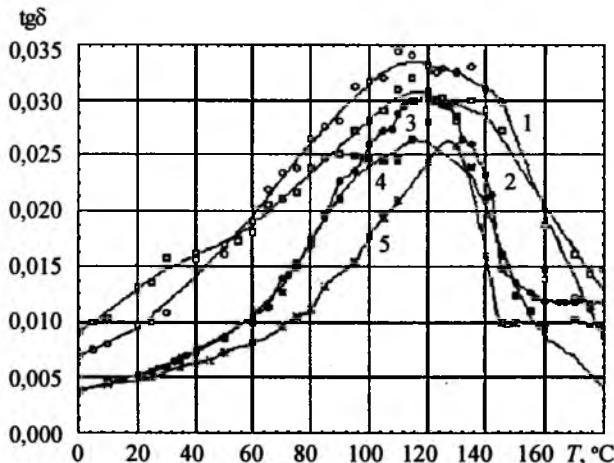


Рис. 8. Зависимость  $\text{tg}\delta$  ( $T$ ) для КО-50Э в процессе старения:

1 – исходный; 2 – старение 70 ч; 3 – 210 ч; 4 – 240 ч; 5 – 520 ч

### Выводы

1. Для пяти пропиточных компаундов, наиболее широко используемых в технологии вакуум-нагнетательной пропитки, получены данные по электрофизическим параметрам, характеризующим старение компаундов при их длительном использовании и процесс последующего отверждения в пропитанной конструкции.

2. Установлено, что у компаундов полярного типа (ПК-11, Элласт-220 ИД) связь между вязкостью и полной проводимостью на низкой частоте (100 Гц) описывается простым соотношением, близким к правилу Вальдена – Писаржевского. На основании этих данных может быть разработан относительно простой оперативный способ контроля состояния таких компаундов в технологическом процессе вакуум-нагнетательной пропитки.

3. Исследования изменения диэлектрических характеристик в процессе отверждения показали, что наиболее информативным является измерение коэффициента полной проводимости. Измерения  $K_{\text{пп}}$  позволяют определить температуру начала реакции отверждения, оценить постоянные времени этого процесса при разных температурах и относительную степень полимеризации (отверждения) связующего.

4. Установлено, что старение компаундов при рабочей температуре 50°C не только ухудшает их пропиточную способность из-за повышения вязкости, но и существенно снижает скорость процесса отверждения, степень полимеризации и, соответственно, цементирующую способность связующего.

### Список литературы

- Пинчук Н.Д., Пинский Г.Б., Петров В.В. Разработка и внедрение новых электроизоляционных материалов и систем термореактивной изоляции турбо-, гидрогенераторов // Электротехника. 2003. № 4. С. 17–27
- Левин С.М., Ножевникова Т.Е., Казакова Н.Ю. Перспективы совершенствования систем изоляции тяговых электрических машин // Электротехника. 2003. № 4. С.31–35.
- Ваксер Н.М., Старовойтенков В.В., Ступина В.С. Совершенствование технологии изготовления пропитанных изоляционных систем // Электросила. 2000. № 39. С.86– 91.
- Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. М.: Энергия, 1973. С. 327.
- Сажин Б.И., Лобанов А.М., Эйдельман М.П. и др. Электрические свойства полимеров. Л.: Химия, 1970. С. 376.
- Marvin L., Bromberg P. Measurement and application of dielectric properties // Electrical insulation Magazine. IFEE. 1986. В. 2, May 3, Р. 18–24.

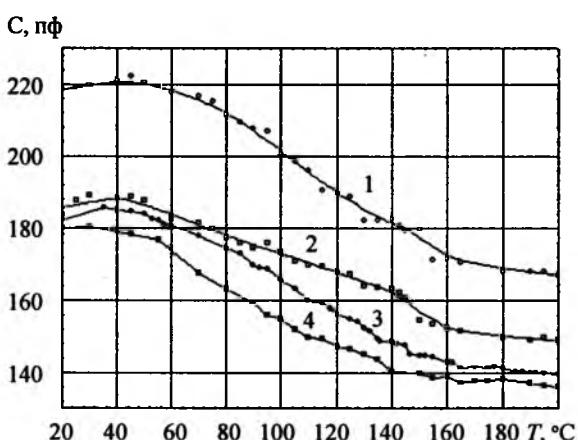


Рис. 9. Зависимость  $C$  ( $T$ ) для КО-50Э в процессе старения:

1 – исходный; 2 – старение 70 ч; 3 – 210 ч; 4 – 240 ч

ниих состояния при старении можно только по  $\text{tg}\delta$ . Для состава КО-50Э зависимость  $\text{tg}\delta(T)$  представлена на рис.8 для различных длительностей старения при температуре  $50 \pm 5^\circ\text{C}$ . Можно полагать, что максимум кривой  $\text{tg}\delta(T)$  соответствует началу отверждения. Как видно из рис.8, старение этого состава приводит к снижению диэлектрических потерь и смещению максимума  $\text{tg}\delta$  в зону более высокой температуры. При времени старения более 100 ч температура начала отверждения повышается от 130 до 150°C. Частичное отверждение при старении подтверждается и снижением ёмкости (рис.9), при этом характер зависимости  $C(T)$  типичен для неполярных материалов.

7. Лущекин Г.А. Диэлектрический мониторинг процесса отверждения термореактивных смол // Физика дизелектриков. Тез. докладов. СПб: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2000. Т.2. С. 222.

8. Ваксер Н.М., Преснов Ю.Л., Кочугова И.В. Непрерывный контроль процесса отверждения термореактивных составов // Пластические массы. 1981. № 11. С. 41–42.

9. Эммануэль Н.М. Курс химической кинетики. М.: Высшая школа, 1984. С. 463.

**Ваксер Нина Михайловна** – доцент кафедры "Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника" Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, канд. техн. наук. Окончила электромеханический факультет Ленинградского политехнического института им. Калинина в 1957 г. Защищила диссертацию по теме "Исследование слюдопластовых материалов повышенной нагревостойкости" в 1974 г.

**Зволинская Анастасия Юрьевна** – работает на кафедре "Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника" Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Окончила электромеханический факультет Санкт-Петербургского государственного политехнического университета в 2002 г.

**Лаврентьева Марина Юрьевна** – работает на кафедре "Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника" Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Окончила электромеханический факультет Ленинградского политехнического института им. Калинина в 1986 г.

**Сажин Борис Иванович** – профессор кафедры "Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника" Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор физ.-мат. наук. Окончил радиотехнический факультет Ленинградского политехнического института им. Калинина в 1953 г. Защитил диссертацию по теме "Прохождение электрического тока через полимерные диэлектрики" в 1971 г.

**Старовойтенков Виктор Валентинович** – доцент ГОУ ДПО "Петербургский Энергетический Институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов", канд. техн. наук. Окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института им. Калинина в 1979 г. Защитил диссертацию по теме "Исследование свойств современных жидкких диэлектриков" в 1989 г.

## Разработка покрытия ленточного типа для предотвращения краевых разрядов в изоляции электрических машин высокого напряжения

КОКЦИНСКАЯ Е.М., ВАКСЕР Б.Д., ГЕГЕНАВА А.Г., ПОЛОНСКИЙ Ю.А.

Представлены результаты исследования электрических характеристик полупроводящего ленточного покрытия в зависимости от типа подложки, дисперсности наполнителя (карбид кремния) и его процентного содержания. После проведённых расчётов и испытаний разработано ленточное полупроводящее покрытие для противокоронной защиты высоковольтных электрических машин.

Для предотвращения краевых разрядов на поверхности изоляции статорных обмоток электрических машин широко используются полупроводящие покрытия с нелинейной вольтамперной характеристикой ВАХ, образующейся благодаря наполнению покрытия мелкодисперсным карбидом кремния (SiC). Покрытия выполняются как в виде эмалей, так и в виде лент. За исключением более высокой стоимости полупроводящие ленты обладают рядом преимуществ перед эмалями [1]:

*The results of research electrical characteristics of semi-conductive tape layer in dependence of substrata type, granulometry of silicon carbide and its concentration. After accounts and tests semi-conductive tape layer for anti-corona protection of high voltage electrical machines is developed.*

– имеют высокую прочность и не повреждаются при укладке обмотки, что зачастую происходит в случае применения эмалей;

– накладываются при намотке основной изоляции, что позволяет устраниить трудоёмкий и экологически вредный процесс покраски секций обмотки.

Полупроводящие ленточные покрытия могут применяться как в системах изоляции, изготавливаемых на основе пропитанных лент, так и при использовании "сухих" лент и ваку-

ум-нагнетательной пропитки (ВНП). Полупроводящее ленточное покрытие накладывается на основную изоляцию до опрессовки перед отверждением или при ВНП до пропитки и отверждения.

Однако для системы изоляции с полной ВНП, заключающейся в пропитке обмотки, изолированной сухими лентами, после укладки её в сердечник, ленточные покрытия незаменимы, поскольку в полностью уложенной обмотке имеются места, недоступные для нанесения эмали.

Главная проблема использования полупроводящих лент при ВНП заключается в сохранении проводимости и нелинейности в процессе пропитки под действием пропитывающего состава.

При внедрении технологии полной ВНП на предприятии ОАО "Электросила" попытка использования ряда полупроводящих лент, изготовленных известными зарубежными фирмами, показала, что эти материалы значительно теряют нелинейность ВАХ под действием пропиточного компаунда ПК-11, применяемого для систем изоляции с нагревостойкостью 155°C. На рис.1 для сравнения приведены ВАХ, измеренные после ВНП, зарубежной полупроводящей ленты и ленты, полученной на начальном этапе данной работы.

Целью данной работы является поиск материала, т.е. подложки ленты и пропитывающего состава, устойчивого к воздействию компаунда ПК-11. Известно, что процесс изготовления изоляции по технологии ВНП включает этапы

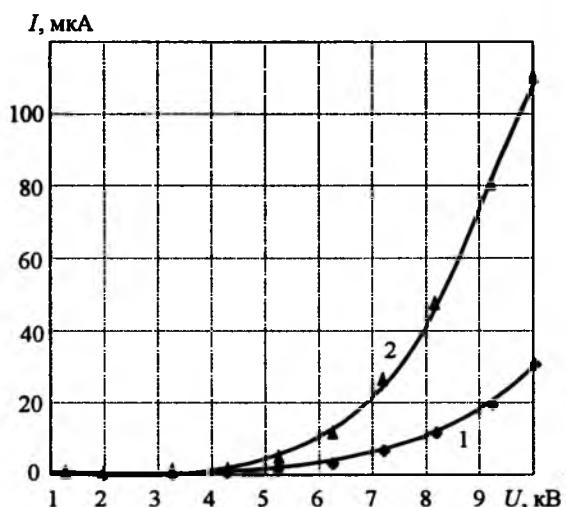


Рис.1. Сравнение ВАХ зарубежной (1) и разрабатываемой (2) полупроводящих лент

предварительной сушки при температуре 100–130°C, вакуумирования, пропитки под давлением при 55°C и последующего отверждения при 160°C. Очевидно, что для сохранения электрических свойств под действием компаунда ПК-11, пропитывающий состав полупроводящей ленты должен быть полностью отверждён на этапе предварительной сушки.

Исследования показали, что этот эффект может быть достигнут при использовании в качестве основы пропиточного состава модифицированного лака, применяемого для одного из типов пропитанных стеклослюдобумажных лент.

Варьировались типы подложек (стеклоткань, лавсановая бумага), дисперсность наполнителя – микропорошка карбида кремния (варианты (а) и (б)) и содержание его относительно основы лака. Образцы изготавливались в виде полос шириной 20 мм, толщиной около 0,5 мм. Подложка пропускалась через ванну с пропиточным составом, а затем между валками с регулируемым расстоянием между ними. Процентное содержание наполнителя варьировалось в определённых пределах по отношению к сухому остатку основе лака от № 1 до № 4. Изготовленные образцы полупроводящих лент накладывались на пластинки из стеклотекстолита с нанесёнными металлическими электродами и подвергались стандартному циклу ВНП. После этого измерялись их ВАХ на переменном токе. Количество измерений каждого варианта покрытия равнялось 10.

Прежде всего было установлено, что полупроводящие ленты на основе стеклоткани имели проводимость гораздо ниже, чем с подложкой из лавсановой бумаги, поэтому дальнейшие исследования, результаты которых представлены ниже, проводились только для последних.

Полученные результаты представлены в виде зависимости удельной продольной проводимости  $G$  от напряженности электрического поля  $E$  в координатах  $\ln G = f(E)$ . На рис.2 представлена зависимость с 95% доверительным интервалом для варианта ленты на лавсановой бумаге с содержанием № 4 карбида кремния (Б). Коэффициент корреляции  $r = 0,99449$ . Поскольку в координатах  $\ln G = f(E)$  ВАХ исследуемых в данной работе покрытий представляют собой прямые, следовательно, имеет место экспоненциальная зависи-

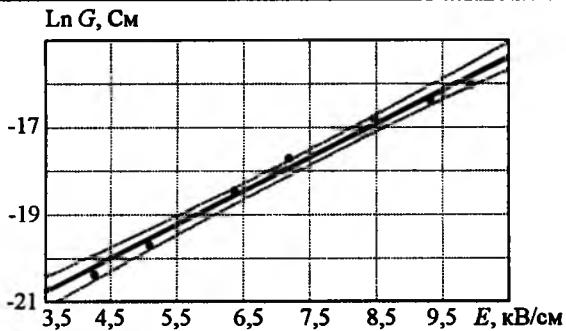


Рис.2. ВАХ полупроводящей ленты с содержанием № 4 карбида кремния (Б)

мость проводимости  $G$  от напряжённости  $E$  [2]:

$$G = G_0 \exp(\beta E), \quad (1)$$

где  $G_0$  – начальная проводимость покрытия;  $\beta$  – коэффициент нелинейности.

Для всех образцов были найдены параметры  $G_0$  и из формулы (1) (табл.1).

Таблица 1

Параметры зависимости проводимости от напряженности с различным содержанием карбида кремния в пропитывающем составе

Содержание SiC	Параметры зависимости (1)			
	A		Б	
	$G_0 \cdot 10^9$ , См	$\beta$ , см/кВ	$G_0 \cdot 10^9$ , См	$\beta$ , см/кВ
№ 1	0,18	0,08	0,021	0,82
№ 2	0,046	0,48	0,023	0,81
№ 3	0,030	0,63	0,038	0,80
№ 4	0,024	0,71	0,061	0,81

Средние значения, стандартные отклонения  $\sigma$  и коэффициенты вариации  $K_{\text{вар}}$  параметров  $G_0$  и  $\beta$ , а также коэффициента корреляции  $r$  зависимости  $\ln G = f(E)$  приведены в табл.2 для полупроводящей ленты с содержанием № 4 карбида кремния Б.

Таблица 2

Статистические характеристики параметров  $G_0$ ,  $\beta$  и  $r$  для полупроводящей ленты с содержанием № 4 карбида кремния Б

$G_0$		$\beta$		$r$	
$G_0 \cdot 10^9$ , См	$K_{\text{вар}}\%$	$\beta_{\text{ср}}, \text{см/кВ}$	$K_{\text{вар}}\%$	$r_{\text{ср}}$	$K_{\text{вар}}\%$
0,061	16,3	0,81	4,7	0,98848	0,6

Построенные по данным табл.1 ВАХ для всех вариантов полупроводящих лент приведены на рис.3. Зависимость проводимости от концентрации карбида кремния представлена на рис.4.

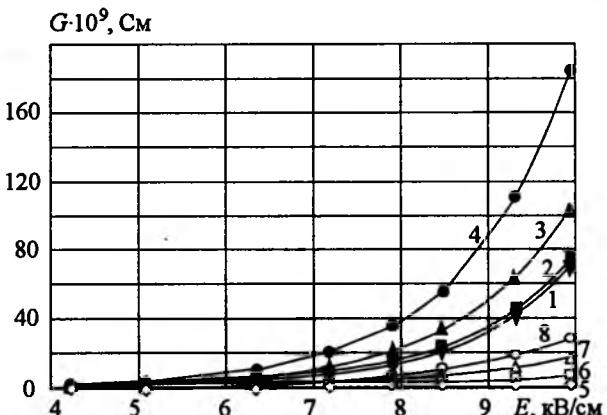


Рис.3. ВАХ полупроводящих ленточных покрытий с разной концентрацией карбида кремния:

1 – 4 – SiC Б; 5 – 8 – SiC А; 1, 5 – № 1; 2, 6 – № 2; 3, 7 – № 3; 4, 8 – № 4

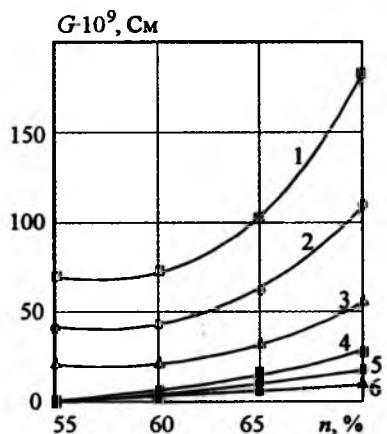


Рис.4. Зависимость проводимости  $G$  от концентрации  $n$  карбида кремния:

1 – 3 – SiC Б; 4 – 6 – SiC А; 1, 4 – при  $E = 9,9$  кВ/см; 2, 5 – при  $E = 9,3$  кВ/см; 3, 6 – при  $E = 8,5$  кВ/см

Из рис.3 и 4 видно, что самой высокой проводимостью обладают покрытия с концентрацией № 4 карбида кремния как А, так и Б.

Для вариантов на основе SiC А была определена предельная напряженность, при которой происходило перекрытие по поверхности либо образование проводящего канала в образце. Установлено, что это значение практически не зависит от концентрации карбида кремния, а существенное влияние оказывает шероховатость поверхности образцов и наличие на их поверхности тонкого слоя компаунда, остающегося после ВНП. Для всех вариантов предельная напряжённость электрического поля составила 10 кВ/см.

По программе, описанной в [3], были вычислены максимальные напряжённости в начале покрытия для лент с различными ВАХ, определяемыми концентрацией карбида кремния.

Расчёт производился для наиболее жёстких условий при испытаниях электрических машин, изготовленных методом полной ВНП:

Испытательное напряжение (амплитудное значение) $U_{исп\,м}$ , кВ	60,6
Длина покрытия $L$ , см	15
Относительная диэлектрическая проницаемость изоляции $\epsilon$	4,5
Толщина изоляции $d$ , мм	4

Также в программе использовались значения  $G_0$  и  $\beta$ , приведенные в таблицах. Полученные в результате расчёта напряжённости в начале покрытия представлены в табл.3.

Таблица 3

**Максимальные расчётные напряжённости в покрытиях, отличающихся содержанием карбида кремния и его дисперсностью**

Содержание SiC	$E_0$ , кВ/см	
	A	B
№ 1	25,2	7,9
№ 2	10,6	7,9
№ 3	9,2	7,5
№ 4	8,7	7,0

Из данных табл.3 видно, что при концентрации № 3, № 4 карбида кремния A и с концентрацией № 1-№ 4 карбида кремния B могут быть получены полупроводящие покрытия, у которых уровень максимальных нагрузок не превышает предельно допустимый.

Эффективность выбранного варианта ленточного покрытия оценивали на натурных макетах изоляции, на которых определяли напряжения образования поверхностных разрядов (свечения) и перекрытия. Были изготовлены макеты с изоляцией из сухих и пропитанных лент. Полупроводящая лента с концентрацией № 4 карбида кремния B с основой из лавсановой бумаги наматывалась с нахлестом в 1/4–2/3 ширины ленты. В табл.4 приведены результаты

Таблица 4

**Испытание макетов с полупроводящим ленточным покрытием**

Изоляция	Средняя толщина изоляции, мм	Длина покрытия, мм	Напряжение свечения, кВ	Напряжение перекрытия, кВ
Пропитанные ленты	2,0	79,0	27,0	51,0
Сухие ленты	2,8	61,0	21,0	49,5
Сухие ленты	2,3	100,0	20,4	61,0

измерений напряжения начала появления разрядов и напряжения перекрытия по поверхности макета. Напряжение начала появления разрядов определялось визуально в тёмной камере.

### Выводы

1. Установлено, что проводимость полупроводящих ленточных покрытий на основе лавсановой бумаги выше, чем на основе стеклоленты; максимальной проводимостью обладают ленты с концентрацией № 4 карбида кремния B.

2. По результатам расчётов и испытаний определено, что разработанное ленточное полупроводящее покрытие пригодно для изготовления изоляции как на основе пропитанных лент, так и методом полной вакуум-нагнетательной пропитки.

### Список литературы

1. Haberthur B. Corona protection in high voltage machines // BEAMA International Electrical Insulation Conference. Brighton, 1986. May 10-13. P. 20-27.

2. Thienpont J., Sie T. Supression of surface discharges in the stator windings of high voltage machines // CIGRE Paper. 1964. June 1-10.

3. Ваксер Б.Д., Гегенава А.Г. Подавление поверхностных разрядов в конструкции проходного изолятора с помощью резистивного покрытия // Электротехника. 2001. № 6. С. 52–55.

**Кокцинская Елена Михайловна** – аспирант кафедры "Электрическая изоляция, кабели и конденсаторы" ГОУ "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" (СПбГПУ). Окончила электромеханический факультет СПбГПУ в 2004 г.

**Ваксер Борис Давыдович** – начальник бюро высоковольтных испытаний лаборатории электрической изоляции ОАО "Силовые машины" филиал "Электросила". Окончил электромеханический факультет ЛПИ(СПбГПУ) в 1957 г. Кандидатскую диссертацию по теме "Исследование и усовершенствование изоляции электрических машин большой мощности с повышенными средними градиентами" защитил в 1967 г.

**Гегенава Анна Геннадиевна** – инженер бюро высоковольтных испытаний лаборатории электрической изоляции ОАО "Силовые машины" филиал "Электросила". Окончила электромеханический факультет ГОУ "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" в 1999 г. Кандидатскую диссертацию по теме "Исследование и усовершенствование противокоронных покрытий высоковольтных электрических машин" защитила в 2003 г.

**Полонский Юрий Александрович** – заведующий кафедрой "Электрическая изоляция, кабели и конденсаторы" электромеханического факультета ГОУ "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет", доктор техн. наук, проф. Окончил радиофизический факультет ЛПИ (СПбГПУ) в 1959 г. Защитил докторскую диссертацию в Институте химии силикатов АН СССР по тематике, связанной с разработкой и исследованиями высокотемпературных неорганических диэлектриков, в 1976 г.

# **Изменение проводимости полимерной плёнки в структуре многослойной изоляции электрических машин в процессе её изготовления**

БОРИСОВА М.А., ГАЛЮКОВ О.В., ПОЛОНСКИЙ Ю.А., ЦАЦЫНКИН П.В.

Изучены временные зависимости токов для слюдо-содержащих композиционных изоляционных материалов, пропитанных эпоксиноволачным связующим. Показано, что электрическая проводимость полимерных плёнок возрастает в случае их включения в композиции. Полученные результаты могут быть использованы при совершенствовании технологии и создании новых композиционных электроизоляционных материалов.

*The time dependences currents through samples of mica-containing composite impregnated epoxy bonding agent insulation materials were investigated. It is shown that electrical conductivity of polymer films included into the composite is increased. The obtained results may be useful both for improving of technology and for creation of new composite insulating materials*

Экспериментально установлено, что использование плёнок полиэтилентерефталата марки ПЭТ-Э в структуре многослойной композиции, состоящей из пропитанных эпоксиноволачным связующим слоев слюдопластовой бумаги и стеклоткани (СПМ-2), приводит к существенному увеличению кратковременной [1] и длительной [2] электрической прочности по сравнению с композицией, не содержащей плёнки. Так, время до пробоя изоляции монолит, содержащей слюдяную ленту и плёнку ПЭТ-Э (лента Элмикапор), в 4 раза больше, чем ленты без плёнки ЛСКО-180 [3].

Для изучения объёмно-зарядового состояния в композиционном материале с плёнкой ПЭТ-Э широко использовали метод токов термостимулированной деполяризации (ТСД) [4, 5]. При этом отмечено полное отсутствие максимума, характерного для плёнки ПЭТ-Э в спектре токов ТСД. Авторы [4] связывают этот факт с перераспределением заряда по толщине плёнки ПЭТ-Э и с накоплением заряда на границе раздела слоёв, входящих в структуру СПМ-2. При этом предполагают [5], чтонейтрализация этого заряда происходит при температурах, значительно превышающих рабочую температуру материала. Присутствием накопленного заряда объясняют увеличение длительной электрической прочности. Отсутствие на кривых спектров ТСД максимума, связанного с релаксацией заряда, характерного для плёнки ПЭТ-Э, в [4] связывается с различным механизмом транспорта заряда в разных слоях многослойного материала и невозможнос-

тью проникновения отрицательных ионов в слой ПЭТ-Э через границу раздела. Все высказанные гипотезы о причинах повышения электрической прочности с введением полимерной плёнки в композиционную изоляцию недостаточно обоснованы, противоречивы и нуждаются в экспериментальном подтверждении и более строгом теоретическом анализе.

Замена плёнки ПЭТ-Э на плёнку полииамида позволит расширить область рабочих температур композиционных материалов. До последнего времени не изучены и процессы взаимодействия полимерных плёнок с эпоксиноволачным связующим при пропитке и отверждении композиций, происходящих в условиях повышенного давления и температуры. В настоящей статье изложены некоторые результаты проведённых нами исследований, направленных на изучение влияния эпоксиноволачного связующего на электропроводность полимерных плёнок различного химического состава.

Изучение электропроводности полимерных плёнок в структуре многослойной изоляции производилось на модельных образцах композиционного материала (КМ), состоящего из пропитанных эпоксиноволачным связующим слоёв слюдобумаги (СБ), стеклоткани (СТ) и слоя полимерной плёнки. Для приготовления образцов использовались ленты Элмикаторм толщиной  $h = 130$  мкм, представляющие собой пропитанную связующим пару "СТ-СБ" (в дальнейшем СПМ). Ленты были изготовлены в заводских условиях и прошли всю необходимую обработку (сушка и т.д.) для окончательного от-

верждения в системе изоляции электрических машин. В качестве полимерного слоя в модельных образцах были взяты пленки полиэтилентерефталата марки ПЭТ-Э (Россия,  $h = 20$  мкм) и Майлар ( $h = 6$  мкм), а также пленки полиимида марок ПМ (КНР,  $h = 25$  мкм и 40 мкм) и ПМ-А (Россия,  $h = 40$  мкм). Полимерная пленка помещалась между слоями СПМ.

Исследование проводимости производилось путём измерения тока зарядки  $I(t)$ , где  $t$  – время протекания тока через образец, и падения напряжения в слоях образца, с последующим расчётом удельного электрического сопротивления  $\rho(t)$ . Токи и напряжения измерялись в изотермическом режиме при различных температурах. Структура модельного образца КМ и электрическая схема измерения тока и напряжений приведены на рис.1. Чтобы исключить токи утечки, которые могли быть обусловлены загрязнением поверхности пленки растекающимся связующим в процессе термопрессования, оставлялись закраины по пленке шириной не менее 1 см. Измерения падения напряжения на пленке проводились с использованием двух потенциальных зондов, расположенных по обе её стороны, выполненных из узких полосок отожженной алюминиевой фольги толщиной 5 мкм. Образец с электродами помещался в измерительную камеру на предварительно разогретую до необходимой температуры плоскую горизонтальную поверхность нагревателя. Для снижения неизбежного в такой конструкции градиента температуры по толщине образца сверху его накрывали толстой теплоизолирующей пластиной из фторопласта. Заземлённая подложка нагревателя изолировалась от образца с помощью тонкой пластины слюды.

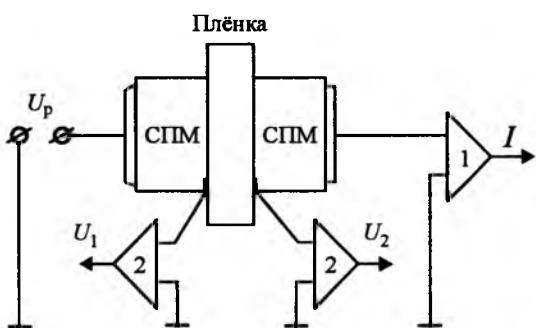


Рис.1. Электрическая схема измерений тока и напряжений в модельных композитах:

1, 2 – электрометрические усилители в режиме измерения тока (1) и напряжения (2)

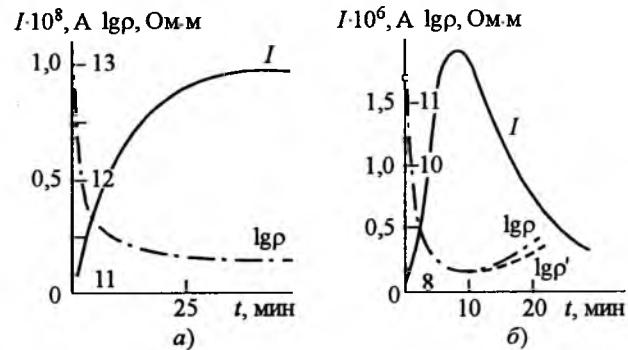


Рис.2. Экспериментальные зависимости тока  $I(t)$  и расчётные кривые удельного электрического сопротивления пленки  $\rho(t)$  в модельных структурах СПМ/ПЭТ-Э/СПМ при температурах 120°C (а) и 160°C (б). Кривая  $\lg \rho$  – расчёт по  $U_p = 185$  В, кривая  $\lg \rho'$  – расчёт по  $\Delta U$

Временные зависимости тока  $I(t)$  через образец КМ с пленкой ПЭТ-Э, измеренные при температурах 120 и 160°C, показаны на рис.2. Там же приведены зависимости расчётного удельного сопротивления пленки  $\rho(t)$ . Зависимости  $\rho(t)$  пленки были рассчитаны как с использованием приложенного ко всему образцу напряжения  $U_p$ , так и с учётом падения напряжения на пленке  $\Delta U = U_2 - U_1$ . Время от установки образца в камеру до начала измерений тока сводилось к минимуму. Видно, что в первые 10–15 мин после приложения напряжения наблюдается резкое возрастание зарядного тока, проходящего затем через максимум. Его значение в максимуме на 2–3 порядка превышает значение зарядного тока в исходной пленке ПЭТ-Э, наблюдавшегося в аналогичных условиях измерения. В течение первых 15 мин измерения практически всё приложенное напряжение (более 99%)  $U_p$  падает на пленке. Так как с течением времени электрическое сопротивление СПМ вследствие отверждения связующего растет [6], то увеличивается и напряжение, падающее на СПМ. Таким образом, расчёт  $\rho$  пленки можно производить с использованием напряжения  $U_p$  только на участке роста тока до максимума на кривой  $I(t)$ . При более длительном отверждении возрастает напряжение, падающее на СПМ, и поэтому для расчёта  $\rho$  пленки необходимо использовать  $\Delta U$ .

Наблюдаемый значительный рост тока  $I(t)$  в модельных структурах СПМ/ПЭТ-Э/СПМ свидетельствует об изменении электрической проводимости пленки, возрастающей на на-

чальной стадии отверждения образца на 1,5–2,5 порядка в зависимости от температуры. Резкое увеличение проводимости пленки, по нашему мнению, объясняется проникновением в толщу пленки при повышенной температуре компонента (компонентов) связующего, обладающего более высокой по сравнению с исходной пленкой проводимостью. С большой вероятностью можно предположить, что этим веществом является растворитель, содержащийся в лаке, либо его пары.

Последующий за максимумом спад зарядного тока может быть объяснен совокупностью причин. Вероятно, это обусловлено установлением межслоевой поляризации, происходящей на фоне непрерывного перераспределения зарядов на границах раздела СПМ/пленка в связи с изменением проводимости слоев во времени. Если сопротивление СПМ непрерывно растёт в процессе отверждения связующего, то возрастающая вначале проводимость пленки может со временем снижаться вследствие уменьшения концентрации свободных носителей.

В пользу высказанного предположения о влиянии именно растворителя на увеличение проводимости пленки свидетельствуют результаты следующего эксперимента. Ленты Элмикатерм были предварительно высушены при 100°C в течение 3 ч. При таком режиме сушки практически весь растворитель, содержащийся в связующем, испаряется, но заметного отверждения ещё не происходит. Токи зарядки, измеренные при 160°C на образце СПМ/ПЭТ-Э/СПМ с высушенными лентами, были почти на 2 порядка меньше, чем в структуре с исходными слоями СПМ. Вид кривой  $I(t)$  с максимумом сохранился, а удельное сопротивление пленки в точке максимума тока составляло  $2,5 \cdot 10^{10}$  Ом·м, что на порядок меньше, чем у исходной пленки при той же температуре:  $\rho = 2,5 \cdot 10^{11}$  Ом·м.

В экспериментах на образцах КМ с односторонним расположением СПМ (СПМ/ПЭТ-Э) эффект снижения удельного сопротивления пленки выражен существенно слабее. Так, при 180°C минимальное значение  $\rho$  пленки на порядок выше, чем в образцах типа СПМ/ПЭТ-Э/СПМ (рис.3). Кроме того, в образцах типа СПМ/ПЭТ-Э прослеживается зависимость этого явления от полярности приложенного напряжения. При отрицательной полярности напря-

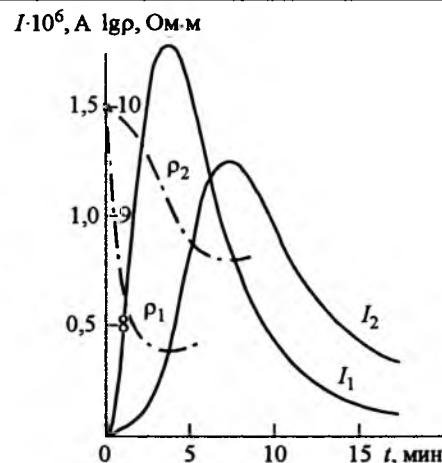


Рис.3. Экспериментальные зависимости  $I(t)$  и расчётные кривые  $\rho(t)$  пленки в модельных структурах СПМ/ПЭТ-Э/СПМ (1) и СПМ/ПЭТ-Э (2) при 180°C.  $U_{p1} = 30$  В,  $U_{p2} = 6,7$  В

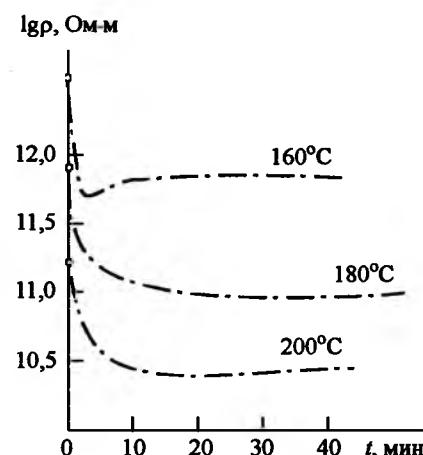


Рис.4. Зависимости  $\rho(t)$ , рассчитанные из  $I(t)$  в структурах СПМ/ПМ-А/СПМ.  $h_{\text{ПМ-А}} = 40$  мкм

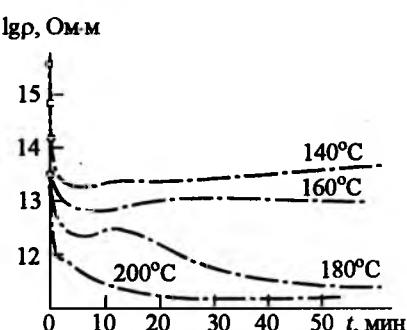


Рис.5. Зависимости  $\rho(t)$ , рассчитанные из  $I(t)$  в структурах СПМ/ПМ/СПМ.  $h_{\text{ПМ}} = 25$  мкм

жения на электроде, примыкающем к СПМ, эффект снижения  $\rho$  пленки заметно сильнее. В структурах с тонкой пленкой – Майлар ( $h = 6$  мкм) снижение удельного сопротивления

$\rho(t)$  происходит быстрее и больше, чем в случае относительно толстой плёнки – ПЭТ-Э ( $h = 20$  мкм).

Аналогичные описанным выше измерения были проведены на модельных образцах КМ с полиимидной плёнкой ПМ (КНР, 25 мкм и 40 мкм) и ПМ-А (Россия, 40 мкм). Рассчитанные из кривых  $I(t)$  зависимости  $\rho(t)$  плёнки в структурах типа СПМ/ПМ/СПМ и СПМ/ПМ-А/СПМ для разных температур приведены на рис.4, 5. Здесь также видны значительные изменения проводимости плёнок, наступившие после выдержки модельного образца КМ с полиимидной плёнкой даже при относительно низкой для данного термостойкого материала температуре.

Таким образом, прослежены закономерности изменения электропроводности полимерных плёнок полиэтилентерефталата и полиимида в композиции со слоями СПМ, пропитанными эпоксиноволачным связующим в процессе отверждения при повышенных температурах. Установлено значительное увеличение проводимости плёнок уже в начальной стадии отверждения при температурах выше 100°C. В полностью отверждённой композиции, где плёнка заключена между толстыми слоями СПМ, отделяющими ее от внешней среды, произошедшие в плёнке изменения длительное время сохраняются. Полученные результаты могут быть использованы при совершенствовании существующей технологии изготовления и создании новых композиционных электроизоляционных материалов для электромашиностроения.

#### Список литературы

1. Пак В.М. Успехи в создании и применении композиционных материалов на основе полимерной плёнки для изоляции вращающихся электрических машин // Электротехника. 2001. № 6. С. 15–21.
2. Андреев А.М., Ваксер Н.М., Куимов И.Е. и др. Композиционные материалы на основе слюдопластовой бумаги и полимерной плёнки // Электротехника. 2000. № 6. С. 44–47.

3. Пак В.М. Усовершенствование термореактивной изоляции крупных электрических машин. Дис. ... докт. техн. наук: 05.09.02 / Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. СПб.: СПбГПУ, 2002.

4. Драчев А.И., Пак В.М., Гильман А.Б., Кузнецов А.А. Объёмно-зарядовые процессы, протекающие под действием электрического поля в многослойном материале с плёнкой ПЭТ-Э // Электротехника. 2002. № 4. С. 26–29.

5. Пантелеев Ю.А., Полонский Ю.А. Термоактивационные спектры слюдосодержащих композиционных электроизоляционных материалов для электрических машин // Электротехника. 2002. № 4. С. 13–17.

6. Веснеболоцкий А.И. Контроль отверждения термореактивных смол по измерению их электропроводности // Электротехническая промышленность. Электротехнические материалы. 1975. № 12.

**Борисова Маргарита Эдуардовна** – профессор кафедры "Электрическая изоляция, кабели и конденсаторы" электромеханического факультета ГОУ "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет", доктор техн. наук. Окончила радиофизический факультет ЛПИ (СПбГПУ) в 1958 г. В 1991 г. защитила докторскую диссертацию по теме "Накопление и релаксация заряда в электроизоляционных полимерных плёнках".

**Галюков Олег Викторович** – ведущий инженер кафедры "Электрическая изоляция, кабели и конденсаторы" электромеханического факультета ГОУ "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет". Окончил радиофизический факультет ЛПИ (СПбГПУ) в 1965 г.

**Полонский Юрий Александрович** – заведующий кафедрой "Электрическая изоляция, кабели и конденсаторы" электромеханического факультета ГОУ "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет", доктор техн. наук, проф. Окончил радиофизический факультет ЛПИ (СПбГПУ) в 1959 г. В 1976 г. защитил докторскую диссертацию в Институте химии силикатов АН СССР по тематике, связанной с разработкой и исследованиями высокотемпературных неорганических диэлектриков.

**Цацынкин Павел Владимирович** – инженер кафедры "Электрическая изоляция, кабели и конденсаторы" электромеханического факультета ГОУ "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет". Окончил электромеханический факультет СПбГПУ в 2000 г.

# Компьютерный расчёт диэлектрической проницаемости материалов при измерениях волноводным методом в диапазоне СВЧ

МАСЛЯКОВ С.А., ПОЛОНСКИЙ Ю.А.

Изложены принципы решения трансцендентных уравнений типа  $\operatorname{tg} x/x = C$  применительно к задаче расчёта диэлектрической проницаемости ( $\epsilon'$ ) при измерениях короткозамкнутым вариантом волноводного метода с применением современной компьютерной техники. Разработана программа для расчётов  $\epsilon'$  материалов при измерениях волноводным методом с использованием современного компьютерного языка C++ и компьютерной библиотеки вычислений MAPM.

Электромагнитные поля сверхвысоких частот (СВЧ) в настоящее время все шире используются в различных областях человеческой деятельности – от энергетики (например, термоядерные реакторы с магнитным удержанием плазмы) до бытовой техники (например, микроволновые печи). При этом в подавляющем большинстве случаев СВЧ излучение на пути от генератора до потребителя проходит через твёрдый диэлектрик, диэлектрические свойства которого (в первую очередь, диэлектрическая проницаемость) определяют эффективность использования энергии, генерируемой источником сверхвысоких частот. В связи с этим представляет актуальный интерес совершенствование методов измерений материалов в диапазоне СВЧ и способов обработки результатов этих измерений. Учитывая, что во многих случаях при этом необходимо исследовать температурную зависимость диэлектрических свойств материалов, в том числе при температурах более 1000°C, целесообразно для таких измерений использовать короткозамкнутый вариант волноводного метода. Однако расчёт диэлектрических параметров по первичным результатам измерений, полученных этим методом, представляет определенные трудности, связанные с решением соответствующих трансцендентных уравнений и многовариантностью конечных расчётных результатов. Настоящая работа посвящена решению этой проблемы с использованием современной компьютерной техники.

*There are explained principles of numerical solution for transcendental equations in the form of  $\operatorname{tg} x/x = C$ . These equations are used in the problem of determination of dielectric permittivity ( $\epsilon'$ ) using the slotted short-cut waveguide method. The special software was designed to compute  $\epsilon'$  using this method. C++ programming language and MAPM library were used to implement the software.*

При определении диэлектрической проницаемости материалов с помощью короткозамкнутого варианта волноводного метода возникает необходимость решать уравнения вида:

$$\frac{\operatorname{th} Z}{Z} = W, \quad (1)$$

где  $W$  – комплексная константа, определяемая по результатам проведения эксперимента;  $Z$  – комплексная величина, напрямую связанная с комплексной диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon^*$ ).

В свою очередь величина  $\epsilon^*$  может быть выражена через действительную диэлектрическую проницаемость ( $\epsilon'$ ) и тангенс угла диэлектрических потерь ( $\operatorname{tg}\delta$ ) следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon^* = \epsilon' + i\epsilon''; \\ \operatorname{tg}\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}, \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $\epsilon''$  – мнимая составляющая диэлектрической проницаемости.

Различные авторы [1–11] решали уравнения (1) по-разному. Были предложены графики-табличные (с использованием таблиц функции  $\operatorname{tg}x/x$ ) [1], графические [2–4], приближённые численно-графические [5], численные [6–11] методы. С развитием вычислительной техники и удешевлением высокоскоростных ЭВМ наиболее точным и эффективным методом стало решение этих уравнений программным способом.

Уравнения (1) в своей оригинальной форме являются на порядок более сложными для решения, так они не только трансцендентны, но и их аргумент является комплексным числом. Некоторые современные авторы [7] предпринимали попытки решения прямо на комплексной плоскости (алгоритм реализован на микро-ЭВМ типа "Электроника-60" с процессором М-2). Однако этот подход сложен на этапе выбора точки начального приближения (ТНП), являющейся входным аргументом алгоритма оптимизации, который предположительно должен сойтись к искомому корню выражения. Неправильный выбор ТНП приведёт к тому, что алгоритм сойдётся к ложному корню. Предложенная авторами [7] методика выбора ТНП основана на использовании набора приближённых обратных функций, которые определяются на различных интервалах области определения исходной функции. Однако при этом авторы не комментируют критерии выбора интервалов, обратных функций и не приводят принципов оценки качества приближённой функции. Таким образом, этот метод является нестрогим и не гарантирует нахождение истинных корней.

Другой подход [8] с использованием ЭВМ и программированием на языке "Паскаль" основывается на преобразовании исходного выражения в систему двух нелинейных алгебраических уравнений с целью раздельного нахождения действительной и мнимой частей  $\epsilon^*$ . Авторы этого метода не обосновывают ключевой момент всего расчёта: они не приводят доказательств того, что выбранный ими метод половинного деления (дихотомии) применим к используемым ими выражениям. В частности, если функция на интервале решения имеет разрывы, сингулярности или не является монотонной, то метод дихотомии не может гарантировать сходимость. Так что выбранная авторами реализация может давать правильный результат только в случае выбора ТНП в ближайшей окрестности истинного корня.

Другие, более старые, работы с применением ЭВМ использовали либо сильно упрощённые уравнения [5], либо далекие от оптимальности численные методы [6] (длительность расчёта составляет 8–12 мин) и [9–11] (язык Fortran IV).

С учётом анализа предшествующих публикаций и при добавлении ряда новшеств авторами настоящей работы был предложен новый метод решения уравнений вида (1). Ключевыми элементами этого подхода являются:

1. Раздельное нахождение  $\epsilon'$  и  $\operatorname{tg} \epsilon$ .
2. Определение  $\epsilon'$  через решение уравнения вида:

$$\frac{\operatorname{tg} x_1}{x_1} = C_1. \quad (3)$$

3. Предварительное деление всего интервала поиска решений на подинтервалы, заключённые между асимптотами тангенсоиды.

4. Доказанность наличия одного и только одного корня функции (3) на каждом из подинтервалов.

5. Использование интеллектуального адаптивного поиска отрезка решения уравнения на каждом из подинтервалов.

6. Использование компьютерной библиотеки вычислений с произвольной точностью (МАРМ).

Примерный вид графика рассматриваемой функции (3), построенного на ЭВМ с учётом её особенностей, представлен на рис.1. Здесь сплошными линиями показан график самой функции, а пунктиром – положения асимптот.

Математический анализ функции (3) приведён в [12], где доказывается, что функция является монотонно-возрастающей между асимптотами и изменяет свое значение в пределах  $(-\infty; +\infty)$ . Это даёт возможность гаран-

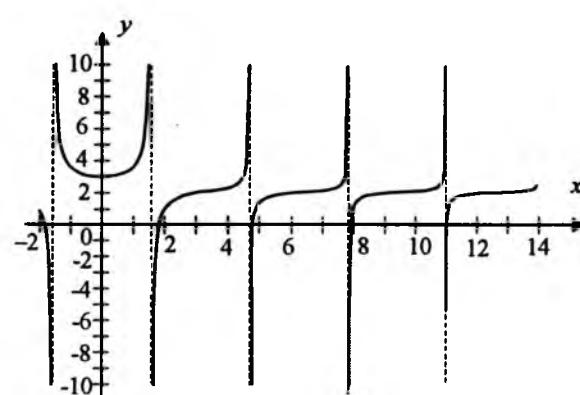


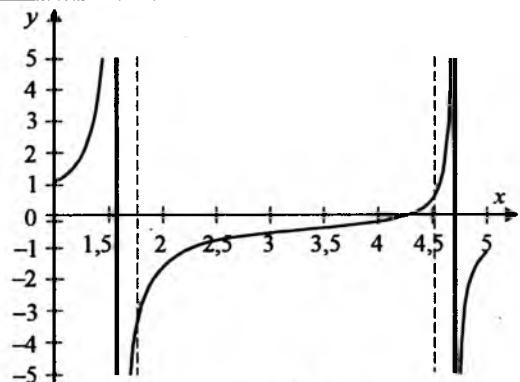
Рис.1. График функции  $y = \frac{\operatorname{tg} x}{x} + 2$

тировать нахождение строго одного корня на каждом из подинтервалов. В [12] описывается работа нового предложенного алгоритма адаптивного выбора отрезка подинтервала, на котором будет производиться поиск корней.

До недавнего времени точность вычислений была ограничена возможностями типов данных, встроенных в язык C++ [13], на котором написана наша программа расчётов. Это приводило к сложностям при поиске корней, особенно в районе асимптот, где из-за ошибок округления могли случаться потери корней.

Как было отмечено выше, алгоритм решения основывается на делении заданного интервала на множество подинтервалов. Каждый из них представляет собой открытый с обоих концов интервал, заключённый между соседними асимптотами соответствующей тангенсоиды. В силу заложенных в архитектуру особенностей цифровая ЭВМ обладает способностью представлять только закрытые интервалы [12]. Таким образом, возникает вопрос, как описать требуемые открытые интервалы.

Проблема ещё больше усложняется из-за того, что асимптоты проходят через точки, вычисляемые как некоторые функции иррационального числа  $\pi$ , т.е. также являются иррациональными числами. Точность представления любого числа в цифровой ЭВМ ограничена. Таким образом, иррациональные числа приводятся к ближайшим умещающимся в отведённой памяти рациональным числам в ущерб точности. Например, реально хранимое в памяти компьютера значение  $\pi$  может отличаться от её истинного значения на некоторую величину в меньшую сторону. Однако нельзя утверждать, что значение некоторой функции, рассчитанной на основании этого "смещённого" значения  $\pi$ , будет также отличаться от его истинного значения в меньшую сторону. Это приводит к образованию некоторой окрестности асимптоты, где отсутствует гарантия точного результата вычисления функции. В процессе работы алгоритма поиска корня важно не допускать попадания любой из рассчитываемых точек в упомянутую окрестность, которая определяется точностью используемого типа данных.



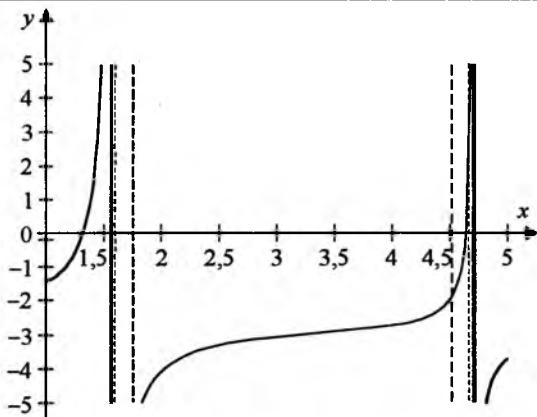


Рис.3. График функции  $y = \frac{\operatorname{tg} x - 3}{x}$

Таким образом, необходимо обеспечить возможность приближения алгоритма вычислений как можно ближе к асимптотам. При этом значения должны быть на десятки порядков меньшими, чем упомянутые 0,2 и 0,04. Эта точность скажется не столько на определении положения отрезка поиска решения, сколько на точности вычислений по мере приближения к асимптотам.

Практика расчётов показала, что если корень попадает в  $\varepsilon$ -окрестность асимптоты радиусом менее  $10^{-9}$ , то при использовании стандартных встроенных типов данных могут теряться решения.

Выход был найден в виде использования компьютерной библиотеки вычислений МАРМ [14]. Эта библиотека позволяет производить вычисления широкого спектра элементарных функций, включая тригонометрические, с неограниченной точностью. Она написана на языке С, но для нее также существует интерфейс для языка С++, реализованный как набор классов. Учитывая, что исходная версия нашей программы расчётов диэлектрической проницаемости была написана на языке С++, интеграция библиотеки являлась сугубо программистской задачей. Однако из-за отсутствия подобного инструментария во время разработок, проводившихся предшествующими авторами или из-за выбора языка программирования, сделанного ими, они не имели возможность использовать библиотеку вычислений с произвольной точностью. В нашей работе она была применена впервые в рамках решаемой задачи.

Необходимо отметить, что при использовании МАРМ точность ограничена объёмом памяти, установленной в ЭВМ. Однако оценочные значения таковы, что точность порядка нескольких тысяч десятичных знаков может использоваться при наличии 128 Мбайт памяти. Быстродействие результирующей программы при заданной точности в 150 десятичных знаков на процессоре Intel® Celeron™ с тактовой частотой 533 МГц составило менее 2 с на один корень, что является приемлемым для решаемой задачи.

## Выводы

1. Разработана программа расчётов диэлектрической проницаемости материалов при измерениях волноводным методом с использованием современного компьютерного языка С++ и компьютерной библиотеки вычислений МАРМ.

2. Модификация метода дихотомии для решения уравнений, соответствующих кусочным функциям с использованием адаптивной коррекции границ интервалов, позволила избежать ограничений оригинального метода, которые приводили к выборочной случайной потере корней.

3. Применение библиотеки вычислений МАРМ с неограниченной точностью дало возможность почти полностью избежать ограничений, обусловленных архитектурой современных цифровых ЭВМ. Кроме того, выявлены возможности применения этой библиотеки для высокоточных расчётов, которые могут быть полезными в дальнейшем.

## Список литературы

1. Dielectric Materials and Applications Cambridge (USA): Technology Press of MIT, 1954.
2. Redheffer R.M., Wildman R.C., O'Gorman V. The Computation of Dielectric constant // Journal Applied Physics. 1952. Vol. 23, № 5. P. 505–508.
3. Bowie D.M., Kelleher K.S. Rapid Measurement of Dielectric Constant and Loss Tangent // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1956. Vol. MTT-4, № 3. P. 137–140.
4. Лебедева Г.Н. Графический расчёт электрических параметров диэлектриков при измерении методом короткого замыкания // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. 1966. № 4. С. 79–83.
5. Pentecost J.L. Electrical Evaluation of Radome Materials// Radome Engineering Handbook. Design and Principles. New York: M. Dekker, 1970. P. 345–387.
6. Watkins J., Brown D. Calculation of the Complex Permittivity of Lossy Dielectric Materials Using the Roberts-von Hippel Standing-Wave Method. Computer Program Description //

Electronics Letters. 1969. Vol. 5, № 11. P. 243–244.

7. Бабченко Г.А., Меркулова О.Н. Решение уравнений  $\text{th}Z/Z = W$  и  $\text{cth}Z/Z = W$  с комплексными переменными в специализированной микропроцессорной системе для исследования СВЧ диэлектрических характеристик материалов // Заводская лаборатория. 1995. № 6. С. 34–36.

8. Шилова М.В., Федосеева Н.В., Планкина С.М. Изменение диэлектрической проницаемости и угла диэлектрических потерь в твердых диэлектриках в диапазоне СВЧ // Физика твердого тела. Лабораторный практикум. М.: Высшая школа, 2001. С. 167–187.

9. Nelson S.O., Schlaphoff C.W., Stetson L.E. A Computer Program for Short-Circuited Waveguide Dielectric Properties Measurements on High- or Low-Loss Materials // Journal Microwave Power. 1973. Vol. 8, № 1. P. 13–22.

10. Nelson S.O., Schlaphoff C.W., Stetson L.E. Computation of Dielectric Properties from Short-Circuited Waveguide Measurements on High- or Low-Loss Materials (Computer Program Description) // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1974. Vol. MTT-22, № 3. P. 342–343.

11. Nelson S.O., Stetson L.E., Schlaphoff C.W. A General Computer Program for Precise Calculation of Dielectric Properties from Short-Circuited Waveguide Measurements // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1974. Vol. IM-23, № 4. P. 455–460.

12. Масляков С.А. Методика гарантированного нахождения решения уравнения в задаче определения свойств диэлектриков волноводным методом // Материалы VII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы "Фундаментальные исследования в технических университетах".

20–21.06.2003. Санкт-Петербург. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. С. 85–86.

13. Stroustrup B. The C++ Programming Language (Special 3<sup>rd</sup> edition). Reading , Massachusetts, USA: Addison-Wesley Professional, 2000.

14. Ring M. MARM, A Portable Arbitrary Precision Math Library in C // C/C++ Users Journal. 2001. № 11.

**Масляков Сергей Александрович** – аспирант кафедры "Электрическая изоляция, кабели и конденсаторы" ГОУ "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" (СПбГПУ). В 1997 г. окончил Санкт-Петербургскую государственную академию аэрокосмического приборостроения по специальному "Вычислительные машины, комплексы, системы и сети". В 1999 г. окончил Texas Tech University (Lubbock, TX USA) с получением степени Master of Science in Electrical Engineering.

**Полонский Юрий Александрович** – заведующий кафедрой "Электрическая изоляция, кабели и конденсаторы" электромеханического факультета ГОУ "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет", доктор техн. наук, проф. Окончил радиофизический факультет ЛПИ (СПбГПУ) в 1959 г. В 1976 г. защитил докторскую диссертацию в Институте химии силикатов АН СССР по тематике, связанной с разработкой и исследованиями высокотемпературных неорганических диэлектриков.

## Новые электроизоляционные материалы для систем изоляции турбо-, гидрогенераторов и тяговых двигателей

ПАПКОВ А.В., МЕЛЬНИЧЕНКО А.П., ПАК В.М., КУИМОВ И.Е.

Новые электроизоляционные материалы для систем изоляции турбо-, гидрогенераторов и тяговых электродвигателей. Приведены основные свойства новых электроизоляционных материалов для корпусной изоляции статорной обмотки и коробки роторного паза турбо-, гидрогенераторов, а также усовершенствованные электроизоляционные материалы класса F и H для изоляции тяговых электродвигателей.

В течение почти 50 лет Холдинговая компания "Элинар" производит слюдосодержащие материалы практически для всех типов вращающихся электрических машин. За этот период ассортимент, качество и надёжность

*Main properties of new electrical insulating materials for conductor insulation of stator winding and rotor slot box of turbo-, hydrogenerators, as well as improved electrical insulating materials for F and H thermal rating classes for the insulation of traction motors are represented in this paper.*

электроизоляционных материалов и систем изоляции на их основе непрерывно повышались благодаря проводимым работам по их совершенствованию и развитию. В данной статье приведены результаты этой работы за последние годы.

## Электроизоляционные материалы (ЭИМ) для систем изоляции турбо-, гидрогенераторов и высоковольтных электрических машин

Программа непрерывного развития производства электроизоляционных слюдяных лент для высоковольтной изоляции разработана для решения следующих задач:

- разработка и совершенствование предварительно пропитанных лент с повышенным содержанием слюды, высокими электрическими и механическими характеристиками для системы изоляции класса нагревостойкости F;

- разработка и совершенствование непропитанных лент с повышенным содержанием слюды, высокой пористостью для применения в технологии вакуум-нагнетательной пропитки.

При разработке предварительно пропитанной ленты марки Элмикатерм 52409 использовалось эпоксиноловачное связующее, стеклоткань и слюдяная бумага с улучшенными показателями. Лента Элмикатерм 52409 может выпускаться с разделительной пленкой (в этом случае в наименовании добавляется индекс 3). В табл.1 приведены сравнительные характеристики предварительно пропитанных лент основных мировых производи-

телей. Анализ данных показывает, что основные показатели новой ленты находятся на уровне продукции ведущих зарубежных фирм.

На основании данных исследований физико-механических свойств различных систем изоляции определено, что изоляция на основе ленты Элмикатерм 52409 обладает более высокими характеристиками, особенно при высоких температурах, изоляция имеет более высокую стабильность физико-механических свойств в широком интервале температур, включая рабочие температуры.

Требования к композиционному составу непропитанных лент примерно такие же, как и для предварительно пропитанных лент: максимальное снижение толщины подложки и соответствующее увеличение поверхностной плотности слюдяной бумаги. Из-за наличия небольшого количества технологического связующего в непропитанной ленте слюдяная бумага может легко повреждаться при изолировочных работах. Поэтому для сохранения целостности и снижения вероятности повреждения слюдяного барьера должны быть существенно повышенны адгезионная прочность слюдяной бумаги к подложке и эластичность ленты. Повышение длительной

Таблица 1

Показатель	Элмикатерм 52409		Элмикатерм 52409-3	Самикатерм 366.28	Кальмикаглас 2005
Толщина, мм	0,14±0,02	0,18±0,02	0,18±0,02	0,18±0,02	0,18±0,02
Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	195 ± 25	250 ± 25	260 ± 25	265 ± 26	258 ± 23
Массовая доля компонентов, г/м <sup>2</sup> :					
– слюда	85 ± 5	120 ± 7	120 ± 7	120 ± 7	120 ± 5
– связующее вещество	72 ± 12	92 ± 15	104 ± 15	113 ± 20	105 ± 15
– стеклоткань	38 ± 4	38 ± 4	38 ± 4	32 ± 3	33 ± 3
Удельная разрушающая нагрузка при растяжении, Н/см	> 150	> 150	> 150	> 150	> 150
Тангенс угла диэлектрических потерь:					
– M (15-35C) 45–75%		< 0,02		< 0,02	< 0,02
– M (155C) < 20%		< 0,09		< 0,10	< 0,10
Текучесть связующего вещества в ленте, %		40 – 70		> 45	> 45

Таблица 2

Показатель	Элмикапор 53319	Самикапор 366.55-10	Поробанд МЕ 2072
Номинальная толщина, мм	$0,15 \pm 0,03$	$0,15 \pm 0,03$	$0,14 \pm 0,02$
Поверхностная плотность, $\text{г}/\text{м}^2$	$194 \pm 15$	$195 \pm 15$	$201 \pm 20$
Массовая доля компонентов, $\text{г}/\text{м}^2$ :			
– слюда, $\text{г}/\text{м}^2$	$160 \pm 15$	$160 \pm 10$	$160 \pm 15$
– стеклоткань	$27 \pm 4$	$23 \pm 2$	$24 \pm 2$
– связующее вещество	$7 \pm 3$	$12 \pm 3$	$17 \pm 3$
Удельная разрушающая нагрузка при растяжении, $\text{Н}/\text{см}$	>80	>80	$\geq 80$
Пробивное напряжение, кВ	>1,5	-	$\geq 1,5$
Пористость по Герлею, с/100 мл	<800	<800	$\leq 800$
Массовая доля ускорителя, $\text{мг}/\text{мм}^2$	$450 \pm 120$	$480 \pm 120$	$400 \pm 100$
Жёсткость, $\text{Н}/\text{м}$	<60	<75	-

электрической прочности и снижение диэлектрических потерь кроме того определяется типом используемого катализатора, так как именно катализатор определяет количество и степень отверждения связующего вещества в обмотках катушек.

Проведенные исследования в ОАО "ХК Элинар" и испытания макетов в ОАО "Электросила" и ОАО "Привод" привели к разработке нового класса непропитанных лент с катализатором на основе солей цинка.

В табл.2 приведены технические характеристики ленты Элмикапор 53319 0,15 У. Для сравнения даны характеристики широко используемых в настоящее время лент производства "Von roll isolat" и "ISOVOLTA".

Сравнение технических характеристик показывает практически полную идентичность лент как по композиционному составу, так и по физико-механическим показателям.

Для противокоронной защиты пазовых частей обмотки высоковольтных электрических машин, турбо-, гидрогенераторов специалистами ОАО "ХК Элинар" разработана лента проводящая полизэфирная марки ЛПП-400.

Для подтверждения возможности использования данной ленты в ОАО "УЭТМ" были проведены сравнительные испытания ленты ЛПП-400 и ленты 215.55 ("Von roll isolat"). В процессе испытаний измеряли сопротивление образцов лент длиной 230 мм в процес-

се пропитки в эпоксидном компаунде при температуре 130°C. Результаты испытаний показали, что ленты практически идентичны и в процессе пропитки происходит увеличение сопротивления ленты от 4 до 140–180 кОм, что полностью удовлетворяет требованиям к изготовлению высоковольтного электрооборудования.

#### Основные технические характеристики ленты ЛПП-400

Номинальная толщина, мм .....	0,10
Предельное отклонение от номинальной толщины, мм .....	$\pm 0,02$
Поверхностная плотность, $\text{г}/\text{м}^2$ .....	$80 \pm 10$
Удельная разрушающая нагрузка при растяжении в продольном направлении, $\text{Н}/\text{см}$ , не менее .....	30
Относительное удлинение при разрыве, %, не менее .....	15
Поверхностное сопротивление, Ом .....	$400 \pm 100$

Новым направлением в развитии производства электроизоляционных материалов в ОАО "ХК Элинар" стало освоение производства пазовых коробок роторов турбогенератора марки КПТБ, которые предназначены для применения в качестве корпусной изоляции обмотки роторов турбогенераторов с системами изоляции класса нагревостойкости F.

КПТБ представляет собой прессованную композицию, состоящую из слоев электроизоляционной ткани из стеклянных, кручёных комплексных нитей и арамидной бумаги (Номекс 410), пропитанных модифицированным эпоксидным связующим.

Габаритные размеры: длина – до 12000 мм; ширина – до 150 мм; высота – от 10 до 30 мм; толщина – от 0,5 до 2,5 мм.

#### **Физико-механические показатели пазовых коробок**

Электрическая прочность перпендикулярно слоям (одноминутное проверочное испытание) в условиях М / 23°C / трансформаторное масло, кВ <sub>эфф</sub> /мм, не менее .....	20
Испытание коробки испытательным переменным напряжением 50 Гц (одноминутное проверочное испытание), кВ .....	6–10
Разрушающее напряжение при изгибе перпендикулярно слоям, МПа, не менее .....	250

Стандартные формы: L- и S-образная, другие конфигурации и габаритные размеры – по заказу.

#### **Электроизоляционные материалы для систем изоляции тяговых электродвигателей (ТЭД)**

В последние годы усилия специалистов были сосредоточены на разработке собственных ЭИМ для формирования всего комплекса ЭИМ систем изоляции ТЭД. В качестве примера в табл.3 приведена конструкция системы изоляции ТЭД НБ 418 К-6 электрозвоза ВЛ-80.

В данной системе изоляции предложен ряд новых ЭИМ.

#### **1. Слюдопласт формовочный марки Элмикаформ 324 Пл**

Слюдопласт Элмикаформ 324 Пл предназначен для изготовления коллекторных манжет и фасонных изоляционных деталей электрических машин и аппаратов с системами изоляции класса нагревостойкости F (155°C) по ГОСТ 8865. Его отличительными характеристиками по сравнению с используемыми

в настоящее время формовочными микалитами являются отличные электрические характеристики за счёт использования полиэтилентерефталатной плёнки, лёгкость и удобство при формировании, низкая разнотолщинность заготовок, что исключает отбраковку манжет по толщине изоляции.

Слюдопласт Элмикаформ 324 Пл изготавливается номинальной толщиной: 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45; и 0,50 мм.

Основные технические характеристики слюдопласта Элмикаформ 324 Пл приведены в табл.4.

#### **2. Компаунд пропиточный электроизоляционный марки ПК-11(э)**

Компаунд ПК -11(э) предназначен для пропитки обмоток высоковольтных электрических машин и тяговых электродвигателей с системами изоляции класса нагревостойкости F по ГОСТ 8865.

#### **Основные технические характеристики компаунда ПК-11(э)**

Внешний вид .....	Однородная прозрачная масса от светло-желтого до коричневого цвета
-------------------	--

Наличие механических включений ....	Отсутствие
Условная вязкость по вискозиметру ВЗ-246 (диаметр сопла 4 мм)	
при температуре (40±2) °C, с, не более .....	40
Время желатинизации при температуре (150±2) °C, ч .....	10–20
Электрическая прочность, кВ/мм, не менее .....	25

#### **3. Мастика электроизоляционная термореактивная марки МЭТ-155**

Для герметизации пустот в обмотках электрических машин и аппаратов с системами изоляции класса нагревостойкости F по ГОСТ 8865 в ОАО "ХК Элинар" разработана мастика электроизоляционная термореактивная марки МЭТ-155. Мастика представляет собой однородную пластичную массу на основе термореактивного связующего вещества и слюдяного наполнителя, не содержащую растворитель.

Таблица 3

Тип изоляции	Наименование материала	Класс нагревостойкости
<b>Якорная обмотка</b>		
Обмоточный провод	ПЭТСО	F
Витковая изоляция	Лента слюдяная пропитанная Элмикатерм 524019 0,08x20	F
Корпусная изоляция катушек	Лента слюдяная пропитанная Элмикатерм 524019 0,10x20	F
Покровная изоляция	Стеклолента ЛЭС 0,10x20	H
Пазовая изоляция Пазовая коробка	Изофлекс 191 0,17	F
Клин пазовый	Стеклотекстолит СТЭФ или СТЭФ-1	F
Межламельная изоляция коллектора	Элмикаласт 1440 или слюдопласт коллекторный КИФЭ 1,3; 1,4 мм	F
Коллекторные манжеты	Элмикаформ 324 Пл 0,5 мм, Формовочный миканит ФФП 0,5 мм Препрег ПСС 0,15 мм	F
Межслойная изоляция	Элмика 423 0,25 – 0,45 мм	F
Бандаж	Лента стеклобандажная ЛСБЭ-155	F
Пропиточный состав	Компаунд пропиточный ПК-11(э) (состав без растворителя)	F
Герметизирующий состав	Мастика электроизоляционная МЭТ – 155	F
<b>Уравнительная катушка</b>		
Корпусная изоляция катушек	Лента слюдяная пропитанная Элмикатерм 524019 0,10x20	F
<b>Статорная обмотка</b>		
<b>Катушки главного полюса</b>		
Междупитковая, межслойная изоляция	Элмикафлекс 44309 0,25 – 0,50 мм	
Корпусная изоляция	Лента слюдяная пропитанная Элмикатерм 524019 0,13x30	F
Покровная изоляция	Стеклолента ЛЭС 0,2x35	H
Пропиточный состав	Компаунд пропиточный ПК-11(э) (состав без растворителя)	F
<b>Катушки добавочного полюса</b>		
Междупитковая, межслойная изоляция	Элмикафлекс 44509 0,25 – 0,50 мм	H
Корпусная изоляция	Лента слюдяная пропитанная Элмикатерм 529029 0,10x30	H
Покровная изоляция	Стеклолента ЛЭС 0,10x20	H
Пропиточный состав	Компаунд пропиточный ПК-11(э) (состав без растворителя)	F
<b>Компенсационная катушка</b>		
Междупитковая изоляция	Элмикафлекс 44509 0,25 – 0,50 мм	H
Корпусная изоляция	Лента слюдяная пропитанная Элмикатерм 524019 0,10x30	F
Пазовая изоляция	Изофлекс 191 0,17	F
Покровная изоляция	Лента термоусаживаемая ПЛЭ(у) 0,18x25	F

Таблица 4

Показатель	Методы испытания	Значение
Электрическая прочность в исходном состоянии, кВ/мм, не менее – средняя – в отдельных точках	ГОСТ 26103 ГОСТ 6433.3	40 32
Массовая доля компонентов, %: – летучих веществ, не более – неорганической части, не менее	ГОСТ 26103 МЭК 371-2	1 70
Удельное объёмное электрическое сопротивление, Ом · м, не менее, после выдержки в условиях: 18 ч (15 – 35 °C) 45 – 75 % 48 ч (23 °C) 93 %	ГОСТ 26103 МЭК 371-2	$10^{11}$ $10^8$

### Основные свойства мастики МЭТ-155

Внешний вид и цвет .....	Однородная масса от светло-серого до чёрного цвета
Плотность, г/см <sup>3</sup> .....	$1,5 \pm 0,2$
Содержание слюды, % .....	55 4
Время отверждения, ч, не более .....	2,5
Электрическая прочность, кВ/мм, не менее ....	4,5

В зависимости от назначения и способа применения мастика может выпускаться по требованию заказчика от низковязкого до высоковязкого состояния, при этом сохраняются все электрические показатели.

### ЭИМ класса нагревостойкости Н

В связи с требованиями изготавителей тяговых электродвигателей по повышению класса нагревостойкости изоляции в ОАО "ХК Элинар" разработаны ленты слюдяные пропитанные марки Элмикатерм 529029 и 529099, которые предназначены для изоляции электрических машин и аппаратов с системами изоляции класса нагревостойкости Н по ГОСТ 8865.

Лента Элмикатерм 529029 представляет собой композицию, состоящую из слюдяной бумаги, ткани электроизоляционной из стеклянных кручёных комплексных нитей и полимидной плёнки, склеенных между собой и пропитанных электроизоляционным компаундом.

Основные технические характеристики ленты слюдяной пропитанной марки Элмикатерм 529029 приведены в табл.5.

Лента марки Элмикатерм 529099 представляет собой композицию, состоящую из слюдяной бумаги и ткани электроизоляционной из стеклянных кручёных комплексных нитей, склеенных между собой и пропитанных электроизоляционным компаундом.

Основные технические характеристики ленты слюдяной пропитанной марки Элмикатерм 529099 приведены в табл.6.

Ленты Элмикатерм 529029 и 529099 имеют высокие электрические свойства при повышенных температурах, технологичны и могут перерабатываться на стандартном оборудовании по действующим технологическим режимам. Технологическое опробование на ряде заводов ОАО "РЖД" показало, что обе ленты с успехом могут заменить используемые сегодня микаленты марок ЛФК-ТТ, ЛМК-ТТ.

### Электроизоляционные материалы для обмоточных проводов

В процессе работы изоляционная система электрических машин подвергается комплексному воздействию электрических, механических и тепловых нагрузок. Особую роль в длительной и надежной работе электрической машины играет витковая изоляция. Тенденция к снижению толщины витковой изоляции наблюдается практически у всех ведущих фирм производящих электрические машины.

ОАО "ХК Элинар" разработало новую серию композиционных материалов на основе слюдяных бумаг и полиэфирных плёнок для изоляции обмоточных проводов (класс нагревостойкости F). Конструкция и основные технические характеристики данных материалов выпускаемых под торговой маркой Элмикатерм приведены в табл.7.

Таблица 5

Показатель	Методы испытания	Элмикатерм 529029	
Номинальная толщина, мм	ГОСТ 26103, МЭК 371-2	0,08±0,01	0,10±0,01
Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	ГОСТ 26103, МЭК 371-2	126±20	152±26
Массовая доля компонентов, %: – слюды, не менее – связующего вещества – летучих веществ, не более	ГОСТ 26103, МЭК 371-2	25 25 ± 5 1,5	25 25 ± 5 1,5
Удельная разрушающая нагрузка при растяжении, н/см, не менее	ГОСТ 26103, МЭК 371-2	60	80
Электрическая прочность, кВ/мм, не менее	ГОСТ 26103, ГОСТ 6433.3, МЭК 371-2	50	70

Таблица 6

Показатель	Методы испытания	Элмикатерм 529099	
Номинальная толщина, мм	ГОСТ 26103, МЭК 371-2	0,13 ± 0,02	0,15 ± 0,02
Поверхностная плотность, г/мм <sup>2</sup>	ГОСТ 26103, МЭК 371-2	222±30	236±30
Массовая доля компонентов, %: – слюды, не менее – связующего вещества – летучих веществ, не более	ГОСТ 26103, МЭК 371-2	25 32 ± 5 1,5	25 32 ± 5 1,5
Удельная разрушающая нагрузка при растяжении, н/см, не менее	ГОСТ 26103, МЭК 371-2	240	240
Электрическая прочность, кВ/мм, не менее	ГОСТ 26103, ГОСТ 6433.3, МЭК 371-2	20	18

Таблица 7

Марка	Толщина, мм	Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>			Пробивное напряжение, кВ, не менее	Удельная разрушающая нагрузка, Н/см, не менее
		ленты	слюдяной бумаги	плёнки		
Элмикафол® 52801	0,07	111 ± 10	75	28	5	20
	0,09	125 ± 10	75	42	7	20
Элмикафол® 528011	0,10	143 ± 15	75	42/14	7	30

Лента марки Элмикафол® состоит из слюдяной бумаги Элмика® на основе кальцинированного мусковита, пропитанной модифицированным эпоксидным связующим, и полиэфирной плёнки в качестве подложки. Элмикафол® марки 528011 содержит полиэфирные плёнки с двух сторон. Внешняя сторона полиэфирной плёнки может быть покрыта специальным ад-

гезивом с температурой плавления около 120°C. Такие ленты имеют в условном обозначении индекс "А". Благодаря наличию адгезива элементарные проводники с витковой изоляцией на основе лент марки Элмикафол® могут быть склеены друг с другом путём кратковременного прессования (5–10 мин) при температуре 120 – 140°C. Кроме того, наличие адгезионного

слоя на полизэфирной плёнке повышает адгезию корпусной изоляции к витковой изоляции как при технологии вакуум-нагнетательной пропитки, так и на предварительно пропитанных лентах.

ООО "Москабель-обмоточные провода" разработал серию обмоточных проводов с плёнкослюдосодержащей изоляцией на осно-

ве лент марки Элмикафол®. Данный провод прошел широкомасштабные испытания на ведущих предприятиях – производителях высоковольтных электрических машин и трансформаторов. В результате подтверждены высокие электрические свойства и технологичность проводов на основе лент марки Элмикафол®.

## Влияние тонкого слоя, нанесённого методом ионно-плазменного осаждения из паров циклогексана, на электрическую прочность плёнки ПЭТФ

ФЁДОРОВА С.С. , ДРАЧЁВ А.И., ГИЛЬМАН А.Б., ПАК В.М.

Структура тонкого слоя, нанесённого на плёнку из полиэтилентерефталата с помощью ионно-стимулированного осаждения из газовой фазы циклогексана, исследована методами электронной спектроскопии для химического анализа и ИК-спектроскопии. Показано, что в состав плёнки входят линейные цепи  $(-\text{CH}_2)_n$ ; шестичленные кольца, в том числе с заместителями – карбонильными группами, а также углеродные цепочки, не содержащие водорода. Установлено, что синтезированное из циклогексана в плазме покрытие обладает полупроводящими свойствами. Нанесение на поверхность плёнки ПЭТФ (толщиной 30 мкм) такого покрытия толщиной 10–120 нм приводит к росту объёмной электропроводности материала в интервале температур 20–200°C и к существенному повышению электрической прочности.

Известно, что плёнки из полиэтилентерефталата (ПЭТФ), благодаря хорошим диэлектрическим характеристикам, используются в качестве электрической изоляции в составе композиционного электроизоляционного материала, состоящего из чередующихся слоёв стеклоткани и слюдяной бумаги, пропитанных эпоксидной смолой с последующим термоотверждением [1], а также в металло-плёночных конденсаторах [2]. Для повышения ресурса электрической прочности элек-

The structure of the thin layer deposited on the poly(ethylene terephthalate) film from cyclohexane by the ionic-plasma deposition method was investigated by ESCA and IR-spectroscopy. It is shown, that the film structure consists of the linear  $(-\text{CH}_2)_n$  chains; six-membered rings, including some carbonyl groups as substitutes, and also carbon chains, free of hydrogen. It is established, that the coating synthesized from cyclohexane has semiconductive properties. Deposition of the coating with 10–120 nm thickness on the PET film surface results in propagation of volume conductivity of the material in a temperature interval from 20 to 200°C and in essential increase of electric strength.

тронных устройств, в которых применяется плёнка ПЭТФ, важной задачей является увеличение её стойкости в сильных электрических полях.

Одним из эффективных путей решения этой задачи может служить нанесение тонких функциональных слоёв на поверхность плёнки с использованием плазмы [3]. Этот метод позволяет осуществлять нанесение тонких слоёв с хорошей адгезией к поверхности полимера, использовать в качестве ис-

ходных практически любые органические и элементоорганические соединения, а также, варьируя условия в плазме, получать очень тонкие покрытия различного состава, в том числе типа  $\text{SiO}_2$  [4] или углеродных структур [5, 6]. Так, известно, что осаждение плазмохимическим способом слоя  $\text{SiO}_2$  толщиной 1 мкм на поверхности плёнки ПЭТФ толщиной 10 мкм позволяет существенно повысить стойкость таких плёнок к действию высокointенсивных газовых разрядов [7].

В данной работе исследованы электрофизические характеристики и структура поверхности плёнок ПЭТФ с тонким покрытием, полученным из циклогексана методом ионно-плазменного осаждения.

Использовали двухосно-ориентированную плёнку ПЭТФ электротехнического назначения производства Владимирского химического завода толщиной 30 мкм. Покрытие толщиной 10–120 нм получали в плазме из газовой фазы циклогексана (ПЭТФ+ППЦГ) по методике, подробно описанной в [8].

Состав и химическую структуру плёнок изучали методами электронной спектроскопии для химического анализа (ЭСХА) и ИК-Фурье-спектроскопии.

Спектры ЭСХА получали на рентгеновском фотоэлектронном спектрометре Riber SIA-100 с анализатором MAC-2 ( $\text{MgK}_{\alpha}$ , 100 Вт, 15 кВ, 20 мА). Положение пиков (энергии связи) калибровали по стандартному пику  $\text{C}_{1s}$  (284,6 эВ) [9].

ИК-спектры регистрировали с помощью Фурье-спектрометра Bruker Equinox 50S в области 400–4000  $\text{cm}^{-1}$  с 500-кратным накоплением при шаге сканирования 2  $\text{cm}^{-1}$ . Для проведения измерений плёнку на основе циклогексана толщиной 120 нм осаждали в плазме на пластине KBr размером 1×4 см. Отнесение полос поглощения проводили согласно [10].

Плёнку характеризовали значениями краевых углов смачивания ( $\theta$ ); рабочими жидкостями служили вода (бидистиллят) и глицерин; измерения проводили гoniометрическим методом (точность  $\pm 1^\circ$ ). Экспериментальные значения  $\theta$  использовали для расчёта поверхностной энергии ( $\gamma$ ), её полярного ( $\gamma^p$ ) и дисперсионного ( $\gamma^d$ ) компонентов по методике [11].

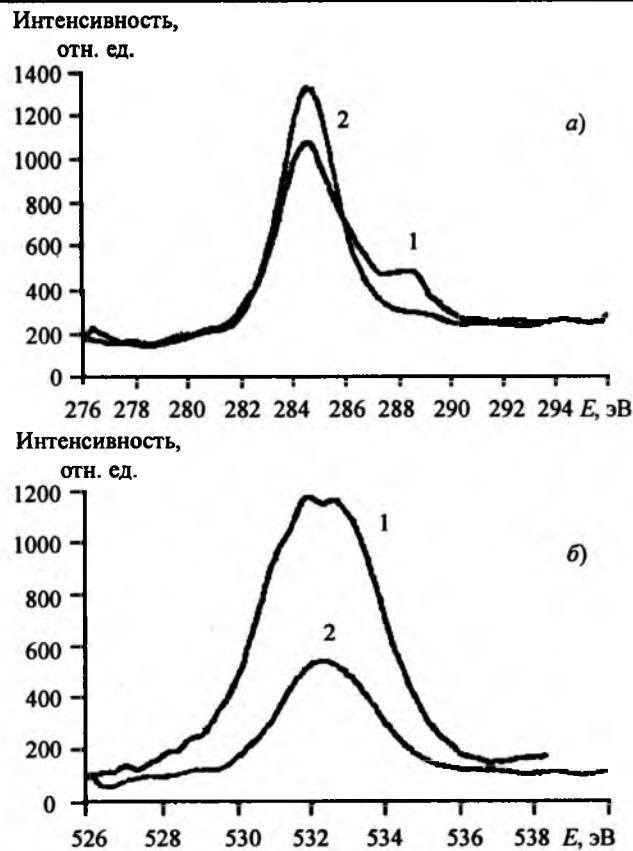


Рис.1. Спектры ЭСХА атомов углерода  $\text{C}_{1s}$  (а) и кислорода  $\text{O}_{1s}$  (б) плёнок ПЭТФ (1) и ПЭТФ+ППЦГ (2)

Таблица 1

Плёнка	O/C
Исходный ПЭТФ	0,40
ПЭТФ+ППЦГ	0,12

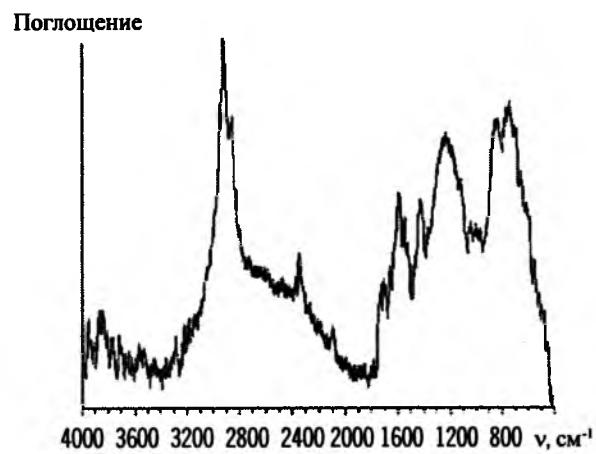


Рис.2. ИК-спектр поглощения полимерного слоя, полученного из циклогексана в плазме

Для изучения электропроводности плёнок ПЭТФ+ППЦГ использовали напылённые алюминиевые электроды, которые наносили на обе поверхности образца методом термического распыления металла в вакууме ( $\sim 10^{-5}$  мм.рт.ст). Объёмную электропроводность измеряли в электрическом поле  $10^7$  В/м в режиме медленного нагрева со скоростью 0,5 град/мин. Перед измерением образцы выдерживали в поле  $10^7$  В/м при начальной температуре  $20^\circ\text{C}$  в течение 3 ч. За это время токи смещения, связанные с изменением положения равновесия связанных зарядов (полярных фрагментов макромолекул) под действием электрического поля, уменьшались до крайне низких значений, и основную роль в токах проводимости полимера играли процессы, связанные с транспортом зарядов, способных перемещаться на расстояния, значительно превышающие межатомные. Таким образом измерялась остаточная электропроводность в объёме плёнки ПЭТФ+ППЦГ.

Для исследования объёмной проводимости плёнки, полученной из циклогексана в плазме (ППЦГ), было проведено её осаждение ионно-плазменным способом на полированную поверхность проводящей (легированной бором) кремниевой пластины. Затем на открытую поверхность плёнки ППЦГ толщиной 100 нм методом вакуумного термического распыления наносили тонкий слой алюминия.

Определение электрической прочности плёнки ПЭТФ+ППЦГ проводили на воздухе при воздействии переменного электрического поля частотой 50 Гц одновременно на 14 образцов исходной плёнки ПЭТФ и 14 образцов плёнки ПЭТФ+ППЦГ [12].

Полученные значения напряжённостей пробоя ( $E$ ) были описаны с помощью трёхпараметрического уравнения Вейбулла. На практике любой изоляционный материал характеризуется максимальной напряжённостью поля, при которой пробоя еще не происходит ( $E_0$ ). В связи с этим в задачах высоковольтной техники при описании и анализе данных используется ограниченное снизу распределение Вейбулла [13]:

Таблица 2

Плёнка	Угол смачивания $\theta$ , град		Поверхностная энергия $\gamma$ , мДж/м <sup>2</sup>		
	По воде	По глицерину	$\gamma$	$\gamma^p$	$\gamma^d$
ПЭТФ	66	55	39,2	16,3	22,9
ПЭТФ+ППЦГ	77	61	37,3	7,0	30,3

$$F(x) = \begin{cases} 1 - \exp \left[ - \left( \frac{E - E_0}{E_{63} - E_0} \right)^\delta \right] & t > t_0; \\ 0 & t \leq t_0, \end{cases}$$

где  $E_{63}$  – напряженность поля, при которой вероятность пробоя составляет 63% (63%-ный квантиль распределения);  $E_0$  – максимальная напряжённость, при которой пробоя ещё не происходит;  $\delta$  – дисперсия (показатель экспоненты Вейбулла).

Параметры трёхпараметрического распределения Вейбулла были получены с помощью математической обработки экспериментальных выборок времен пробоя по методу моментов [13].

На рис.1 представлены спектры ЭСХА углерода C<sub>1s</sub> (а) и кислорода O<sub>1s</sub> (б) для исходной плёнки ПЭТФ (1) и плёнки ПЭТФ+ППЦГ (2). Видно, что углеродные и кислородные пики в спектре плёнки ПЭТФ имеют сложный характер, который связан с присутствием различных типов связей: C–C (284,6 эВ); C=O (288,4 эВ и 532 эВ); C–O–O–C (532,7 эВ) [9]. В спектрах плёнки ПЭТФ+ППЦГ углерод представлен в основном в виде C–C связей (284,6 эВ), найдено также некоторое количество кислорода (12 атом. %, табл.1) в виде C=O связей (532 эВ). Наличие на поверхности такой плёнки небольшого количества кислорода может быть связано как с присутствием остаточного кислорода в плазмообразующем газе, так и с последующим окислением ППЦГ при выносе на воздух, характерным для полимеров, синтезированных в плазме [14].

В ИК-спектре осаждённой из циклогексана в плазме плёнки (рис.2) основными являются полосы поглощения при 2920 и 2860 см<sup>-1</sup> (валентные колебания групп CH<sub>2</sub>), связанные с присутствием в структуре полимера цепей (-CH<sub>2</sub>-)<sub>n</sub>, 1420 см<sup>-1</sup> (деформационные колебания групп CH<sub>2</sub>), 1020 см<sup>-1</sup> (валентные колебания связи C–C) и 740 см<sup>-1</sup> (колебания

$\sigma, \text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ 

Таблица 3

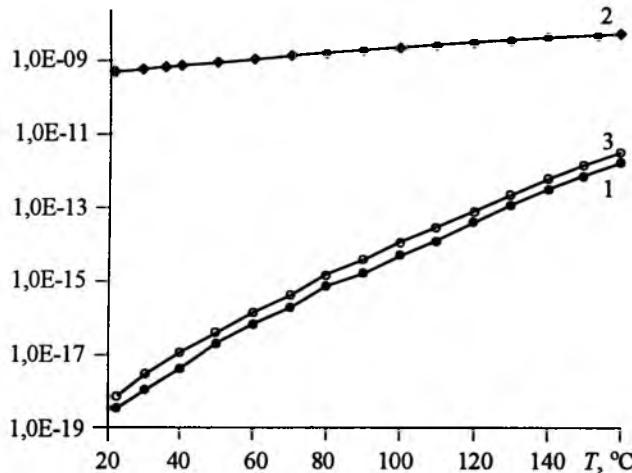


Рис.3. Температурная зависимость объёмной проводимости:

1 – плёнка ПЭТФ; 2 – слой ППЦГ; 3 – ПЭТФ+ППЦГ

углеродного скелета). Кроме того, наблюдаются полосы, относящиеся к циклическим молекулам циклогексана, не разрушенным в плазме ( $1230$  и  $840 \text{ см}^{-1}$ ) [10].

О наличии атомов кислорода в плёнке ППЦГ свидетельствуют полосы поглощения  $1710$ ,  $1680$ ,  $1640$ ,  $1590$  и  $1540 \text{ см}^{-1}$ , связанные с валентными колебаниями карбонильной группы, находящейся в различных положениях в цепях  $(-\text{CH}_2-)_n$ . Полосы при  $1710$  и  $1680 \text{ см}^{-1}$  могут относиться к валентным колебаниям  $\text{C=O}$  группы в ненасыщенных кетонах, кетонах с шестичленным циклом и  $\alpha$ - или  $\gamma$ -дикетонах, имеющих две соседние  $\text{C=O}$  группы. Полосы при  $1640$ ,  $1590$  и  $1540 \text{ см}^{-1}$  могут быть связаны с валентными колебаниями карбонильной группы, например в дикетонах, в которых карбонильные группы разделены одной метиленовой. В составе плёнки ППЦГ присутствуют также углеродные цепочки, не содержащие атомов водорода. Так, ИК-поглощение в области  $2600$ – $2000 \text{ см}^{-1}$  с разрешёнными максимумами при  $2340$  и  $2090 \text{ см}^{-1}$  совпадает с областью поглощения аморфного углерода [15].

На основании приведённых выше данных ЭСХА и ИК-спектроскопии можно заключить, что синтезированная методом ионно-стимулированного осаждения из плазмы циклогексана плёнка имеет структуру, в состав которой входят линейные цепи  $(-\text{CH}_2-)_n$ ; шестичленные кольца, в том числе с заместителями – карбонильными группами, а также уг-

Образцы	Толщина пленки ППЦГ, нм	$E_0$ , МВ/м	$E_{63}$ , МВ/м	$\delta$
ПЭТФ	–	203	226	3
ПЭТФ + ППЦГ	10	290	338	2
	40	305	360	2
	120	314	378	3

леродные цепочки, не содержащие водорода.

Полученные данные по структуре плёнок подтверждаются результатами измерения краевых углов смачивания ( $\theta$ ). В табл.2 приведены значения  $\theta$  для исходной плёнки ПЭТФ и плёнки ПЭТФ+ППЦГ, а также рассчитанные на их основе значения поверхностной энергии ( $\gamma$ ) и её компонентов ( $\gamma_p$  – полярного и  $\gamma_d$  – дисперсионного). Видно, что исходная плёнка ПЭТФ характеризуется достаточно высокой смачиваемостью и поверхностной энергией  $\gamma = 39,2 \text{ мДж/м}^2$ , что связано, по-видимому, с наличием полярных кислородсодержащих групп на её поверхности. После нанесения в плазме покрытия ППЦГ значения краевых углов возрастают, плёнка становится более гидрофобной. Следует особо отметить значительное (более чем в 2 раза) уменьшение полярного компонента поверхностной энергии, в то время как полная поверхностная энергия почти не изменяется. Эти данные подтверждают результаты, полученные при изучении структуры и состава плёнки ППЦГ и свидетельствующие об уменьшении количества кислородсодержащих полярных групп в тонком слое, осаждённом в плазме, по сравнению с исходной плёнкой ПЭТФ.

Объёмная электропроводность ( $\sigma$ ) плёнки ПЭТФ в интервале от  $20$  до  $160^\circ\text{C}$  экспоненциально возрастает с ростом температуры от  $10^{-19}$  до  $10^{-12} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$  и характеризуется значением энергии активации  $E_a = 1,4 \text{ эВ}$  (рис.3, кривая 1). В [16] было показано, что остаточная электропроводность в объёме ПЭТФ в постоянном поле и температурном интервале  $20$ – $200^\circ\text{C}$  связана с прыжковым механизмом проводимости [17]. Электроны, инжектируемые из металлического электрода в полимер, локализуются на структурных ловушках. Как было показано в [18], при оп-

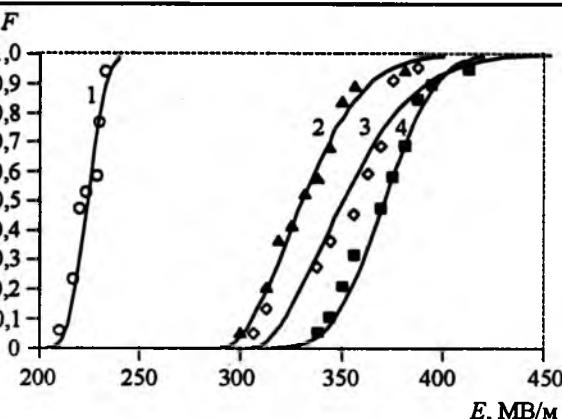


Рис.4. Функции распределения напряжённости пробоя плёнки ПЭТФ (1) и ПЭТФ, покрытой слоем ППЦГ толщиной 10 нм (2), 40 нм (3) и 120 нм (4)

ределённых условиях, когда концентрация ловушек в диэлектрике достаточно высока и среднее расстояние между ними таково, что имеется ненулевой интеграл перекрытия для двух соседних квантовых состояний электрона в ловушках, появляется вероятность перехода (прыжка) электрона на свободное состояние соседней ловушки. В результате осуществляется прыжковая проводимость в диэлектрике. Энергия активации проводимости в таком случае будет зависеть от разброса энергетических уровней двух соседних ловушек.

Измерения объёмной проводимости плёнки ППЦГ показали, что  $\sigma \sim 10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  и материал можно отнести к полупроводящим полимерам (рис.3, кривая 2). Температурная зависимость проводимости имела активационный характер с достаточно низким значением энергии активации  $E_a = 0,19 \text{ эВ}$ .

Нанесение на поверхность ПЭТФ плёнки ППЦГ толщиной 40 нм приводило к росту объёмной электропроводности образца в два раза во всем исследованном интервале температур (рис.3, кривая 3), при этом значение энергии активации проводимости оставалось неизменным ( $E_a = 1,4 \text{ эВ}$ ). Этот факт указывает на то, что после нанесения слоя ППЦГ механизм электрической проводимости остается неизменным. В [17] было показано, что остаточная проводимость ПЭТФ в постоянном электрическом поле в исследуемом интервале температур связана с инжецией электронов в поверхностные слои полимера и их движением по локализованным состояниям (ловушкам) за счёт прыжкового меха-

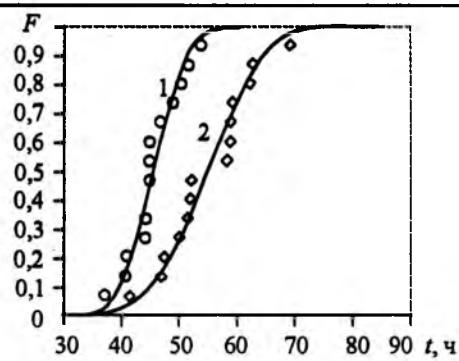


Рис.5. Функции распределения времен пробоя плёнки ПЭТФ (1) и ПЭТФ, покрытой слоем ППЦГ толщиной 40 нм (2), в электрическом поле 26,6 МВ/м с частотой  $f = 50 \text{ Гц}$

низма. Вероятно в данном случае рост  $\sigma_v$  вызван увеличением концентрации носителей заряда на ловушках. Таким образом, нанесение слоя ППЦГ оказывает влияние на структуру перехода металл-диэлектрик и приводит к росту интенсивности инжеции электронов в ПЭТФ.

Результаты измерений кратковременной электрической прочности плёнки ПЭТФ толщиной 20 мкм и плёнки ПЭТФ+ППЦГ приведены в табл.3 и на рис.4. Видно, что нанесение слоя ППЦГ толщиной 10–120 нм приводит к существенному (более чем в 1,5 раза) росту напряжённости поля пробоя плёнки. Так, если исходная плёнка ПЭТФ начинает пробиваться в электрических полях  $E > 203 \text{ МВ/м}$ , то плёнка ПЭТФ с нанесённым слоем ППЦГ толщиной 120 нм имеет ненулевую вероятность пробоя в поле  $E > 314 \text{ МВ/м}$ .

В [16,19] было показано, что электрический пробой плёнки ПЭТФ вызван инжецией электронов из металлического электрода и образованием в ее поверхностных слоях отрицательного гомозаряда. Неравномерное распределение гомозаряда приводит к образованию областей, характеризующихся аномально высокими локальными полями, в которых по мере накопления избыточного заряда происходит пробой полимера. Ранее нами было показано, что осаждённая в плазме плёнка ППЦГ обладает полупроводящими свойствами. Известно также, что её нанесение на поверхность ПЭТФ способствует росту интенсивности инжеции электронов из металлического электрода [20]. С одной стороны, рост интенсивности инжеции

электронов должен приводить к ухудшению электрической прочности образца. С другой стороны, обладая полупроводящими свойствами, слой ППЦГ способствует равномерному распределению заряда в поверхностном слое полимера и отсутствию локальных областей перенапряжения, что, в свою очередь, приводит к увеличению напряжённости поля, при которой наблюдается пробой. По-видимому, полупроводящие свойства плёнки ППЦГ играют решающую роль в увеличении электрической прочности плёнки ПЭТФ+ППЦГ.

Увеличение толщины слоя ППЦГ приводит к снижению интенсивности инжекции электронов из металла в электрическом поле и к увеличению напряжённости поля, в котором происходит пробой полимера (рис.4, кривые 2–4 и табл.3). Уменьшение дисперсии распределения  $\delta$  при толщине слоя от 10 до 40 нм связано, возможно, с неравномерным осаждением слоя ППЦГ на плёнке ПЭТФ, т.е. слой может иметь переменную толщину.

Одновременно с увеличением кратковременной электрической прочности, тонкий слой ППЦГ толщиной несколько десятков нанометров на поверхности плёнки ПЭТФ приводит к увеличению её долговременной электрической прочности в электрическом поле напряжённостью на порядок меньше, чем в случае мгновенного пробоя (рис.5). Например, среднее время жизни плёнки ПЭТФ в поле 26,6 МВ/м составляет 47 ч, а плёнки ПЭТФ со слоем ППЦГ толщиной 40 нм – 58 ч. Конечное время жизни диэлектрика в полях более низких, чем поле мгновенного пробоя, обусловлено разрядными процессами, протекающими в воздушных микронных зазорах между электродом и поверхностью диэлектрика. В результате микроразрядов в поверхностном слое плёнки ПЭТФ образуется гомозаряд, значение которого постепенно увеличивается с течением времени выдержки плёнки в поле. Неравномерное распределение заряда в поверхностном слое диэлектрика приводит к тому, что с течением времени выдержки в нём образуются области локального перенапряжения с аномально высокими полями, приводящие к разрушению образца.

Таким образом, осаждение в плазме на

поверхности плёнки ПЭТФ тонкого слоя ППЦГ (толщиной 10–120 нм) оказывает значительное влияние на электрофизические свойства плёнки ПЭТФ, приводя к росту её проводимости, критического значения напряжённости электрического поля пробоя диэлектрика и времени жизни диэлектрика в полях более низких, чем поле мгновенного пробоя.

Авторы выражают благодарность В.М. Елинсон (МАТИ) за предоставленные для исследований образцы плёнки ПЭТФ с покрытием, полученным в плазме из паров циклогексана методом ионно-стимулированного осаждения.

#### Список литературы

1. Андреев А.М., Ваксер Н.М., Куимов И.Е., Пак В.М., Старовойтенков В.В. Композиционные материалы на основе слюдопластовой бумаги и полимерной плёнки // Электротехника. 2000. № 6. С. 44–47.
2. Емельянов О.А. Особенности работоспособности металлоплёночных конденсаторов в форсированных режимах // Электротехника. 2002. № 4. С. 6–10.
3. Пономарев А.Н. Осаждение полимерных плёнок в неравновесной плазме // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том IV. 2000. М.: Наука. С. 386–392.
4. Гильман А.Б., Колотыркин В.М. Получение тонких плёнок двуокиси кремния в тлеющем разряде // Химия высоких энергий. 1976. Т.10, № 5. С. 380–383.
5. Handbook of Industrial Diamonds and Diamond films. Ed. By Prelas M., Popovici G., Bigelow L.K. N.Y.: Marcel Dekker, 1997.
6. Манкелевич Ю.А., Сузгин Н.В. Получение углеродных структур // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том IV. 2000. М.: Наука. С. 404–414.
7. Шалимов В.В., Беспалова Е.Б., Зорин Г.А., Кандиболовская Т.Б. Исследование стойкости слоистых материалов к действию электрических разрядов // Журнал технической физики. 1993. Т. 63, № 9. С. 185–190.
8. Sleptsov V.V., Elinson V.M., Dmitriev S.N., Potryasai V.V., Kravets L.I. Plasma modification of poly(ethylene) terephthalate track membranes // J. Non-Cryst. Solids. 1991. Vol. 136. P. 53–57.
9. Rabek J.F. Experimental Methods in Polymer Chemistry. New York: Wiley, 1980.
10. Беллами Л. Инфракрасные спектры сложных молекул. М.: Изд. Иностр. литер., 1963.
11. Wu S. Polymer Interfaces and Adhesion. N.Y.: Marcel Dekker, 1982.
12. Мецик М.С., Бережанский В.Б., Городов В.В., Гладкий Г.Ю. Исследование электрического старения кристаллов слюды в однородном электрическом поле // Электротехника. 1991. №8. С.20–25.
13. Хашильд В., Мош В. Статистика для электротехников в приложении к технике высоких напряжений. Л.: Энергатомиздат, 1989.
14. Ясуда Х. Полимеризация в плазме. М.: Мир, 1988.
15. Купцов А.Х., Жижин Р.Н. Фурье-КР и Фурье-ИК спектры полимеров. М.: Физматлит, 2001.
16. Драчёв А.И., Пак В.М., Гильман А.Б., Кузнецов А.А. Поляризация плёнок полизтилентерефталата в электрическом поле // Электротехника. 2003. № 4. С.39–42.

17. Мотт И., Дэвис Э. Электронные процессы в некристаллических веществах. М: Мир, 1982. Т.1.
18. Лившиц И.М. О структуре энергетического спектра и состояниях неупорядоченных систем // Успехи физической науки. 1964. Т.83, № 4. С.617–663.
19. Закревский В.А., Сударь Н.Т. Отрицательный объёмный заряд и напряженность электрического поля в полимерных диэлектриках при низких температурах // Физика твердого тела. 1998. Т. 40, № 6. С.1167–1172.
20. Цибенко С.С., Драчёв А.И., Елинсон В.М. Получение и свойства системы плёнка ПЭТФ-углеродное покрытие // Сборник трудов 3-го Международного симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии. Иваново: изд-во ИГХТУ. 2002. Т.2. С. 279–281.

**Фёдорова Светлана Станиславовна** – аспирант Российской государственной технологической университета им. К.Э. Циолковского (МАТИ).

**Драчёв Александр Иванович** – руководитель Группы тонких плёнок Института синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН, канд. физ.-

мат. наук. Окончил Хабаровский педагогический институт в 1983 г. Защитил кандидатскую диссертацию по теме "Электроперенос в полиметилметакрилате, содержащем примеси" в 1991 г.

**Гильман Алла Борисовна** – старший научный сотрудник Института синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН, канд. хим. наук. Окончила Московский институт тонкой химической технологии им. М.В. Ломоносова в 1961 г. Защищила кандидатскую диссертацию по теме "Полимеризация ароматических соединений в плазме" в 1973 г. Лауреат Государственной премии в области науки и техники за 1987 г.

**Пак Владимир Моисеевич** – главный специалист по электроизоляционным материалам АО "Элинар", доктор техн. наук. Окончил Ленинградский политехнический институт в 1965 г. Защитил докторскую диссертацию по теме "Усовершенствование термореактивной изоляции крупных электрических машин" в 2002 г.

## **Система изоляции Элмикатерм для статорных обмоток турбо- и гидрогенераторов**

**ПЕТРОВ В.В., ПОГОДИНА Ж.П., ПИЩУЛИНА О.П., ГУСЕВА Е.А.**

*Осуществлён переход на систему изоляции нового поколения с улучшенными тепловыми, физико-механическими и диэлектрическими свойствами для статорных обмоток турбо- и гидрогенераторов. Проведены исследования системы изоляции Элмикатерм на макетных образцах, натурных стержнях по расширенной программе. Переход на систему изоляции Элмикатерм обеспечивает более высокую надёжность и долговечность статорной обмотки генераторов благодаря большой устойчивости новой изоляции к действию повышенных температур и электрического поля.*

*Changeover to the insulation system of a new generation with improved thermal, physical and mechanical and dielectric properties for the stator windings of turbogenerators and hydrogenerators has been performed. Investigations of the insulation system Elmikaterm are conducted on mock-up samples, full-scale bars in accordance with expanded program. Changeover to the insulation system Elmikaterm provides a higher reliability and durability of the generator stator winding due to a greater stability of the new insulation to the exposure of increased temperatures and the electric field.*

Завод "Электросила" на протяжении 40 лет для высоковольтных электрических машин применял термореактивную изоляцию на основе пропитанных лент типа ЛТСС-3М слюдотерм разработки сотрудников отдела изоляции завода "Электросила". Связующее ленты ЛТСС-3М на протяжении её применения прошло несколько этапов модификаций, что позволило в 90-х годах значительно сократить режим отверждения изоляции и повысить ее температурно-деформационные характеристики.

За последние три года филиал ОАО "Силовые машины" "Электросила" освоил пропитанные ленты нового поколения производства завода "Элинар" с улучшенными тепловыми, физико-механическими и диэлектрическими свойствами. Новая система изоляции Элмикатерм имеет следующие преимущества по сравнению с ранее применяемой изоляцией Слюдотерм:

1. Сокращение цикла термообработки изоляции до 6–9 ч в зависимости от применяемой ленты Элмикатерм за счёт использова-

ния эпоксиноволачного связующего и отвердителя латентного типа в ленте.

2. Высокая степень адгезии эпоксиноволачного связующего к меди и соответствующая механическая прочность готовой изоляции.

3. Повышение содержания слюды в ленте до значения, равного 40%, улучшение пропитываемости бумаги благодаря использованию слюдопластовой бумаги в ленте плотностью  $85 \text{ г/м}^2$ , получаемой гидромеханическим расщеплением мусковита (вместо слюдинитовой бумаги для ленты ЛТСС-ЗМ плотностью  $55 \text{ г/м}^2$ ).

4. Длительно допустимая рабочая температура изоляции на ленте Элмикатерм  $155^\circ\text{C}$ .

В филиале ОАО "Силовые машины" "Электросила" применяются ленты Элмикатерм двух марок (табл.1):

– основной вариант – Элмикатерм 55409  $0,14 \times 25$  на основе слюдопластовой бумаги и модифицированного эпоксиноволачного связующего с латентным отвердителем;

– Элмикатерм 52409  $0,14 \times 25$  на основе слюдопластовой бумаги и связующего из эпоксиноволачной смолы и латентного отвердителя.

Проведённые технологические исследования, электрические и термоциклические испытания системы изоляции Элмикатерм показали, что в изоляции, изготавливаемой по технологии "пропитанных лент", за счёт совершенствования технологического процесса изготовления ленты, введения бумаги новой структуры и модификации связующего можно достичь средней рабочей напряжённости до  $3 \text{ МВ/м}$ .

Параллельно с внедрением новых предварительно пропитанных лент в филиале ОАО "Силовые машины" "Электросила" проводилось усовершенствование технологии изготавления обмоток турбо- и гидрогенераторов.

В первые годы применения термореактивной изоляции, а в ряде типов турбогенераторов и до настоящего времени, опрессовка и полное отверждение изоляции производились при температуре  $160^\circ\text{C}$  в электропрессформах, воспроизводящих точную геометрию стержня обмотки. Этот способ требует больших денежных затрат на оснастку.

Наряду с этой технологией применяется иногда отверждение по двухступенчатой технологии – предварительная подпрессовка па-

Таблица 1

## Сравнительные характеристики лент Элмикатерм

Параметр	Элмикатерм 55409	Элмикатерм 52409
Тип связующего	Модифицированная эпоксиноволачная смола с латентным отвердителем	Эпоксиноволачная смола с латентным отвердителем
Номинальная толщина, мм	0,14	0,14
Отклонение от номинальной толщины, мм	<ul style="list-style-type: none"> <li>- среднее <math>\pm 0,02</math></li> <li>- в отдельных точках <math>\pm 0,03</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>\pm 0,02</math></li> <li><math>\pm 0,03</math></li> </ul>
Поверхностная плотность, $\text{г/м}^2$	$195 \pm 25$	$195 \pm 25$
Массовая доля компонентов, %:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- слюда, не менее 40</li> <li>- связующее вещество <math>37 \pm 4</math></li> <li>- летучие вещества, не более 1,5</li> </ul>		
Разрушающая нагрузка при растяжении, Н/см не менее	150	150
Электрическая прочность, кВ/мм, не менее	25	25
Тангенс угла диэлектрических потерь, %, при:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>24 \text{ ч}, (15-35)^\circ\text{C}</math>, 45–75 % влажности</li> <li>- <math>24 \text{ ч}, 155^\circ\text{C}</math>, менее 20 % влажности</li> </ul>	25	9
Текущесть связующего вещества в ленте, %	40–70	40–70
Жёсткость при изгибе, Н/м, не более	50	50

Таблица 2

Материал	tgδ, %, при T, °C		
	23	130	155
Элмикатерм 52409	0,5	2,1	7,0
Элмикатерм 55409	0,5	3,8	21,4

Таблица 3

Материал	tgδ, %, при											
	20 °C				130 °C				155 °C			
	2 кВ	4 кВ	6 кВ	8 кВ	2 кВ	4 кВ	6 кВ	8 кВ	2 кВ	4 кВ	6 кВ	8 кВ
Элмикатерм 55409	0,43	0,43	0,45	0,46	8,3	8,3	8,4	8,5	39,2	39,4	39,7	40,5
	0,43	0,46	0,48	0,50	8,7	8,7	8,7	8,8	38,7	38,8	39,3	39,9
Элмикатерм 52409	0,38	0,37	0,49	0,56	2,22	2,24	2,28	2,36	5,34	5,33	5,38	5,44
	0,37	0,39	0,42	0,46	2,41	2,45	2,47	2,54	6,05	6,09	6,11	6,18

Таблица 4

Конструкция изоляции стержня, двухсторонняя толщина изоляции $d_{\text{дв}}$ , мм	$f$ , Гц	$C$ , нФ	$\text{tg } \delta$ , %
2 слоя ленты ЛСЭН-526Т	55,5	1,80	8,50
	45,5	1,83	9,10
	50,0	1,82	9,00
2 слоя ленты ЛСЭН-526Т 14 слоёв Элмикатерм 52409 $d_{\text{дв}} = 6,8$	55,5	1,60	5,00
	45,5	1,60	5,40
	50,0	1,60	5,40

зовой части по укороченному режиму в прессах типа "Шюманн" и полное отверждение изоляции стержневой обмотки под давлением 1 МПа в автоклаве с опрессовочной средой битума при 160°C.

Однако наиболее перспективным является "одноступенчатый" процесс опрессовки и отверждения под давлением изоляции обмотки в автоклаве. Для этого используются опрессовочные планки специальной формы, задающие размеры и сечение стержня в пазовой и лобовой частях.

При этом способе за счёт постепенного подъёма температуры и подачи давления одновременно во всех направлениях на изоляцию снижается вероятность повреждения слюдяного барьера, увеличивается электрическая прочность изоляции, сводится к минимуму объём внутренних газовых полостей.

росила" в настоящее время всю стержневую обмотку гидрогенераторов производит в оп-

Таблица 5

Конструкция изоляции стержня, двухсторонняя толщина изоляции $d_{\text{дв}}$ , мм	tgδ, %, при	
	150°C	155°C
2 слоя ЛСЭН-526 Т 14 слоёв Элмикатерм 52409 $d_{\text{дв}} = 6,8$	4,30	4,55
8 слоёв ЛСЭН-526 Т 8 слоёв Элмикатерм 52409 $d_{\text{дв}} = 6,8$	6,43	6,88
	7,70	8,35

Филиал ОАО "Силовые машины" "Элект-

Таблица 6

Время до пробоя $t_x$ , ч		
8 слоёв Элмикатерм 52409	4 слоя ЛСЭН- 526Т+4 слоя Элмикатерм 52409	4 слоя Элмикатерм 55409 + 4 слоя ЛСЭН-526Т
27,45	33,50	24,55
31,35	36,40	31,15
33,55	34,45	31,30
41,45	38,55	53,20
48,50	44,05	73,10
51,50	57,15	76,20
60,05	77,15	81,04
66,55	81,40	

Таблица 7

Лента Элмикатерм 55409 поставка 2002 г.	
Толщина изоляции, мм	Время $t_x$ , ч, мин
2,20	30,10
2,20	39,40
2,30	40,20
2,10	56,50
2,00	63,25
2,10	66,00
2,30	85,45
2,20	93,30
2,10	244,30

Таблица 8

Лента Элмикатерм 55409 поставка 2003 г.	
Толщина изоляции, мм	Время $t_x$ , ч, мин
2,20	74,15
2,15	90,15
2,20	92,45
2,15	95,25
2,20	102,40
2,20	105,55
2,20	108,30
2,20	122,50
2,15	128,20
2,20	234,40

прессовочных планках. Изоляция стержней статорной обмотки турбогенераторов мощностью более 300 МВт в основном отверждается в электропрессформах.

Испытания, проведённые на натурных стержнях генераторов, показали, что электрическая прочность изоляции, опрессованной и отверждённой в автоклаве без предварительного прессования на 10–20% выше, чем у подпрессованной в прессах типа "Шумманн", а отбраковка при цеховых испытаниях высоким напряжением значительно ниже. Однако реализация этого способа связана с более строгими требованиями к однородности ленты и процессу наложения изоляции – постоянство нахлеста, максимальный натяг и т.п.

Усовершенствование технологического процесса изготовления турбо- и гидрогенераторов, применение предварительно пропитанных лент нового поколения позволило снизить толщину корпусной изоляции обмоток турбогенераторов до 30% за последние 10 лет.

Наряду с переходом на новую систему изоляции Элмикатерм филиал ОАО "Силовые машины" "Электросила" внедрил комплекс современных выравнивающих и цементирующих препрегов фирмы "Isovolta" на основе эпоксиноволачных смол для монолитизации плетёной части стержня. В качестве изоляции мест транспозиции внедрён материал Nomex-410. Внедрение комплекса препрегов и материала Nomex-410 позволило значительно сократить трудоёмкость изготовления обмоток.

Основная технология изготовления стержневой обмотки турбо- и гидрогенераторов с применением предварительно пропитанных лент Элмикатерм в филиале ОАО "Силовые машины" "Электросила" следующая:

- Предварительно пропитанная лента Элмикатерм наматывается на стержень станочным способом, в том числе на станке с программным управлением ЛИС 12000 КБ "Модестат" с обдувом ленты горячим воздухом (фенами).

- Стержень с изоляцией в опрессовочных планках термоотверждается в автоклаве при давлении 1 МПа и температуре 160–165°C (опрессовочная среда – расплавленный битум). Время прессования для изоляции Эл-

микатерм 55409 9 ч.

3. Проверяются размеры сечения готового стержня, на поверхность изоляции наносятся короногасящие покрытия.

4. Проводится контроль монолитности и степени полимеризации изоляции методами измерения прироста тангенса угла диэлектрических потерь  $\tan\delta$  и интенсивности частичных разрядов. Проводятся испытания изоляции высоким напряжением.

Следует отметить, что в настоящее время за заказчиком ужесточены критерии приёмки обмотки гидрогенераторов по уровню  $\tan\delta$  при температуре 155°C и электрической прочности.

Исследование изоляции Элмикатерм в лаборатории проводится на пластинах толщиной изоляции 2 мм, набранных из ленты Элмикатерм с измерением  $\tan\delta$  при 155°C, на макетах медных шин 6×30×800 мм с односторонней толщиной изоляции 2 мм и на натурных стержнях гидрогенераторов.

В табл.2 приведены значения  $\tan\delta$  при напряжённости электрического поля  $E = 1$  кВ/мм в зависимости от температуры для лент Элмикатерм на пластинах 100×100 мм, изготовленных в соответствии с требованиями технических условий на ленту Элмикатерм.

Кроме того, определялся  $\tan\delta$  для двух типов изоляции в зависимости от напряжения при температуре 20, 130, 155°C на макетных образцах размером 6×30×800 мм.

В табл.3 приведены значения  $\tan\delta$  изоляции Элмикатерм на макетах медных шин размером 6×30×800 мм в зависимости от напряжения электрического поля при различных температурах.

В табл.4 представлены значения  $\tan\delta$  при  $T = 155^\circ\text{C}$  изоляции натурных стержней гидрогенератора СВ1045/185-48Т4 ГЭС "Се-Сан" ( $U_{\text{раб}} = 15,75$  кВ).

В качестве эксперимента, были изготовлены стержни СВ1045/185-48Т4 ГЭС "Се-Сан" с изоляцией, выполненной из ленты ЛСЭН-526Т и ленты Элмикатерм 52409. Значения  $\tan\delta$  представлены в табл.5.

Анализируя данные табл.4 и 5 следует отметить, что условиям тендера на ряд экспортных заказов (при  $t = 155^\circ\text{C}$   $\tan\delta \leq 9\%$  при  $0,2 U_{\text{ном}}$ ) соответствует система изоляции, в основном, выполненная на ленте Элмикатерм 52409.

Важнейшим показателем работоспособности высоковольтной изоляции является её долговечность при электрическом старении, характеризующаяся сроком жизни (временем до пробоя при повышенном напряжении). В табл.6 приведены значения времени жизни изоляции с различной комбинацией лент при  $E = 15$  МВ/м.

Следует отметить, что системы изоляции на новой ленте Элмикатерм 52409 и на ленте Элмикатерм 55409 находятся на одном уровне по длительной электрической прочности. В табл.7 и 8 приведены результаты определения времён жизни до пробоя различных партий лент Элмикатерм 55409, поставок 2002–2003 гг.

Данные, представленные в табл.7 и 8 свидетельствуют о достаточной стабильности промышленных партий лент по значению длительной электрической прочности.

Изоляция Элмикатерм 55409 применяется для стержней статорных обмоток всех турбо- и гидрогенераторов, выпускаемых на заводе "Электросила". При этом в качестве двух внутренних слоёв для улучшения адгезии корпусной изоляции к меди используется лента ЛСЭН-526 Т.

Следует отметить, что переход на систему изоляции Элмикатерм и комплекс мер по монолитизации плетёных стержней снизил процент брака обмотки при заводских испытаниях до 2% как для турбо-, так и для гидрогенераторов. Кроме того, отмечен большой запас кратковременной электрической прочности изоляции натурных стержней. Так, для стержней гидрогенератора СВ1488/175-84ухл ГЭС "Джердап" ( $U_{\text{раб}} = 15,75$  кВ), выполненной на ленте Элмикатерм 52409 пробивное напряжение при подъёме со скоростью 5 кВ/мин и частоте  $f = 50$  Гц равно 75 кВ.

В связи с требованиями тендера на производство гидрогенератора СВ 1182/300-48ТВ4 для ГЭС "Эль-Кахон" с номинальным напряжением 17 кВ по значению  $\tan\delta \leq 9\%$  при  $T = 155^\circ\text{C}$  для натурных стержней впервые конструкция изоляции была выполнена комбинированной:

- подслой из ленты ЛСЭН-526 Т;
- основные слои ленты Элмикатерм 52409;
- последние слои из ленты Элмикатерм 55409;

Значения  $\tg\delta$  при  $T = 155^{\circ}\text{C}$  на натурных стержнях гидрогенератора "Эль-Кахон", благодаря указанной конструкции, соответствуют требованиям тендера.

Переход на систему изоляции Элмикатерм обеспечивает более высокую надежность и долговечность генераторов по статорной обмотке благодаря большой устойчивости Элмикатерм к действию повышенных температур, электрического поля и механических нагрузок.

**Петров Владимир Васильевич** – заведующий лабораторией электрической изоляции ОАО "Электросила".  
Окончил Ленинградский политехнический институт в 1972 г.

**Погодина Жанна Петровна** – заведующая бюро лаборатории электрической изоляции ОАО "Электросила".  
Окончила Ленинградский политехнический институт в 1964 г.

**Пищулина Ольга Петровна** – инженер 1 категории ОАО "Силовые машины" – филиал "Электросила".

## Короностойкий диэлектрический материал на основе полиимидной плёнки

ДРАЧЁВ А.И., ПАК В.М.

*Получен диэлектрический материал, состоящий из полиимидной плёнки и тонких слоёв, осаждённых на обеих сторонах её поверхности с помощью полимеризации кремнийорганического соединения в разряде постоянного тока. Исследована электропроводность полученного материала в температурном интервале от 20 до 200°C. Показано, что поляризация такого диэлектрического материала, не приводит к образованию избыточного положительного заряда в его объёме под действием высоких электрических полей.*

*The dielectric material consisting from polyimide film and two thin layers, deposited on both sides of the surface by DC discharge polymerization of octamethylcyclotetrasiloxane was obtained. The structure of the deposited layers was investigated by IR-spectroscopy. Electric conductivity of this material was explored at a temperature from 20 up to 200 °C. It is shown that polarization of such dielectric material does not result in formation of the excess charge in the volume.*

На электровозах двойного питания при преобразовании напряжения на изоляцию воздействуют пиковые нагрузки. Для решения этой проблемы фирма "Дюпон" разработала специальную полиимидную плёнку марки Kapton CR с целью повышения короностойкости. Композиционные материалы на основе короностойкой полиимидной плёнки в сочетании со слюдяной бумагой или термостойкими неткаными материалами широко применяются при выпуске тяговых электродвигателей класса Н ( $200\text{--}220^{\circ}\text{C}$ ) в компаниях "Сименс", АББ и "Шкода".

В России проводятся работы по созданию аналогичных электроизоляционных материалов для перспективных серий электровозов. В работе изложены результаты опытных работ по получению короностойкой полиимид-

ной плёнки, а также данные испытаний на плоских образцах чистой плёнки.

Одним из эффективных путей увеличения стойкости полимерных плёнок, используемых в качестве электрической изоляции, к действию электрических разрядов является нанесение на их поверхность тонких барьерных слоёв различной химической природы [1].

Среди методов, с помощью которых можно наносить тонкие слои с хорошей адгезией к поверхности полимера, наиболее перспективным, безусловно, является метод полимеризации в плазме. Этот метод позволяет использовать в качестве исходных практически любые органические и элементоорганические соединения, а также, варьируя условия в плазме, получать очень тонкие по-

крытия различного состава, в том числе на основе кремнийорганических соединений [2].

Для получения диэлектрического материала использовали полиимидную плёнку марки ПМ толщиной 25 мкм. На обе её поверхности с помощью метода полимеризации в плазме проводили осаждение тонкого слоя кремнийорганического соединения.

Процесс осаждения полимерного слоя проводили в разряде постоянного тока в парах кремнийорганического соединения при давлении 10 Па и токе 20 мА в течение 1–3 мин. Толщина осажденных в плазме кремнийсодержащих слоёв составляла 0,05–0,1 мкм.

Исследование процессов накопления заряда в полученном диэлектрическом материале (полиимидная плёнка с тонким покрытием, осаждённым в плазме) проводили методом термостимулированной деполяризации (ТСД) [3]. Для изучения токов ТСД исходную плёнку ПМ и диэлектрический материал предварительно поляризовали во внешнем электрическом поле напряжённостью  $1 \cdot 10^7$  В/м при 200°C в течение 20 мин с последующим охлаждением в поле.

Проводимость исходной полиимидной плёнки увеличивается с ростом температуры (рис.1, кривая 1). В сравнении с другими известными полимерными диэлектриками при температурах близких к 20°C плёнка имеет очень низкие значения остаточной проводимости:  $\sim 10^{-20}$  Ом $^{-1} \cdot$ см $^{-1}$ .

Нанесение на обе поверхности плёнки тонкого слоя, синтезированного в плазме на

основе кремнийорганического соединения, приводит к росту проводимости диэлектрического материала в температурном интервале от 20 до 140°C (рис.1, кривая 2). При комнатной температуре материал с покрытием имеет проводимость на два порядка выше, чем исходная плёнка ПМ, на основе которой он получен. Следует, однако, отметить, что значения проводимости материала с покрытием остаются достаточно низкими и характеризуют его как хороший диэлектрик, а при температурах выше 150°C он имеет гораздо более низкие значения электропроводности в сравнении с исходной полиимидной плёнкой.

На термограммах токов ТСД исходной плёнки ПМ наблюдался интенсивный р-максимум в области 215°C, связанный с образованием избыточного положительного заряда в объёме образца (рис.2, кривая 1). Ранее нами было показано, что образование положительного гомозаряда в полиимиде связано с инжекцией дырок и их перераспределением в объёме плёнки при температурах 200–260°C [3].

На кривых токов ТСД материала с покрытием, измеренных до 260°C, никаких максимумов не наблюдалось. Непосредственно после замыкания цепи в объёме образца наблюдался начальный ток, значение которого быстро уменьшалось с течением времени на начальном участке температурной шкалы до значений близких к нулевым (рис.2, кривая 2). Далее токи деполяризации были близки к нулевым вплоть до температуры 230°C.

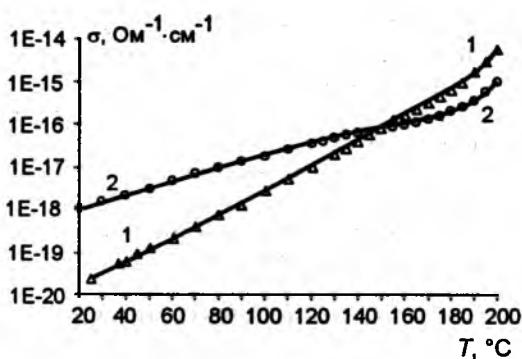


Рис.1. Температурные зависимости проводимости исходной полиимидной плёнки (1) и диэлектрического материала на основе полиимидной плёнки с нанесёнными кремнийсодержащими слоями толщиной 0,1 мкм (2)

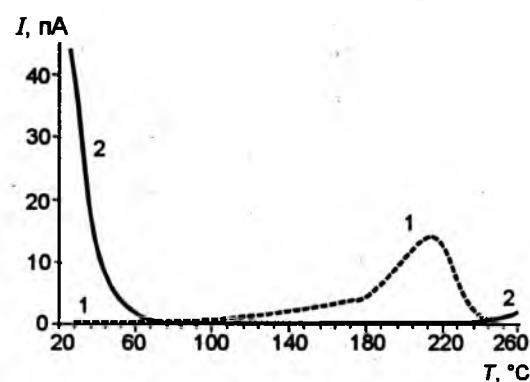


Рис.2. Термограммы токов ТСД исходной полиимидной плёнки (1) и диэлектрического материала на основе полиимидной плёнки с нанесёнными кремнийсодержащими слоями толщиной 0,1 мкм (2)

Этот факт свидетельствует о том, что поляризация диэлектрического материала, изготовленного на основе полиимидной плёнки с нанесенными в плазме кремнийсодержащими слоями, не приводит к образованию избыточного положительного заряда в объёме материала.

Осаждение тонкого кремнийорганического слоя на обе поверхности полиимидной плёнки приводит к полному устранению процесса накопления избыточного заряда в объёме материала под действием высоких электрических полей. Таким образом, этот слой является барьерным по отношению к зарядам, инжектируемым в поверхностные слои диэлектрического материала из электродов и области воздушных зазоров. На основании полученных результатов можно предположить, что диэлектрический материал на основе полиимидной плёнки, покрытой тонкими кремнийсодержащими слоями, должен иметь более высокие значения кратковременной и долговременной электрической прочности. Это подтверждается данными по кратковременной (таблица) и длительной электрической прочности (рис.3) исходной плёнки ПМ и плёнки ПМ с покрытием.

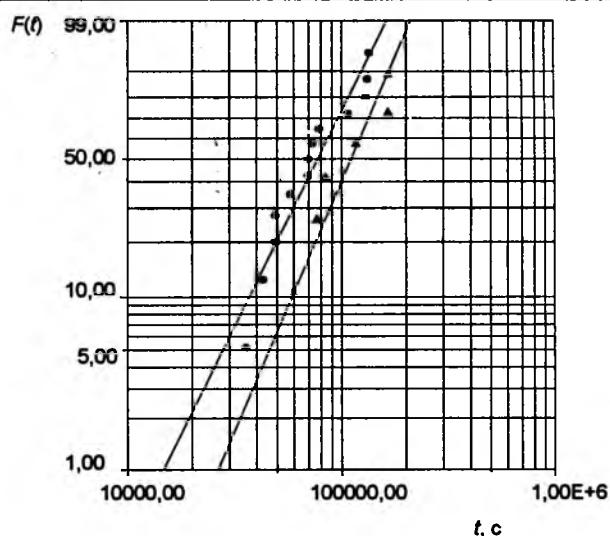


Рис.3. Влияние поверхностного кремнийорганического слоя на длительную электрическую прочность полиимидной плёнки (распределение Вейбулла времени до пробоя):

-▲-- плёнка ПМ с покрытием, толщина 0,04 мм,  $\beta_2 = 2,96$ ,  $\eta_2 = 1,25E+5$ ; -●-- исходная плёнка ПМ, толщина 0,04 мм,  $\beta_1 = 2,54$ ,  $\eta_1 = 89315,88$

## Выводы

1. Отработана технология получения короностойкой полиимидной плёнки.

2. Проводятся испытания короностойкой плёнки на макетах из шинной меди при длительном воздействии электрического поля.

3. Наибольший интерес представляет применение короностойкой полиимидной плёнки или композиционных материалов на её основе для изоляции тяговых электродвигателей электровозов ЭП-1 и ЭП-10.

## Список литературы

- Шалимов В.В., Беспалова Е.Б., Зорин Г.А., Кандибоцкая Т.Б. Исследование стойкости слоистых материалов к действию электрических разрядов // Журнал технической физики. 1993. Т. 63, № 9. С. 185–190.
- Гильман А.Б., Колотыркин В.М. Получение тонких пленок двуокиси кремния в тлеющем разряде // Химия высоких энергий. 1976. Т.10, № 5. С. 380–383.
- Драчёв А.И., Пак В.М., Гильман А.Б., Кузнецов А.А. Поляризация плёнок полиэтилентерефталата в электрическом поле // Электротехника. 2003. № 4. С. 39–42.
- Гильман А.Б., Драчёв А.И., Кузнецов А.А., Потапов В.К. Влияние зарядовых состояний, возникающих при плазмохимической модификации полиимидных плёнок, на изменение свойств полимера при хранении // Химия высоких энергий. 1998. Т. 32, № 5. С. 386–390.

Кратковременная электрическая прочность изоляции толщиной 0,04 мм, кВ/мм)			
ПМА	ПМА + кремнийорганическое покрытие		
24,0 (225,0)	25,0 (234,4)		
22,0 (206,3)	27,5 (257,8)		
24,0 (225,0)	27,0 (253,1)		
24,5 (229,7)	23,5 (220,3)		
24,0 (225,0)	25,0 (234,4)		
25,0 (234,4)	27,0 (253,1)		
24,5 (229,7)	26,0 (243,8)		
25,0 (234,4)	26,0 (243,8)		
23,0 (215,6)	27,0 (253,1)		
24,5 (229,7)	27,5 (257,8)		

# **Компактная сборка лобовых частей обмотки статора турбогенераторов с изоляцией Resin Rich**

**ХАЙМОВИЧ Л.Л.**

*Переход от термопластичной к термореактивной изоляции RR вынудил отойти от классической компактной к новой просторной сборке лобовых частей для укладки стержней с минимальными деформациями без повреждения изоляции. При такой свободной сборке увеличиваются аксиальные вылеты лобовых частей и всей конструктивной торцевой зоны статора в целом. В связи с этим сложился некий парадокс: глобальный выигрыш по сокращению поперечных размеров активной зоны статора, достигнутый благодаря утончению изоляции RR, при свободной сборке оказался частично потерянным из-за увеличения продольных габаритов статора. Для устранения этого противоречия разработан неповреждающий способ укладки обмотки статора, который позволил возвратиться к компактной сборке, но уже при термореактивной изоляции.*

К настоящему времени во всем мире для обмоток статоров турбогенераторов определилась практически одинаковая термореактивная изоляция из предварительно пропитанных лент, изготавляемая по так называемому способу Resin Rich (RR) [1]. Установился также и высоковольтный дизайн обмоток, обеспечивающий длительную электрическую прочность изоляции. Несмотря на почти 50-летнее применение термореактивной изоляции, проблема сохранности изоляции при укладке обмотки с эвольвентными лобовыми частями, особенно замкового стержня, продолжает оставаться актуальной.

При выполнении сборки обмотки следует обеспечить сходимость головок стержней нижнего и верхнего рядов даже при точной повторяемости лобовых частей, выставить заданные зазоры между лобовыми частями и особенно важно правильно завершить укладку последнего (замкового) стержня без повреждения его изоляции. Главным препятствием на этом пути является необходимость преодоления неизбежного и конструктивно присущего всегда у всех обмоток сборочного перехлеста между лобовыми частями последнего укладываемого стержня и лобовыми частями соседних ранее уложенных стержней и, прежде всего, начального (первого) стержня. Перехлест – это пересечение витков в пространстве в зоне лобовых частей, наблюдае-

*Transfer from thermoplastic to thermoreactive insulation RR forced us to go away from classic compact design to new spacious design of face end parts for bars laying with minimum deformation without damage of insulation. At that spacious design, axial overhangs of face end parts and the whole design of the stator face zone are increased. In connection with that fact, some paradox has appeared such as global win on reduction of cross dimensions of the stator active zone, achieved due to making thinner insulation RR, at spacious design appeared partially lost due to increasing of longitudinal overall dimensions of the stator. We designed not damaging method of the stator winding laying, which let to come back to compact design, but already at usage of thermoreactive insulation for elimination of that contradiction.*

мое в процессе укладки стержней и усложняющее сборку обмотки.

В "старых" обмотках с термопластичной микарентной компаундированной изоляцией все проблемы сборки при отклонениях формы лобовых частей и взаимного ухода от перехлеста лобовых частей соседних стержней решались радикально и однотипно безболезненно для изоляции чисто технологическим приемом – индивидуальной подформовкой в горячем состоянии по месту в любом направлении [2]. В этом случае размягченным в горячем состоянии лобовым частям придают вначале переходную форму, необходимую для прохождения их в зазорах между соседними уложенными лобовыми частями, а затем окончательную при придании им номинального положения. По такой технологии были изготовлены и продолжают ремонтироваться до настоящего времени обмотки турбогенераторов мощностью до 200 МВт, в том числе и более 100 турбогенераторов типа ТГВ-200 производства завода "Электротяжмаш" с непосредственным водородным охлаждением.

Обмотки этих генераторов в лобовых частях отличаются минимальными конструктивными сборочными зазорами, выбранными по условиям вентиляции или отсутствия коронирования в межфазных зонах, минимальными радиусами сопряжения прямолинейных и эвольвентных участ-

тков стержня и др. На завершающем этапе применения компаундированной изоляции в самом мощном из известных турбогенераторе с этой изоляцией типа ТГВ-200 на номинальное напряжение 15,75 кВ лобовые части к тому же для сокращения аксиальных размеров осознанно и направленно спроектированы с запредельными углами отгиба на опорный конус – 32 и 35° при обычных 20 и 22°30' [3].

В результате благодаря термопластичности связующего в этой классической конструкции обмотки статора предельного исполнения с микарентной компаундированной изоляцией достигнута наиболее компактная и плотная упаковка лобовых частей при минимизации аксиальных вылетов торцевой зоны обмотки и габаритов генератора в целом с соблюдением требуемых размеров диэлектрических промежутков, в частности в ТГВ-200 с непосредственным охлаждением обмотки водородом, между открытыми головками соседних фаз и от торцов вентиляционных трубок в стержнях до заземлённых щитов, диффузора компрессора системы вентиляции генератора и др.

При переходе к термореактивной изоляции типа RR в обмотках нельзя подформовывать лобовые части для преодоления их перехлестов при укладке стержней из-за опасности повреждения изоляции. Этот переход наложил отпечаток как на дизайн лобовых частей стержней и обмотки в целом, так и на последовавшие за ним новые решения по укладке обмотки.

Проблему укладки обмотки пришлось решать дважды и двояко в разное время различными способами:

– вначале конструктивно в 50–60-х годах при первом применении термореактивной изоляции RR в новых турбогенераторах мощностью до 1200 МВт;

– затем технологически с 90-х годов, когда пошла волна модернизации статоров турбогенераторов мощностью до 300 МВт с косвенным и непосредственным газовым охлаждением с заменой отработавших свой ресурс обмоток с термопластичной изоляцией на новые обмотки с термореактивной RR-изоляцией.

На первом этапе задача предотвращения сборочных запредельных деформаций лобовых частей решается довольно просто – прямолинейный отказ от традиционной компактности исполнения и переход к более свободной упаковке: стер-

жни отличаются уменьшенными углами отгиба на конус и эвольвенту, более плавными сопряжениями прямолинейных и криволинейных участков; в "корзинке" лобовых частей предусмотрены увеличенные и переменные по длине зазоры между стержнями, соизмеримые в ряде случаев с шириной самих стержней, применены стержни с различной конфигурацией в пределах фазных зон и др.

На начальной стадии внедрения термореактивная изоляция первых поколений класса нагревостойкости В на эпоксиполиэфирном и эпоксиленполформальдегидном связующих еще допускала незначительные подгоночные деформации лобовых частей в горячем состоянии. На это была ориентирована переходная конструкция обмотки статора первых турбогенераторов предельной мощности с термореактивной изоляцией в СССР – турбогенератора типа ТГВ-300 мощностью 300 МВт на номинальное напряжение 20 кВ производства завода "Электротяжмаш" (1963 г.) – еще с оглядкой на старую технологию с подогревом и частичной натяжкой (не подформовкой!) лобовых частей при заводке замкового стержня между лобовыми частями соседних стержней. Именно с этого генератора начинают просматриваться первые признаки новой конструкции, направленные на уменьшение сборочных деформаций в лобовых частях. Впервые вводится отворот по всей длине эвольвентной части относительно опорной конической поверхности в сторону, обратную направлению укладки обмотки, который на начальной стадии укладки способствует уменьшению перехлеста с нижней стороны заводимого замкового стержня при входении его в зацеп с уложенной лобовой частью и некоторому сокращению конструктивных зазоров между лобовыми частями [4].

Во всех случаях полный уход от перехлеста лобовых частей является нецелесообразным, ибо он вызвал бы несуразно большие зазоры и вылеты лобовых частей. Поэтому укладка замкового стержня повсеместно проводится с частичным подъемом в пазах ступенькой группы стержней, уложенных первыми. Лобовые части этой группы стержней и лобовые части замкового стержня разводят в противоположные стороны, уходя от перехлеста, образуя на момент укладки увеличенный коридор, куда заводят лобовые части всех участвующих в перемещении стержней [2, 5].

Как видно, на этом – конструктивном – этапе не удается полностью избавиться от деформации

лобовых частей, из-за чего их изоляция зачастую повреждается, и укладка замкового стержня не всегда оказывается успешной, она, как правило, достигается с 2–3 попыток с повреждением и пробоем изоляции 1–2 из числа перемещаемых стержней.

Таким образом, переход от термопластичной к термореактивной изоляции вынудил отойти от классической плотной компоновки к более просторной упаковке лобовых частей, обеспечивающей укладываемость стержней с минимальными деформациями. Теперь оказалось, что выигрыш в сокращении размеров поперечного сечения активной зоны статора, достигнутый благодаря уменьшению толщины изоляции RR, обернулся частичным проигрышем из-за её жёсткости и вынужденного увеличения вылетов лобовых частей, а вслед за ним и продольных размеров всей конструктивной торцевой зоны статора и турбогенератора в целом, особенно генераторов последнего поколения с косвенным воздушным охлаждением с многопазовыми статорами и глубокими пазами сердечника. В итоге с самого начала перехода вырисовался парадокс: обмотки с термореактивной изоляцией по аксиальным размерам лобовых частей уступают обмоткам с термопластичной изоляцией, и сколько существует изоляция RR, столько и идет поиск возможностей возврата их к прежней уплотнённой компоновке.

Второй этап по разработке способа неразрушающей "мягкой" укладки обмотки предполагал устранение вышеуказанного противоречия. Он был инициирован двумя посылами: вначале модернизацией "старых" машин, когда стало ясно, что невозможно просто так в ограниченный объём, очерченный компактными лобовыми частями с термопластичной изоляцией, вписать лобовые части с термореактивной изоляцией [6], а затем в последнее время также и переходом на более жёсткую термореактивную изоляцию RR последнего поколения с эпоксиноволачным связующим класса нагревостойкости F, не допускающую никаких деформаций ни в холодном, ни в горячем состоянии по сравнению с термореактивной изоляцией первого поколения класса B [1].

И в первом, и во втором случаях напрашивалось дальнейшее повышение конструктивной свободы в лобовых частях и увеличение их габаритов. Однако этот путь, исчерпавший себя ещё в обмотках с изоляцией RR первого поколения, сейчас стал бессмысленным, и напрашивается

необычное решение, на этот раз обращённое к технологии укладки.

Особенности геометрической конфигурации "старых" обмоток с термопластичной изоляцией и пространственные ограничения в торцевой зоне статоров не позволяли простой заменой перейти на термореактивную изоляцию. В течение более 40 лет, т.е. сколько применяется изоляция RR на заводе "Электротяжмаш", шёл поиск такой возможности, который завершился разработкой новой концепции неразрушающей сборки, свободной от необходимости подогрева и подформовки лобовых частей.

Вначале при компьютерном моделировании выполнен поиск новых приёмов неразрушающей укладки замкового стержня с использованием всех возможных перемещений первой группы уложенных и не закреплённых стержней в условиях полной свободы, ограниченной только стенками паза и малыми конструктивными зазорами между их лобовыми частями. Новая концепция способа сборки, разработанная специально для обмоток с термореактивной изоляцией взамен обмоток с компаудированной изоляцией, предполагает полный отказ от насилия над стержнями при укладке в пазы, исключение взаимного натяга соседних лобовых частей и их деформации, предотвращение механического повреждения полупроводящего пазового покрытия и изоляции с сохранением ее исходной электрической прочности после укладки. Главное условие новой концепции по выполнению сборки без разрушения изоляции состоит в предоставлении стержням дополнительной степени свободы в виде возможности перемещения их вдоль паза параллельно дну и под углом к нему без повреждающих изоляцию усилий.

Способ неразрушающей сборки предполагает взаимное перемещение в пазу в определённой последовательности незакреплённых ранее уложенных стержней из окружения замкового стержня [7,8]. При этом приподнимают поочередно лобовые части то с одной, то с другой стороны, перемещая стержни как на качелях вперед-назад, вверх-вниз, не извлекая из пазов. В результате добиваются такого сложения всех малых конструктивных зазоров в пределах перемещаемой группы первых стержней, чтобы образовались расширенные технологические коридоры между лобовыми частями первого и предзамкового стержней с обеих сторон обмотки, куда, приподнимая над

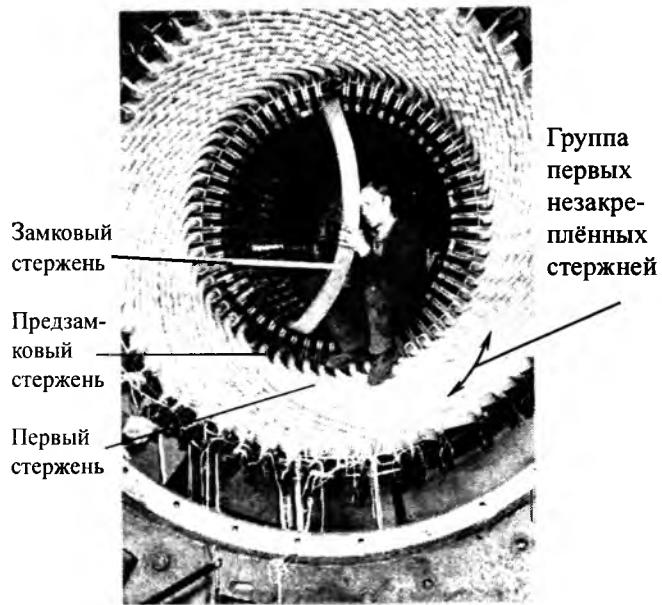


Рис.1. Укладка обмотки статора турбогенератора типа ТГВ-200-2 по способу "кобра". Замковый стержень перед укладкой в паз



Рис.3. Исходное положение лобовой части замкового стержня со стороны возбудителя после заводки лобовой части со стороны турбины

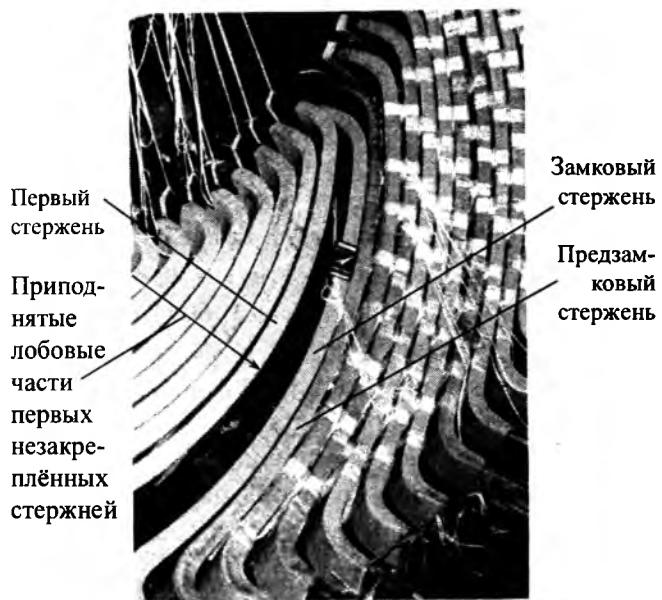


Рис.2. Заведённая лобовая часть замкового стержня со стороны турбины

опущенными и подныривая под приподнятые лобовые части, поочередно свободно заводят каждую лобовую часть замкового стержня.

По сходству приподнятых головок эвольвентных лобовых частей перемещаемого замкового стержня с застывшей головой кобры способ сборки получил название "кобра" (рис.1). Для примера далее показаны определяющие стадии неразрушающей укладки замкового стержня нижнего слоя обмотки.

На рис.2 видны сдвинутые лобовые части группы незакреплённых стержней и уложенная более длинная лобовая часть замкового стержня со стороны турбины. Там же виден образовавшийся при сдвиге стержней расширенный коридор между лобовыми частями первого и замкового стержня.

На рис.3 представлено исходное положение второй лобовой части замкового стержня со стороны возбудителя после того, как была сначала заведена его лобовая часть со стороны турбины. В этот момент лобовая часть еще удалена от расширенного коридора и ей предстоит еще переместиться к нему над лобовыми частями трёх уложенных стержней. В этой позиции замковый стержень и группа свободных стержней находятся в наклонных противоположно направленных положениях по отношению к дну паза: у замкового стержня лобовая часть опущена со стороны турбины и приподнята над лобовыми частями сдвинутых стержней со стороны возбудителя, а у группы стержней наоборот – лобовые части приподняты со стороны турбины (удерживаются бандажами) и опущены со стороны возбудителя.

На рис.4 запечатлён момент, когда приподнятая лобовая часть со стороны возбудителя замкового стержня, пройдя над тремя лобовыми частями уложенных стержней, достигла расширенного коридора и застыла над ним, готовая опустить-

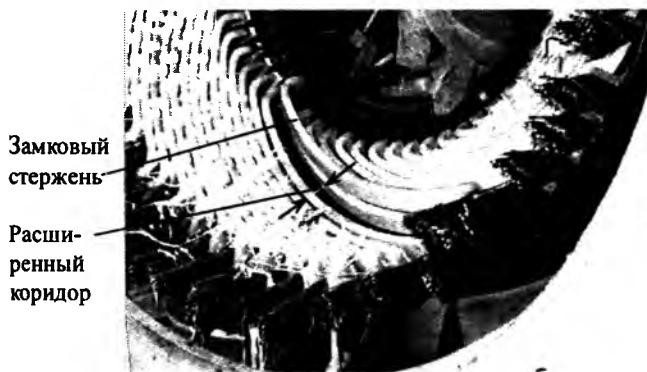


Рис.4. Приподнятая лобовая часть замкового стержня со стороны возбудителя застыла над расширенным коридором перед опусканием в номинальное положение

ся вниз и занять свое номинальное положение.

Затем разработанный на основании предложенной концепции неразрушающий способ укладки прошёл натурное моделирование на статоре турбогенератора ТГВ-200, имеющем из известных обмоток наихудшую по укладываемости конфигурацию. При этом было выполнено 7 успешных укладок замковых стержней, которые выдержали предусмотренные после этого высоковольтные испытания повышенным напряжением 45 кВ, и тем самым подтвердили высокую эффективность нового способа мягкой укладки обмотки.

После этого способ сразу же нашёл применение как при модернизации старых машин с заменой компаундированных обмоток на термореактивные, так и при замене обмоток с термореактивной изоляцией первого поколения класса нагревостойкости В на современную изоляцию класса F с эпоксиноволачным связующим. По первому пути пошло изготовление головного образца статора турбогенератора ТГВ-200-2 для Череповецкой ГРЭС (Россия, 1999 г.) с увеличением мощности с 200 до 230 МВт; по второму пути пошла модернизация первого статора турбогенератора ТГВ-325-2 для Змиевской ТЭС (Украина, 2000 г.) с повышением мощности с 300 до 325 МВт.

Разработанный способ оказался универсальным и применимым для модернизированных обмоток турбогенераторов всех фирм и заводов с любой конфигурацией лобовых частей, особенно для случаев замены компактных обмоток с микалентной изоляцией. Благодаря способу сохраняются прежние габариты и конфигурации

старых обмоток, а мощность обновленных машин без каких-либо конструктивных изменений удается повысить на 10–20%.

С другой стороны, во вновь проектируемых турбогенераторах любой мощности с этим способом пришла возможность возврата к старой классической конфигурации обмоток с компактными лобовыми частями и устранения габаритного парадокса, вызванного применением современной изоляции RR [1].

Новый способ неразрушающей укладки по своей значимости является столь же универсальным, т.е. применимым для всех обмоток с изоляцией RR, как в свое время был единственным старый способ укладки с горячей подформовкой лобовых частей. Способ может применяться как на заводе при изготовлении новых обмоток, так и на местах установки турбогенераторов при перемотке или ремонте статоров.

Способ становится практически безальтернативным при укладке стержней предельных масс (120–150 кг) мощных турбогенераторов, так как упрощаются все перемещения стержней из окружения замкового стержня, они выполняются не на весу, как при ступенчатом подъёме группы первых стержней при старом способе [2,5], а непосредственно в пазах, даже при "потолочной" укладке в случае ремонта на месте установки. На примере сборки крупногабаритных обмоток и замены повреждённых стержней турбогенераторов ТГВ-200-2 и ТГВ-325-2 с непосредственным водородным охлаждением с появлением способа достигнут действительно 100%-ный успех укладки замковых стержней без повреждения и пробоя изоляции.

Таким образом, за почти 50-летний период перехода от термопластичной к современной термореактивной изоляции RR эволюция конструкции лобовых частей и технологии неразрушающей укладки прошли три этапа: от малых зазоров и больших деформаций через большие зазоры и малые деформации к возврату к малым зазорам и исключению каких-либо деформаций, т.е. от компактных через свободные к компактным обмоткам.

Эффективность неразрушающего способа сборки обмотки оценим по открывшейся возможности применения современной изоляции RR на примере ожидаемой массовой модернизации 180 турбогенераторов типов ТГВ-200 и ТГВ-300 производства завода "Электротяжмаш", находящих-

ся с 60–70-х годов в эксплуатации в странах бывшего СССР и ближнего зарубежья. В большинстве из них изоляция выработала свой ресурс или приближается к критическому сроку службы.

При замене старых обмоток мощность каждого генератора повышается на 25–35 МВт при минимальных затратах, идущих только на изготовление обмоток.

Завод является единственным в бывшем СССР изготавителем обмоток с непосредственным водородным охлаждением с вентиляционными трубками внутри стержней между проводниками. Он оказывает весь спектр услуг по модернизации указанных генераторов – от обследования статоров и разработки проекта реконструкции до его реализации и сдаточных испытаний, подтверждающих повышение мощности модернизированных турбогенераторов.

#### Список литературы

1. Пинчук Н.Д., Пинский Г.Б., Петров В.В. и др. Разработка и внедрение новых электроизоляционных материалов и

систем термореактивной изоляции турбо-, гидрогенераторов // Электротехника. 2003. № 4. С.17–27.

2. Иноземцев Е.К. Ремонт генераторов, синхронных компенсаторов и электродвигателей. М.: Высшая школа, 1986.

3. Титов В.В., Хуторецкий Г.М., Загородная Г.А. и др. Турбогенераторы. Л.: Энергия, 1967.

4. Викторжак В.А. Опыт сборки обмотки статоров турбогенераторов с термореактивной изоляцией типа слюдотерм // Электросила. 1974. № 30. С.153–155.

5. А.с. 225999 СССР. Обмотка статора электрической машины / Ю.М.Задоров., В.Г.Ракогон, М.Я.Резин и др. // Открытия. Изобретения. 1968. № 28.

6. Кузьмин В.В., Зозулин Ю.В., Ракогон В.Г. и др. Особенности модернизации и продление ресурса статора действующих турбогенераторов серии ТГВ с водородным охлаждением мощностью 200 и 300 МВт // Новини енергетики. 2001. № 9. С.77–81.

7. Пат. 2208286 РФ. Способ укладки обмотки статора электрической машины / Л.Л.Хаймович, В.Г.Ракогон, И.Я.Черемисов // Открытия. Изобретения. 2003. № 19.

8. Пат. 61994 України. Спосіб укладання обмотки статора електричної машини / Л.Л.Хаймович, В.Г.Ракогон, І.Я.Черемісов // Откриття. Изобретения. 2003. № 12.

**Хаймович Лев Львович** – главный специалист по электрической изоляции ГП завода "Электротяжмаш", г. Харьков. Окончил в 1958 г. электроэнергетический факультет Харьковского политехнического института.

## Классификация степени старения изоляции обмоток электрических машин

ГЛИНКА Т.Я., ЯКУБЕЦ М.С.

Классификация степени старения изоляции обмоток электрических машин иллюстрируется на примере 20 машин, установленных на одной линии прокатки. Это 4 синхронных двигателя, 8 генераторов постоянного тока и 8 прокатных двигателей постоянного тока. Диагностика изоляции этих машин производилась постоянным током, при этом устанавливались следующие закономерности: зависимость сопротивления изоляции от напряжения  $R_{60} = f(U)$ ; процесс изменения тока при внезапном приложении напряжения  $i_p = f(t)$ ; процесс восстановления напряжения  $U_{od} = f(t)$ .

Используя результаты диагностических исследований изоляции обмоток электрических машин одного типа, полученных при испытании обмоток постоянным током, предпринята попытка классификации степени старения изоляции обмоток.

Объектом исследований были:

– 4 синхронных двигателя типа МЦ 325-12/12 с номинальными параметрами 7000 кВт; 6 кВ; 828 А, 500 об/мин;  $\cos\phi = 0,85$ ; возбуждение: 155 В; 266 А.

*Classification of electrical machines windings' insulation degree of wear has been presented on the basis of twenty electrical machines operating in rolling mill. Four of these are synchronous machines, eight are d.c. generators and remaining eight are rolling mill driving motors. The insulation diagnostic tests include: measurement of insulation resistance (for steady-state conditions) vs. supply voltage  $R_{60} = f(U)$ ; measurement of leakage current versus time  $i_p = f(t)$ , after a unit step voltage of rated value was applied; measurement of voltage recovery curve  $U_{od} = f(t)$ ; this is measured after the system had been earlier charged with rated voltage, and then short-circuited for  $t_z$  seconds.*

– 8 генераторов постоянного тока типа П21-35-17К с номинальными параметрами 4150 кВт; 730 В; 5670 А; 500 об/мин;

– 8 двигателей постоянного тока типа 2ПП3000/40 с номинальными параметрами 3250 кВт; 730 В; 4780 А; 55/110 об/мин; возбуждение: 110/220 В.

Машины были произведены в 1970–1973 г. заводом "Электротяжмаш" в г. Харькове (Украина) и смонтированы в прокатном цехе одного из

металлургических заводов. Машины работают с 1974 г., т.е. 30 лет. Изоляция обмоток выполнена на микарене, пропитанной электроизоляционным лаком, класс нагревостойкости изоляции В.

### Диагностика изоляции обмоток постоянным током

Диагностика системы изоляции обмоток электрических машин постоянным током является самым простым методом оценки технического состояния изоляции. Этот метод нашёл признание и получил распространение на практике, а с 1998 г. внесён в Польской стандарт PN-E-04700 как рекомендуемое испытание [1].

Оценка состояния изоляции постоянным током включает в себя три вида диагностических операций [2]:

- снятие характеристики  $R_{60} = f(U)$  в диапазоне напряжений от 0 до  $2U_N$  (насколько это возможно);
- снятие процесса изменения тока утечки  $i_p$  после внезапного приложения постоянного тока напряжением  $U_0 = U_N$  или более высокого;
- приложения к токоведущим частям, разделенным изоляцией, подвергаемой испытаниям, напряжения постоянного тока  $U_0 \geq U_N$  (с последующей выдержкой времени до достижения установленного значения тока), отключения источника питания и КЗ токоведущих частей на время  $t_z$ , после которого токоведущие части размыкаются и снимается процесс восстановления напряжения в изоляционной системе  $U_{0d}(t)$ .

Первые два испытания постоянно выполняются при периодических испытаниях изоляции электрических машин, как этого требуют инструкции по эксплуатации. Однако диапазон напряжений при таких испытаниях обычно ограничивается одним значением напряжения 2500, 1000 либо 500 В. В предлагаемой программе диагностических исследований расширяется диапазон напряжений до  $2U_N$  (если это возможно), что обеспечивает возможность снятия характеристики  $R_{60} = f(U)$  и определения  $i_p = f(t)$  при  $U_N$ .

Третий вид испытаний является относительно новым и главным для диагностики технического состояния изоляции и оценки степени её старения.

Исследования выполнялись на измерительной установке, принципиальная схема которой представлена на рис.1.

Основным элементом этой установки является источник питания постоянного тока  $Z$ , обеспечивающий регулирование напряжения от 0 до

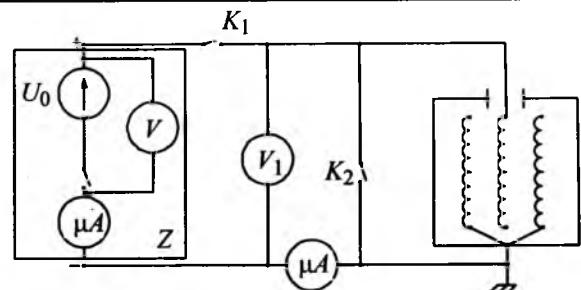


Рис.1. Схема измерительной системы для исследования изоляции напряжением постоянного тока:  
 $Z$  – высоковольтный источник питания;  $V_1$  – электростатический вольтметр

$2U_N$ , а также микроамперметр и электростатический вольтметр, кроме того, в состав установки входят выключатели  $K_1$  и  $K_2$ , обеспечивающие реализацию испытаний.

При проведении испытаний необходимо исключить влияние ограниченного сопротивления изоляции выключателей на точность измерений. В этой связи представляется рациональным производить все переключения вручную с помощью рубильников. В частности, это касается переключений, необходимых для организации КЗ токоведущих частей, разделённых испытуемой изоляцией, после их отключения от источника высокого напряжения. А также для подключения электростатического вольтметра, с помощью которого производится определение значения напряжения восстановления, измеряемого после КЗ токоведущих частей на время  $t_z$ .

По результатам проведённых измерений определяются следующие характеристики и параметры изоляционной системы:

- зависимость сопротивления изоляции  $R_{60} = f(U)$  в диапазоне напряжений от 0 до  $2U_N$ , по которой определяется сопротивление  $R_{60}$  при  $U_N$ ;
- по экстраполяции кривой  $R_{60} = f(U)$  оценивается уровень напряжения пробоя  $U_p$  изоляционной системы;
- диаграмма восстановления напряжения  $U_{0d}(t)$  на изоляционной системе, по которой определяется время восстановления  $t_{0d}$  и максимальное значение напряжения восстановления  $U_{0d\ max}$ ,
- коэффициент абсорбции изоляционной системы  $i_{p15}/i_{p60}$ ;
- уровень пульсаций тока утечки  $i_{p60\ max}$  и  $i_{p60\ min}$  определенный через  $t > 60$  с после момента приложения напряжения (т.е. для установившегося состояния).

Параметры, характеризующие техническое состояние изоляции представлены в табл.1.

Таблица 1

## Критерии оценки результатов исследований [1,2]

Параметр изоляционной системы	Техническое состояние изоляции			
	Хорошее	Удовлетворительное	Неудовлетворительное	
			Изоляция старая	Изоляция влажная
Напряжение пробоя $U_p/U_N$	>3	>2	~1,5	~1,0
Сопротивление $R_{60N}/U_N$ , кОм/В, при $U_N$	>10	>3	>3	<3
Время КЗ $t_z$ , с	для $U_N = 6$ кВ	≥ 30	≈ 10	1
	для $U_N < 6$ кВ	≥ 10	≈ 5	0,5
Максимальное напряжение восстановления $U_{0d\max}/U_0$	>0,1	> 0,05	= 0	= 0
Время восстановления напряжения $t_{0d}$ , с	для $U_N = 6$ кВ	> 120	≈ 30	0
	для $U_N < 1$ кВ	> 30	≈ 15	0
Пульсация тока утечки при $U_N$	$\frac{i_{p60\max}}{i_{p60cp}}$	1÷ 1,5	1÷2	1÷5
$i_{p15}/i_{p60} = R_{60}/R_{15}$	для $U_N = 6$ кВ	> 2	≥ 1,5	≈ 1
	для $U_N < 1$ кВ	> 1,5	> 1,2	≈ 1

Таблица 2

## Степень старения изоляции обмоток

Заводской номер машины	Синхронный двигатель типа МС 325-12/12		
	Техническое состояние изоляции обмоток		
	Якорь	Индуктор	Примечания
700 887	4	4	-
710 052	4	2	Загрязнение головки контактных колец
730 244	4	3	-
710 107	4	1	Чрезвычайно сильное загрязнение головки контактных колец

## Генераторы постоянного тока типа Р21-35-17К

Заводской номер машины	Техническое состояние изоляции обмоток		
	Ротор А1А2	Статор	Примечания
		B1C2	
710 054	1	1	3
700 888	1	1	4
710 013	1	1	2
710 053	3	2	5
700 889	1	1	2
730 299	4	5	4
710 108	3	3	4
710 014	2*	2	4

## Прокатные двигатели 2РР 3000/40

Заводской номер машины	Техническое состояние изоляции обмоток		
	Ротор А1А2	Статор	Примечания
		B1C2	
720 161	4*	4	4
720 160	4	4	3
720 486	5	5	5
720 487	3*x	5	5
720 305	1*	5	5
720 306	5	5	5
720 630	5	5	5
720 631	5*	5	5

\* - Диагностические параметры изоляции обмотки представлены на рис. 2, 3, 4, а также в табл. 3.

Таблица 3

## Оценка результатов исследований изоляции обмотки якоря А1А2

Заводской номер машины	720 631	720 161	720 487	710 014	720 305
Номинальное напряжение обмотки, В	580	580	580	730	580
Напряжение пробоя $U_p/U_N$	> 3	~3	> 2	~2	~1
Сопротивление $R_{60}/U_N$ , кОм/В, при $U_N$	1450	42	10	1,6	0,08
Восстановление напряжения	Время КЗ $t_z$ , с	10	10	10	1
	$U_{0d\max}/U_0$	0,17	0,32	0,27	0
	Время восстановления $t_{0d}$ , с	150	50	30	0
$i_{p15}/i_{p60}$	2	1,9	1,1	1	1
Пульсация тока утечки при $U_N$	$\frac{i_{p60\max}}{i_{p60cp}}$	1	1	1	1
Оценочный балл степени старения изоляции	5	4	3	2	1

### Оценка степени старения изоляции

Измеренные характеристики и параметры изоляционной системы можно разделить на категории с номерами от 5 до 0:

5 – изоляция очень хорошая (новая);

4 – изоляция хорошая, но параметры восстановления напряжения и сопротивления изоляции имеют несколько меньшее значение, чем для категории 5;

3 – изоляция удовлетворительная, характеризуется снижением параметров восстановления напряжения, что говорит о существенном старении изоляции или о её загрязнении;

2 – изоляция не совсем удовлетворительная (напряжение не восстанавливается после КЗ длительностью 1 с) – изоляция состарилась или очень сильно загрязнена;

1 – изоляция неудовлетворительная, появилась реальная угроза КЗ обмотки на землю в процессе работы машины;

0 – серьёзное повреждение изоляции (замыкание на корпус, витковое замыкание), состояние аварийное, изоляция состарена на 100%.

Изоляция обмоток всех упомянутых электрических машин (20 штук) была диагностирована постоянным током. Опираясь на результаты проведённых исследований, проведена классификация степени старения обмоток этих машин по предлагаемой бальной системе оценивания, которая представлена в табл.2.

Для иллюстрации отдельных диагностических уровней старения изоляции обмоток выбранных машин с разной степенью старения изоляции (от 5 до 1) представлены диаграммы:

– сопротивления изоляции  $R_{60}$  в зависимости от напряжения (рис.2);

– восстановления напряжения в функции времени (рис.3);

– тока утечки  $i_p(t)$  после внезапного приложения напряжения постоянного тока (рис.4),

а диагностические параметры, определённые из этих диаграмм, представлены в табл.3. Эти параметры являются основанием для определения оценочных баллов (от 5 до 1) степени старения изоляции.

У двигателей, степень старения изоляции которых оценивается 2 или 1, при проведении испытаний напряжение не восстанавливается. В этих случаях, авторы, как правило, выполняют дополнительные испытания: определение особенностей исчезновения напряжения на изоляционной системе после отключения от источника питания. В системах изоляции со степенью

старения 1 напряжение исчезает практически мгновенно, а в системах со степенью старения 2 – процесс исчезновения длится более 10 с.

### Выводы

1. Информация, полученная в результате диагностических исследований изоляции обмоток напряжением постоянного тока, даёт возможность сделать корректную оценку степени её старения.

2. Исходя из накопленного опыта эксплуатации

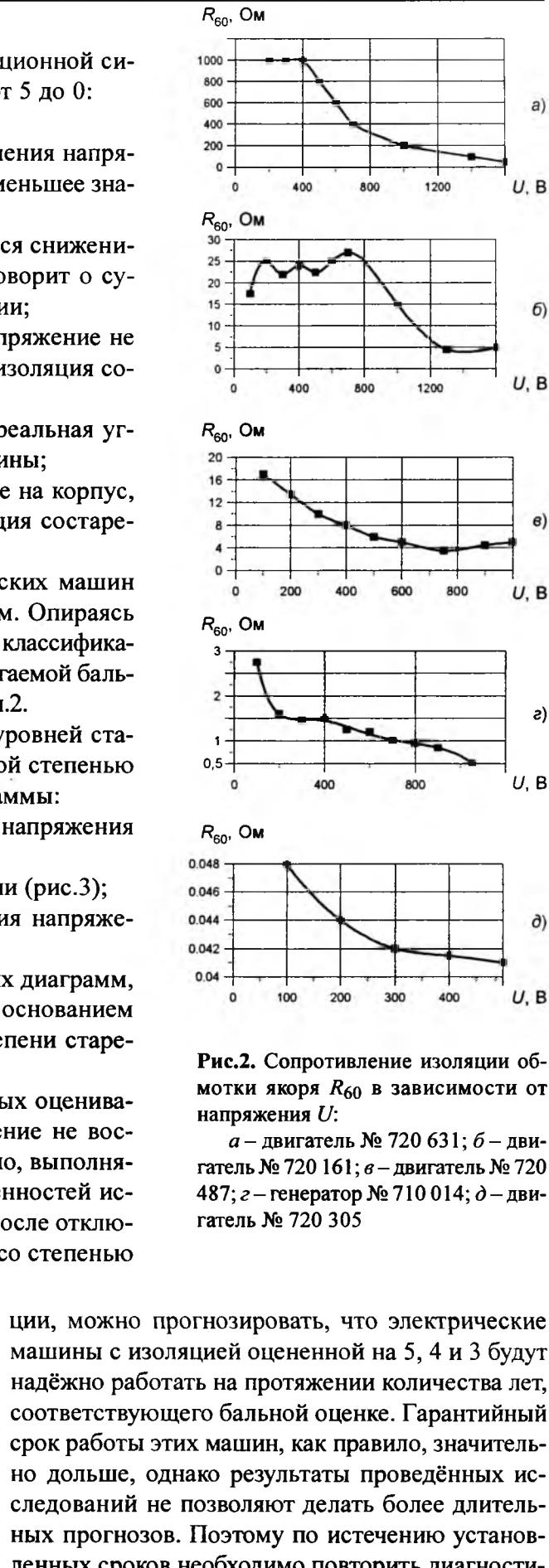


Рис.2. Сопротивление изоляции обмотки якоря  $R_{60}$  в зависимости от напряжения  $U$ :

а – двигатель № 720 631; б – двигатель № 720 161; в – двигатель № 720 487; г – генератор № 710 014; д – двигатель № 720 305

ции, можно прогнозировать, что электрические машины с изоляцией оцененной на 5, 4 и 3 будут надёжно работать на протяжении количества лет, соответствующего бальной оценке. Гарантийный срок работы этих машин, как правило, значительно дольше, однако результаты проведённых исследований не позволяют делать более длительных прогнозов. Поэтому по истечению установленных сроков необходимо повторить диагностические

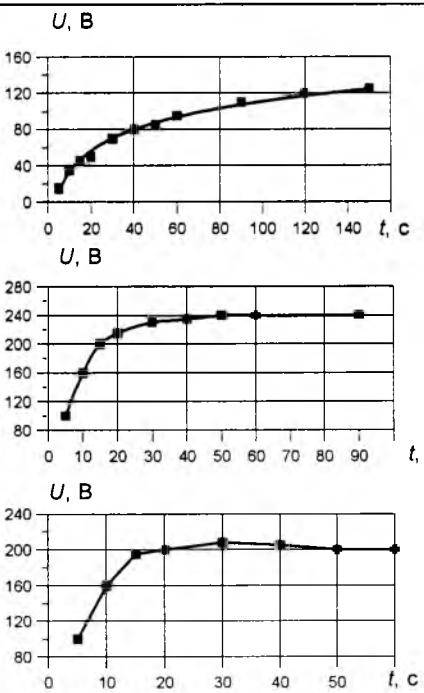


Рис.3. Диаграммы восстановления напряжения на изоляционной системе обмотки якоря:

а – двигатель № 720 631; б – двигатель № 720 161; в – двигатель № 720 487 (для машин с номерами 710 014 и 720305  $i(t) = 0$ )

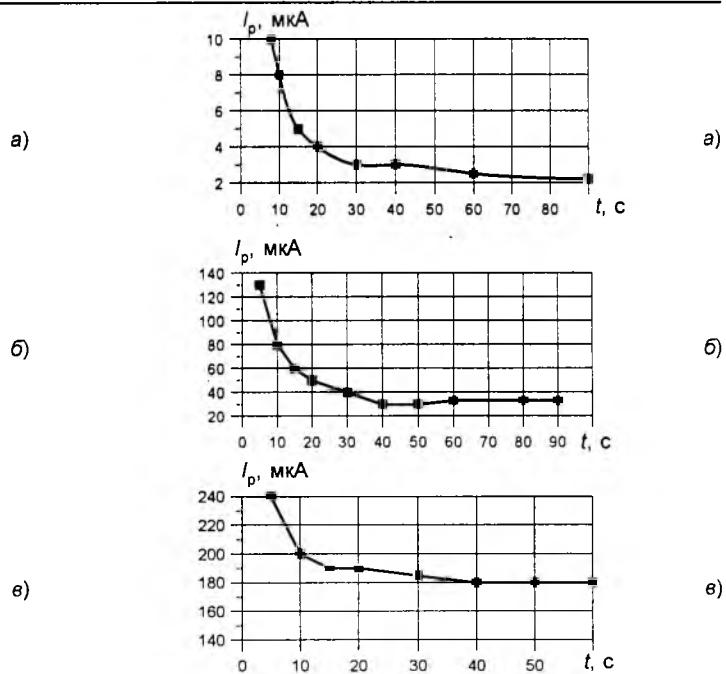


Рис.4. Изменение тока утечки  $i_p$  на изоляционной обмотке якоря после внезапного приложения номинального напряжения:

а – двигатель № 720 631; б – двигатель № 720 161; в – двигатель № 720 487 (для машин с номерами 710 014 и 720 305  $i_p(t) = \text{const}$ )

ческие исследования. Оценка с баллами 2 и 1 является негативной.

Оценка 2 говорит о том, что не более чем через год необходимо повторить измерения и быть готовым к замене изоляции обмотки. При оценке 1 не даётся никакой гарантии на возможность дальнейшей эксплуатации – авария на машине может произойти в любой момент, т.е. такую обмотку необходимо как можно скорее заменить.

3. С целью минимизации последствий аварии машины в случае оценки изоляции баллом 1 в таких машинах необходимо установить защиту:

– в синхронных и асинхронных машинах от перенапряжения, перенапряжения КЗ, замыкания на корпус и от несимметрии токов;

– в машинах постоянного тока от КЗ, перегрузок в цепи якоря ( $2, 5I_N$ ) и в цепи возбуждения ( $1, 5I_N$ ) [2].

Эти защиты должны быть надёжными.

4. По мнению авторов, другие методы диагностики, например метод частичных разрядов, не могут обеспечить достоверность оценки состояния изоляции, сопоставимой с предлагаемой.

#### Список литературы

1. PN-98/E-04700. Urzadzenia i układy elektryczne.: Wytyczne przeprowadzenia pomiarów badań odbiorczych.

2. GLINKA T. Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle. Wyd. BOBRME Komel Katowice. 2002.

3. Серебряков А.С. Оценка состояния корпусной изоляции тяговых электродвигателей по абсорбционным характеристикам // Электричество. 2004. № 6.



Глинка Тадеуш Янович – директор Института теоретической и промышленной электротехники Силезского политехнического университета, руководитель Национального совета Отраслевого научно-исследовательского центра электрических машин KOMEL, проф., доктор наук. Окончил электрический факультет

Силезского политехнического университета в 1961 г. В 1968 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме "Анализ динамических свойств машин постоянного тока", а в 1975 г. – докторскую по теме "Коммутационные свойства машин постоянного тока при пульсирующим либо быстроизменяющемся токе якоря". В 1990 г. получил должность профессора.

Якубец Мечислав Степанович – директор отраслевого научно-исследовательского центра электрических машин KOMEL, канд. наук. Окончил электрический факультет Силезской Политехники в 1961 г. В 1996 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме "Приспособление конструкций обмоток клеточных роторов асинхронных двигателей по условиям пуска".



# НАШИ ЮБИЛЯРЫ

## Виктор Миронович Нейман

Исполнилось 70 лет Виктору Мироновичу Нейману. Жизненный путь Виктора Мироновича – пример служения производству, делу и Родине.

В.М. Нейман родился 2 марта 1935 г. в г. Симферополь. После окончания МВТУ им. Баумана был направлен на Загорский электромеханический завод, где проработал до октября 1968 г. (последняя должность – начальник производства завода). Затем был переведен на работу в центральный аппарат Минрадиопрома СССР, где последовательно занимал руководящие должности, вплоть до начальника 11 Главного управления Минрадиопрома СССР. В 1986 г. окончил институт по повышению квалификации руководителей высшего звена госуправления (Академия народного хозяйства при СМ СССР). С февраля 1987 г. работал заместителем Председателя Госкомитета СССР по вычислительной технике и информатике. После ликвидации Комитета (1991 г.) возглавлял Государственную Ассоциацию по информационным технологиям, программным средствам, обслуживанию средств и систем информатики и вычислительной техники.

С ноября 1997 г. является Генеральным директором открытого акционерного общества "Научно-исследовательский институт суперЭВМ".

Работая на Загорском электромеханическом заводе, В.М. Нейман внёс большой вклад в организацию производства аппаратуры вычислительных комплексов. Особо необходимо выделить системно-комплексные работы по созданию ряда вычислительных комплексов и машин семейства ЕСЭВМ, при этом впервые в стране и странах-членов СЭВ была создана международная кооперация по разработке, производству и обслуживанию 15 моделей этого ряда. При его непосредственном участии осуществлялось производство многослойных печатных плат, средств автоматизированного изготовления узлов и блоков для вычислительной техники. Знания и опыт Неймана В.М. были направле-



ны на организацию ритмичного выпуска продукции завода, выполнению плана поставок вычислительных средств потребителю. Особое внимание уделял В.М. Нейман освоению в производстве современных по тому времени МВК "Эльбрус-1", налаживанию их серийного выпуска и отработке вычислительных систем в условиях натурных испытаний. Работая на руководящих должностях в Минрадиопроме СССР, В.М. Нейман осуществлял научно-техническое руководство предприятиями главка по организации выпуска средств вычислительной техники, оснащению заводов современными средствами автоматизации и механизации производственных процессов, в том числе гибридно-плёночной технологией, что позволило предприятиям, входящим в Главное управление, в сжатые сроки освоить выпуск быстродействующих и высоконадёжных вычислительных комплексов МВК "Эльбрус" и терминалных вычислительных машин.

Работая в Государственном комитете СССР по вычислительной технике и информатике, а также в Государственной Ассоциации, В.М. Нейман особое внимание уделял выработке основных направлений научно-исследовательских работ для НИИ и КБ, обобщению опыта разработок вычислительной техники у нас в стране и за рубежом, в том числе в странах-членах СЭВ.

ОАО "НИИ суперЭВМ", возглавляемое В.М. Нейманом, успешно ведёт разработку современных специ-

альных вычислительных комплексов, осуществляет обслуживание вычислительных комплексов, находящихся на вооружении, внедрение современных информационных услуг и информационных технологий при построении сетевых телекоммуникационных систем с использованием радиорелейного оборудования. ОАО "НИИ суперЭВМ" стало победителем конкурса в 2002 г. на проведение опытно-конструкторской работы "Разработка суперкомпьютеров и рабочих станций на основе сигнальных микропроцессоров", выполненной по заказу РАСУ России по ФЦП "Реформирование и развитие оборонно-промышленного комплекса (2002–2006)".

С 1999 г. В.М. Нейман является действительным членом Академии электротехнических наук РФ.

За большие научно-технические достижения в области создания специальных автоматизированных средств управления и вычислительной техники В.М. Нейману присуждена Государственная премия СССР за 1983 г. Он имеет государственные награды: 2 ордена Трудового Красного Знамени (1970, 1977 г.), орден Дружбы народов (1987 г.), неоднократно награждался медалями и почётными грамотами. Указом Президента РФ от 18.04.1999 г. В.М. Нейман награждён орденом "За заслуги перед отечеством" IV степени.

В свой юбилей В.М. Нейман полон творческих сил, как всегда энергичен и устремлен к дальнейшему эффективному развитию акционерного и государственного секторов науки и техники как единого целого в мировом сообществе. Душевность, серьёзное восприятие и понимание коллег – это отличительная черта инженера, педагога и человека В.М. Неймана.

Академия электротехнических наук РФ от всей души поздравляет Виктора Мироновича Неймана с юбилеем и желает ему долгой плодотворной творческой деятельности на благо отечественной науки и техники, крепкого здоровья и неиссякаемой энергии.

Петленко Б.И. президент АЭН РФ

23–27 мая 2005 г.

# Электротехника 2010

## VIII симпозиум

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВИДЫ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

### ТЕМАТИЧЕСКАЯ НАПРАВЛЕННОСТЬ:

1. ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА, ПЕРЕДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
2. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА
3. РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА, АВТОМАТИКА, АСУТП, СДТУ
4. ДИАГНОСТИКА И МОНИТОРИНГ В/В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ. ПРОДЛЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ОБОРУДОВАНИЯ
5. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ЕЁ ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА
6. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ. СИСТЕМЫ ИЗОЛЯЦИИ. ИЗОЛЯЦИОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ
7. ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ
8. РАССРЕДОТОЧЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА (Генерация и распределение электроэнергии малой мощности)
9. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ И КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

**Круглый стол: ИСПЫТАНИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ В/В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

### VIII СИМПОЗИУМ ПОСВЯЩЁН:

Проблемам и направлениям развития энергетики и электротехнического оборудования  
Повышению надёжности оборудования и электроснабжения потребителей  
Экологически чистым и энергосберегающим электротехнологиям

### ПРЕДСТАВЛЕНИЕ НАЗВАНИЯ ДОКЛАДА

С АННОТАЦИЕЙ ДО 01.03.05

### ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ТЕЗИСОВ И ТЕКСТА ДОКЛАДА ДО 20.03.05

### РЕГИСТРАЦИЯ И ОПЛАТА УЧАСТИЯ С 01.12.04 ДО 10.05.05

**АДРЕС ОРГКОМИТЕТА: Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 12  
тел. (095) 361-95-20, 361-92-25, тел./факс (095) 362-55-03, 362-56-17**

**Email: travek@vei.ru, agilim@vei.ru**

**Информация в сети Internet на сайте: <http://travek.vei.ru>**  
Вологодская областная универсальная научная библиотека  
[www.booksite.ru](http://www.booksite.ru)