

ISSN 0013-5860



Электротехника
7 2007



МЕДАЛЬ
"ЗА ЗАСЛУГИ В
ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ"



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

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 «РОСЭЛПРОМ» (г. МОСКВА)

СОВЕТ УЧРЕДИТЕЛЕЙ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор **КОЧЕТКОВ В.Д.**

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

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

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).

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.

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, Главпочтамт, а/я 648.

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

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

Сдано в набор 11.05.2007. Подписано в печать 20.06.2007 Формат 60x88 1/8
Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Печ. л. 8. Заказ 141
Цена свободная. Тираж 1000 экз. Зарегистрирован Комитетом РФ по печати, регистрационный №01330.

Макет выполнен и отпечатан в ОАО «Электропривод»
107078, Москва, ул. Садовая Спасская, 1/2, стр. 5

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

- Пыхтин В.В. Метод экспериментального определения дефектности систем изоляции обмоток асинхронных двигателей с учётом различных механизмов образования дефектов 2
- Пашков Н.И. Торцевые асинхронные двигатели малой мощности с меньшей материал- и трудоёмкостью изготовления 8

УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ, РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И ЗАЩИТЫ

- Веселовский А.С., Баев В.П., Буянов Ю.Л. Экспериментальная сверхпроводниковая магнитная система с регулируемой индуктивностью обмотки энергоёмкостью 5 МДж 16
- Каттель Л.Г. Быстродействующее включающее устройство для синтетических испытаний выключателей переменного тока высокого напряжения .. 24
- Муллин В.В., Смирнов А.А., Сиберт И.И. Результаты ресурсных испытаний вакуумных дугогасительных камер со сферическими контактами 30
- Иньков Ю.М., Климаш В.С., Светлаков Д.П. Компенсаторы неактивной энергии со стабилизацией напряжения трансформаторных подстанций 34

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЁТЫ

- Копейкин А.И. Влияние нелинейного трения на динамику электромеханических систем 37
- Булль О.Б. Сравнение инженерных методов расчёта магнитных цепей и полей электромагнитов 42
- Аракелян В.Г. Исследование теплового старения изоляционных жидкостей. Ч.1. Механизмы и кинетика старения 48
- Марков А.В., Юленец Ю.П. Многофункциональный контроль параметров технологического процесса в электротермической установке высокочастотного диэлектрического нагрева 60

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

- Юрий Моисеевич Иньков 65

CONTENS

ELECTRIC MACHINES

- Pykhtin V.V. The method for defects discovering in windings insulation systems of asynchronous engines while taking into account different mechanizms of defects formation 2
- Paschkov N.I. Frontal an isochronous low-power, low material capacity and labour-itensiveness engines .. 8

SWITCHGEAR, CONTROL AND PROTECTION DEVICES

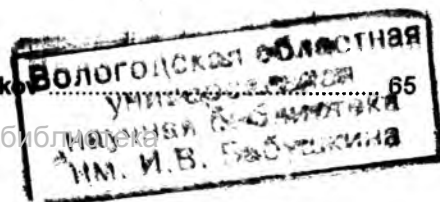
- Veselovsky A.S., Baev V.P., Buyanov Yu.L. Experimental superconducting magnet system with adjustable inductance of a winding power consumption 5 MJ... 16
- Kattel L.G. Fast-operating making device for synthetic testing of high-voltage alternating current circuit-breakers 24
- Mullin V.V., Smirnov A.A., Sibert I.I. Life test results related to vacuum circuit breakers with sphere-shaped 30
- In'kov Yu.M., Klilmash V.S., Svetlakov D.P. Compensators for inactive power in the networks with stabilizing the voltage on the loads connected to transformer substations 34

RESEARCH AND DEVELOPMENT

- Kopeikin A.I. Nonlinear friction effect on electromechanic systems dynamics 37
- Bull O.B. Comparative characters of methods magnetic circiits and fields calculations of electromagnets.... 42
- Arakelian V.G. Research of heat ageing of insulating liquids. P.1. Mechanisms and kinetics of ageing 48
- Markov A.V., Yulenets Yu.P. A complex method to control the operation process in high-frequency heating setup 60

JUBILEES

- Yuriy Moiseevich In'kov 65



Метод экспериментального определения дефектности систем изоляции обмоток асинхронных двигателей с учётом различных механизмов образования дефектов

ПЫХТИН В.В.

Проведён анализ существующих методов определения дефектности изоляции обмоток в период приработки по результатам испытаний на пробой изоляции, извлечённой из пазов непропитанного статора. Предложен метод экспериментального определения дефектности в системах изоляции пропитанных обмоток асинхронных двигателей, учитывающий различные механизмы образования дефектов, разработана конструкция макетов обмоток для проведения ускорённых испытаний.

Расчётная вероятность безотказной работы изоляции обмоток, при прочих равных условиях, определяется уровнем технологической и эксплуатационной дефектности. В нормативных документах в качестве критериев, используемых при предъявлении требований к надёжности систем витковой и корпусной изоляции обмоток асинхронных двигателей (АД), приняты технологическая дефектность и скорость дефектообразования (при воздействии основных эксплуатационных нагрузок). При этом под дефектом понимается сквозное повреждение витковой либо корпусной изоляции обмотки [1, 2].

Естественно, что при исследовании процесса дефектообразования в изоляции в обмотках электрических машин при их эксплуатации, необходимо иметь методы обнаружения и определения дефектов.

Методика определения дефектности изоляции обмоток в период приработки по результатам испытаний на пробой изоляции, извлечённой из пазов непропитанного статора [2], не пригодна в случае оценки дефектности изоляции пропитанных обмоток. В настоящей работе для оценки дефектности изоляции обмоток АД предложен метод, основанный на сравнении значений напряжений перекрытия, получен-

The analysis of existing methods for windings insulation defects discovering during the extra operation period according to spark-over tests results of insulation removed from unsoaked stator slots, has been made. The method of experimental defects discovering in soaked windings insulation systems of asynchronous engines has been suggested. The given method is intended for different mechanisms of defects formation. The windings models construction for rapid tests conducting has been developed.

ных на образцах с искусственными дефектами, и напряжений перекрытия, полученных непосредственно при испытании изоляции пропитанных обмоток [3].

Для оценки дефектности витковой изоляции предлагается определение расстояний между ближайшими дефектами производить путём испытания на пробой пар проводников в электрической машине или вне машины. Результаты, полученные этим методом, дают возможность оценить дефектность изоляции, так как расстояние между дефектами можно считать распределённым по показательному закону [4].

Рассмотрим подробнее основные положения предложенного метода оценки дефектности систем изоляции пропитанных обмоток АД.

Максимальный импульс коммутационного перенапряжения между витками обмотки асинхронных двигателей в эксплуатации не превышает 1 кВ, однако при испытании таким напряжением пробьётся небольшая доля образцов. При этом будут обнаружены только те дефекты, расстояние между которыми достаточно мало. Для получения достоверной статистики необходимо либо увеличивать число испытанных образцов, либо повышать испытательное напряжение. При росте напряжения может про-

биться изоляция, не имеющая повреждений. Для распознавания случаев перекрытия по поверхности изоляции между дефектами и случаев пробоя неповреждённой изоляции после первого пробоя образцов производится повторная подача напряжения. Значение пробивного напряжения образцов при втором пробое, в случае перекрытия между дефектами, незначительно отличается от пробивного напряжения этих образцов при первом пробое. Экспериментально при пробое искусственно повреждённых материалов было установлено, что это отличие может достигать 0,6 кВ [4]. В случае пробоя неповреждённой изоляции разность между значениями пробивного напряжения при первом и втором пробое превышает 0,6 кВ.

Зависимости среднего значения напряжения перекрытия U_k от перекрываемого расстояния X_k для эмалевой изоляции провода и слоя лавсана определены путём пробоя образцов с искусственными дефектами и представлены в табл. 1, 2.

Вероятность перекрытия с искусственного дефекта на естественный в интервале напряжения $0-U_k$ находится с учётом того, что поиск дефекта ведётся по обе стороны искусственного дефекта:

$$P_T(U_k) = 1 - e^{-2\lambda x_k}, \quad (1)$$

где x_k – расстояние, соответствующее напряжению перекрытия U_k , мм; $\lambda = 1/x$ – дефектность, мм^{-1} ; x – среднее расстояние между дефектами одного провода, мм.

Вероятность пробоя изоляции в недефектном месте напряжением U_k при условии, что в интервале напряжений $0-U_k$ отсутствовали перекрытия, определим по формуле

$$Q(U_k) = \int_0^{U_k} f_{2x}(U) dU, \quad (2)$$

Таблица 1

Зависимость $U_k(x_k)$ для эмалевой изоляции (провод ПЭТВ, Ø 1,08)

U_k , кВ	0,8	1,6	2,4	3,2	4,0	4,8	5,6
x_k , мм	0,5	1,5	2,9	5,3	9,0	13,9	18,5

Таблица 2

Зависимость $U_k(x_k)$ для лавсана

U_k , кВ	0,40	0,80	1,20	1,60	2,00	2,40	2,80
x_k , мм	0,13	0,52	0,92	1,29	1,78	2,26	2,73
U_k , кВ	3,20	3,60	4,00	4,40	4,80	5,20	6,00
x_k , мм	3,32	3,93	4,56	5,23	5,92	6,67	8,33

где $f_{2x}(U)$ – плотность распределения пробивного напряжения участка изоляции длиной $2x_k$.

При испытаниях, однако, не происходят только пробое изоляции или только перекрытия, и мы не получаем указанных распределений в чистом виде. Кроме этого, при изменении значения U_k изменяется и длина $2x_k$ испытуемого участка провода. Это усложняет нахождение параметров распределения пробивного напряжения изоляции и расстояний между дефектами. Вероятность того, что при повышении напряжения от 0 до U_{k-1} не произойдет перекрытия, а в интервале напряжения $U_{k-1}-U_k$ произойдет пробой изоляции, равна

$$q'_k = e^{-2\lambda x_{k-1}} \int_{U_{k-1}}^{U_k} f_{2x}(U) dU. \quad (3)$$

Вероятность того, что при повышении напряжения от 0 до U_{k-1} не произойдет перекрытия, а в интервале напряжения $U_{k-1}-U_k$ произойдет перекрытие по поверхности изоляции на дефект,

$$P'_k = [1 - \int_0^{U_{k-1}} f_{2x}(U) dU] (e^{-2\lambda x_{k-1}} - e^{-2\lambda x_k}). \quad (4)$$

Вероятность перекрытия при отсутствии пробоя P_k и вероятность пробоя при отсутствии перекрытия q_k можно определить из выражений (3, 4):

$$P_k = \frac{e^{-2\lambda x_{k-1}} - e^{-2\lambda x_k}}{1 - \int_0^{U_{k-1}} f_{2x}(U) dU} = \frac{P'_k}{1 - \int_0^{U_{k-1}} f_{2x}(U) dU}; \quad (5)$$

$$q_k = \int_{U_{k-1}}^{U_k} f_{2x}(U) dU = \frac{q'_k}{e^{-2\lambda x_{k-1}}}. \quad (6)$$

Поскольку значения $e^{-2\lambda x_{k-1}}$ и $\int_0^{U_{k-1}} f_{2x}(U) dU$

неизвестны, предлагается итерационный расчёт по рекуррентным формулам, причём для первого разряда принимается:

$$q_1 = \int_0^{U_1} f_{2x}(U) dU \approx q'_1; \quad (7)$$

$$P_1 = 1 - e^{-2\lambda x_1} \approx P'_1. \quad (8)$$

Полная схема расчёта приведена в табл. 3. По найденному значению $P_T(U_k)$ из выражения (1) определяется дефектность витковой изоляции λ , мм^{-1} ,

Схема итерационного расчёта по рекуррентным формулам

P'_1	P'_2	P'_3	...	P'_k	
q'_1	q'_2	q'_3	...	q'_k	
$P_1 \approx P'_1$	$P_2 = \frac{P'_2}{1-q}$	$P_3 = \frac{P'_3}{1-q_1-q_2}$...	$P_k = \frac{P'_k}{1-q_1-q_2-\dots-q_{k-1}}$	$\sum_{i=1}^k P_i = P_\tau(U_k)$
$q_1 \approx q'_1$	$q_2 = \frac{q'_2}{1-P_1}$	$q_3 = \frac{q'_3}{1-P_1-P_2}$...	$q_k = \frac{q'_k}{1-P_1-P_2-\dots-P_{k-1}}$	$\sum_{i=1}^k q_i = Q(U_k)$

$$\lambda = -\frac{\ln[1-P_\tau(U_k)]}{2x_k} \quad (9)$$

Методом сравнения напряжений перекрытия можно определить и дефектность корпусной изоляции. Эта дефектность выражает число дефектов на единице площади изоляции и определяется из выражения

$$P_\tau(U_k) = 1 - e^{-\lambda x_k S_k}, \quad (10)$$

где $P_\tau(U_k)$ – вероятность перекрытия согласно табл.3; S_k – площадь изоляции, в пределах которой ведётся поиск дефекта напряжением U_k .

Площадь S_k зависит от длины неизолированной части электрода l_3 и значения x_k . Для слоя изоляции, прилегающего к сердечнику:

$$S_k = \pi x_k^2 + 2x_k l_3 + l_3 d_3, \quad (11)$$

где d_3 – диаметр электрода.

Для внутреннего слоя изоляции

$$S_k = \frac{\pi x_k^2}{4} + l_3 x_k + l_3 d_3. \quad (12)$$

Количественно дефектообразование в изоляции целесообразно характеризовать приращением дефектности

$$\Delta \lambda_i = \lambda_i - \lambda'_0, \quad (13)$$

где λ_i , λ'_0 – дефектность изоляции после старения и в состоянии поставки.

Как уже отмечалось, проведение ускоренных испытаний реальных конструкций АД с целью оценки изменения уровня дефектности изоляции обмоток в процессе старения при воздействии различных эксплуатационных нагрузок требует большого количества двигателей, значительных материальных и временных затрат и т.д. В таких случаях наиболее перспективным является проведение ускоренных макетных испытаний изоляционных систем в лабораторных условиях.

В настоящей работе в соответствии с изложенной методикой определения дефектности изоляции пропитанных обмоток разработана конструкция макетов и методика ускоренных лабораторных испытаний при одновременном воздействии различных эксплуатационных нагрузок. В процессе разработки конструкции макетов обмоток был устранён основной недостаток существующих макетных испытаний изоляционных систем – различие в конструктивных параметрах и уровнях технологических воздействий на изоляцию при изготовлении реальных машин и макетов обмоток. При изготовлении макетов обмоток с целью проведения ускоренных испытаний необходимо обеспечить реальную возможность определения целого ряда нужных характеристик в процессе износа изоляции обмотки.

Задача сводится к тому, чтобы путём несущественных изменений в конструкции обмотки и технологии изготовления последней предусмотреть возможность определения пробивного напряжения изоляции и обнаружения дефектов в изоляции без извлечения обмотки из пазов пакета статора. Кроме того, нужно заранее предусмотреть возможность получения необходимого числа образцов для достижения требуемой точности результатов и обеспечить однородность выборки.

Макеты обмоток представляют собой половинки статорного железа асинхронных двигателей, в пазы которых укладывается корпусная изоляция и всыпается обмотка. Изготовление макетов (изоляция пазов статора, изготовление и укладка обмотки, установка клина, формовка лобовых частей, наложение бандажа и т.д.) производится в соответствии с заводской технологией, тем же инструментом.

Отличие конструкции изоляции в макетах от конструкции серийных машин заключается лишь в следующем. После намотки и формов-

ки катушки обмотки на шаблоне одна из лобовых частей разрезается и проводники попарно связываются в пяти местах (рис. 1).

После этого пары связанных проводников укладываются в пазы пакета статора.

Связка обеспечивает плотное касание проводников по всей длине, а фиксирующая колодка из негорючего материала – распознавание пар при испытании витковой изоляции на пробой.

Коэффициент заполнения паза макета обеспечивается равным коэффициенту заполнения паза реальных машин. После укладки обмотки в пазы пакета статора выступающие из пазов концы проводников разводятся для предотвращения перекрытий при испытании пар на пробой.

Для испытания корпусной изоляции между её слоями укладывались электроды, представляющие собой отрезки провода с неизолированной рабочей частью (рис. 2). Выступающая из паза часть электрода имеет изоляцию, пробивное напряжение и класс нагревостойкости которой выше пробивного напряжения и класса нагревостойкости корпусной изоляции.

Расположение электродов в пазу пакета статора (в макете) показано на рис. 3, 4. В каждый паз вкладывалось 4 электрода – по два с каждой стороны паза. Расстояние L между электродами по оси паза было выбрано с таким расчётом, чтобы пробивное напряжение слоя изоляции было не выше, чем напряжение перекрытия по поверхности изоляции на длине $L/2$.

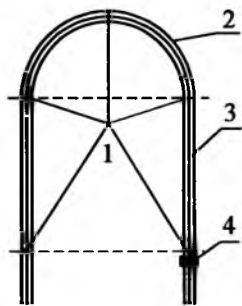


Рис. 1. Связка двух проводников:
1 – места связок; 2 – лобовая часть; 3 – пазовая часть; 4 – фиксирующая колодка

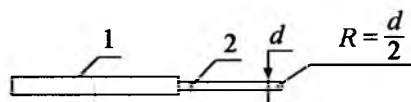


Рис. 2. Электрод для испытания корпусной изоляции:
1 – изолированная часть провода; 2 – оголённая часть электрода

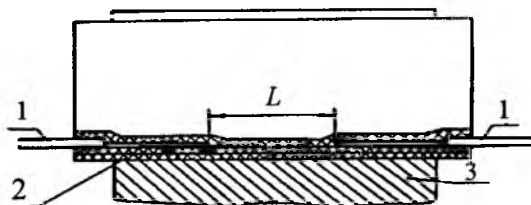


Рис. 3. Расположение электродов вдоль паза:
1 – электроды; 2 – пазовая изоляция; 3 – пакет сердечника

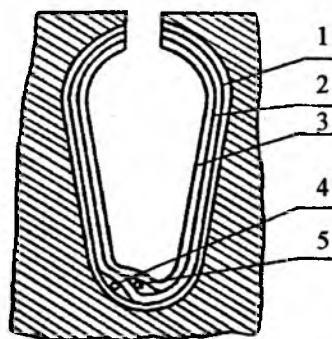


Рис. 4. Расположение электродов в поперечнике паза:
1, 2, 3 – слои изоляции; 4, 5 – электроды

Для предотвращения возможных витковых замыканий посредством электродов в моделях был уложен дополнительный слой корпусной изоляции (слой 3 на рис. 4). Выполненные таким образом макеты подвергаются пропитке в соответствии с заводской технологией.

Для обеспечения однородности выборки все макеты обмоток должны быть изготовлены из изоляционных материалов и проводов, принадлежащих одной партии. Пропитка готовых макетов выполняется одновременно (одной загрузкой), что обеспечивает одинаковые режимы пропитки и сушки.

Описанная конструкция макетов (рис. 5) позволяет получить большой объём информации об изменении дефектности изоляции. В каждом макете обмотки получаем число образцов витковой изоляции, равное числу связанных пар проводников, а число образцов корпусной изоляции, равное числу электродов, вложенных в пазы макета.

Ускоренные испытания макетов предложенной конструкции позволяют проводить изучение характера и скорости изменения дефектности изоляции при одновременном воздействии комплекса различных эксплуатационных факторов (нагрузок). Однако при исследовании процесса



Рис.5. Макет всыпной обмотки статора асинхронного двигателя в готовом виде

дефектообразования в витковой изоляции по изложенной методике практически невозможно определить наличие дефекта на одном проводнике из связанной пары. Пробой пары проводников или перекрытие наблюдается при наличии либо совпадающих дефектов, либо несовпадающих дефектов на обоих проводниках.

В отраслевом стандарте принято, что дефекты на касающихся проводниках образуются независимо друг от друга и отказ витковой изоляции возможен лишь при совпадении дефектов. В общем случае в процессе старения возможны два механизма образования дефектов в системе пропитанных обмоток.

Во-первых, возможно развитие дефектов, прорастающих в изоляции любого из соприкасающихся эмалированных проводов либо при старении в композиции "эмаль + пропитывающий состав" (рис.6). Такие дефекты будем называть "независимыми".

Во-вторых, возможно развитие дефектов, прорастающих одновременно в композиции изоляции "изоляция провода – пропитывающий состав – изоляция провода". Такие дефекты будем называть "зависимыми" (рис.6). В связи со сказанным, необходимо иметь методику определения дефектности витковой изоляции пропитанных обмоток АД, учитывающую возможность двух названных механизмов образования дефектов. При этом необходимо учитывать, что дефекты, образующиеся на технологических операциях изготовления эмалированных проводов и обмоток АД, являются независимыми.

Экспериментальное обнаружение дефектов в изоляции может быть произведено путём испытания образцов на пробой и сравнения полученных пробивных напряжений с пробивными напряжениями аналогичной системы с искус-

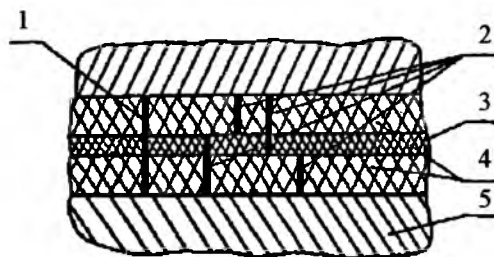


Рис.6. Возможные дефекты в системе витковой изоляции:

1 – дефект зависимый; 2 – дефекты независимые; 3 – пропитывающий состав; 4 – изоляция провода; 5 – медь провода

ственно нанесёнными дефектами. За дефектные принимаются образцы, пробивное напряжение которых

$$U_{\text{пр}} \leq \bar{U}_q + 3\sigma_q, \quad (14)$$

где \bar{U}_q и σ_q – соответственно среднее значение и среднеквадратическое отклонение напряжения пробоя образцов с искусственными дефектами.

В процессе проведения эксперимента с целью определения зависимых и независимых дефектов в изоляции пропитанной обмотки при воздействии различных эксплуатационных нагрузок предлагается проводить испытания специальных макетов, конструкция и технология изготовления которых несколько отличаются от уже описанных. Отличие в том, что связки образцов состоят не из двух, а из трёх касающихся отрезков проводников: двух изолированных, подлежащих испытанию, и одного неизолированного (рис.7). Процедура испытания изоляции на пробой заключается в следующем:

1. Производится пробой системы "неизолированный образец связки – замкнутые два изо-

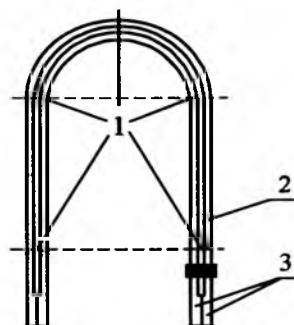


Рис.7. Связка трёх отрезков проводников:

1 – места связок; 2 – голый проводник; 3 – изолированные проводники

лированных образца этой же связки". Подъём напряжения при испытании производится до значения U_1 , соответствующего максимально-му пробивному напряжению системы с искусственным дефектом только на одном из изолированных образцов.

Пробой при напряжении, меньшем или равном U_1 , произойдёт, если хотя бы на одном из двух изолированных образцов имеется лишь один независимый дефект.

Вероятность существования хотя бы одного независимого дефекта на длине провода, равной длине образца $l_{обр}$, будет равна

$$q_n = 1 - \sqrt[1 - \frac{n_{q1}}{\sum n_1}], \quad (15)$$

где n_{q1} и $\sum n_1$ – соответственно число образцов, пробитых напряжением, меньшим или равным U_1 , и общее число испытанных образцов системы "неизолированный образец – замкнутые два изолированных образца".

Число независимых дефектов на единице длины эмалированного (изолированного) провода

$$\lambda_n = -\frac{\ln(1 - q_n)}{l_{обр}}, \quad (16)$$

где $l_{обр}$ – длина соприкосновения неизолированного образца с изолированным, мм.

2. Производится пробой системы "изолированный образец – изолированный образец". Напряжение при этом поднимается до значения U_2 , соответствующего максимальному пробивному напряжению между двумя соприкасающимися изолированными образцами с совпадавшими искусственными дефектами.

Пробой при напряжении, меньшем или равном U_2 , произойдёт, если имеется хотя бы по одному независимому дефекту на каждом из изолированных образцов, либо если имеется хотя бы один зависимый дефект, или если имеется хотя бы одно совпадение независимых дефектов на двух изолированных образцах.

Для оценки числа совпадений независимых дефектов нужно знать длину участка $l_{деф}$, в пределах которой независимые дефекты, находящиеся на касающихся проводниках, можно считать совпадающими.

На основании экспериментальных и расчётных данных установлено, что для нормальных условий окружающей среды $l_{деф} \approx 0,8$ мм [4].

Вероятность существования независимого дефекта $q_{эл}$ на длине провода $l_{деф}$, исходя из экспоненциального закона распределения расстояний между дефектами, определяется выражением

$$q_{эл} = 1 - e^{-\lambda_n l_{деф}}. \quad (17)$$

Вероятность хотя бы одного совпадения независимых дефектов q_c на касающихся изолированных проводниках длиной $l_{обр}$ в соответствии с законом умножения и сложения вероятностей,

$$q_c = 1 - (1 - q_{эл}^2)^{\frac{l_{обр}}{l_{деф}}}. \quad (18)$$

С учётом выражений (15), (18) вероятность существования хотя бы одного зависимого дефекта на длине $l_{обр}$

$$q_3 = 1 - \frac{1 - \frac{n_{q2}}{\sum n_2}}{(1 - q_n^2)(1 - q_c^2)}, \quad (19)$$

где n_{q2} и $\sum n_2$ – соответственно число образцов, пробитых напряжением, меньшим или равным U_2 , и общее количество испытанных образцов системы "изолированный образец – изолированный образец".

При расчётной оценке показателей надёжности изоляции удобно пользоваться одной характеристикой дефектности, поскольку образование одного зависимого дефекта равнозначно совпадению двух независимых, так как при этом получается одинаковая вероятность отката элемента изоляции.

Принимая зону совпадения независимых дефектов равной $l_{деф}$, можно определить значение дефектности изоляции λ_v (мм⁻¹), приведённое к независимым дефектам согласно выражению

$$\lambda_v = \frac{\sqrt{\lambda_3}}{l_{деф}} + \lambda_n, \quad (20)$$

где λ_3 – число зависимых дефектов на длине $l_{деф}$, мм⁻¹,

$$\lambda_3 = -\frac{\ln(1 - q_3)}{l_{обр}} l_{деф}. \quad (21)$$

Скорость роста дефектности (H_v , мм⁻¹·ч⁻¹) определяется выражением

$$H_v = \frac{\lambda_v - \lambda_{0в}}{\phi}, \quad (22)$$

где $\lambda_{об}$ – дефектность витковой изоляции, не подвергавшейся старению, мм^{-1} ; τ – время старения, ч.

Определение дефектности корпусной изоляции λ_k (мм^{-2}) производится путём испытания на пробой образцов изоляции и сравнении полученных пробивных напряжений с пробивными напряжениями аналогичной системы со сквозным искусственным повреждением:

$$\lambda_k = \frac{\ln\left(1 - \frac{n_{\text{деф}}}{\sum n}\right)}{S_{\text{обр}}}, \quad (23)$$

где $n_{\text{деф}}$ и $\sum n$ – соответственно число образцов корпусной изоляции, пробитых напряжением, меньшим или равным пробивному напряжению этой же системы со сквозным повреждением, и общее число испытанных образцов; $S_{\text{обр}}$ – испытываемая площадь образца корпусной изоляции, мм^2 .

Разработанный метод экспериментального определения дефектности в системах изоляции пропитанных обмоток асинхронных двигателей, учитывающий различные механизмы образования дефектов, а также предложенная конструк-

ция макетов обмоток, дают возможность получения в достаточном объёме исходных данных по дефектности витковой и корпусной изоляции до изготовления электрической машины.

Достоверность получаемых экспериментальных данных по электрической прочности и дефектности витковой и корпусной изоляции обмоток будет не ниже, чем при испытаниях реальных конструкций асинхронных двигателей.

Список литературы

1. Меламедов И.М. Физические основы надёжности. М.: Энергия, 1970.
2. Методика расчёта надёжности всыпных обмоток АД № ОАА. 682.022-71. М.: Информэлектро, 1971.
3. Пыхтин В.В. Дефектообразование в системах изоляции и надёжность обмоток асинхронных двигателей. Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 2001.
4. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и её приложение. М.: Изд-во иностр. лит. 1964.

Пыхтин Виктор Васильевич – профессор кафедры "Электромеханика" ГОУВПО "Комсомольский-на-Амуре ГТУ", канд. техн. наук, доцент. Окончил факультет "Автоматика и телемеханика" Томского политехнического института в 1972 г. Защитил диссертацию по теме "Исследование влияния конструктивных и эксплуатационных факторов на надёжность обмоток асинхронных двигателей" в ЛПИ в 1980 г.

Торцевые асинхронные двигатели малой мощности меньшей материалоемкости и трудоёмкости изготовления

ПАШКОВ Н.И.

Предложены конструкция и технология массового производства торцевых асинхронных двигателей малой мощности, позволяющая сократить материалоемкость и трудоёмкость изготовления примерно в два раза.

В современной практике электрических машин (ЭМ) малой мощности, потребляющих более 1/3 всей электроэнергии, доминируют асинхронные электродвигатели (АД) классической конструкции с цилиндрической расточкой ших-

The construction and technology of frontal asynchronous low-power engine production is suggested. It allows to establish two times less labour – intensiveness and active materials usage.

тованного зубцового статора с короткозамкнутым ротором.

Несмотря на принципиальные достоинства – отсутствие скользящих контактов; механическая жёсткость шихтованных магнитопроводов

статора и ротора (при технологической простоте их реализации одновременно с малым воздушным зазором); компенсация сил магнитного тяжения между ротором и статором, высвобождение проводников обмотки в ферромагнитных пазах от механических воздействий при передаче вращающего момента (определившие 100-летнюю незыблемость этой конструкции ЭМ), потенциал классической конструкции при существующих материалах практически исчерпан.

Факторы, лимитирующие потенциал классической конструкции ЭМ, сосредоточены в зубцово-пазовых зонах статора со насыпной обмоткой и короткозамкнутого ротора, достаточно хорошо изложены в литературе.

Технологические ограничения потенциала малых ЭМ определяются, в основном, спецификой двух многооперационных циклов штамповочно-шихтовочных и обмоточно-изолирующих работ, которые при современном уровне их механизации соответственно составляют примерно 45% общей трудоёмкости и оказывают заметное влияние на все остальные приоритетные показатели электрических машин. Кроме того, операция штамповки связана с огромными отходами листовой электротехнической стали, составляющими до 50% проектной массы изготавливаемого шихтованного магнитопровода ЭМ. Во втором цикле работ наиболее критична вся последовательность технологических операций, необходимых для выполнения насыпной обмотки статора, которая с ростом их производительности, во-первых, требует размерных ограничений геометрии зубцовой зоны (в частности, снижения активной длины ЭМ, коэффициента заполнения паза, ширины шлица) и, во-вторых, сопровождается неоднозначной деформацией проводников (местное удлинение вплоть до обрыва) и снижением свойств витковой изоляции в результате её локального утоньшения и появления точечных повреждений. Последнее существенно снижает надёжность малых ЭМ как непосредственно в процессе их изготовления (например, уровень производственного брака при изготовлении двигателей серии КД доходит до 15%), так и в результате скрытых технологических дефектов изоляции в процессе эксплуатации [1–3]. Сказанное подтверждается данными, приведёнными в табл. 1, 2, где показаны причины выхода из строя двигателей в процессе эксплуатации

и основные виды брака при изготовлении двигателя КД 120-4/... классической конструкции, взятые на одном из заводов электротехнической промышленности.

Специфика штамповочно-шихтовочных и обмоточных операций не позволяет реализовать их на универсальном оборудовании. Требуется создание уникального парка технологического оборудования с большим числом функционально независимых единиц, параметры которых помимо содержания операции, зависят от типоразмера изготавливаемых электрических машин. Уникальность таких технологических единиц и их количество, соизмеримое с числом специфических операций каждого цикла, определили весьма значительную капиталоемкость электромашиностроительного производства. Фактор больших стартовых капиталовложений породил феномен технологической преемственности вновь осваиваемых модификаций и новых типов ЭМ, особенно при крупных масштабах их производства, в том числе асинхронных двигателей. Этот феномен можно рассматривать в качестве директивно технологического ограничения потенциала малых электрических машин и своеобразного гаранта сохранности их классической конструкции. В какой-то мере утверждению этого феномена способствует международная стандартизация ЭМ и использование САПР, в которых косвенно заложены как достоинства классического построения активного объёма, так и ограничивающие факторы, обусловленные зубцово-пазовой структурой обмоточных зон.

В настоящее время этот феномен проявляется в технологическом монополизме уникального оборудования для промышленной реализации только традиционных электрических машин с цилиндрической расточкой зубцового стато-

Таблица 1

Причины выхода из строя асинхронных двигателей общепромышленного назначения

Наименование дефекта	Процент выхода из строя (серия 4А, СССР)
Повреждение обмотки статора:	69
– перегрузка	34
– потеря фазы	15
– загрязнение	20
– старение	–
Повреждение подшипников	31
Повреждение ротора	–
Разное	–

Основные виды брака при изготовлении двигателя КД 120-4/... классической конструкции (объём выпуска 200 тыс. шт. в квартал)

Брак	Количество дефектных двигателей, шт / %			
	1 кв.	2 кв.	3 кв.	4 кв.
Дефекты, связанные с установкой пазового клина	$\frac{1581}{0,79}$	$\frac{1758}{0,88}$	$\frac{1763}{0,88}$	$\frac{1811}{0,90}$
Обрыв провода при намотке	$\frac{4485}{2,44}$	$\frac{5301}{2,65}$	$\frac{5549}{2,77}$	$\frac{5345}{2,67}$
Пробой изоляции обмоток	$\frac{2002}{1,00}$	$\frac{3108}{1,55}$	$\frac{2648}{1,32}$	$\frac{2813}{1,40}$
Межвитковое замыкание до пропитки статора	$\frac{1928}{0,96}$	$\frac{731}{0,36}$	$\frac{538}{0,27}$	$\frac{896}{0,45}$
Межвитковое замыкание после пропитки статора	$\frac{5251}{2,62}$	$\frac{6669}{3,34}$	$\frac{6459}{3,23}$	$\frac{6631}{3,32}$
Сгорание обмотки во время пропитки	$\frac{855}{0,43}$	$\frac{816}{0,41}$	$\frac{771}{0,38}$	$\frac{801}{0,40}$
Пробой изоляции после сборки	$\frac{540}{0,27}$	$\frac{676}{0,34}$	$\frac{1501}{0,75}$	$\frac{1312}{0,66}$
Обрыв провода после сборки	$\frac{197}{0,10}$	$\frac{193}{0,10}$	$\frac{425}{0,21}$	$\frac{301}{0,15}$
Превышение норматива мощности и тока ХХ	$\frac{547}{0,27}$	$\frac{781}{0,39}$	$\frac{3936}{1,97}$	$\frac{3502}{1,75}$
Превышение норматива мощности ХХ	$\frac{1205}{0,60}$	$\frac{1026}{0,51}$	$\frac{6314}{3,16}$	$\frac{1289}{0,64}$
Превышение норматива тока ХХ	$\frac{314}{0,16}$	$\frac{473}{0,24}$	$\frac{2921}{1,46}$	$\frac{2405}{1,20}$
Превышение среднего уровня звука	$\frac{3095}{1,55}$	$\frac{1956}{0,98}$	$\frac{1914}{0,96}$	$\frac{2215}{0,11}$
Дефекты внешнего вида	$\frac{1286}{0,64}$	$\frac{1776}{0,89}$	$\frac{2078}{1,04}$	$\frac{2308}{1,15}$

ра, потенциал которых, несмотря на известные пути его повышения как за счёт улучшения свойств используемых материалов, так и за счёт частных конструктивно-технологических решений, практически исчерпан. В табл.3 приведена маршрутная технология штамповочно-шихтовочных и обмоточно-изолировочных операций изготовления двигателя КД 120-4/... классической конструкции одного из заводов электротехнической промышленности.

Как видно из табл.3, штамповочно-шихтовочные и обмоточно-изолировочные работы изготовления статора и ротора составляют примерно 45% всей трудоёмкости изготовления двигателя. Почти половина оборудования – верстаки, что говорит о низкой степени механизации и автоматизации производства двигателя, несмотря на многолетний период их выпуска.

Приоритет технологической преимущества существенно ослабил промышленную реали-

зацию малых ЭМ с плоской формой расточки зубцового статора, в частности, торцевых асинхронных двигателей, обладающих рядом преимуществ по сравнению с традиционными ЭМ, особенно в многополюсном исполнении. В малом электромашиностроении сложившийся феномен технологической преимущества принципиально несовместим с поиском новых конструкций активного объёма электрических машин, хотя часто служит "декларативным" основанием для их неприятия без проведения комплексной (включая технологию) опытно-промышленной апробации.

На основании патентных исследований автором разработаны торцевая конструкция однофазного асинхронного двигателя и технология его изготовления применительно к массовому производству.

Сущность торцевой конструкции активного объёма электрических машин состоит в намот-

Таблица 3

Маршрутная технология изготовления двигателя КД 120-4/... классической конструкции

Технологическая операция	Трудоёмкость, минут на 100 двигателей	Число технологического оборудования на годовую программу 500 тыс. шт. (расчётное)	Оборудование
Вырубка листа статора, ротора	67,00	1,400	Пресс-автомат усилием 100т
Развеска листов статора	72,90	1,500	Верстак
Термопарофазное оксидирование	123,0	2,560	Электропечь СПЗ
Сварка листов статора	83,00	1,730	Сварочная машина ВСС-5
Разрезка прокладки	6,672	0,140	Станок ОМ-1
Разрезка плёнки для пазового клина	4,320	0,100	Станок ОМ-1
Разрезка плёнки для межфазной прокладки	0,615	0,010	Станок ОМ-1
Вырубка межфазной прокладки	4,980	0,010	Станок ОМ-1
Разрезка прокладки	0,464	0,010	Станок ЭМ-1
Вырубка прокладки с переборкой	16,73	0,350	Станок ОМ-1
Комплектовка магнитопровода статора изолирующими прокладками	30,52	0,640	Верстак
Изолировка пазов статора	36,93	0,770	Станок ВИС-8
Намотка вспомогательной обмотки	207,207	4,320	Станок НВС-2А10
Втягивание и заклинивание вспомогательной обмотки	230,296	4,800	Станок АНБС-1А10
Разжим лобовых частей вспомогательной обмотки	48,27	1,000	Станок РС-2А
Постановка межфазных изоляционных прокладок	95,60	1,990	Верстак
Намотка главной обмотки	207,207	4,320	Станок НВС-2А10
Втягивание и заклинивание главной обмотки статора	259,698	5,400	Станок АНБС-1А10
Формовка лобовых частей обмотки статора	92,873	1,930	Станок ФС-235
Разжим лобовых частей главной обмотки	78,331	1,630	Станок ФС-235
Монтаж и пайка выводных концов статора	108,9	2,270	Верстак
Ушивка выводных концов	566,9	11,80	Верстак
Ушивка лобовых частей со стороны, противоположной выводным концам	131,01	2,730	Станок ВБС-4
Ушивка лобовых частей со стороны выводных концов	131,01	2,730	Станок ВБС-4
Калибровка лобовых частей	65,56	1,360	Станок ФС-235
Испытательная проверка межвиткового замыкания	87,549	1,820	Стенд ЕВЦИ
Учёт изготовленных статоров	50,82	1,100	Верстак
Дефектовка статоров	51,81	1,100	Верстак
Пропитка статора	233,09	4,860	Установка пропитки УПС-10
Проверка статора на межвитковое замыкание	41,437	0,860	Верстак
Развеска листов ротора	32,67	0,680	Верстак
Шихтовка листов ротора	48,62	1,000	Установка для шихтовки
Сборка пакета ротора	70,07	1,460	Пресс 289
Изготовление подшипниковых щитов, вала, шайб, винтов, гаек, сальников, втулок, прокладок, сборка и испытание двигателей и т.д. (всего 113 технологических операций)	3916,57	67,12	—
Итого	7202,63	Фактическое количество оборудования 191 ед., из них верстаков 89 ед.	

ке из ленты электротехнической стали магнитопроводов статора и ротора в виде кольца с одновременной пробивкой пазов с переменным шагом под обмотку статора и короткозамкнутую обмотку ротора.

На рис.1 показан двигатель КД 120-4/... (масса двигателя 3,85 кг) классической конструкции, а на рис.2 торцевой двигатель ДАК 120-4/... (масса двигателя 3,0 кг). Оба двигателя предназначены для одних и тех же целей, имеют одинаковые выходные показатели качества: частоту вращения ротора, полезную мощность, вращающие моменты, КПД, cosφ, пусковой ток, ток ХХ, мощность ХХ и т.д.

Торцевой двигатель (рис.2) состоит из статора 1 с обмотками 2, расположенными в двух

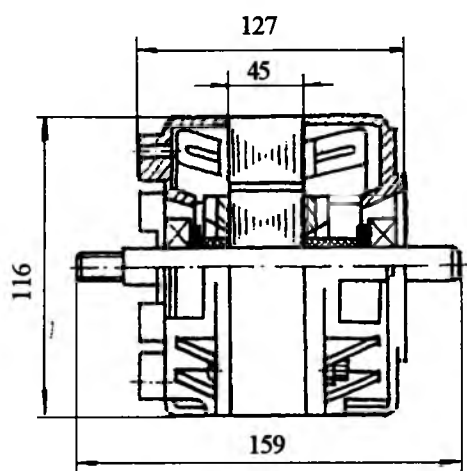


Рис.1. Двигатель КД 120-4/56 РМ6 классической конструкции

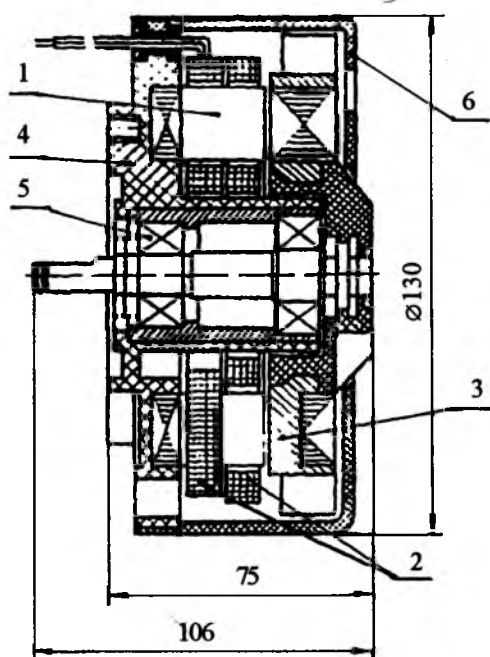


Рис.2. Двигатель торцевой ДАК 120-4/Т

уровнях так, что их лобовые части не касаются друг друга и не пересекаются между собой; ротора с короткозамкнутой обмоткой 3; одного подшипникового щита 4; подшипников 5 и крышки 6. Размещение в двух уровнях обмоток статора позволяет существенно сократить длину лобовых частей и снизить расход обмоточной меди, а также уменьшить габаритные размеры двигателя. Вместе с тем следует отметить, что при этом высота паза статора увеличивается примерно в два раза и в связи с этим повышается расход электротехнической стали. Так как обмоточная медь примерно в 10 раз дороже электротехнической стали, такой вариант конструкции экономически оправдан. Кроме того, при таком расположении обмоток не требуется формовка и ушивка лобовых частей и другие операции, связанные с механическим воздействием на обмоточный провод. Известно, что в торцевых машинах сила магнитного тяжения направлена вдоль оси вала, поэтому в предлагаемой конструкции предусмотрены подшипники качения 5, воспринимающие данную силу и препятствующие осевому воздействию вала на приводной механизм. Торцевой двигатель имеет существенно меньший условный объем (КД 120-4/... – 1341 см³, а ДАК 120-4/... – 995 см³) и гораздо меньшую аксиальную длину, он лучше встраивается в исполнительный механизм, следствием чего является уменьшение габаритных размеров прибора в целом. Например, стиральная машина СМ-1 на 1 кг сухого белья по условному объему больше, чем стиральная машина СМ-1,5 с торцевым двигателем на 1,5 кг сухого белья (рис.3 и 4). Стиральная машина СМ-1,5 с тор-

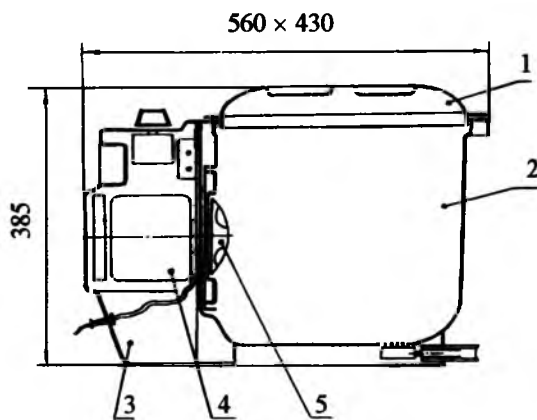


Рис.3. Стиральная машина СМ-1 ("Мана", "Малютка", "Десна" и др.):

1 – крышка; 2 – бак; 3 – кожух; 4 – двигатель КД 120-4/56 РМ6; 5 – активатор

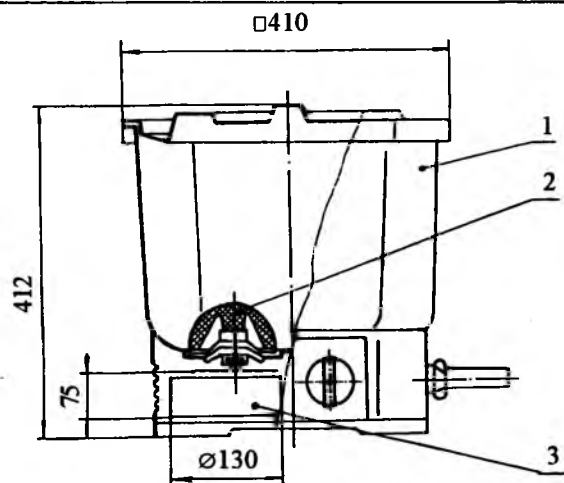


Рис.4. Стиральная машина SM-1,5 с торцевым двигателем:

1 – бак; 2 – активатор; 3 – торцевой двигатель ДАК 120-4/Т

цевым двигателем мощностью 120 Вт прошла испытания в НПО "Веста" (г. Киев) и показала результаты, отвечающие требованиям стандартов.

Автором разработана маршрутная технология изготовления торцевого двигателя применительно к массовому производству (табл.4).

Из табл.4 следует, что по сравнению с двигателем классической конструкции у торцевого двигателя трудоёмкость изготовления меньше (более чем в 2 раза), степень механизации и автоматизации технологических операций выше; номенклатура и количество технологического оборудования меньше и т. д. [4].

Три образца предлагаемой конструкции торцевого двигателя были изготовлены и испытаны

Таблица 4

Маршрутная технология изготовления торцевого двигателя ДАК 120 - 4/...

Технологическая операция	Трудоёмкость, минут на 100 двигателей	Число технологического оборудования на годовую программу 500 тыс. шт. (расчётное)	Оборудование
Изготовление магнитопровода статора в виде кольца с одновременной пробивкой пазов с переменным шагом под обмотку	150,2	4,58	Автоматическая линия изготовления витых магнитопроводов НР-1
Изготовление магнитопровода ротора в виде кольца с одновременной пробивкой пазов с переменным шагом под короткозамкнутую обмотку	152,1	4,83	Автоматическая линия изготовления витых магнитопроводов НР-1
Приготовление расплава и заливка алюминием магнитопровода ротора вместе с валом (техпроцесс аналогичен традиционной технологии)	279,4	2,58	Литейная машина
Изготовление пластмассового подшипникового щита в сборе с магнитопроводом статора (магнитопровод статора служит арматурой при прессовании пластмассы). При прессовании одновременно формируется пазовая изоляция	44,6	1,0	Роторный пресс
Намотка обмоток статора самоспекающимся проводом и установка их в пазы статора (возможна намотка простым проводом с последующей пропиткой)	500,0	3,38	Намоточный станок Ряд-01
Изготовление вала (техпроцесс тот же, что и в традиционной технологии)	528,1	–	Оборудование аналогичное традиционной технологии
Сборка двигателя	300,0	2,25	Стол слесаря-сборщика
Балансировка ротора в двигателе (в собранном двигателе на ХХ измеряется дисбаланс ротора и затем устраняется)	120,0	1,35	Балансировочный станок БС-2
Приёмо-сдаточные испытания	44,6	1,0	Автоматическая установка для проверки требуемых параметров
Другие мелкие общемашиностроительные операции (40 % от основной трудоёмкости)	847,6	–	–
Итого	2966,6	Ориентировочно, с округлением в большую сторону, 28 ед. основного (определяющего) технологического оборудования	

ны в ОАО "Армавирский электротехнический завод". Данные испытаний этих двигателей в сравнении с двигателем КД 120-4/..., выпускаемым этим заводом, приведены в табл. 5.

В данном варианте конструкции двигателя мощностью 120 Вт ($2p = 4$) и при аксиальной

высоте магнитопроводов статора и ротора 59 мм чистая масса электротехнической стали составляет 2,1 кг, а заготовительная – 2,54 кг, коэффициент использования электротехнической стали равен 0,83 (в двигателе КД 120-4/... норма расхода электротехнической стали 4,54 кг

Таблица 5

Основные показатели качества однофазных асинхронных двигателей КД 120-4/56 РМ6, КД 180-4/56 РМ6 и трёх опытных образцов однофазных асинхронных торцевых двигателей ДАК 120-4/Т

Показатель	Тип электродвигателя и номер опытного образца								
	КД120-4/56РМ № 8	КД120-4/56Р № 1	КД180-4/56Р № 2	ДАК120-4/Т № 2-А		ДАК120-4/Т № 3-А		ДАК120-4/Т № 3-III	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Напряжение питания, В	220	220	220	220	220	220	220	220	220
Частота, Гц	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Ёмкость конденсатора, мкФ	6	8	8	6	8	6	8	6	8
Частота вращения ХХ, мин ⁻¹	1491	1489	1492	1488	1485	1485	1485	1485	1485
Ток ХХ, А	0,850	0,625	1,300	0,550	0,750	0,500	0,750	0,850	0,850
Потери ХХ, Вт	110,0	105,0	155,0	110,0	170,0	105,0	170,0	125,0	170,0
Пусковой момент, Н·м	–	–	–	0,820	0,940	0,760	1,000	0,740	0,960
Пусковой ток, А	2,800	2,800	4,450	2,450	2,450	2,250	2,250	2,600	2,600
Момент КЗ, Н·м	0,490	0,580	0,900	0,500	0,540	0,400	0,580	0,360	0,520
Потери КЗ, Вт	590	550	900	425	480	400	430	520	530
Номинальный момент, Н·м	0,830	0,831	1,260	0,820	0,820	0,840	0,840	0,820	0,820
Номинальный ток, А	1,050	1,050	1,650	1,050	1,250	1,100	1,350	1,050	1,200
Номинальная мощность, Вт	122,4	120,1	185,3	121,2 (расчёт)	121,2 (расчёт)	121,2 (расчёт)	121,2 (расчёт)	121,2 (расчёт)	121,2 (расчёт)
Потребляемая мощность, Вт	205	230	330	215	275	215	280	220	260
Частота вращения при номинальном моменте, мин ⁻¹	1409	1400	1405	1404	1418	1400	1415	1425	1434
Максимальный момент, Н·м	1,470	1,460	2,400	1,600	1,820	1,550	1,900	1,700	1,840
Кратность пускового момента	–	–	–	1,000	1,146	0,905	1,190	0,902	1,171
Кратность момента КЗ	0,590	0,699	–	0,610	0,658	0,476	0,691	0,439	0,634
Кратность максимального момента	1,770	1,760	–	1,951	2,219	1,845	2,262	2,073	2,244
Средний уровень звука, дБА	48,00	48,00	–	47,50	–	–	–	–	–
Норма расхода электротехнической стали, кг	4,500	4,500	–	2,550	2,550	2,550	2,550	2,550	2,550
Коэффициент использования электротехнической стали	0,560	0,560	–	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820
Норма расхода обмоточной меди, кг	0,564	0,564	–	0,353	0,353	0,353	0,353	0,353	0,353
Масса двигателя, кг	3,850	3,950	–	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000

при чистой массе 2,56 кг, коэффициент использования электротехнической стали 0,56), снижение расхода стали на 44%; норма расхода обмоточной меди статора – 0,353 кг (в двигателе КД 120-4/... норма расхода обмоточной меди 0,564 кг), снижение расхода на 37%.

На основании изложенного можно сформулировать конструктивно-технологические преимущества торцевого активного объёма асинхронных двигателей по сравнению с классическим вариантом:

- меньшие масса и габаритные размеры двигателя (масса торцевого двигателя меньше, более чем на 20 %);

- меньшая трудоёмкость изготовления (более чем в 2 раза);

- меньший расход активных материалов (электротехнической стали примерно на 44%, обмоточной меди на 37%);

- возможна рядовая укладка проводников как круглых, так и ленточных, что адекватно увеличению достигнутого в традиционной конструкции коэффициента заполнения паза медью на 20–25% и более;

- практически снимается проблема технологических отходов электротехнической стали, коэффициент её использования более 0,8;

- обеспечивается технологическая автоматизация изготовления витых магнитопроводов

статора и ротора, катушечных групп;

- возможна балансировка ротора только с одной стороны в работающем на ХХ двигателе, что обеспечивает лучшее качество балансировки и снижение трудоёмкости балансировки;

- снижается число специфических технологических операций и, как следствие, численность и капиталоемкость парка специального оборудования, выполняющего эти операции, в частности, при производстве витых магнитопроводов торцевых машин не требуются сложные штампы для вырубки пазов, так как при намотке магнитопровода вырубается только один паз; при изготовлении катушечных групп достаточно одного наименования станка вместо нескольких, функционально независимых единиц станочного оборудования, необходимого для изготовления обмотки статора в классической технологии – намотки катушек, вытягивания их в пазы, расклинивания, разжима и формовки лобовых частей, их ушивки и т.д.;

- возможность повышения уровня механизации и автоматизации изготовления двигателей в связи с отсутствием в конструкции двигателя крепёжных винтов, гаек, шайб, сальников, гибких прокладок, меньшего общего количества деталей и узлов (в торцевом двигателе их

Таблица 6

Основные показатели качества однофазных торцевых асинхронных конденсаторных двигателей мощностью 90 – 1500 Вт

Показатель	Торцевые асинхронные двигатели ($2p = 4$)								
	90 Вт	120 Вт	180 Вт	250 Вт	370 Вт	550 Вт	750 Вт	1100 Вт	1500 Вт
Наружный диаметр магнитопроводов, мм	93,00	100,0	110,0	124,0	134,0	152,0	160,0	178,0	196,0
Обороты двигателя в номинальном режиме, мин ⁻¹	1375	1404	1380	1389	1396	1408	1405	1417	1416
Номинальный ток, А	1,084	1,202	1,630	2,088	2,957	3,925	5,034	6,947	9,199
Номинальный момент, Н·м	0,632	0,821	1,252	1,738	2,553	3,765	5,107	7,438	10,20
КПД	0,482	0,524	0,564	0,613	0,631	0,669	0,698	0,727	0,755
Кратность максимального момента	1,668	1,780	1,622	1,646	1,663	1,710	1,698	1,674	1,694
Кратность пускового момента	0,650	0,570	0,592	0,538	0,583	0,550	0,500	0,480	0,420
Кратность пускового тока	1,956	2,179	2,098	2,341	2,435	2,623	2,780	2,894	2,992
Ток ХХ, А	0,891	0,972	1,230	1,442	2,340	2,507	3,069	3,571	3,477
Мощность ХХ, Вт	119,1	132,8	170,9	191,4	276,3	348,2	411,1	521,5	563,3
Масса электротехнической стали, кг	1,143	2,081	1,890	2,885	2,916	4,290	4,613	6,650	9,000
Масса обмоточной меди, кг	0,305	0,332	0,416	0,443	0,589	0,722	0,860	0,960	1,088
Масса короткозамкнутой обмотки ротора, кг	0,133	0,143	0,157	0,150	0,232	0,274	0,322	0,382	0,424
Масса активных материалов, кг	1,581	2,556	2,463	3,478	3,737	5,286	5,795	7,992	10,51

порядка 11, в классической конструкции их несколько десятков) и т.д.;

– возможность механизации и автоматизации межоперационных транспортных операций, так как детали и узлы относительно крупные и их легко ориентировать в пространстве;

– меньшие номенклатура и масса применяемых материалов;

– снижается (в 3–5 раз) число технологических операций, способных вызвать остаточную деформацию и локальные повреждения витковой изоляции.

Таким образом, предлагаемый вариант конструкции и технологии изготовления, наиболее приемлем для организации массового производства торцевых двигателей с точки зрения снижения затрат на производство и уменьшения габаритных размеров и массы, например бытовых электроприборов.

Автором выполнен комплекс работ по разработке и внедрению новых конструкций одно-

фазных торцевых асинхронных двигателей малой мощности и их малоотходной технологии массового производства. Полученные результаты положены в основу проектирования и разработки отрезка серии перспективных, по мнению автора, торцевых асинхронных двигателей четырехполюсного исполнения в диапазоне мощностей 90–1500 Вт (табл.6).

Список литературы

1. Данилевич Я.Б. Современные проблемы электромашиностроения // Электротехника. 2003. №7. С.32–35.
2. Кравчик А.Э., Кругликов О.В. и др. Перспективы разработки и производства стандартных асинхронных электродвигателей на предприятиях группы компаний "ВЭМЗ" // Электротехника. 2005. №5. С.3–8.
3. Чувашев В.А., Броди В.Я. и др. Совершенствование асинхронных двигателей малой мощности // Электротехника. 2002. №10. С.21–25.
4. Казанский В.М., Елшин А.И. Концепция новой технологии электрических машин // Электротехника. 2004. №11. С.2–8.

УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ, РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И ЗАЩИТЫ

Экспериментальная сверхпроводниковая магнитная система с регулируемой индуктивностью обмотки энергоёмкостью 5 МДж

ВЕСЕЛОВСКИЙ А.С., БАЕВ В.П., БУЯНОВ Ю.Л.

Описана экспериментальная сверхпроводниковая магнитная система (МС) энергоёмкостью 5 МДж и мощностью на выходе не менее 130 МВт. Катушка МС секционирована в аксиальном и радиальном направлении. Радиальное секционирование даёт возможность использовать МС как регулирующую индуктивность, позволяющую стабилизировать ток. Регулируемая индуктивность может также служить эффективным инструментом при выравнивании соотношения между реактивной и активной мощностью в электросетях различного назначения (транспорт, энергетика, аварийные системы).

Magnet system (MS) by power consumption 5 MJ and output capacity not less than 130 MW is described. Coil of MS is partitioned in an axial and radial direction. Radial sectioning enables to use MS as the adjustable inductance, allowing to stabilize a current. Adjustable inductance can serve also as the effective tool at alignment of a ratio between jet and active capacity in electric systems of various purpose (transport, power, emergency systems).

С начала 90-х годов возросшее значение бесперебойности энергоснабжения привело к тому, что в оборудовании для транспортировки и распределения электроэнергии возникла потребность в достаточно мощных, быстродействующих и экономичных устройствах, способных противостоять аварийным ситуациям, связанным с отключением питания или падением напряжения в сети.

В электроэнергетике промышленно развитых стран значительное место в решении этих проблем отводится сверхпроводниковым индуктивным накопителям энергии (СПИН). В настоящее время сформировалось достаточно общее представление о разделении функций технических реализуемых накопителей в зависимости от их энергоёмкости:

– накопители средней энергоёмкости 100–1000 МДж для повышения статической и динамической устойчивости линий электропередачи, электростанций и крупных узлов нагрузки;

– накопители малой энергоёмкости 3–10 МДж для поддержания локального напряжения на подстанциях 110–220 кВ при изменениях мощности потребления, а также при аварийных кратковременных перерывах электроснабжения потребителей вследствие внезапных отключений воздушных линий электропередачи или кратковременного снижения напряжения на 30–90%.

В настоящее время наибольшее практическое применение в энергосистемах находят сверхпроводниковые накопители энергоёмкостью 3–10 МДж [1], предназначенные, в основном, для повышения качества напряжения в нормальных и аварийных ситуациях линий электропередачи. В ряде случаев используются также их возможности как регулируемых источников активной мощности. Одним из технических преимуществ таких накопителей является их высокое быстродействие (1–10 мс), позволяющее при провалах напряжения в сети обеспечивать устойчивость синхронной и асинхронной нагрузок потребителей.

Созданный и испытанный в Институте высоких температур РАН сверхпроводниковый индуктивный накопитель с запасаемой энергией 5 МДж представляет большой интерес для разработки и создания СПИН с аналогичными параметрами для опытно-промышленной эксплуатации.

Основные характеристики СПИН

Энергия в СПИН накапливается в форме энергии магнитного поля в сверхпроводящей магнитной системе, в её основной части – катушке, в обмотке которой используется сверхпроводящий кабель. Для поддержания рабочей температуры сверхпроводника в пределах 1,8–5 К катушка находится в наполненной жидким гелием ванне криостата. Поддержанное заданного температурного уровня осуществляется системой криогенного обеспечения.

На рис. 1. показана в сборе катушка магнитной системы СПИН на 5 МДж. Катушка размещалась в криостате с диаметром гелиевой ванны 1500 мм.

Техническая характеристика СПИН

Запасаемая энергия при токе 1250 А, МДж	4,7
Номинальный ток, А	1250
Максимальное расчётное напряжение на обмотке при выводе энергии, кВ	200
Плотность тока средняя по сечению обмотки, А/м ²	1,4·10 ⁷
Индукция магнитного поля в центре, Тл	3,6
Индуктивность, Гн	6,05
Максимальная мощность при управляемом разряде, МВт	125
Размеры обмотки, м:	
– внутренний диаметр	0,532
– внешний диаметр	0,960
– высота	2,58
Размеры высоковольтного токоввода, м:	
– длина	6,7
– диаметр	0,25
Масса, кг:	
– катушки	1870
– сверхпроводника в обмотке	1440
– высоковольтного токоввода	700
– изоляции токоввода	200

Для того чтобы эффективно передать энергию в нагрузку требуется решить сложную задачу по формированию импульсов энергии на выходе и стабилизации тока разряда. Наиболее эффективный путь стабилизации тока – регулировать индуктивность обмотки катушки. При создании описываемой магнитной системы использовался опыт работы различных сверхпро-



Рис.1. Общий вид обмотки сверхпроводниковой магнитной системы СПИН

водящих импульсных магнитных систем и, в основном, её прототипа – системы с регулируемой индуктивностью обмотки энергоёмкостью 0,5 МДж [2]. В ней ступенчатое изменение индуктивности обмотки обеспечивало за период 0,1 мс управление током разряда (до 1,1 кА) с выводом энергии на высокоомную нагрузку (40 Ом) с максимальным напряжением 45 кВ. Рассматриваемая магнитная система имеет большую энергоёмкость (5 МДж) и предназначена для получения мощных импульсов

энергии большой длительности (до 2 с).

Для более эффективной стабилизации тока нагрузки используется схема, в которой осуществляется предварительная стабилизация тока накопителя путём последовательного отключения части витков обмотки. Эта часть обмотки образует определённое число так называемых регулировочных секций. Для этого обмотка секционируется в радиальном направлении, что обеспечивает достаточно высокие коэффициенты магнитной связи её отдельных частей.

Рассматриваемая магнитная система представляет собой сверхпроводящую цилиндрическую катушку прямоугольного сечения, секционированную в радиальном и осевом направлениях и снабжённую системой импульсных токовводов.

Для достижения необходимой плотности тока в сверхпроводящем кабеле при параллельном включении секции катушки (например, при увеличении начального значения тока до 10 кА) и обеспечения нормального охлаждения внутренних частей обмотки, катушка в осевом направлении разбита на восемь секций (блоков). Каждая секция имеет свой каркас. Намотка секции выполнялась многожильным проводом из NbTi внешним диаметром 5 мм. Межслойная изоляция осуществлялась фторопластовой плёнкой, толщина которой составляла 1 мм. В качестве межвитковой изоляции использовалась изоляция кабеля. Между слоями расстав-

лялись проставки толщиной 2 мм, которые образовывали в обмотке каналы для омывания её жидким гелием. Фланцы каркасов со стороны обмотки имеют канавки для подвода жидкого гелия, а с наружной стороны – радиальные пазы для размещения выводных концов. Радиальные каналы со стороны обмотки обеспечивают хорошее вентилирование межслойных каналов и эффективное удаление пузырьков газообразного гелия, образующегося в результате диссипации энергии при подъёме тока в соленоиде и разряде.

Ввод и вывод энергии из СПИН

Вывод энергии из СПИН из холодной зоны в теплую осуществлялся системой криогенных токовводов: низковольтного и высоковольтного. В конструкции высоковольтного токоввода объединены в одном моноблоке стационарно нагруженный и пять импульсных токовводов. Такая конструкция позволяет изоляционный слой каждого импульсного токоввода рассчитывать только на разность потенциалов двух смежных токовводов. Устройство рассчитано на номинальное напряжение при нагрузке $U=100$ кВ. Последовательное отключение секций обмотки приводит к возрастанию напряжения на центральном, постоянно нагруженном токовводе до 200 кВ. При равномерном распределении напряжения по секциям обмотки разность потенциалов между двумя соседними импульсными токовводами составит примерно 20 кВ. Токонесущий элемент центрального, постоянно нагруженного токоввода состоит из медных прутков, разделённых турбулизаторами потока газообразного гелия, и расположен в кожухе. В нём проходит поток охлаждающего гелия с расходом около 0,7 кг/ч.

Импульсные токовводы выполнены из медных лент, изолированных между собой фторопластовой плёнкой, общей толщиной 8,5 мм. Подробно технология изготовления высоковольтного токоввода, преимущества и недостатки моноблочной конструкции ввода описаны в [3–5]. Кроме своего прямого назначения проводить ток медные ленты служат обкладками для выравнивания электрического поля в теле изолятора. Связанные с секциями обмотки они обеспечивают принудительное распределение напряжения по слоям изоляции моноблочного ввода. Импульсные токовводы в хо-

лодной и тёплой зонах ввода (в гелиевой ванне и в верхней части) оканчиваются контактными кольцами, к которым присоединяются соответственно концы обмотки сверхпроводящей катушки и шины нагрузки. Контактные кольца служат также экранами, снижающими напряжённость электрического поля на концах импульсных тоководов. Расстояния между контактными кольцами в жидком гелии – 80 мм и верхней частях моноблочного ввода – 250 мм различны и обусловлены разными расчётными значениями допустимого значения напряжённости электрического ($U_{\text{доп}}$) поля сред, в которых они должны находиться. Для верхних промежутков $U_{\text{доп}}$ было ориентировано на возможный нижний предел – смесь воздуха и тёплого гелия, который, несмотря на плотную намотку изоляционных слоёв, может просачиваться в ёмкость. Однако высоковольтный эксперимент показал, что эта смесь имеет более низкую электрическую прочность, чем предсказывает теория. При разряде СПИН на нагрузку 48 Ом (при токе $I_0 = 1 \text{ кА}$), т.е. уже при половинном номинальном напряжении на нагрузке (около 50 кВ), возникала электрическая дуга между верхними контактными кольцами. Для предотвращения пробоя эта часть высоковольтного токовода была помещена внутрь ёмкости, залитой жидким азотом, электрическая прочность которого очень высока.

Криостатирование СПИН

Для описываемой магнитной системы (МС СПИН) криостатирование производилось жидким гелием, кипящим при атмосферном давлении при $T = 4,2 \text{ К}$. Выведение СПИН на рабочий температурный режим двухэтапное:

– захлаживание МС от 300 до 90 К газообразным гелием, прокачиваемым через теплообменник, охлаждаемый жидким азотом;

– захлаживание МС от 90 до 4,5 К переливом жидкого гелия из криогенных установок под нижний фланец соленоида.

Данные по расходу жидкого и газообразного гелия и азота для обеспечения захлаживания катушки и набора заданного уровня жидкого гелия над верхним фланцем соленоида, а также данные по количеству жидкого гелия, израсходованного в процессе проведения одного полномасштабного эксперимента, представлены ниже.

Захлаживание от 300 до 90 К:

- средний расход газообразного гелия, $\text{м}^3/\text{ч}$ ~ 600
- время захлаживания, ч ~30–36
- количество жидкого азота, т ~ 10
- темп захлаживания не более, $\text{К}/\text{ч}$ 10

Захлаживание от 90 до 4,5 К:

- количество жидкого гелия, л ~14000
- время захлаживания, ч 12–20
- темп захлаживания не менее, $\text{К}/\text{ч}$ –5

Набор уровня жидкого гелия:

- количество жидкого гелия, л ~ 6000
- время набора уровня, ч ~100–140

Расход гелия в эксперименте:

- количество жидкого гелия, л ~ 3000
- время эксперимента (среднее), ч ~100
- испаряемость жидкого гелия, $\text{л}/\text{ч}$ ~10–13

Электрическая часть установки и процесс стабилизации тока

Силовая часть установки СПИН представлена на рис.2. Установка содержит два силовых контура: первый – электротехническое оборудование, необходимое для ввода тока в катушку и вывода энергии из неё при аварийной ситуации; второй – включает систему управления выходным импульсом (СУИ) и нагрузку (в данном варианте – линейная нагрузка ЛН). Основными элементами схемы являются: источник постоянного тока ИП; нормально замкнутый коммутатор B_1 с параллельно включённым сопротивлением R_1 , функция которого поглощать энергию СПИН при потере сверхпроводимости обмотки; высоковольтный вакуумный выключатель B_2 для отключения СПИН от источника тока, а также система обнаружения нормальной фазы ДФ.

Система управлением импульса может работать в двух режимах: управляемого и неуправляемого разряда. В последнем случае нагрузка непосредственно подсоединяется к концам соленоида (нерегулируемый СПИН) и ток в линейной нагрузке спадает по экспоненциальному закону с постоянной времени, определяемой отношением полной индуктивности L_c к сопротивлению нагрузки R_n . Если изменение тока в нагрузке ограничено заданными пределами ($I_n - I_k = \Delta I$), то количество выведенной энергии определяется выражением

$$\Delta E = 0,5L_{co} (I_n + I_k)\Delta I,$$

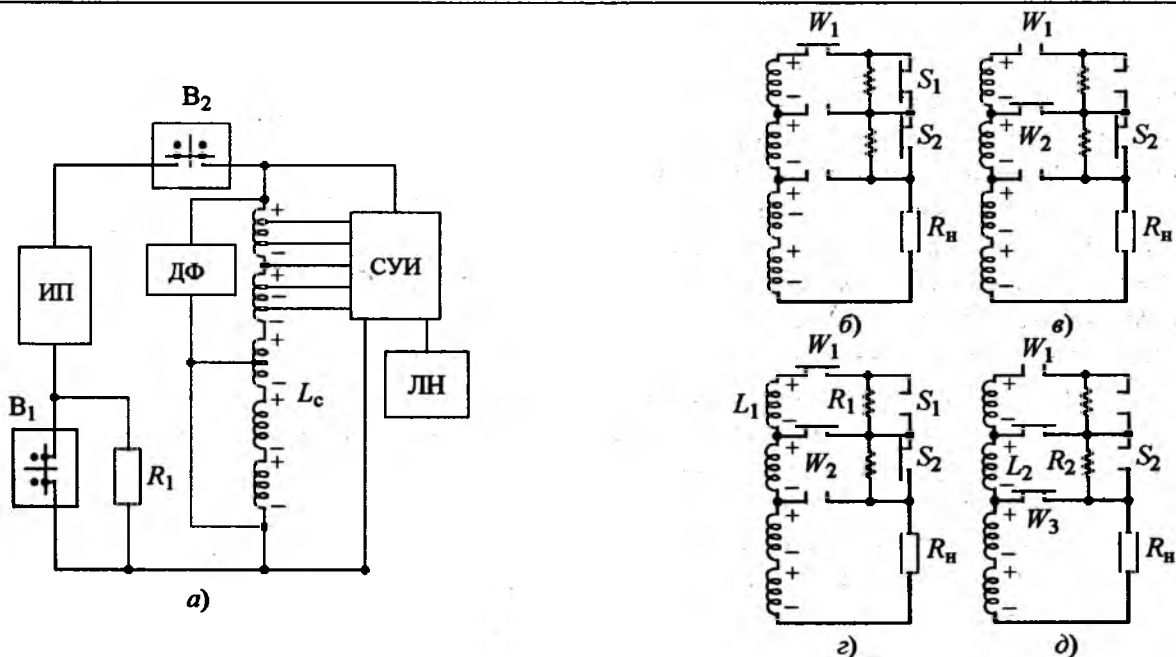


Рис.2. Принципиальная схема испытания МС с линейной нагрузкой (ИП – низковольтный источник питания; B_1 – выключатель постоянного тока (ВАБ-43); B_2 – высоковольтный вакуумный ключ (ВВК-110Б-2/1000 VI); R_1 – разрядное сопротивление, 3,06 Ом; ЛН – линейная нагрузка; СУИ – система управления импульсом; ДФ – система обнаружения нормальной фазы) (а) и последовательность перехода по отпайкам при управляемом разряде (показана только часть полного цикла) (б – д)

где L_{co} – начальная (полная) индуктивность катушки; I_n – начальное значение тока; I_k – конечное значение тока в нагрузке.

При номинальном токе $I_n = 1250$ А (сопротивление нагрузки 20 Ом) и при заданном пределе изменения тока $\Delta I = 150$ А (примерно $\pm 6,4\%$ среднего тока) значение используемой энергии при неуправляемом разряде не превышает 1,06 МДж, т.е. всего 22,6% полной запасённой энергии. Оставшаяся часть энергии (77,4%), называемая мертвым объёмом, использована не будет. Для стабилизации тока в этом случае система должна быть возвращена в исходное состояние, т.е. подключена к источнику тока ИП (рис.2).

При управляемом разряде СУИ последовательно подключает нагрузку к отпайкам соленоида. При указанных параметрах значение используемой энергии составляет уже 77,2% полной запасённой энергии ($\Delta E = 3,6$ МДж). Отметим также, что рабочий интервал времени импульса нерегулируемого разряда в два и более раз (зависит от сопротивления нагрузки) меньше времени управляемого разряда. Эти факты хорошо отражены на рис.3.

Рассмотрим вывод энергии из обмотки на

схемах, представленных на рис.2,б–д. В начальный момент времени после размыкания выключателя B_2 к нагрузке подключены стационарные токовводы через замкнутые ключи W_1, S_1 и S_2 (рис.2,б). Разряд соленоида на R_n происходит до заданного значения тока $I_k \sim 1100$ А. Напряжение на нагрузке и на обмотке U кВ. При токе $I = I_k$ к нагрузке подключается первый импульсный токоввод через замкнутые ключи W_2 и S_2 (рис.2,в). На этом этапе ключ S_1 размыкается и ток в контуре L_1-R_1 быстро затухает, а магнитная энергия связи распределяется по оставшейся части обмотки, увеличивая ток в главном контуре. При снижении тока в контуре L_1-R_1 до минимального значения, ключ W_1 размыкается и система возвращается к начальным условиям, т.е. к току $I = I_0$ (рис.2,в). На этом этапе ток в нагрузке так же, как и выше, спадает по экспоненциальному закону, но с меньшей постоянной времени. Напряжение на нагрузке остаётся почти постоянным, а на высоковольтном токовводе возрастает до значения U_1 . Если ток нагрузки падает меньше I_k , вводится следующая комбинация ключей: ключ W_3 – замкнут, ключ S_2 размыкается и образует второй контур L_2-R_2 (рис.2,д).

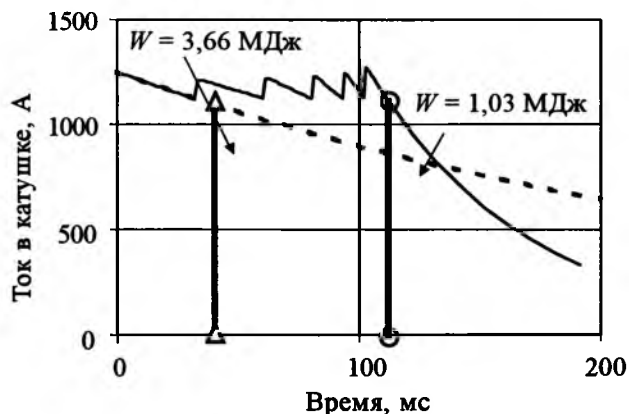


Рис.3. Диаграммы тока на линейной нагрузке при нерегулируемой индуктивности МС (---) и при регулируемой индуктивности МС (—) (W – "мёртвый объём" накопителя энергии; начальное значение тока $I_0 = 1250$ А; минимальное значение 1100 А; сопротивление нагрузки 20 Ом)

Нагрузка подсоединяется ко второй отпайке, а разряд тока в контуре L_2-R_2 приводит к восстановлению тока в оставшейся части обмотки к первоначальному значению I_0 . Такая последовательность коммутации продолжается до пятой отпайки.

Напряжение на нагрузке R_n с помощью системы коммутации остаётся постоянным и равным U , а напряжение на обмотке и на высоковольтном токовводе ещё более возрастает ($U_2 > U_1$). Как видно из рис.2 изменение напряжения происходит по автотрансформаторной схеме: возрастание U происходит на всей обмотке по мере уменьшения индуктивности в той её части, которая подключается к нагрузке. Можно считать, что значения энергии в момент переключения равны ($W = W_1$), где $W = LI^2/2$, а $W_1 = L_1 I_1^2/2$. Здесь L, I – значения индуктивности обмотки и тока до переключения и L_1, I_1 – после переключения. Следовательно, значение тока после переключения увеличивается $I_1 = (L/L_1)^{1/2}$, так как $L_1 < L$. Таким способом регулируется ток при разряде.

Экспериментальная часть

Электромагнитные характеристики сверхпроводника (СП), используемого в данной модели СПИН: критический ток $I_{кр}$; минимальный ток распространения нормальной зоны $I_{мин}$; импульсные потери и др., исследованы в предварительных экспериментах в стационарных условиях. На рис.4 представлена зависимость $I_{кр}$ от индукции магнитного поля B_e . Для

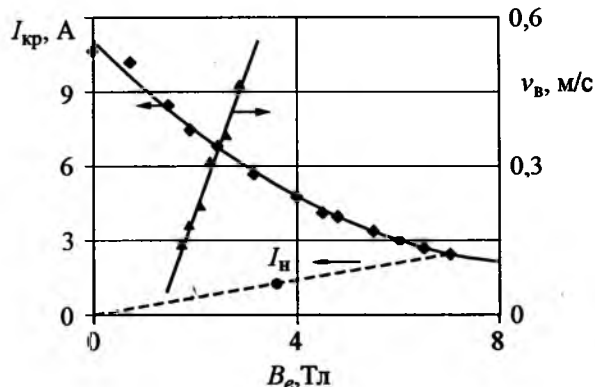


Рис.4. Зависимость критического тока $I_{кр}$ и скорости нормальной зоны v_n от индукции магнитного поля B_e

генерации больших токов (до 10 кА) использовался метод накачки потока. Точность измерения $I_{кр}$ составляла примерно 0,2%. Скорость изменения поля и тока поддерживались постоянными в пределах 10–15% и измерялись с точностью до 1%. Можно видеть, что отношение токов $I_n/I_{кр} \sim 0,5$. Значение I_n определяется уровнем стабилизации СП (параметр Стекли примерно 300) и механическими нагрузками σ_n на самый напряжённый виток обмотки. Значение σ_n не должно превосходить предельные нагрузки композитного сверхпроводника ($\sigma_{пр}$).

Испытания модели проводились на криогенном стенде ИВТ РАН по следующей программе:

1. "Тренировка" МС СПИН при вводе транспортного тока $I_{тр}$. Эксперименты показали, что при вводе тока со скоростью менее 2 А/с до значений $I_{тр} = 1305$ А (с точностью 0,1%) перехода СПИН в нормальное состояние не происходит.

2. Исследование переходных процессов в обмотке СПИН. Основной метод исследования – это искусственное инициирование нормальной зоны с помощью внедрённых в обмотку (при её создании) манганиновых нагревателей. Измерительные участки помимо нагревателей содержат также потенциальные отводы и термометры, что позволило регистрировать и полностью контролировать переходный процесс в МС.

На рис.4 изображена зависимость скорости нормальной зоны вдоль витка v_n как функция индукции магнитного поля B_e в центре соленоида. По данной зависимости, экстраполируя прямую v_n до пересечения с осью B_e , можно определить минимальный ток распространения

нормальной зоны I_{\min} . Этот ток определяет тепловую стабильность сверхпроводниковой магнитной обмотки, для которой характерна прямая зависимость между полем и током $I_{\text{тр}} = kB_e$. Эксперимент показал, что минимальные токи в обмотке и в независимом эксперименте на образце очень близки друг к другу, тем самым подтверждая идентичность теплообмена в каналах обмотки и контрольного образца.

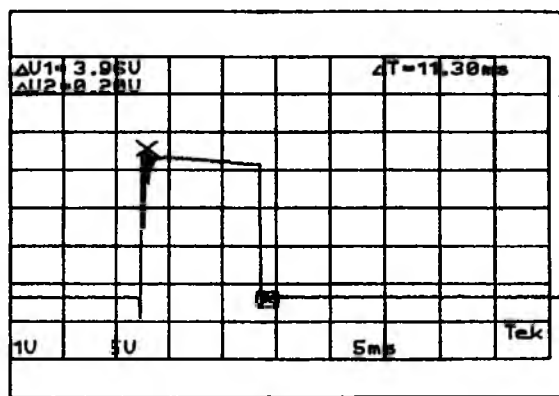
3. Исследование электрических переходных процессов в системе СПИН–СУИ при управляемом и неуправляемом разряде. Неуправляемый (апериодический) разряд осуществлялся во всём диапазоне транспортных токов до $I_{\text{тр}} = 1305$ А. Результаты этого этапа испытаний позволили определить уровень потерь энергии в обмотке СПИН при разряде на линейную нагрузку. Методика определения потерь в соленоиде общеизвестна: синхронное измерение индукции магнитного поля $B(t)$ (с помощью датчика Холла) и транспортного тока $I_{\text{тр}}(t)$. Из испытаний было получено, что при $I_{\text{тр}}$ в диапазоне токов 600–1300 А и разряде на нагрузку 3,06 Ом относительные потери постоянны и составляют примерно 0,9% полной запасаемой энергии.

В управляемом разряде использовалось три варианта схемы стабилизации выходного импульса. В первом варианте стабилизация тока осуществлялась только схемными решениями

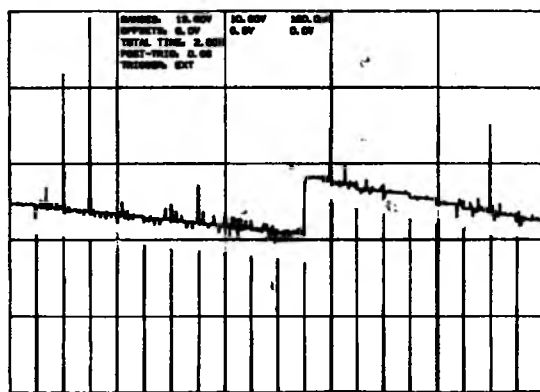
СУИ. Алгоритм управления не включал изменение индуктивности обмотки. На рис.5,а представлена осциллограмма одиночного прямоугольного импульса напряжения стабилизированного по этому варианту схемы. Начальный уровень тока $I_0 = 1100$ А, конечное значение $I_k = 1024$ А (т.е. $\Delta I = 76$ А или 6,7% I_0). При токе I_0 запасённая энергия в СПИН 3,66 МДж, а использованная около 0,46 МДж, что составило всего 13,4% общей энергии. Оставшаяся энергия (примерно 87%) была сброшена на балластную нагрузку.

Второй вариант схемы предусматривал стабилизацию тока изменением индуктивности СПИН. Изменение тока в катушке по данному алгоритму иллюстрируются на рис.3 (сплошная линия).

Третий вариант включал использование СПИН в качестве генератора периодических прямоугольных импульсов длительностью примерно 1–1,5 мс и скважностью около 100. На демонстрационной осциллограмме (рис.5,б) изображена временная функция тока в соленоиде (сплошная линия) и напряжения на нагрузке (узкие импульсы в нижней части осциллограммы). Скачок тока соответствует переходу на последующую отпайку соленоида. Из осциллограммы видно, что уровень начального тока в соленоиде восстановился и даже несколько превысил I_0 , δI_0 определяется значением тока и нагрузки, также восстановилась



а)



б)

Рис.5. Одиночный импульс тока (а) при $I_0 = 1100$ А и сопротивлении нагрузки 37 Ом (средняя мощность импульса 45 МВт, энергия импульса 0,5 МДж; записано на цифровом осциллографе фирмы "Tektronix"; развёртка по времени 5 мс/дел; развёртка по напряжению 10 кВ/дел) и стабилизация тока в режиме генератора импульсов (б) (начальный ток 500 А, сопротивление нагрузки 40 Ом; максимальная мощность в импульсе 11,3 МВт, энергия импульса 13 кДж; развёртка по току в соленоиде (—) 200 А/дел; развёртка по напряжению на нагрузке (пики в нижней части осциллограммы) 10 кВ/дел; развёртка по времени 0,4 с/дел; записано на цифровом графопостроителе НР-7093)

амплитуда напряжения на нагрузке. Данный эксперимент является наиболее серьезным подтверждением основной идеи нового поколения накопителей: осуществлять стабилизацию выходного импульса и снижать "мертвый" объём энергии можно за счёт изменения собственных параметров СПИН (изменения индуктивности обмотки).

Регистрация параметров импульса осуществлялась цифровыми и аналоговыми запоминающими приборами. Точность регистрации для цифровых осциллографов и графопостроителей составляла примерно 0,2%, а для аналоговых осциллографов примерно 2%.

Выводы

1. Создан сверхпроводниковый накопитель энергии на 5 МДж с изменяющейся индуктивностью и системой коммутации СУИ.

2. Проведено шесть серий полномасштабных испытаний этой модели. В испытаниях исследовались переходные процессы при токах 800–1120 А в стационарном режиме. Осуществлено большое количество управляемых разрядов через систему СУИ при токах примерно 1000 А и нагрузке до 48 Ом. Полная длительность разряда (определяемая алгоритмом схемы управления коммутатором) составила 2 с при токе 1000 А и 3 с при токе 500 А. Проводились также и апериодические разряды на линейную нагрузку с максимальным током 1305 А. Получены следующие максимальные параметры управляемого разряда: ток разряда 1000 А, напряжение на нагрузке 80 кВ.

3. Эксперимент показал, что наиболее слабым звеном в системе СПИН–СУИ является управляемый тиристорный коммутатор. Параметры элементов используемого коммутатора

и схемные решения не соответствуют современному уровню развития сильноточной и высоковольтной электроники.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 06-08-00813-а (2006 г.)

Список литературы

1. Глузкин И.З., Дмитриева Г.А., Мисрихаиов М.М. и др. Сверхпроводниковые токоограничивающие устройства и накопители энергии для электроэнергетических сетей. М.: Энергоатомиздат, 2002.

2. Баев В.П., Березин Г.Л., Буянов Ю.Л. и др. Сверхпроводниковая магнитная система с регулируемой индуктивностью обмотки // Приборы и техника эксперимента. 1994. №2, С.126–135.

3. Буянов Ю.Л., Березин Г.Л. Высоковольтные токовводы сверхпроводящих накопителей энергии // Автоматизация и современные технологии. 1992. №11. С.21–25.

4. Андриянов В.В., Баев В.П., Березин Г.Л. и др. Высоковольтный токоввод в индуктивный накопитель энергии // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1988. №5. С.76–82.

5. Баев В.П., Березин Г.Л., Буянов Ю.Л., Трифонов Е.С. Многоэлементный токоввод для криосоленоида // Приборы и техника эксперимента. 1993. №2. С.234–238.

Веселовский Андрей Серафимович – заместитель директора Института высоких температур РАН, канд. техн. наук. Окончил МВТУ им. Баумана в 1961 г. Защитил диссертацию по сверхпроводниковым электротехническим машинам в 1987 г.

Баев Валерий Петрович – руководитель лаборатории Института высоких температур РАН, канд. техн. наук. Окончил теплоэнергетический факультет Московского энергетического института в 1967 г. Защитил диссертацию по теме "Экспериментальное исследование потерь в комбинированных сверхпроводниках в импульсных магнитных полях" в 1978 г.

Буянов Юрий Леонидович – заведующий сектором Института высоких температур РАН, канд. техн. наук. Окончил МЭИ в 1966 г. Защитил диссертацию по теме "Исследование теплового режима и токонесущей способности криотоковводов в сверхпроводящие магнитные устройства" в 1982 г.

Быстродействующее включающее устройство для синтетических испытаний выключателей переменного тока высокого напряжения

КАТТЕЛЬ Л.Г.

Представлены характеристики быстродействующего включающего устройства, предназначенного для подключения источника тока к испытываемому выключателю при синтетических испытаниях на включающую способность. Приведены результаты испытаний, полученные путём электрических измерений и с помощью быстродействующей фотодиагностической аппаратуры. Включающее устройство, построенное на основе оригинального, самозапускающегося, быстродействующего искрового промежутка, полностью отвечает требованиям стандарта МЭК.

Characteristics of the high-speed making device intended for connection of a current source to the test circuit-breaker at synthetic making test of high voltage alternating current circuit-breaker are presented. The results of test obtained with electric measurements and by means of the high-speed photo-diagnostic techniques are submitted. The making device designed on the basis of an original, self-triggered, fast-operating spark gap, completely meets the requirements of IEC standard.

Современные выключатели на напряжение 110 кВ и выше испытываются синтетическими методами, при которых практически весь коммутируемый ток получают от одного источника питания, а напряжение, воздействующее на выключатель при испытаниях, – от одного или нескольких дополнительных источников питания.

Методы испытаний сетевых выключателей высокого напряжения непрерывно совершенствуются, и одновременно с этим стандарты МЭК налагают всё более жёсткие требования к проведению таких испытаний, чтобы они по возможности точнее воспроизводили наиболее тяжёлые режимы, возникающие в энергосистемах. В последнем стандарте МЭК [1] оговаривается, что один из опытов включения на ток КЗ должен быть выполнен с максимальной продолжительностью горения дуги между контактами выключателя. Это реализуется в случае пробоя между контактами при максимальном значении амплитуды приложенного напряжения, при включении выключателя на КЗ [2].

Включающие устройства, имеющие различные технические решения, были разработаны в ряде лабораторий [3]. В НИЦ "ТЕСТ" ВЭИ была создана собственная оригинальная конструкция включающего устройства [4–6]. Включающие устройства ВЭИ были поставлены ряду ведущих электротехнических компаний,

смонтированы в лабораториях больших мощностей, прошли приёмочные испытания и успешно эксплуатируются в течение ряда лет. Ниже представлены основные характеристики, принципы работы и показано соответствие этого устройства требованиям стандарта МЭК.

Функциональные требования к включающему устройству

Включающее устройство (ВУ) должно обеспечивать приложение высокого напряжения к зажимам испытываемого выключателя, первоначально отделённого от цепи большого тока. При испытании на включающую способность, когда в процессе операции включения выключателя происходит искровой пробой между его контактами, включающее устройство должно обеспечить коммутацию с цепи высокого напряжения на цепь большого тока с очень коротким временем запаздывания. В интервале времени между искровым пробоем межконтактного промежутка и началом протекания большого тока (тока КЗ) через выключатель должен протекать некоторый переходный ток включения (от устройства ИТМС), что обеспечивает непрерывное горение дуги между контактами вплоть до момента замыкания контактов. Схема испытаний на включающую способность, приведённая в стандарте МЭК, представлена

на рис. 1. На рис. 2 показана схема испытаний в случае применения включающего устройства ВЭИ.

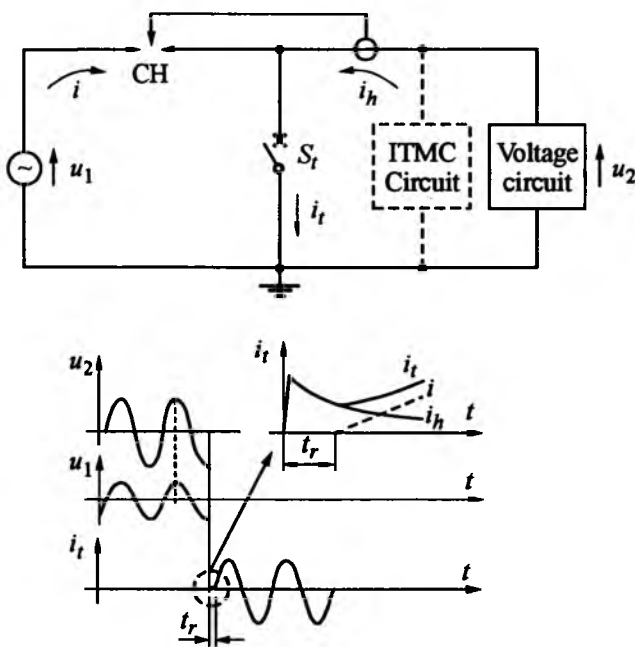


Рис. 1. Схема проведения синтетических испытаний и формы кривых тока:

u_1 – напряжение источника тока; u_2 – прикладываемое напряжение; CH – включающее устройство; i_h – переходный ток включения (ИТМС); i – ток промышленной частоты источника тока; i_t – ток в испытуемом выключателе; S_t – испытуемый выключатель; t_r – время задержки CH

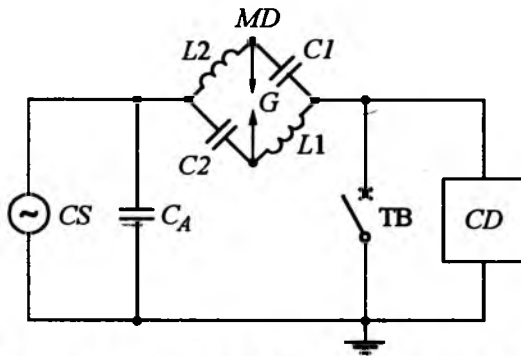


Рис. 2. Схема испытаний с включающим устройством ВЭИ:

MD – включающее устройство; G – разрядник; TB – испытуемый выключатель; CD – зарядное устройство; CS – источник тока; C_A – конденсатор защиты CS ; C_1, C_2 – главные конденсаторы MD ; L_1, L_2 – реакторы MD

Принципиальная схема и конструкция включающего устройства

Включающее устройство может состоять из одного или двух, соединённых последовательно, модулей. Модуль ВУ представляет собой последовательный разрядник, включённый

в диагональ мостовой схемы, две противоположные ветви которой состоят из конденсаторов, а две другие – из реакторов с нелинейной индуктивностью. Принципиальная схема модуля представлена на рис. 3.

Последовательный разрядник модуля ВУ состоит из четырёх идентичных открытых искровых промежутков $G1-G4$, соединённых последовательно. Подключение испытуемого выключателя к источнику тока синтетической схемы осуществляется благодаря зажиганию электрических дуг в этих промежутках. Каждый из промежутков рассчитан на работу при постоянном напряжении в пределах 60–80 кВ. Число используемых модулей и промежутков в каждом модуле зависит от номинального напряжения испытуемого выключателя. Искровые промежутки, которые не используются в заданном режиме, закорачиваются.

Каждый электрод искрового промежутка состоит из шести сферических элементов, расположенных по кругу. При этом каждый элемент имеет собственный стержневой токопровод, присоединённый к общему кольцевому коллектору. Эти токопроводы сконструированы таким образом, что возникающие при протекании тока электродинамические силы удерживают дугу в зоне вертикальной оси искровых промежутков и вращают дугу вокруг этой оси, перемещая её опорные пятна по внутренним боковым поверхностям сферических элементов. Благодаря этому обеспечивается сравнительно низкое падение напряжения на дуге и незначительная эрозия электродов, причём поверхности сферических элементов искровых промежутков, обращённые друг к другу, практически не подвергаются эрозии.

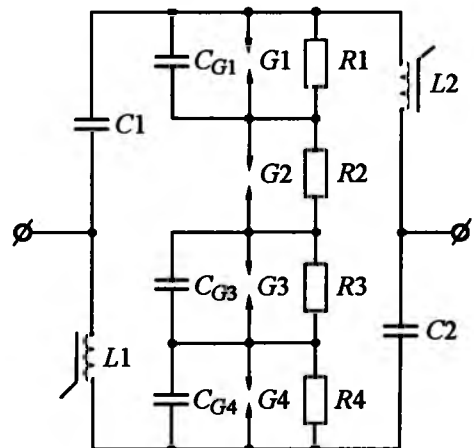


Рис. 3. Принципиальная схема модуля включающего устройства

Резисторы $R1-R4$ предназначены для обеспечения равномерного распределения постоянного напряжения между искровыми промежутками. Конденсаторы C_{G1}, C_{G3}, C_{G4} имеют разные ёмкости. Они используются для перераспределения напряжения между искровыми промежутками после пробоя испытуемого выключателя. Каждый из главных конденсаторов ($C1$ и $C2$) состоит из пяти последовательно соединённых конденсаторов типа КПИ-70-0,1 (70 кВ, 0,1 мкФ). Нелинейные реакторы ($L1$ и $L2$) выполнены в виде стержневых токопроводов, на которые надеты ферритовые сердечники. Каждый стержень вместе с сердечниками размещается в изоляционной стеклопластиковой трубе.

Опорная изоляция включающего устройства состоит из 8 стеклопластиковых стержней, смонтированных на опорной раме, снабжённой колесами. Эскиз общего вида модуля включающего устройства показан на рис. 4.

Принцип действия устройства

В зависимости от напряжения заряда конденсаторов $C1$ и $C2$ и числа используемых промежутков могут иметь место два случая пробоя искровых промежутков.

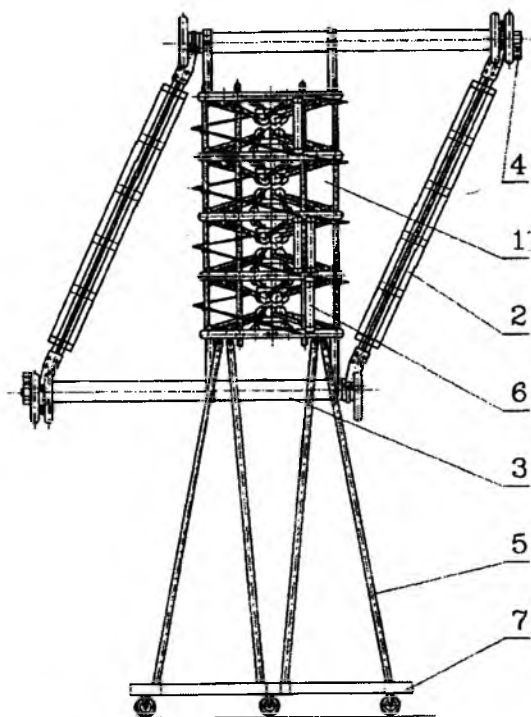


Рис. 4. Модуль включающего устройства:

1 – блок искровых промежутков; 2 – блок главных конденсаторов; 3 – реактор; 4 – клемма (вывод); 5 – опорная изоляция; 6 – конденсатор; 7 – рама - основание

Первый, когда используется только один искровой промежуток. Рис. 5 разъясняет принцип действия включающего устройства в этом случае. Для очень быстрых процессов, происходящих на элементах включающего устройства, можно рассматривать конденсатор C_A , шунтирующий источник тока, как короткозамкнутый. При этом напряжение источника тока не влияет на описываемые процессы.

Когда в процессе операции включения происходит пробой между сближающимися контактами испытуемого выключателя TB (в момент времени t_0) благодаря разрядке конденсаторов $C1$ и $C2$ через нелинейные реакторы $L1$ и $L2$ и цепь с индуктивностью L , соединяющую TB с включающим устройством, через TB начинает протекать ток $i = i/2 + i/2$. В самом начале процесса реакторы не насыщены и ток нарастает линейно и незначительно.

В этот интервал времени индуктивность реакторов $L1$ и $L2$ во много раз превышает ин-

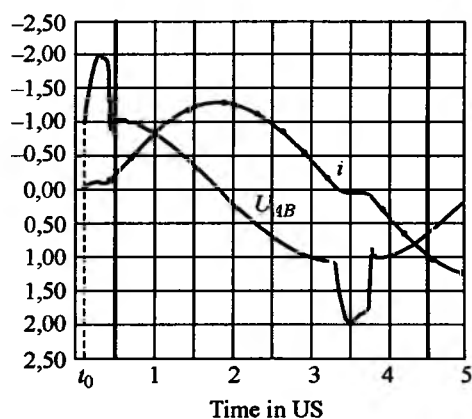
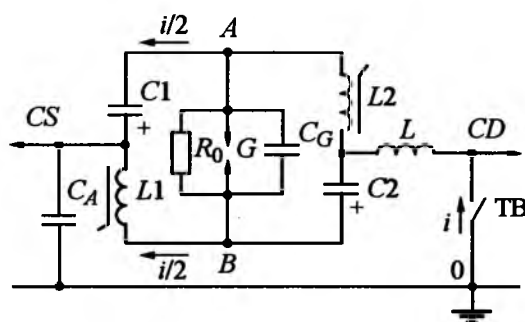


Рис. 5. Включающее устройство с одним искровым промежутком:

CS – источник тока; CD – зарядное устройство; $C1, C2$ – главные конденсаторы; $L1, L2$ – реакторы с нелинейной индуктивностью; R_G, C_G – резистор и конденсатор, присоединённые параллельно к искровому промежутку G ; TB – испытуемый выключатель; L – индуктивность соединительного контура испытательной цепи

дуктивность цепи L и практически всё напряжение заряженных конденсаторов $C1$ и $C2$ прикладывается к реакторам $L1$ и $L2$.

В результате на искровом промежутке инициируется импульс напряжения, равный сумме мгновенных значений напряжения на конденсаторе $C1(C2)$ и реакторе $L1(L2)$. Если не учитывать межэлектродную ёмкость искрового промежутка C_G и индуктивность соединительной цепи L , значение этого импульса вдвое превышает первоначальное (до момента t_0) напряжение на искровом промежутке. Практически импульс напряжения будет несколько меньше в зависимости от отношения индуктивности ненасыщенных реакторов $L1$ и $L2$ к индуктивности цепи L , соединяющей включающее устройство с испытуемым выключателем. Инициированный на искровом промежутке импульс напряжения вызывает пробой промежутка.

В это же время реакторы $L1$ и $L2$ переходят в насыщенное состояние, их индуктивность становится практически равной нулю, в результате чего через испытуемый выключатель протекает синусоидальный ток от источника тока, не ограниченный индуктивностью реакторов включающего устройства. В рассмотренном случае пробоя искрового промежутка время запаздывания обычно не превышает 0,5 мкс. Однако при минимальном напряжении на искровом промежутке не исключена вероятность пробоя промежутка на втором импульсе напряжения.

Приблизительно такое же время запаздывания (до 0,5 мкс) и когда используются два или более последовательно соединённых искровых промежутков, а напряжение заряда конденсаторов $C1$ и $C2$ ближе к наибольшему напряжению, допустимому для данного количества промежутков.

При нескольких искровых промежутках после пробоя TB прирост напряжения на них распределяется обратно пропорционально ёмкостям шунтирующих конденсаторов, т.е. проявляется эффект последовательного разрядника.

Например, при использовании двух искровых промежутков, один из которых не шунтирован конденсатором (собственная ёмкость промежутка около 50 пФ), а другой шунтирован конденсатором ёмкостью 100 пФ, прирост напряжения на первом будет в 3 раза больше, чем на втором, а так как напряжение на промежут-

ках до момента t_0 было одинаковым и равнялось половине напряжения заряда главных конденсаторов, импульс напряжения на первом промежутке достигнет 2,5-кратного значения. Инициированный импульс напряжения вызывает пробой первого промежутка с незначительной задержкой, а затем пробой второго промежутка (или каскадный пробой остальных промежутков) со временем развития в пределах половины микросекунды.

Второй случай пробоя происходит, когда используются два или более искровых промежутков, но напряжение заряда конденсаторов $C1$ и $C2$ близко к наименьшему напряжению для данного количества промежутков. В этом случае после пробоя испытуемого выключателя вначале происходят такие же процессы, как описано выше, но первый импульс напряжения на каждом искровом промежутке ниже пробивного напряжения.

Включающее устройство инжектирует в испытуемый выключатель импульс синусоидального тока длительностью несколько микросекунд. Во время этого интервала происходит перераспределение напряжения между искровыми промежутками, шунтированными кон-

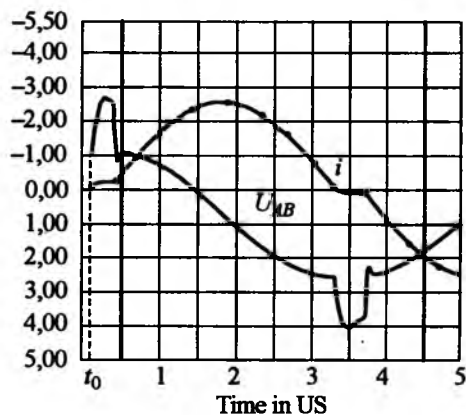
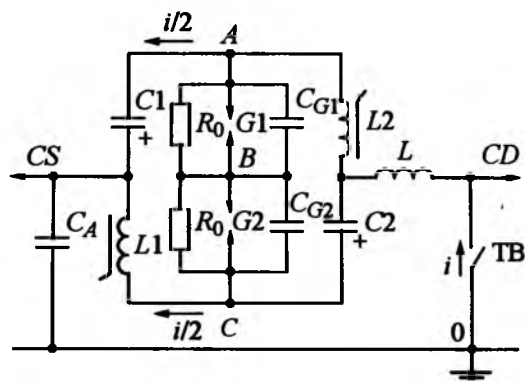


Рис.6. Включающее устройство с двумя искровыми промежутками (обозначения те же, что на рис.5.)

денсаторами разной ёмкости ($C_{G1} < C_{G2}$). Импульс напряжения на искровом промежутке G_1 (рис. 6) достигает более чем 3-кратного значения, и этот промежуток пробивается, что вызывает пробой другого промежутка (или каскадный пробой других промежутков). В этом случае время запаздывания не превышает 5 мкс.

При использовании двух модулей, включённых последовательно, механизм пробоя искровых промежутков носит такой же характер. В зависимости от напряжения заряда главных конденсаторов и количества используемых искровых промежутков каскадный пробой промежутков в модулях может происходить одновременно или последовательно. В обоих случаях время запаздывания не превышает 5 мкс.

Эксперименты

Исследовались два различных режима работы включающего устройства: срабатывание только при наличии источника высокого напряжения и развитие дуги в искровых промежутках при протекании большого тока. Исследования в первом режиме проводились по схеме, показанной на рис. 7. Конденсаторы MD (C_1 и C_2), являющиеся источником высокого напря-

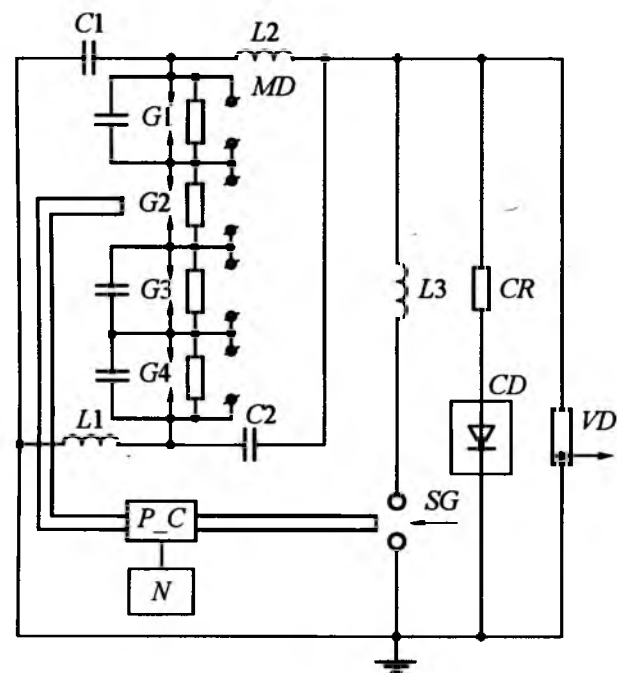


Рис. 7. Схема исследования времени запаздывания срабатывания включающего устройства:

MD – включающее устройство; SG – управляемый разрядник; CD – зарядное устройство; CR – зарядный резистор; VD – делитель напряжения; P_C – блок фотоумножителя; N – цифровой осциллограф HP 54645A

жения, заряжались от маломощного зарядного устройства CD . Испытуемый выключатель моделировался управляемым разрядником SG .

Момент срабатывания SG и искровых промежутков MD регистрировался с помощью оптоволоконных кабелей, блока фотоумножителя (P_C) и цифрового осциллографа HP 54645A. Опыты проводились при включении одного, двух, трёх и четырёх искровых промежутков, при наименьшем и наибольшем напряжениях, допускаемых для принятого количества промежутков. На рис. 8 приведены осциллограммы, полученные при 3 (G_1 , G_2 и G_3), последовательно включённых промежутках.

На осциллограмме рис. 8,а первый импульс – пробой SG , второй – пробой G_2 (а также G_1 и G_3) MD . На осциллограмме рис. 8,б – пробой SG и MD зафиксированы одним импульсом, весь процесс – пробой SG и каскадный пробой трёх промежутков MD произошёл на фронте импульса. Аналогичные результаты были получены при использовании одного, двух и четырёх промежутков. Во всех случаях время запаздывания срабатывания MD после пробоя SD при наименьшем напряжении не превышало 3 мкс, а при напряжении, ближе к наибольшему, не превышало 0,5 мкс.

Эти результаты были подтверждены наблюдениями с помощью высокоскоростной камеры

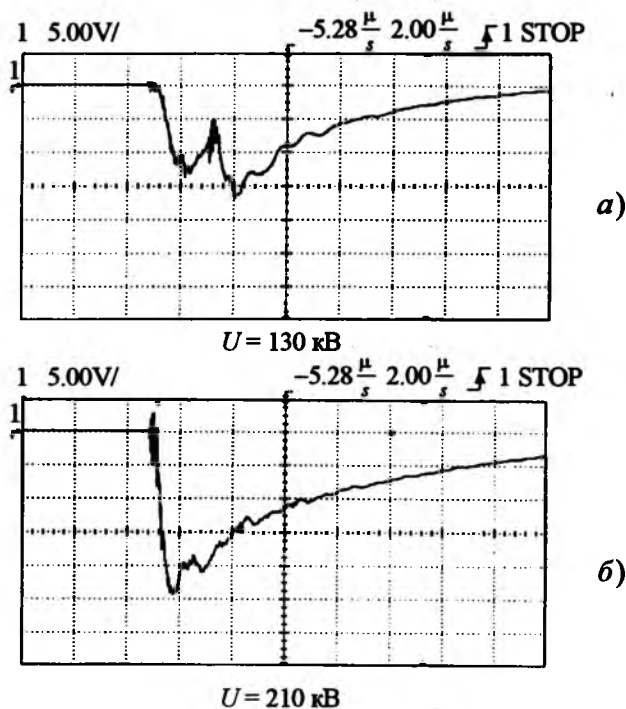


Рис. 8. Осциллограммы искровых пробоев разрядника SG и промежутка G_2 (масштаб времени 2 мкс/дел)

типа IMACON 468, имеющей скорость экспозиции до $100 \cdot 10^6$ кадров в секунду. Фотодиагностика проводилась в испытательной лаборатории фирмы АВВ (г. Людвика, Швеция) во время приёмо-сдаточных испытаний включающего устройства¹). Как видно на фотокадрах (рис.9), время от пробоя первого искрового промежутка до полного пробоя трёх последовательно включённых промежутков составляет менее 250 нс.

Характер динамики развития дуги показан на рис.10. Начиная с определённого уровня тока, дуга начинает вращаться в искровых промежутках под действием электродинамических сил, созданных током в подводящих стержнях. Характер сигналов даёт основание предполагать, что дуга горит одновременно на всех или большей части сферических элементов элект-

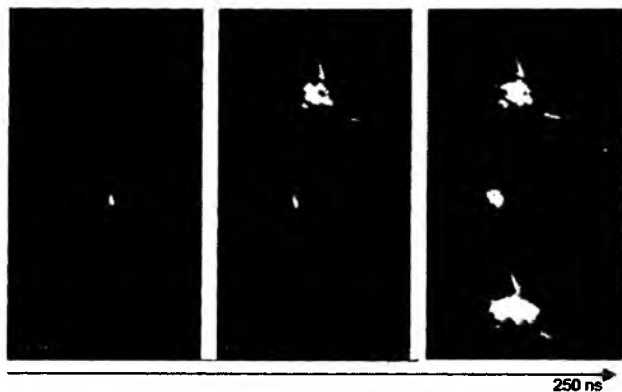


Рис.9. Развитие пробоя в трёх, последовательно соединённых, промежутках при разрядном напряжении 175 кВ (время экспозиции 50 нс/кадр, полное время развития пробоя менее 250 нс)

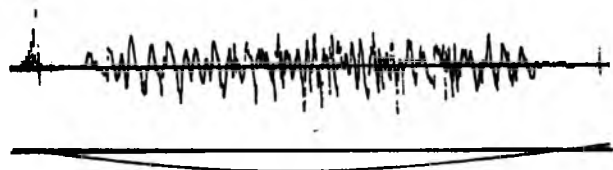


Рис.10. Осциллограммы тока (действующее значение 40 кА, один полупериод промышленной частоты) через искровой промежуток – нижняя кривая и сигналов с пояса Роговского, установленного на одном из стержневых токопроводов электрода – верхняя кривая

¹ Фотодиагностику проводили сотрудники фирмы АВВ D.Windmar и S.Subramany.

родов, а вращается только "ствол дуги". Скорость перемещения ствола дуги около 300 м/с. Это предположение подтверждается кадрами, полученными с помощью камеры IMACON 468.

Сравнение отдельных кадров на снимке показывает, что дуга перемещается со скоростью около 300 м/с.

Результаты экспериментов подтверждают теоретические положения, положенные в основу схемы и конструкции включающего устройства.

Включающие и зарядные устройства для испытания выключателей на напряжения до 72–550 кВ и ток включения до 63 кА были поставлены, смонтированы, испытаны, введены в действие и успешно эксплуатируются в лабораториях больших мощностей ведущих зарубежных электротехнических фирм: АВВ-Швеция – 2 комплекта, Siemens-Германия – 2 комплекта, АВВ-Швейцария – 2 комплекта, CPRI – Индия.

Выводы

1. Многолетний практический опыт работы показал, что включающее устройство просто в наладке и в работе. Оно не требует отдельной запускающей цепи и применения схемы переходного включающего тока.

2. Очень короткое время запаздывания включения – менее 5 мкс позволяет более точно моделировать системные условия.

3. Записанные в процессе испытаний осциллограммы и высокоскоростная съёмка наглядно показали процесс развития разряда, короткое время запаздывания и вращение дуги в разрядных промежутках при проведении реальных опытов по синтетическим испытаниям выключателей на включающую способность.

Список литературы

1. IEC 60427-2000. Synthetic testing of high-voltage alternating current circuit-breakers.
2. Chernyshov N.M., Kattel L.G., Butkevitch I.M. Making capacity of high-voltage circuit-breakers // CIGRE. 1990. 112.
3. Symposium on High-Power Testing. KEMA High-Power Laboratory. 2004.
4. А.с. 1559902. РФ. Синтетическая схема для испытания коммутационных аппаратов высокого напряжения / Каттель Л.Г., Чернышев Н.М. // БИ. 1997. №6.
5. А.с. 1628805. РФ. Разрядник / Каттель Л.Г. // БИ. 1997. №6.
6. Свидетельство № 30691. Аппарат коммутационный для испытания выключателей высокого напряжения / Каттель Л.Г. // ПО. 1991. №3.

Результаты ресурсных испытаний вакуумных дугогасительных камер со сферическими контактами

МУЛЛИН В.В., СМИРНОВ А.А., СИБЕРТ И.И.

Представлены данные ресурсных испытаний вакуумных дугогасительных камер с контактами сферической формы и материалом контактов ХД70. Их анализ, а также анализ состояния внутренних элементов камер показали эффективность применения этих технических решений при создании камер с повышенной отключающей способностью.

Увеличения коммутационного ресурса вакуумных дугогасительных камер (ВДК) при одновременном уменьшении их габаритов можно достигнуть, применив сферические контакты и систему индукторов, создающих в межконтактном промежутке аксиальное магнитное поле. [1]. Это, по сравнению с плоскими контактами при одинаковых наружных диаметрах, позволяет увеличить площадь контактирования и получить большие запасы по параметрам, характеризующим отключающую способность камер. Кроме того, сферическая форма контактов и взаимодействие витков индукторов при прохождении тока позволяет снизить силы электродинамического отброса контактов, а следовательно, уменьшить необходимое дополнительное поджатие контактов (ДПК) в вакуумном выключателе.

ФГУП "НПП "Контакт" (г. Саратов) совместно с ГУП "ВЭИ" (г. Москва) создали и серийно выпускают ВДК нового поколения КДВА5-10-20/1600, в которых используется подобная конструкция контактной системы.

Эти камеры отличаются от ВДК предыдущего поколения на те же типономиналы КДВХ4-10-20/1600, имеющей плоские контакты, не создающие аксиального магнитного поля, повышенными коммутационными характеристиками и значительно меньшим внешним диаметром корпуса (75 мм вместо 102 мм). Кроме того, в ВДК КДВА5-10-20/1600 применены контакты из материала ХД70* вместо

Abstract- Data presented deal with life test results pertaining to vacuum circuit breakers furnished with sphere-shaped contacts, which are manufactured of contact material dubbed ХД70. Subsequent inspection of the contact and inner parts of the chamber confirmed the effectiveness of the approach in view of producing vacuum circuit breakers having an improved interruption capability.

ХД50 или ХД60, применявшихся на камерах предыдущих поколений. Контактный материал ХД70 имеет меньшее удельное электрическое сопротивление и твердость, чем материал ХД60, что позволяет в сочетании со сферической формой контактов уменьшить переходное сопротивление между контактами и частично компенсировать увеличение сопротивления, возникающего при уменьшении диаметра, введении индукторов и уменьшении ДПК (700Н вместо 1600Н). В результате сопротивление ВДК не вышло за пределы требуемых значений.

Ниже приводится анализ результатов ресурсных испытаний камеры КДВ5А-10-20/1600 при токе 20 кА. Эти результаты представляют интерес, поскольку подобных испытаний в таком объеме на камерах со сферическими контактами ранее не проводилось.

Ресурсные испытания ВДК проводились в составе трёхфазного выключателя ВБ-10-20/1600, производимого на ФГУП "НПП "Контакт".** Они включали в себя испытания в режимах операций "О" и "ВО" при номинальном токе отключения до 20 кА (более 170 операций). Износ контактов после испытаний не превысил 1 мм (при испытании камеры КДВХ410-20/1600 после 50 подобных операций износ превысил 1,5 мм).

В процессе подобных испытаний критерием оценки отключающей способности камеры является время горения дуги после момента раз-

* Химический состав материала ХД70: Cr = 28÷72%; Cu = 68÷72%; Al < 0,1%; Fe < 0,1%; O₂ < 0,08%; N < 0,01%; H₂ < 0,1%; плотность более 8,1 г/см³; НВ > 80 ед. Заготовки этого материала диаметром до 100 мм и высотой до 25 мм выпускаются ООО "ТЭР" (г. Саратов).

** Испытания проводились на оборудовании НИЦ ТЭСТ ГУП "ВЭИ".

ведения контактов $t_{\text{дуги}}$. Последовательность испытаний и анализ результатов измерений приведены в таблице.

Поскольку гашение дуги переменного тока происходит при переходе тока через ноль, а в трёхфазной цепи время перехода через ноль в полюсах выключателя сдвинуто друг относительно друга на 3,3 мс, то один из полюсов выключателя отключит дугу первым. На двух других полюсах из-за изменения межфазного напряжения гашение дуги произойдет одновременно, при этом время горения дуги будет больше, чем в первом дугогасящем полюсе на 5 мс.

Если в первом дугогасящем полюсе $t_{\text{дуги}} \leq 3,3$ мс, то гашение дуги произошло при первом переходе через ноль в выключателе. Если $t_{\text{дуги}} > 3,3$ мс, то один из полюсов не отключил ток (произошло повторное зажигание дуги после перехода через ноль), а первое отключение произошло в полюсе со следующим по времени переходом тока через ноль. Количество опытов с $t_{\text{дуги}} \leq 3,3$ мс, а также минимальное и среднее время дуги могут служить критерием для оценки динамики изменения запасов по отключающей способности в процессе ресурсных испытаний. Для исключения влияния на статистические данные разновременности размыкания контактов камер в полюсах выключателя (около 1 мс) и погрешности измерения времени дуги в таблице к успешным отключениям при первом переходе через ноль отнесены опыты с $t_{\text{дуги}} \leq 4,5$ мс.

Испытания проводились в несколько этапов. На первом и втором этапах в режиме операций "О" ток отключения доводился до 20 кА. Режим этапа 3 наиболее критичен из-за мини-

мального времени между операциями "О" и "ВО" (2 цикла из трёх последовательно проводимых операций). Последующие этапы – режим одиночных операций "ВО" и "О" при максимальном токе (ресурсные испытания).

Как видно из таблицы, в процессе испытаний на первых этапах происходило постепенное улучшение показателей, характеризующих отключающую способность, что свидетельствует о прохождении в процессе испытаний своеобразной тренировки контактов и изменения физических свойств материала контактов. В результате при ресурсных испытаниях (четвёртый этап) показатели достигают максимального значения и сохраняют относительную стабильность до завершения испытаний. Для подтверждения этого вывода в таблице данные относительно ресурсных испытаний при операции "О" разбиты на два одинаковых подэтапа. Таким образом, ресурс камеры на момент окончания испытаний не был исчерпан.

После испытания на ресурс отмечено некоторое увеличение сопротивления камеры по сравнению с результатами замера до испытаний, что связано с изменением профиля соприкасающихся поверхностей контактов и структуры материала их поверхностного слоя. Это было подтверждено при последующем обследовании.

На рис.1 приведена фотография контакта камеры после ресурсных испытаний. Осмотр показал следующие изменения:

- оплавление соприкасающихся поверхностей контактов;
- наплавы на боковых поверхностях контактов;
- заплывание пазов контактов со стороны соприкасающихся поверхностей;

Содержание испытаний	Число операций или циклов	$t_{\text{дуги}}$ мс, в первом дугогасящем полюсе			Число отключений при $t_{\text{дуги}} < 4,5$ мс	Количество отключений при первом переходе тока через ноль, %
		Минимальное	Максимальное	Усреднённое		
Операции "О" при токе (0,1; 0,3; 0,6) 20 кА	6 + 6 + 6	1,3	7,3	3,8	14	78
Операции "О" при токе 20 кА	6	3,1	7,6	6,5	1	17
Циклы "ВО" при токе 20 кА	4	5,8	7,8	7,1	0	0
Ресурс:						
– циклы "ВО" при токе 20 кА	51	1,4	7,8	3,6	39	76
– операции "О" при токе 20 кА;	50	1,0	6,6	2,8	47	94
– операции "О" при токе 20 кА	49	0,7	5,8	2,7	44	90

– перекрытие на одном участке токовывода зазора между индуктором и контактом вследствие разбрызгивания металла на боковую поверхность контакта.

Результаты замера профиля контакта приведены на рис.2. Измерения показали, что максимальный износ контакта в результате оплавления и разбрызгивания жидкого металла не превышает 1 мм. Суммарный износ контактов за счёт переноса расплавленного металла с одного контакта на другой и перераспределения его по поверхности контакта также не превышает 1 мм. Оплавление поверхности неравномерное, что объясняется локализацией области первичного соприкосновения контактов за счёт допусков на радиусы их сфер, невозможностью обеспечения идеальной соосности контактов, а также азимутальной неоднородностью магнитного поля контактной системы.

При металлографическом исследовании контактов выявлено формирование в их рабочей зоне вторичной структуры, отличающейся от исходной. Отличие структур связано с существенно разными условиями охлаждения и кристаллизации расплавленного металла контакта после гашения дуги в камере от тех же условий при изготовлении заготовок, а также различиями в температуре плавления и скорости испарения компонентов материала контакта.



Рис.1. Поверхность контактов ВДК после ресурсных испытаний

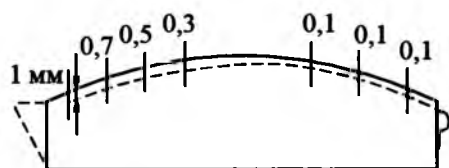


Рис.2. Сравнение исходной конфигурации контакта с его конфигурацией после ресурсных испытаний:
— — по чертежу; - - - - фактически

На рис.3 приведены данные по распределению толщины слоя со вторичной структурой по радиусу контактов. Это распределение неоднородно. Для контакта с выпуклой поверхностью вторичная структура имеет глубину от 40 до 160 мкм в центральной части и до 280 мкм на периферии; в рабочей зоне контакта с вогнутой поверхностью имеется участок без вторичной структуры, в центре глубина вторичной структуры достигает 400 мкм, а глубина этой структуры выплеска на периферии составляет 1360 мкм. Утонение вторичной структуры около наружного слоя контактов объясняется вытеснением расплавленной фазы из области соприкосновения сферических поверхностей контактов на периферию и в зазор между контактами в центральной их части.

Фотографии шлифов некоторых участков поверхности контактов представлены на рис.4 и 5. Как видно, вторичный слой представляет собой текстурированную матрицу из меди с диспергированными зёрнами хрома, поскольку композиция Сг-Си относится к системам с ограниченной взаимной растворимостью. Вдоль слоя имеются трещины, поры и раковины. Вторичная структура на рис.4 и 5,а – мелкодисперсная, переменного состава по длине рабочей зоны, участки с преобладанием хрома чередуются с участками с преобладанием меди; величина зёрен хрома до 1–3 мкм. Во вторичной структуре (рис.5,б) преобладает хромовая составляющая.

Неоднородность по составу вторичной структуры и её слоистое строение, а также наличие раковин и пор объясняется процессами, протекающими в контактах при горении дуги, и зависит от преобладания одного или комбинации нескольких способов переноса составляющих под воздействием дугового разряда, которыми являются:

- паровой перенос;

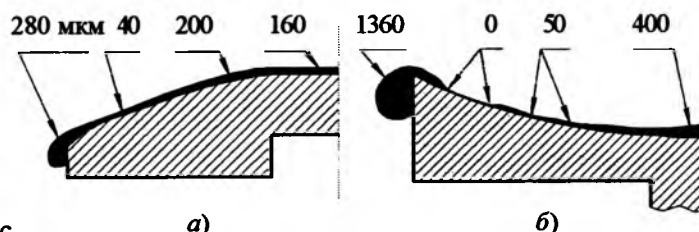


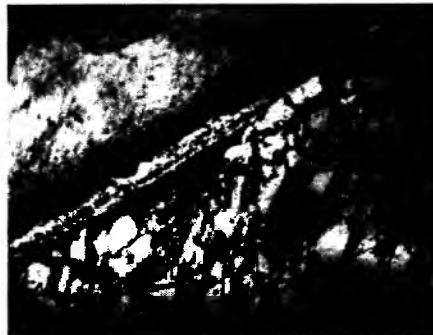
Рис.3. Схема распределения вторичной структуры по поверхности контакта



Рис.4. Структура поверхностного слоя центральной части контакта с выпуклой поверхностью



а)



б)

Рис.5. Структура участков поверхностного слоя контакта с вогнутой поверхностью:

а – в области всплеска; б – на участке с глубиной вторичной структуры 50 мкм

– капельный перенос, обусловленный локальными взрывообразными испарениями, образующимися в местах концентрации дуги;

– механическим вытеснением оплавленной фазы при выполнении последовательных операций "ВО".

Преобладание того или иного способа переноса составляющих материала контакта зависит от используемого в ВДК магнитного поля. При аксиальном магнитном поле обеспечивается малое напряжение горения дуги и достаточно однородное распределение термической нагрузки рабочей поверхности контактов [2]. В результате преобладает паровой перенос составляющих материала контакта. Весьма близкое к идеалу аксиальное магнитное поле может быть достигнуто в случае плоских контактов.

Однако результаты испытаний камер со сферическими контактами (увеличенный в 3 раза ресурс и уменьшенный износ контактов) свидетельствуют, что искажение аксиального характера поля на краю сферы не привело к существенному изменению характера дуги и соотношения между способами переноса.

Таким образом, проведенные ресурсные испытания и последующее обследование состояния рабочих поверхностей контактов показали эффективность использования сферической формы контактов и применения контактного материала ХД70 при создании ВДК на токи отключения 20 кА. Они обеспечивают снижение износа контактов и увеличение ресурса ВДК при одновременном уменьшении её поперечных габаритов. Очевидно, полученные результаты могут быть использованы при создании новых типов ВДК с другими токономиналами.

Список литературы

1. Пат. на изобретение № 2178927. РФ. Контактные соединения вакуумных дугогасительных камер / Белкин Г.С., Ромочкин Ю.Г., Лукацкая И.Л. 2002.
2. Вакуумные дуги / Под ред. Дж. Лафферти. М.: Мир, 1982.

Муллин Виктор Валентинович – генеральный директор ФГУП "НПП "Контакт". В 1977 г. окончил физический факультет Саратовского государственного университета по специальности "Радиофизика и электроника".

Смирнов Александр Александрович – начальник отдела ФГУП "НПП "Контакт". В 1965 г. окончил Новочеркасский политехнический институт по специальности "Технология электрохимических производств".

Сиберт Иван Игнатьевич – заместитель начальника отдела ФГУП "НПП "Контакт". В 1981 г. окончил физический факультет Саратовского государственного университета по специальности "Радиофизика и электроника".

Компенсаторы неактивной энергии со стабилизацией напряжения трансформаторных подстанций

ИНЬКОВ Ю.М., КЛИМАШ В.С., СВЕТЛАКОВ Д.П.

Предложены новые схемные решения, предназначенные для быстрой и точной разгрузки питающей сети и, как следствие, для улучшения качества электроэнергии и повышения эффективности её использования. Показано использование этих схем на примере устройств для тяговых и промышленных подстанций.

New schematic solution for devices designed to relieve the load on the power network in a fast and accurate manner and, as a consequence, to improve the quality of electric power and the efficiency of its use, are proposed. The application of these schemes is illustrated on an example of devices for traction and industrial substations.

Проблема повышения качества и экономии электроэнергии в сетях переменного напряжения с трансформаторными подстанциями промышленных предприятий и тяговых энергосистем, является одной из наиболее актуальных в электроэнергетике. Особое значение она приобрела из-за повышения стоимости электроэнергии и требований к её качеству со стороны генерирующих и распределяющих энергосистем.

В последние годы острота этой проблемы ещё более усилилась, поскольку стремительное внедрение в различные отрасли промышленности частотно-регулируемого электропривода значительно увеличило суммарную мощность потребителей, получающих питание от сетей переменного тока через выпрямители. Это обстоятельство предопределило появление в промышленных цехах смешанных систем энергоснабжения, имеющих линии постоянного и переменного тока. К числу таких же смешанных систем следует отнести объединённые сети коммунального хозяйства и городского электрифицированного транспорта (эскалаторы метро, трамваи, троллейбусы).

В настоящее время для улучшения формы и уменьшения фазы тока, потребляемого из сети через силовые трансформаторы подстанций промышленного и тягового электроснабжения, применяют фильтро-компенсирующие устройства. Это конденсаторно-реакторные блоки, каждый из которых настроен на частоту соответствующей высшей гармонической составляющей искажённого тока. Такие фильтры, яв-

ляясь громоздкими устройствами, обладают недостаточно высокой эффективностью, поскольку из-за отклонений их реальных параметров от расчётных они, как правило, не могут обеспечить резонанса токов на требуемых частотах. Таким образом, пассивные фильтры, по существу, некачественно выполняют возложенные на них функции. Их показатели эффективности ещё более снижаются при изменении температуры и картины гармонического состава, а также при постоянно происходящих в электрических сетях отклонениях частоты и напряжения от номинальных значений, на которые рассчитаны фильтры.

Следует отметить, что разгрузка фильтрами, в том числе и активными [1], электрических сетей от неактивных составляющих полной мощности вызывает повышение напряжения на входных зажимах подстанций и снижает энергетические показатели и срок службы силовых трансформаторов.

Трансформаторно-вентильные компенсаторы реактивной энергии сети со стабилизацией напряжения нагрузки комплектных трансформаторных подстанций [2] устраняют большую часть указанных недостатков. Вместе с тем, они не обладают возможностью симметрирования фазных токов сети при амплитудной и фазовой асимметрии нагрузки и не обеспечивают высококачественную синусоидальность их формы. Это вызывает дополнительные потери электроэнергии в силовых трансформаторах и в сети – потери от качаний фазовых углов токов сети, эквивалентные тем, которые

возникают при колебаниях частоты, а также потери энергии от асимметрии и несинусоидальности токов и их реактивных составляющих.

Таким образом, трансформаторные подстанции находятся в условиях, которые приводят к снижению их энергетических показателей как со стороны сети, так и со стороны нагрузки.

Предлагается техническое решение, которое позволяет изменить ситуацию не только на трансформаторной подстанции, но и у производителей и потребителей электроэнергии. Устройство устраняет негативное влияние токов на выходе подстанции и нестабильность напряже-

ния на её входе. Это, в свою очередь, приводит к комплексному улучшению энергетических показателей подстанции, нагрузки, сети, а также к улучшению массогабаритных и технологических показателей силового трансформатора подстанции, вследствие того, что отпадает необходимость в отводах у обмоток и переключающих устройствах на его высокой стороне.

Схемы промышленной и тяговой подстанций с компенсатором неактивных составляющих энергии и стабилизацией напряжения приведены на рис. 1 и 2. В их состав входят силовой и вольтодобавочный трансформаторы *СТ* и *ВТ*, два инвертора с ШИМ напряжения *ИН1* и *ИН2*

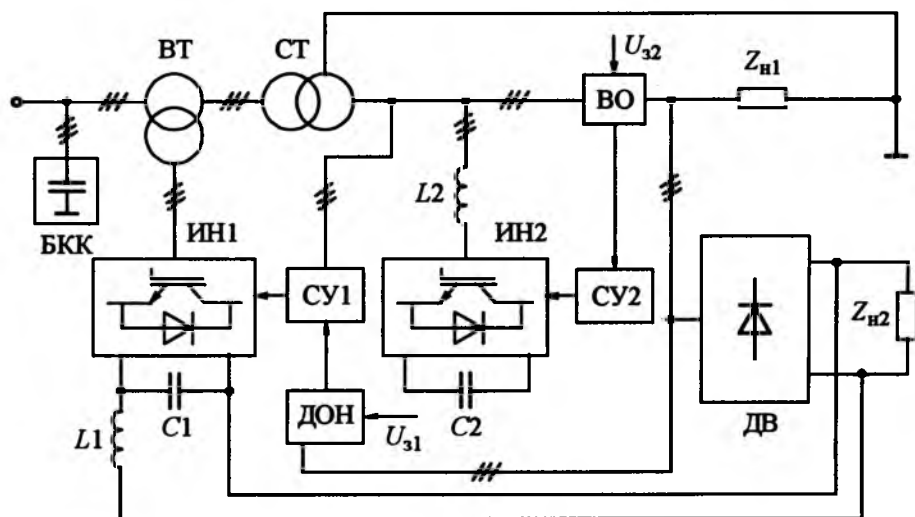


Рис.1. Структурная схема промышленной подстанции

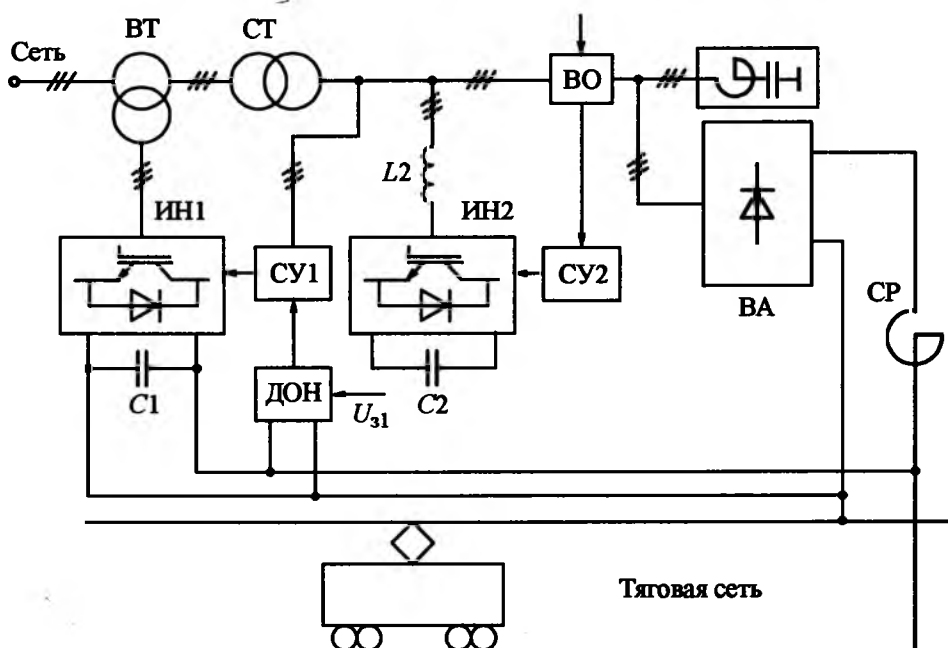


Рис.2. Структурная схема тяговой подстанции

с системами управления $SU1$ и $SU2$, вычислитель-оценщик (BO) искажений суммарного тока потребителей и датчик отклонения напряжения ($ДОН$) нагрузки. К цеховой системе энергоснабжения (рис. 1) непосредственно подключены потребители переменного тока и через диодный выпрямитель ($ДВ$) потребители постоянного тока, а к системе тягового энергоснабжения (рис. 2) – через выпрямительный агрегат ($ВА$) тяговая сеть постоянного тока. Для уменьшения мощности параллельного активного фильтра, выполненного на инверторе $ИН2$, в схему тяговой подстанции (рис. 2) включены ФКУ 5- и 7-й гармоник, а в схему промышленной подстанции (рис. 1) – батарея косинусных конденсаторов ($БКК$), система управления $SU1$ инвертором $ИН1$ выполнена с возможностью регулирования фазы добавочного напряжения сети, снимаемого с последовательной обмотки $ВТ$. При опережающем регулировании фазы инвертора $ИН1$ устройство дополняет действие $БКК$, а при отстающем – нейтрализует его действие, генерируя или потребляя дополнительную реактивную мощность [3]. Наличие нулевого провода во вторичной цепи промышленной подстанции (рис. 1) позволяет при помощи той же трёхфазной мостовой схемы активного фильтра и установки сигнала задания на среднее значение амплитуды первых гармоник тока устранить асимметрию токов во вторичной цепи силового трансформатора при несимметричной нагрузке с сохранением симметрии выходного напряжения.

Исследования трансформаторных подстанций систем промышленного и тягового энергоснабжения выполнены на обобщённой математической модели, разработанной для среды MatLab [4]. В этой составной блочно-модульной модели все элементы, кроме систем управления инверторами напряжения с ШИМ и устройств автоуправления, взяты готовыми. Блоки управления выполнены по принципам макро-моделирования с учётом функций, выполняемых аналоговыми и цифровыми микросхемами.

Результаты численных экспериментов со схемами промышленной и тяговой подстанций представлены соответственно на рис. 3 и 4. Здесь хорошо видно как новое устройство из несимметричной и (или) несинусоидальной системы токов нагрузки $I_{на}$, I_{nb} , I_{nc} формирует синусоидальную и симметричную трёхфазную

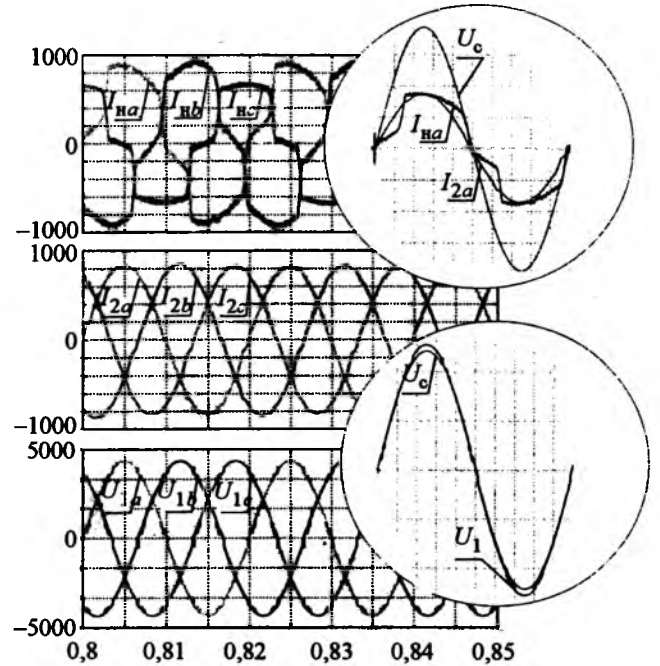


Рис. 3. Расчётные значения напряжений на высокой стороне и токов на низкой стороне промышленной подстанции с активным фильтром

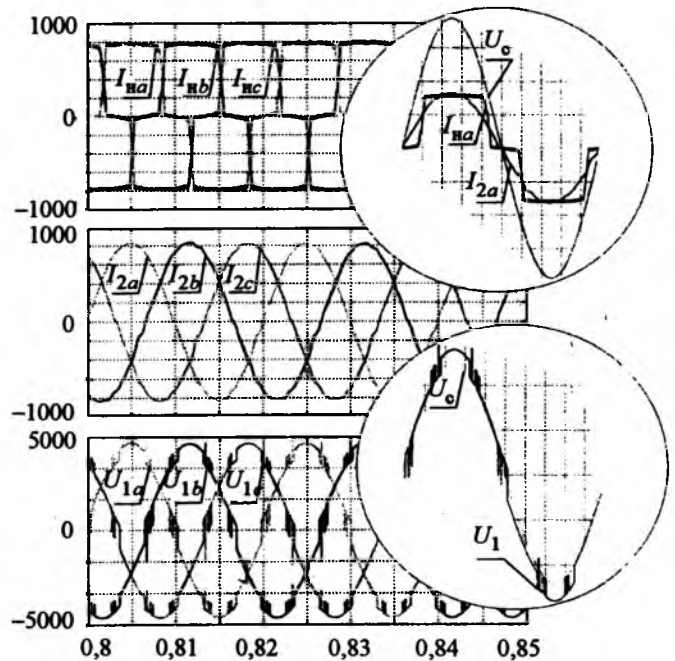


Рис. 4. Расчётные значения напряжений на высокой стороне и токов на низкой стороне тяговой подстанции с гибридным фильтром

систему токов вторичной обмотки силового трансформатора I_{2a} , I_{2b} , I_{2c} .

Расчёты также показали, что при отклонениях напряжения в сети U_{ca} , U_{cb} , U_{cc} от заданного, например номинального, уровня устрой-

ство обеспечивает питание первичной обмотки силового трансформатора стабилизированным напряжением U_{1a}, U_{1b}, U_{1c} .

Полученные результаты позволяют осуществить работу трансформаторного оборудования с паспортными характеристиками, разгрузить подстанции и сети примерно на 25–30% и обеспечить им дополнительную пропускную способность полезной активной энергии.

Список литературы

1. Розанов Ю.К. Основные этапы развития и современное состояние силовой электроники // *Электричество*. 2005. №7.

2. Иньков Ю.М., Климаш В.С. Компенсаторы реактивной энергии со стабилизацией напряжения нагрузки трансформаторных подстанций // *Электричество*. 2003. №12.

3. Климаш В.С. Вольтодобавочные устройства для компенсации отклонений напряжения и реактивной энергии с амплитудным, импульсным и фазовым регулированием. Владивосток: Дальнаука, 2002.

4. Свидетельство РФ № 20006613825 на программу для ЭВМ. Математическая модель компенсатора неактив-

ных составляющих энергии со стабилизацией напряжения систем энергоснабжения на IGBT-транзисторах для среды MatLab / Климаш В.С., Светлаков Д.П. (Россия). Оpubл. 07.11.2006.

Иньков Юрий Моисеевич – профессор кафедры "Электрическая тяга" МИИТ. Окончил в 1959 г. факультет "Электрификация железных дорог" Московского института инженеров железнодорожного транспорта (МИИТ). В 1978 г. защитил докторскую диссертацию по вопросам мощных полупроводниковых преобразователей электроэнергии.

Климаш Владимир Степанович – профессор кафедры "Промышленная электроника" Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (КнАГТУ). Окончил электротехнический факультет Комсомольского-на-Амуре политехнического института в 1976 г. В 2003 г. защитил докторскую диссертацию по вопросам компенсации реактивной мощности в электрических сетях.

Светлаков Денис Петрович – аспирант кафедры "Промышленная электроника" КнАГТУ. Окончил в 2004 г. электротехнический факультет Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (КнАГТУ).

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЁТЫ

Влияние нелинейного трения на динамику электромеханических систем

КОПЕЙКИН А.И.

Приводится двухмассовая модель электромеханической системы (ЭМС), в которой дается новая композиция механической подсистемы. Получена передаточная функция системы с учетом нагрузок на валу исполнительного двигателя и объекте, а также нелинейности характеристики трения. Построены частотные характеристики, которые наглядно указывают на необходимость точного знания коэффициента вязкого трения при оценке качественных показателей систем и приводов.

There is a two mass model of the electro mechanic system (EMS) in which a new composition of the mechanical subsystem. The EMS's transmission function is received with the provision for loads on EE shaft and object, and with nonlinear features of friction. Frequency characteristics of the system where built. They graphically underline the necessity to know exactly the ratio of viscous friction while estimating EMS's factors.

В последнее время уделяется значительное внимание исследованию влияния нелинейных нагрузок на динамические свойства различных систем электропривода [1–3]. Это вызвано необходимостью выбора соответствующего ме-

тода синтеза регуляторов для улучшения качественных показателей приводных систем, в частности, устойчивости движения. В работах подчеркивается, что электропривод теряет не только динамическую, но и статическую

устойчивость, если жёсткость падающего участка механической нагрузки оказывается по абсолютному значению больше жёсткости механической характеристики двигателя. Трение в механической подсистеме (МП) электроприводов относится к тому типу нагрузок, для которых свойственны нелинейные зависимости с падающими и восходящими участками, аналогичные кривой Штрибека [4]. Поэтому для эффективности синтеза регуляторов таких систем, в частности приводов подач в станкостроении, обжимных станов при буксовании валов в металлургии, испытательных стендов с асинхронными короткозамкнутыми двигателями с провалами в кривой момента, требуются более совершенные модели МП, учитывающие отмеченные особенности нагрузки и их влияние на динамику всей системы, а также выбор интегральных параметров нагрузки в описании и уточнение пределов их изменения в конкретной электромеханической системе. Особенно это относится к двухмассовым ЭМС, где взаимные связи между элементами и соответственно обмен энергиями значительно сложнее, чем в одномассовых моделях. И если учесть практическую и теоретическую непроработанность вопроса интегральных параметров всей механической подсистемы и отсутствие технических средств их оперативного определения, то развитие моделей механических частей приводов и исследование влияния их определяющих параметров на динамические свойства и надёжностные характеристики системы имеют актуальное значение. Недооценка особенностей характеристик, свойств элементов механической подсистемы, их изменение в процессе эксплуатации и отсутствие коррекции соответ-

ствующих моделей ухудшает технический уровень электроприводов и повышает технологические затраты. Статистика такова – из-за износа элементов механической подсистемы происходит примерно 80–90% отказов. На поддержание машин в работоспособном состоянии в нашей стране используется свыше 40% станочного парка, 25% трудовых резервов, 20% выплавляемого металла, а потери средств от трения и износа в развитых странах составляют 4–5% национального дохода [5].

В предлагаемой работе в качестве интегральных параметров нагрузки как на стороне исполнительного двигателя, так и на рабочем механизме выбраны эквивалентные диссипативные коэффициенты β_{31} и β_{32} , определение которых целесообразно проводить разработанным способом [6]. Кроме того, в приведённых исследованиях учтено влияние насыщения магнитной цепи μ и крутильной жёсткости c_{12} , включающей электромагнитную связь ротор (якорь) – статор, что позволяет для каждого конкретного электропривода, используя современные программные средства, выполнить подробный анализ его динамических свойств, в частности, по амплитудным и фазовым частотным характеристикам в соответствии с предложенной обобщённой моделью (рис. 1).

На схеме рис. 1 пунктирные линии обозначают асинхронный электромеханический преобразователь (ЭМП) с параметрами $\beta = \frac{2M_k}{\omega_{ном} S_k}$;

$$T_3 = \frac{1}{\omega_{ном} S_k}, \text{ где } \omega_{ном} \text{ – синхронная скорость}$$

магнитного поля при номинальной частоте;

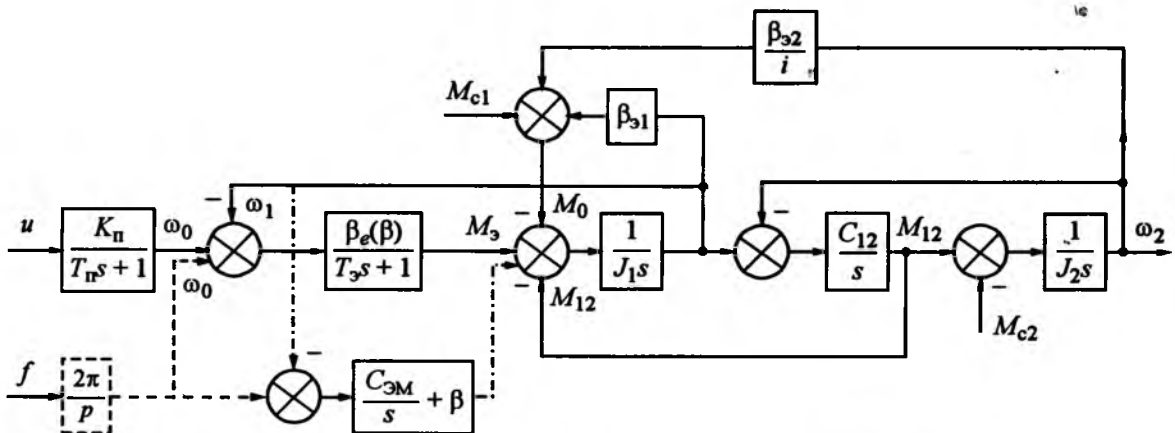


Рис. 1. Общая структура линеаризованной ЭМС

M_k, S_k – критические момент и скольжение. Штрихпунктирные линии относятся к ЭМС с синхронным двигателем, в котором

$$C_3 = \frac{M_{ном}}{\theta_{эл.ном}} - \text{коэффициент жёсткости упругой}$$

электромагнитной связи ротор–статор.

Для дальнейших исследований структурную схему системы (рис. 1) применим к приводам с исполнительным двигателем постоянного тока и якорным управлением. Тогда уравнения электрического равновесия напряжений по цепи управления и движения механической части системы примут вид:

$$\left. \begin{aligned} u &= i_A R_{\Sigma} + L_{\Sigma я} \frac{di_A}{dt} + C_e \Phi \omega_1; \\ M_3 - M_0 - M_{12} &= J_1 \frac{d\omega_1}{dt}; \\ M_{12} - M_{c2} &= J_2 \frac{d\omega_2}{dt}; \\ M_{12} &= C_{12}(\Phi_1 - \Phi_2), \end{aligned} \right\} (1)$$

где u – напряжение управления на якорной обмотке ИД; i_A – ток якоря; R_{Σ} – суммарное активное сопротивление силовой цепи; $L_{\Sigma я}$ – суммар-

ная индуктивность цепи управления; $C_e = \frac{pN}{2\pi a}$ – постоянная двигателя (p – число пар полюсов, N – число активных проводников обмотки якоря, a – число пар параллельных ветвей обмотки якоря); Φ – поток возбуждения (в зазоре машины); M_3, M_{12}, M_{c2}, M_0 – соответственно электромагнитный, упругий, нагрузочный и холостого хода моменты; J_1, J_2 – приведённые моменты инерции первой и второй массы; ω_1 и ω_2, Φ_1 и Φ_2 – обобщённые скорости и угловые перемещения масс; C_{12} – приведённая крутильная жёсткость механической связи между массами.

Переходя к безразмерным единицам:

$$\left. \begin{aligned} i_0 &= \frac{i_A}{I_H}; u_0 = \frac{u}{E_H}; v_i = \frac{\omega_i}{\omega_H}; \tau_0 = \frac{t}{T_M}; \gamma = \frac{J_2}{J_1}; \\ \mu &= \frac{\Phi}{\Phi_H}; m = \frac{M_3}{M_{3,н}} = \mu i_0; m_c = \frac{M_{c2}}{M_{3,н}}; \\ m_y &= \frac{M_{12}}{M_{3,н}}; \rho_0 = \frac{R_{\Sigma} I_H}{E_H}; \rho = \frac{I_H L_{\Sigma я}}{T_M E_H}, \end{aligned} \right\} (2)$$

запишем систему уравнений (1) в изображениях:

$$\left. \begin{aligned} (u_0 - \mu v_1) \left(\frac{k_1}{\tau_1 s + 1} \right) &= \mu_0 i_0; \\ \mu i_0 - a - m_y &= \left(\frac{k_2}{\tau_2 s + 1} \right)^{-1} v_1; \\ (v_1 - v_2) \frac{k_{a1}}{s} &= m_y; \\ (m_y - m_c) \frac{k_{a2}}{s} &= v_2. \end{aligned} \right\} (3)$$

На структурной схеме и в соотношениях (2)

и (3) приняты обозначения: $T_M = J_1 \frac{\omega_H}{M_{3,н}}$ –

электромеханическая постоянная первой массы; $E_H = C_e \Phi_H \omega_H$ – номинальная ЭДС якоря

двигателя; $a = \frac{M_{c1}}{M_{3,н}}$ – собственный относитель-

ный момент сопротивления ИД; β_{31}, β_{32} – эквивалентные диссипативные коэффициенты; M_{c2}, i – сопротивление нагрузки для второй массы и её коэффициент приведения к валу двигателя.

Выражениям (3), в которых аргумент s при переменных системы опущен, соответствует структурная схема, представленная на рис. 2,

где $K_1 = \frac{\mu}{\rho_0}$ и $\tau_1 = \frac{\rho}{\rho_0}$ – коэффициент переда-

чи и относительная постоянная времени апериодического звена первого порядка; K_2, τ_2 – соответственно коэффициент передачи и относительная постоянная времени инерционного звена, равные $1/\beta$; K_{a1}, K_{a2} – коэффициенты пере-

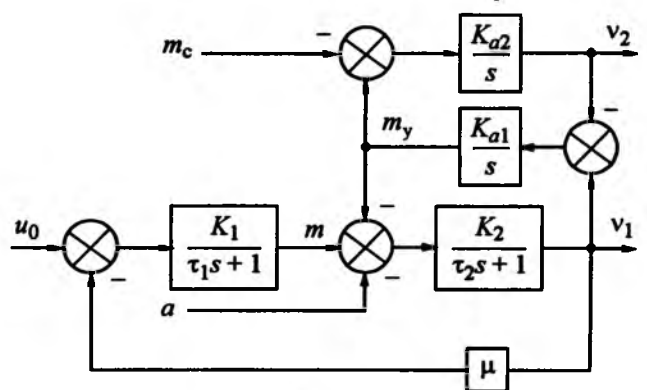


Рис. 2. Относительная структурная схема двухмассовой ЭМС

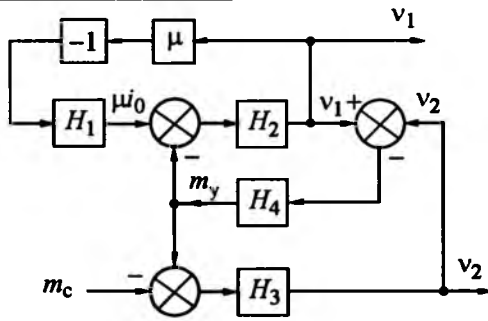


Рис.3. Структурная схема приводной системы по нагрузке m_c

дачи астатических звеньев, соответственно равные c и $1/\gamma$. Причём коэффициент μ учитывает магнитное насыщение, относительная составляющая вязкого трения $\epsilon = \frac{\beta_{\Sigma 1} + \beta_{\Sigma 2}/i}{M_{\Sigma H}} \omega_n$, а относительная крутильная жёсткость $c = C_{12H}/C_{12H}$; $C_{12H} = M_{\Sigma H}/\Phi_H$. Система (3) и является основой получения важнейших характеристик динамики приводных систем.

В соответствии с рис.2 связь между v_2 и m_c выйдем из анализа преобразованной схемы (рис.3), отражающей их взаимодействие [7]. На схеме рис.3 приняты обозначения:

Составим очевидные соотношения для этой схемы

$$H_1(s) = \frac{K_1}{\tau_1 s + 1}; H_2(s) = \frac{K_2}{\tau_2 s + 1}; H_3(s) = \frac{1/\gamma}{s}; H_4(s) = \frac{c}{s} \quad (4)$$

Составим очевидные соотношения для этой схемы

совместное решение которых приводит к выражению

$$H_{\Sigma 1}(s) = \frac{v_1}{m_y} = -\frac{H_2(s)}{1 + \mu H_1(s)H_2(s)} \quad (6)$$

Тогда, используя (6), динамику системы для исследуемого случая целесообразно описать системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} (-m_c + m_y)H_3(s) &= v_2; \\ m_y &= (v_1 - v_2)H_4(s); \\ m_y &= -v_1 \left(\frac{1 + \mu H_1(s)H_2(s)}{H_2(s)} \right) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Уравнения системы (7) применим для исследования влияния моментов сил сопротивления в нагрузке на динамику ЭМС.

Приравняв правые части 2- и 3-го уравнений системы (7) и производя преобразования, получим следующую связь между переменными v_1 и v_2 :

$$v_2 = v_1 \left[1 + \left(\frac{1}{H_2(s)H_4(s)} + \mu \frac{H_1(s)}{H_4(s)} \right) \right] \quad (8)$$

Затем, воспользовавшись первыми двумя уравнениями системы (7) и выражением (8) связи между относительными скоростями v_1 и v_2 , получим зависимость:

$$v_2 = -m_c \frac{H_2(s)[1 + H_{\Sigma 2}(s)]}{H_3(s)H_4(s) + H_{\Sigma 2}(s) + 1} \quad (9)$$

где $H_{\Sigma 2}(s) = \frac{H_2(s)H_4(s)}{1 + \mu H_1(s)H_2(s)} = -H_4(s)H_{\Sigma 1}(s)$ — передаточная функция замкнутого контура.

Подставляя в уравнение (7) значения $H_1(s)$ и $H_2(s)$ из (4), после преобразования получаем:

$$H_{\Sigma 1}(s) = \frac{K'_2(\tau_1 s + 1)}{\tau_{\Sigma 1}^2 s^2 + 2\rho_{\Sigma 1}\tau_{\Sigma 1}s + 1} \quad (10)$$

где $\tau_{\Sigma 1} = \sqrt{\frac{\tau_1 \tau_2}{1 + \mu k_1 k_2}}$ — постоянная времени эквивалентного колебательного звена;

$\rho_{\Sigma 1} = \frac{1}{2} \frac{\tau_1 + \tau_2}{\sqrt{\tau_1 \tau_2 (1 + \mu k_1 k_2)}}$ — эквивалентный параметр демпфирования;

$K'_2 = \frac{K_2}{1 + \mu K_1 K_2}$ — коэффициент передачи эквивалентного колебательного звена.

Соответственно

$$H_{\Sigma 2}(s) = -H_{\Sigma 1}(s)H_4(s) = \frac{cK'_2(\tau_1 s + 1)}{s(\tau_{\Sigma 1}^2 s^2 + 2\rho_{\Sigma 1}\tau_{\Sigma 1}s + 1)} \quad (11)$$

Поэтому после подстановки $H_{\Sigma 2}(s)$ из (11) в (9) и последующих преобразований, связь между $-m_c$ и v_2 определится как

$$\frac{v_2(s)}{-m_c(s)} = \frac{1/\gamma [\tau_{\Sigma 1}^2 s^3 + 2\rho_{\Sigma 1}\tau_{\Sigma 1}s^2 + (1 + cK'_2\tau_1)s + cK'_2]}{\epsilon_0 s^4 + \epsilon_1 s^3 + \epsilon_2 s^2 + \epsilon_3 s + \epsilon_4} \quad (12)$$

где

$$\left. \begin{aligned} v_0 = \tau_{31}^2; v_1 = 2\rho_{31}\tau_{31}; v_2 = 1 + cK_2'\tau_1 + v_4\tau_{31}^2; \\ v_3 = cK_2' + 2\rho_{31}\tau_{31}v_4; v_4 = c/\gamma. \end{aligned} \right\} (13)$$

Построенные по соотношению (12) с учётом (13) амплитудные и фазовые частотные характеристики (АЧХ, ФЧХ) в функции относительной частоты колебаний $v = \omega T_M$ представлены на рис. 4 и 5.

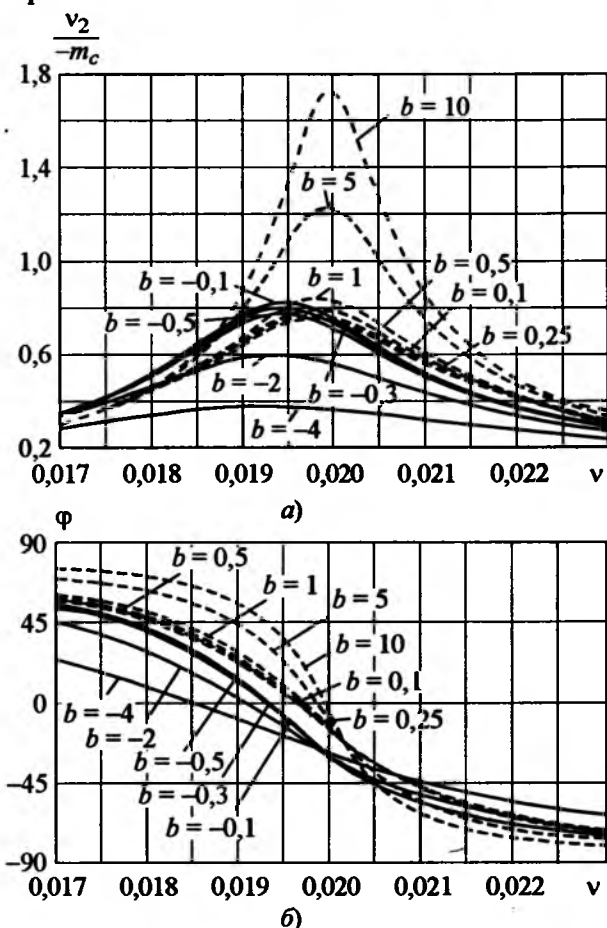


Рис.4. Частотные характеристики по нагрузке на объекте ($\mu, c, \gamma = 1$):
а – АЧХ; б – ФЧХ

Выводы

1. Для повышения технического уровня электроприводов на стадии проектирования и разработки, а также его поддержания в эксплуатации разработана уточнённая модель механической подсистемы, учитывающая нелинейный характер нагрузок и особенности изменения её свойств из-за износа и старения.

2. Предложенная обобщённая структура позволяет для двухмассовых расчётных схем механической части приводов выбрать необходимую модель исследований для достижения требуемого функционирования на стадии проек-

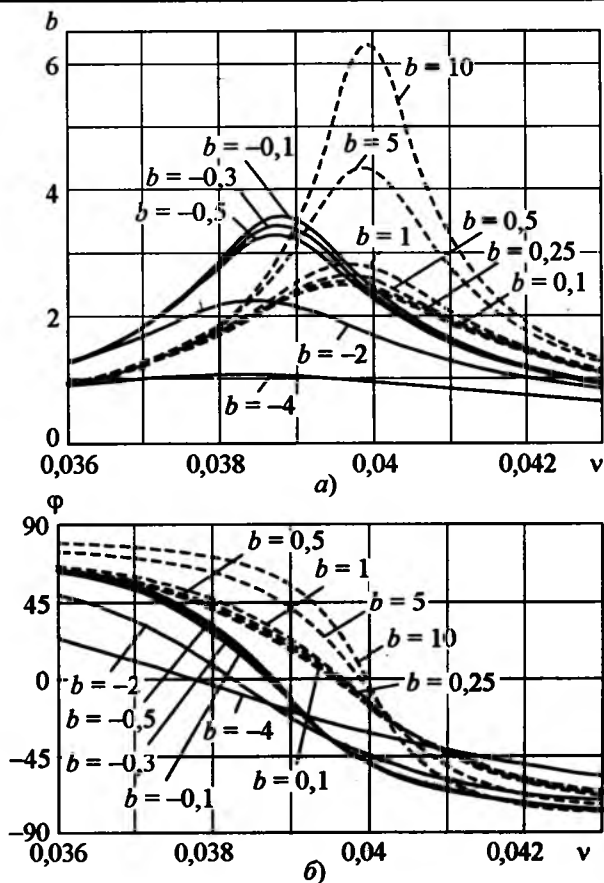


Рис.5. Частотные характеристики по нагрузке на объекте ($\mu, c, \gamma = 0,25$):
а – АЧХ; б – ФЧХ

тирования с учётом конкретного типа электромеханического преобразователя.

3. Получена инвариантная к мощности привода и типу электромеханического преобразователя относительная модель, включающая новую композицию механической подсистемы: ротор (якорь) двигателя – согласующее устройство – нагрузка и, соответственно, её крутильную жёсткость C , учитывающую электромагнитную жёсткость двигателя, что повышает достоверность оценки основных характеристик приводов на стадии разработки.

4. В разработанные модели введены интегральные коэффициенты нелинейных нагрузок – эквивалентный диссипативный коэффициент b_{31} на валу электродвигателя и на объекте b_{32} , определяющие значение и знак обобщённого аппроксимирующего параметра нагрузки b , являющегося основой расчёта динамики электроприводов с нелинейной нагрузкой.

5. Впервые учтены теплофизические свойства трибузлов механической подсистемы передаточной функцией $K_2/(\tau_1 s + 1)$, что уточняет оценку динамических, кинематических,

надёжных характеристик приводов не только при проектировании, но и в процессе эксплуатации, когда фактически скоростная составляющая сил сопротивления изменяется по кривой Штрибека.

6. Полученные расчётные данные в виде амплитудных и фазовых частотных характеристик по нагрузке показывают, что при приближении к резонансным частотам выходная переменная (скорость на нагрузке) может превысить номинальную в шесть раз. Это приведёт к недопустимым усилиям в элементах кинематической цепи, повышенному их износу и даже к аварийному режиму. Наблюдается также ухудшение качественных показателей из-за нестабильности и уменьшения запасов по амплитуде и фазе, вызванных случайностью факторов трения, старения и изнашивания. Поэтому для устранения указанных недостатков необходимы достаточно точные зависимости обобщённого параметра $b(\omega)$, что реализуемо методом [6] и обеспечит необходимый технический уровень приводных систем с нелинейными нагрузками.

Список литературы

1. Ключев В.И. Теория электропривода: М.: Энергоатомиздат, 2001.

2. Вульфсон И.И. Нелинейные колебания в цикловых механизмах, вызванные нестационарными силами трения в кинематических парах // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 1999. №4. С.26–33.

3. Акимов А.В., Пирожок А.В. Синтез статического и астатического регуляторов ЭДС для двухконтурных двухмассовых и одномассовых электроприводов с нелинейной реактивной нагрузкой // Электротехника. 2002. №9. С.28–37.

4. Сосновский Л.А., Махутов Н.А., Шуринов В.А. Фрикционно-механическая усталость: Основные закономерности / Заводская лаборатория. 1992. №9. С.46–63.

5. Белый В.А., Свириденко А.И. Актуальные направления развития исследования в области трения и изнашивания // Трение и износ. 1987. Т.8, №1. С.5–24.

6. Пат. 2284019 РФ. Способ идентификации диссипативных характеристик подшипников / Малафеев С.И., Копейкин А.И., Шамберов В.Н. // БИ. 2006. №26.

7. Копейкин А.И., Малафеев С.И. Динамические свойства нелинейной электромеханической системы с трением // Тезисы докладов Междун. конференции по дифференциальным уравнениям и динамическим системам. Владимир: ВлГУ, 2006. С.128–129.

Копейкин Анатолий Иванович – доцент Владимирского государственного университета, канд. техн. наук. Окончил в 1962 г. факультет телемеханики и автоматики Рязанского радиотехнического института. Защитил диссертацию по теме "Разработка и исследование электромеханического датчика угловых ускорений" во Владимирском политехническом институте в 1973 г.

Сравнение инженерных методов расчёта магнитных цепей и полей электромагнитов

БУЛЬ О.Б.

Обсуждаются достоинства и недостатки составляющих комплекса методов расчёта магнитных цепей и полей электромагнитов. Рассматриваются плоскопараллельные, плоскомеридианные и трёхмерные задачи, "ручные" и компьютерные методы расчёта.

Электромагнит – это электротехническое устройство, получившее широкое распространение в физике, технике, энергетике. Проще назвать области деятельности человека, в которых не применялись бы те или иные элект-

Merits and demerits components of complex methods magnetic circuits and fields calculations of electromagnets are discussed. 2D and 3D problems; hand-made and computer methods are examined.

ромагниты. Поэтому методы их расчёта всегда были актуальны, остаются они актуальными и в наши дни.

В статье рассматриваются только электромагниты, потоки рассеяния которых надо учи-

тывать (с зазорами). Если обсуждаются цепные методы, то под расчётом электромагнита в настоящей работе имеется в виду определение характеристик его магнитной цепи (прежде всего, магнитных проводимостей) и решение прямой или обратной задач расчёта магнитной цепи. Если рассматриваются полевые методы, то обычно имеется в виду определение индукции в рабочем зазоре по заданной МДС обмотки. Расчёты электромагнитных сил, геометрических и тепловых параметров обмотки делаются попутно только в некоторых обсуждаемых ниже компьютерных программах.

В настоящее время известно много методов расчёта электромагнитов [1–4]. Все они отличаются друг от друга по разным признакам,

главные из которых сложность расчёта и его точность. Как правило, наибольшую точность дают самые сложные или требующие специального дорогостоящего программного обеспечения методы. Так как в процессе проектирования и оптимизации электромагнита на заданные параметры приходится просчитывать несколько вариантов, отличающихся размерами, следует признать, что в настоящее время даже самые простые и неточные цепные методы их расчёта являются востребованными.

В статье обобщаются методы и приёмы расчёта плоскопараллельных (табл. 1) и плоскомеридианных (табл. 2) магнитных полей и их маг-

Таблица 1

Методы расчёта плоскопараллельных стационарных полей и их магнитных проводимостей

№	Название и краткая характеристика	Достоинства	Недостатки
I	С помощью простых плоских фигур, выполняющих роль трубок потока [1, 3, 5, 6]	Простота	1. Необходимо заранее иметь хотя бы примерное представление о картине поля 2. Поле строится приближённо с помощью прямых и дуг окружностей 3. Некоторые участки поля оказываются не занятыми простыми фигурами 4. Линии магнитной индукции некоторых простых фигур (четвертей и половин круга, сегмента, серпа) выходят из одной точки 5. Картина поля не учитывает сопротивление магнитопровода
I.1	Простейший – путём измерения средних ширины и длины трубки потока на масштабном рисунке [3]	1. Быстрота 2. Удобство для прикидочных расчётов на первоначальном этапе, особенно при выборе размеров 3. Меньшая, чем у метода I.2, вероятность ошибки	1. Недостаточная точность для окончательных расчётов 2. Меньшая, чем у метода I.2, точность
I.2	По формулам [3, 6]	1. Большая точность, чем у метода I.1 2. Возможность использования в компьютерных программах	1. Большая трудоёмкость, чем у метода I.1 2. Большая, чем у метода I.1, вероятность ошибки из-за сложности некоторых формул
II	С помощью картин поля, построенных вручную [3, 7]	1. Обычно большая точность, чем у методов I.1 и I.2. 2. Принципиальная возможность расчёта проводимостей бесконечно протяжённых полей	1. Сложность и трудоёмкость построения поля 2. Зависимость от художественных способностей расчётчика – умения рисовать 3. Особая сложность построения бесконечно протяжённых полей
II.1	Метод Рихтера с заменой обмотки, бесконечно тонким намагничивающим слоем [2]	Обычно хорошо передаёт безвихревое поле	1. Картина поля не учитывает сопротивление магнитопровода 2. Искажает поле в районе поперечного сечения обмотки
II.2	Простейший – без разбивки трубок потока на ячейки [3]	Большая простота, чем у методов II.1, II.3 и II.4	1. Требуется хотя бы примерное предварительное представление о картине поля 2. При сложной форме трубок потока необходим переход к методу II.3 3. При построении картины поля не учитывается сопротивление магнитопровода
II.3	Простейший – с разбивкой трубок потока на ячейки [3]	Большая простота, чем у методов II.1 и II.4	1. Требуется хотя бы примерное предварительное представление о картине поля 2. При построении картины поля не учитывается сопротивление магнитопровода 3. Большая трудоёмкость, чем у метода II.2

II.4	Метод Лемана [3, 7]	1. Не искажает поле в районе поперечного сечения обмотки 2. При построении поля можно учесть сопротивление магнитопровода	1. Построение поля сложнее, чем методами II.1 – II.3 2. Сложность построения поля с учётом сопротивления магнитопровода сильно увеличивается
III	С помощью картин поля, снятых на проводящей бумаге [3, 6, 8]	1. Можно учесть сопротивление магнитопровода, но при наличии проводящей бумаги разных номиналов 2. Не требуется предварительного знания картины поля, как в методах I, II.2 и II.3. 3. Возможность расчёта проводимостей участка поля в районе поперечного сечения обмотки 4. Простота моделирования и расчёта бесконечно протяжённых полей	1. Необходима установка для моделирования и специальная проводящая бумага 2. Сложность учёта сопротивления магнитопровода 3. Невозможность использования в компьютерных программах
III.1	С использованием эталонной полюсы [3, 8]	Простота расчёта	Зависимость результата от различия в сопротивлениях бумаги по направлению и поперёк намотки рулона
III.2	Без эталонной полюсы – при расчёте проводимостей с разбивкой трубок потока на ячейки [3, 6, 8]	1. Меньшие требования к разнице в сопротивлениях бумаги вдоль и поперёк рулона, чем в методе III.1 2. Наглядность при вычерчивании линий магнитной индукции	Большая трудоёмкость расчёта, чем у метода III.1, так как для расчёта проводимости каждую трубку приходится разбивать на ячейки
IV	Метод векторных магнитных потенциалов (с использованием конечно-элементных компьютерных программ FEMM и ANSYS) [3, 4]	Точность, простота и быстрота, возможность учёта сопротивления магнитопровода как в линейном, так и в нелинейном вариантах	Необходимо предварительно найти компьютерную программу и освоить её (FEMM свободно распространяется в Интернете; ANSYS при числе конечных элементов, большем 500, – коммерческая программа, стоит достаточно дорого)

Таблица 2

Методы расчёта плоскомеридианных стационарных магнитных полей и их магнитных проводимостей

№	Название и краткая характеристика	Достоинства	Недостатки
I	С помощью простых плоских фигур, выполняющих роль трубок потока [1, 3, 5]	Простота	1. Необходимо заранее иметь хотя бы примерное представление о картине поля 2. Поле строится приближённо с помощью прямых и дуг окружностей 3. Некоторые участки поля оказываются не занятыми простыми фигурами 4. Линии магнитной индукции некоторых простых фигур (четвертей и половин круга, сегмента, серпа) выходят из одной точки 5. Картина поля не учитывает сопротивление магнитопровода
I.1	Простейший – путём измерения средней ширины, средней длины и расстояния центра тяжести простой плоской фигуры от оси вращения на масштабном рисунке	1. Быстрота 2. Удобство для прикидочных расчётов на первоначальном этапе, особенно при выборе размеров. 3. Меньшая, чем у метода I.2, вероятность ошибки	1. Недостаточная точность для окончательных расчётов 2. Меньшая, чем у метода I.2, точность
I.2	По формулам табл. 3.1 [3]	Большая точность, чем у метода I.1 2. Возможность использования компьютерных программ	1. Большая трудоёмкость, чем у метода I.1 2. Большая, чем у метода I.1, вероятность ошибки из-за сложности некоторых формул

II	С помощью картин поля, построенных вручную	1. Большая точность, чем у методов I.1 и I.2 2. Принципиальная возможность расчёта проводимостей бесконечно протяжённых полей	1. Большая сложность, чем у аналогичных расчётов плоскопараллельных полей 2. Невозможность использования в компьютерных программах
II.1	Графический – по картине плоскомеридианного поля (известен по электроаппаратной литературе, например, [2])	Достаточная точность	Сложность построения сильно увеличивается (по сравнению с плоскопараллельным полем), так как соотношение ширины единичной трубки к длине должно зависеть от её расстояния до оси вращения
II.2	Простейший – по картине плоскопараллельного поля с разбивкой трубок потока на единичные трубки-ячейки [3, 9]	1. Достаточная точность 2. Простота (по сравнению с методом II.1)	1. Необходимо заранее иметь хотя бы примерное представление о картине поля 2. Меньшая точность, чем у метода II.1
III	С помощью картин поля, снятых на проводящей бумаге [3, 8]	1. Можно учесть сопротивление магнитопровода, но при наличии проводящей бумаги разных номиналов 2. Не требуется предварительного знания примерной картины поля, как в методах I и II.2 3. Возможность расчёта проводимостей участка поля в районе поперечного сечения обмотки 4. Простота моделирования и расчёта бесконечно протяжённых полей	1. Необходима установка для моделирования и специальная проводящая бумага 2. Сложность учёта сопротивления магнитопровода 3. Невозможность использования в компьютерных программах
IV	Метод векторных магнитных потенциалов (с использованием конечно-элементных компьютерных программ FEMM и ANSYS) [3, 4, 10]	Точность, простота и быстрота, возможность учёта сопротивления магнитопровода как в линейном, так и в нелинейном вариантах	Необходимо предварительно найти компьютерную программу и освоить её (FEMM свободно распространяется в Интернете; ANSYS при числе конечных элементов, большем 500, – коммерческая программа, стоит достаточно дорого)

Таблица 3

Методы расчёта электромагнитов, поля которых нельзя свести к двумерным

№	Название и краткая характеристика	Достоинства	Недостатки
I	Ценные [3]	Не требуют расходов на приобретение компьютерной программы и не требуют умения работы на компьютере, как методы II	Как правило, меньшая точность, чем у методов II
I.1	Методы решения трёхмерной задачи расчёта магнитных проводимостей		
I.1.1	С использованием метода расчётных полюсов (см. подразд. 3.8 [3])	Требуется расчёт магнитных проводимостей только в основной плоскости и в плоскости, перпендикулярной основной	Для сечений ярма даёт обычно большие погрешности, чем метод I.1.2
I.1.2	С помощью суммирования частичных объёмов поля (см. подразд. 3.7 [3])	Более обоснован, чем метод I.1.1	Сложнее, чем метод I.1.1

I.2	Методы расчёта магнитной цепи		
I.2.1	С помощью коэффициентов рассеяния (см. подразд. 1.3.2 [3])	1. Проще, чем метод I.2.2 2. При прямом расчёте магнитной цепи не требуется несколько итераций, как у метода I.2.2	1. Пригоден для расчёта систем с потоками рассеяния, линии индукции которых перпендикулярны одной из сторон поперечного сечения обмотки 2. Обычно даёт меньшую точность, чем метод I.2.2
I.2.2	Методом участков (см. подразд. 1.3.2 [3])	Обычно даёт большую точность, чем метод I.2.1	1. Пригоден для расчёта систем с потоками рассеяния, линии индукции которых перпендикулярны одной из сторон поперечного сечения обмотки 2. Требуется нескольких итераций и при прямом, и при обратном расчётах магнитной цепи
I.2.3	С учётом коэффициентов приведения для расчёта слабо насыщенных магнитных систем (см. подразд. 1.4 [3])	Пригоден для расчёта систем с потоками рассеяния и выпучивания, линии индукции которых имеют любую форму	Сложность расчёта коэффициентов приведения
I.2.4	Методы расчёта сильно насыщенной магнитной цепи со слабым насыщением ярма (см. подразд. 1.4.3 [3]) и с сильным насыщением ярма [11]	Пригодны для расчёта систем с потоками рассеяния и выпучивания, линии индукции которых имеют любую форму	Относительная сложность
I.3	Компьютерные цепные расчёты электромагнитов	1. Быстрота по сравнению с "ручными" расчётами 2. При наличии исполняемых (exe) файлов не требуют каких-либо других программ (исполняются в операционной системе Windows)	1. Для каждого типа конструкции необходима своя программа, так как от конструкции зависят формулы магнитных проводимостей 2. Для программ можно использовать только методы, расчёты которых выражаются формулами (для расчёта проводимостей нельзя использовать картины поля, построенные вручную или снятые на проводящей бумаге; можно использовать только метод простых фигур, который даёт обычно менее точные результаты)
I.3.1	На переменном токе (программа AC [12])	1. Простота по сравнению с методами II 2. Наглядность, так как расчёты сопровождаются понятными графиками и рисунками 3. QuickBASIC-программу AC можно скопировать из [12]	Программа пригодна только для электромагнита с поворачивающимся якорем, магнитопровод – шихтованный, короткозамкнутый виток охватывает часть поперечного сечения полюса
I.3.2	На постоянном токе в динамике (по рабочему документу DUON) [13]	1. Наглядность, так как расчёты сопровождаются понятными графиками и рисунками. 2. MathCAD-рабочий документ DUON можно скопировать из [13]	1. Рабочий документ пригоден только для электромагнита с поворачивающимся якорем, круглыми сердечником и обмоткой, ярмом и якорем из полюсы, прямоугольной в поперечном сечении. 2. Требуется наличие на компьютере системы MathCAD и умение работы с ней в качестве пользователя
I.3.3	На построенном токе в статике (программы DC и DU [12, 13])	1. Простота по сравнению с методами II 2. Наглядность, так как расчёты сопровождаются понятными графиками и рисунками 3. QuickBASIC-программы DC и DU можно скопировать из [2, 3]	Программы пригодны только для электромагнита с поворачивающимся якорем, круглыми сердечником и обмоткой, ярмом и якорем из полюсы, прямоугольной в поперечном сечении

II	Полевые методы расчёта с использованием компьютерной программы ANSYS [4, 10, 14–16]	Обычно большая точность, чем у методов I	1. Необходимо приобрести программу ANSYS и освоить её 2. Несовершенство методов расчёта электромагнитов переменного тока в программе ANSYS
II.1	Метод векторного магнитного потенциала [4, 15, 16]	Имеет штатное средство расчёта магнитных потоков	1. Требуется большее число конечных элементов и узлов, чем для метода II.3. 2. Компьютер для расчёта этим методом должен иметь большие ресурсы, чем для расчёта методом II.3, так как уравнения решаются для каждой проекции векторного магнитного потенциала на оси координат
II.2	Краевой [4, 15, 16]	В общем случае требуется компьютер с меньшими ресурсами, чем для метода II.1	1. Не имеет штатного средства расчёта магнитных потоков 2. Требуется большее число конечных элементов и узлов, чем для метода II.3, так как в методе II.2 обмотка является частью сети конечных элементов
II.3	Метод скалярного магнитного потенциала [4, 15, 16]	В общем случае требует меньше конечных элементов и узлов, чем методы II.2 и II.1, так как обмотка не входит в конечно-элементную сеть и моделируется одним или несколькими конечными элементами	1. Не имеет штатного средства расчёта магнитных потоков 2. Имеет штатные конечные элементы для моделирования обмоток, только прямоугольных в поперечном сечении

нитных проводимостей, а также методы расчёта электромагнитов, поля которых нельзя свести к двумерным (табл.3). В этих таблицах представлены методы расчёта, которые использовались автором или были предложены им, а также те, к разработке и совершенствованию которых он имел непосредственное отношение. Практически все приведённые в этих таблицах методы проверены автором путём сравнения магнитных потоков, измеренных в сечениях реальных электромагнитов и рассчитанных методами табл. 1–3.

В каждой из таблиц, кроме 3-й, методы представлены примерно в порядке возрастания точности. В табл.3 в одном цепном расчёте возможно разное сочетание методов I.1 решения трёхмерной задачи и методов I.2 расчёта магнитной цепи. Методы I.1.1 и I.1.2 группы I.1, а также методы I.2.1 и I.2.2 группы I.2, расположены примерно в порядке возрастания точности (каждая пара внутри своей группы). Методы I.2.3 и I.2.4 группы I.2 имеют другую, нежели методы I.2.1 и I.2.2, область применения, поэтому сравнить их точность не представляется возможным.

Компьютерные цепные методы группы I.3 расположены примерно в порядке возрастания точности. В особых случаях методы I.3.1 и I.3.2 могут поменяться местами, так как на погрешности расчёта с помощью компьютерного рабочего документа DUON большое влияние могут оказать характеристики механизма (коэффициенты демпфирования, вязкости, трения).

Для сравнения по точности методов группы II у автора пока недостаточно данных. В тех расчётах, которые удалось сравнить с экспериментом, эти методы дали примерно одинаковую погрешность [15, 16].

Выводы

Статья позволяет инженеру выбрать методы, необходимые для расчёта электромагнита на заданные параметры в соответствии со своими личными возможностями, склонностями, а также в соответствии с экономическими возможностями предприятия, на котором он работает.

Список литературы

1. Ротерс Г. Электромагнитные механизмы. М.: Госэнергоиздат, 1949.
2. Таев И.С., Буль Б.К., Годжелло А.Г. и др. Основы теории электрических аппаратов. М.: Высшая школа, 1987.

3. Буль О.Б. Методы расчёта магнитных систем электрических аппаратов. Магнитные цепи, поля и программа FEMM. М.: Академия, 2005.

4. Буль О.Б. Методы расчёта магнитных систем электрических аппаратов. Программа ANSYS. М.: Академия, 2006.

5. Буль О.Б. Расчёт магнитных проводимостей плоскопараллельных и плоскомеридианных полей с помощью простых фигур // Изв. вузов. Электромеханика. 1969. №1. С.1–10.

6. Буль О.Б., Селиванов Л.В. Электромагнит с магнитной индукцией в зазоре 5 Тл // Энергосбережение и водоподготовка. 2002. №1. С.78–82.

7. Буль О.Б. Два метода построения картины вихревого магнитного поля // Труды МЭИ. Электромеханика. 1969. Вып. VXXI, Ч.П. С.141–150.

8. Буль О.Б. Некоторые особенности моделирования плоскопараллельных полей электромагнитов // Сборник трудов ВЗПИ. Электрические машины и аппараты. 1971. Вып.66. С.98–108.

9. Буль О.Б. Расчёт магнитных проводимостей осесимметричных систем по картинам плоскопараллельного поля // Труды МЭИ. "Электроаппаратостроение". 1972. Вып.113. С.128–131.

10. Буль О.Б. Погрешности расчёта осесимметричной

магнитной системы с помощью программ ANSYS и FEMM // МГОУ-XXI-Новые технологии. 2005. №6. С.17–22.

11. Буль О.Б. Расчёт магнитной цепи электромагнита с магнитной индукцией в зазоре, значительно превосходящей индукцию насыщения материала магнитопровода // Энергосбережение и водоподготовка. 2001. №4. С.70–76.

12. Буль О.Б. Компьютерная графика на QuickBasic для электрических аппаратов. М.: Изд-во МГОУ, 1998.

13. Гольдберг О.Д., Буль О.Б., Свириденко И.С., Хелемская С.П. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования. М.: Высшая школа, 2001.

14. Буль О.Б. Погрешности расчёта осесимметричной магнитной системы с помощью программ ANSYS и FEMM (часть II) // МГОУ-XXI-Новые технологии. 2006. №1. С.8–15.

15. Буль О.Б. Погрешности расчёта электромагнита с помощью ANSYS и FEMM // Электричество. 2006. №7. С.31–43.

16. Буль О.Б. Точность расчёта осесимметричной и трёхмерной магнитных систем постоянного тока с помощью ANSYS // Сб. тр. 6-й конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM GmbH (20–21 апр. 2006 г.) / Под ред. А.С. Шадского. М.: ООО "ИИГ Полигон-пресс" и "Изд-во Барс", 2006. С.364–386.

Исследование теплового старения изоляционных жидкостей Ч.1. Механизмы и кинетика старения

АРАКЕЛЯН В.Г.

Опираясь на строгое описание опытов теплового старения изоляционных жидкостей, по результатам газового анализа составлено точное представление о механизме протекающих физико-химических процессов в виде кинетических схем и дифференциальных уравнений, полностью отражающих результаты экспериментов в присутствии и в отсутствие кислорода.

В процессе эксплуатации оборудования изоляционное масло претерпевает изменение, которое называется старением. Лавина физических и физико-химических процессов, протекающих в работающем оборудовании, укорачивает жизнь изоляционных материалов [1]. В то время как тепловая энергия, поглощаемая жидкостью, не изменяет химических свойств стабильных углеводородных цепей, лабильные компоненты неминуемо разлагаются благодаря гомолитическому разрыву некоторых возбуждённых ковалентных связей:

Basing on the strict description of experiences of heat ageing of insulating liquids, by results of the gas analysis exact representation about the mechanism of proceeding physico-chemical processes as kinetic circuits and the differential equations is made. Circuits and the differential equations completely reflect results of experiments at presence and in absence of oxygen.



Образовавшиеся короткоживущие фрагменты, называемые свободными радикалами, порождают цепную реакцию.

На скорость старения оказывают влияние кислород, температура, свет [2, 3]. В основном, рассматриваются два источника энергии, ответственных за превращение органических жидкостей в продукты разложения [4]: электрическое поле, инжектирующее электроны в изоляцию, и кислород в сочетании с теплом и

каталитическими свойствами металлов.

Окислительный автокаталитический процесс является основной причиной старения трансформаторного масла в эксплуатации [5]. Жидкофазное окисление углеводородов – цепной химический процесс, также порождаемый свободными радикалами [6]. Случайно образовавшийся под действием энергии термического или фотохимического воздействия радикал $R\bullet$ присоединяется к молекуле кислорода, образуя перекисный радикал $R-O-O\bullet$. Последний, взаимодействуя с молекулой углеводорода, образует гидроперекись и новый радикал, и цепная реакция продолжается. Обрыв цепной реакции происходит за счёт уничтожения радикалов при взаимодействии их между собой, со специальными веществами (на чём основано действие антиоксидантов) и с прочими материалами, имеющимися в реакционной системе. Антиоксиданты выполняют очень важную защитную функцию [7], затормаживая образование продуктов окисления. Реакции окислительного старения масла ускоряются присутствием тепла, влаги и катализаторов, таких как медь или железо, которые являются изначальными компонентами электротехнического устройства [8].

Задача исследования состоит в определении констант физико-химических процессов, протекающих при тепловом старении изоляционных жидкостей на основе кинетического описания опытов. В последнее время всё чаще для описания старения пользуются данными анализа газов, растворённых в изоляционной жидкости. Однако подобные исследования заканчивались лишь представлением графиков динамики изменения концентрации компонентов (например [9, 10]). Мы также воспользуемся изменением концентрации газообразных компонентов. Цель данной работы – основываясь на физико-химическом понимании происходящих явлений, предложить решение таких вопросов, как термическая стойкость, стойкость к газообразованию, стойкость к окислению изоляционных жидкостей, и приблизиться к решению вопросов диагностики и перспективного конструирования.

Экспериментальное исследование старения изоляционных жидкостей

Возможность получения истинных значений параметров процесса старения полностью зависит от постановки эксперимента. Изучению подлежит жидкофазный процесс, так как имен-

но он определяет старение изоляционных жидкостей в реальных условиях эксплуатации, и вероятность газофазного окисления должна быть исключена. Для правильной постановки эксперимента необходимо представлять особенности реакционных систем. Общим условием является сохранность контролируемых продуктов реакции вплоть до их аналитического определения. Для термоокислительного процесса дополнительно необходимо оценивать способ доставки кислорода в реакционную массу. Из известных вариантов реакционной системы (открытой, с ограниченным и неограниченным доступом кислорода, закрытой, с газовой фазой и без) теоретически наиболее простым для получения значений основных констант изучаемого процесса является вариант закрытой системы без газовой фазы.

Эксперименты теплового старения были выполнены с 10 мл изоляционных жидкостей в полностью стеклянных медицинских шприцах на 10 мл в отсутствие газовой фазы. При этом шприц одновременно выполняет функции реактора и пробоотборника. Анализ газов в масле выполнялся на специализированном хроматографе [11], производящем полностью автоматический анализ непосредственно из пробы масла. По экспериментально полученным значениям концентрации кислорода было показано, что систему в пределах длительности опыта можно рассматривать как герметичную.

Эксперименты теплового старения минерального масла

Минеральное масло ГК было насыщено воздухом посредством барботажа в течение 2 ч при комнатной температуре и оставлено на ночь. Отстоявшееся изоляционное масло размещено в полностью стеклянных шприцах на 10 мл, закрытых тефлонированными колпачками, без следов воздуха, и шприцы помещены в горизонтальном положении в термошкаф при 180°C.

В опытах в атмосфере аргона исходным маслом служило дегазированное в вакуумном шкафу масло ГК. Взятое непосредственно из вакуумного шкафа масло помещалось в шприц на 50 мл с трёхходовым краником, через который осуществлялась барботажная продувка аргоном в течение 3 ч, после чего масло было оставлено на ночь в атмосфере аргона. После размещения масла в продутых аргоном шприцах посредством передавливания из большого

шприца в малые по системе из трёхходовых кранов оно дополнительно продувалось аргонном в течение 30 мин.

После извлечения из термошкафа шприцы охлаждались при небольшом поджатии поршня для предотвращения попадания воздуха, и масло анализировалось непосредственно из этих же шприцов, исключая какой-либо контакт с атмосферным воздухом. Результаты опытов представлены в табл.1 и на рис.1 и 2, где экспериментальные точки для удобства соединены линиями. Эти линии совершенно произвольно соединяют точки и не отражают истинной динамики изменения концентрации газов, не являются кинетическими кривыми.

Эксперименты теплового старения касторового масла

Исследованию были подвергнуты два типа касторового масла – техническое и медицинское – российского и индийского производства. Техническое касторовое масло российского производства соответствовало требованиям к изоляционным конденсаторным жидкостям. Дегазация выполнялась непосредственно в шприцах. Касторовое масло набиралось в стеклянные медицинские шприцы ёмкостью 10 мл, которые в открытом состоянии, без поршней, размещались в вакуумном шкафу. Процесс сушки и дегазации продолжался в течение суток при температуре не выше 70°C в вакууме при

Таблица 1

Экспериментальные данные теплового воздействия при 180°C на масло ГК (за вычетом начальных значений концентрации; ацетилен и пропин отсутствуют)

Тепловое воздействие	Концентрация компонентов, мкл/л									
	N ₂	O ₂	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈
Исходное состояние		36040	отс.	2,2	отс.	246	3,1	отс.	1,9	5,4
1 ч	81773	375	316	143	929	521	22	7,5	1,5	32
2 ч		13	377	214	1286	663	28	50	2,6	72
1 ч	1800	660*	132	289	569	674	11	221	2,1	192
2 ч			136	317	617	484	14	287	2,5	253

* Исходная концентрация; в результатах анализа образцов, подвергнутых нагреву, кислород отсутствует.

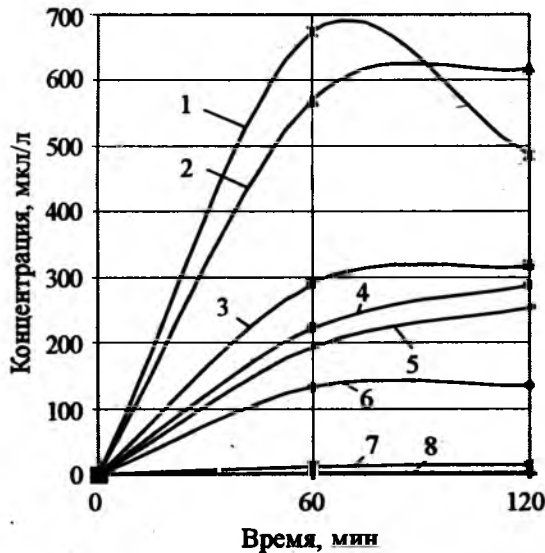


Рис.1. Образование газов при тепловом старении минерального изоляционного масла ГК при 180°C и начальной концентрации кислорода 660 мкл/л (соединительные линии точек при 60 и 120 мин):

1 – CO₂; 2 – CO; 3 – CH₄; 4 – C₂H₆; 5 – C₃H₈; 6 – H₂; 7 – C₂H₄; 8 – C₃H₆

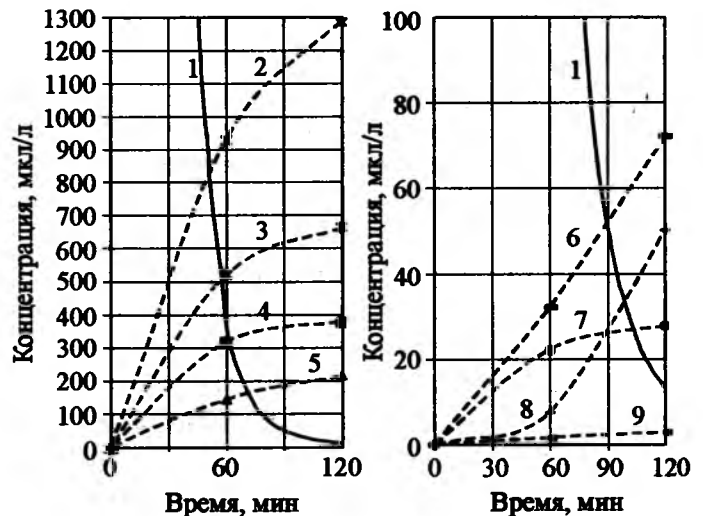


Рис.2. Образование газов при тепловом старении минерального изоляционного масла ГК при 180°C и начальной концентрации кислорода 36040 мкл/л (соединительные линии точек при 60 и 120 мин):

1 – O₂; 2 – CO; 3 – CO₂; 4 – H₂; 5 – CH₄; 6 – C₃H₈; 7 – C₂H₄; 8 – C₂H₆; 9 – C₃H₆

остаточном давлении на уровне 1 мм.рт.ст. Далее собранные и загерметизированные шприцы с изоляционной жидкостью помещались в термощкаф при заданной температуре в диапазоне от 60 до 130°C. После выемки шприц охлаждался и изоляционная жидкость анализировалась.

В табл.2 приведены экспериментальные данные для медицинского и технического касторового масла российского производства, за вычетом исходного содержания компонентов. При температуре до 70°C единственным образующимся из технического касторового масла компонентом является водород. При дальнейшем увеличении температуры появляются остальные газообразные компоненты: окислы углерода и легкие углеводороды. Из табл.2 видно, что газообразование в медицинском касторовом масле идет более продуктивно.

Предварительная оценка полученных результатов

Опыт с минеральным маслом (рис.1 и 2).

1. В опыте с аргоном концентрация кислорода намного меньше начальной концентрации кислорода в опытах с воздухом (660 против 36040 мкл/л). Поэтому в первом приближении можно принять, что опыт с аргоном отражает механизм термического разложения, а опыт с воздухом – термоокислительного.

2. В опыте с аргоном отметим, что зависимость концентрации газообразных продуктов, кроме CO_2 , от времени, вероятно, приближаются к пределу за 2 ч.

3. Образование компонентов из субстрата в отсутствие кислорода протекает не по линейному закону (нулевому порядку). Либо его роль мала, либо существуют процессы, которые препятствуют простому накоплению газообразного компонента. На фоне примерно установившейся концентрации водорода и углеводородов меняется только концентрация окислов углерода: концентрация CO ещё растёт, а концентрация CO_2 – падает. Очевидный переход через максимум соединительной линии для концентрации CO_2 , а также возможный перегиб у линий для CO , H_2 и CH_4 могут свидетельствовать о наличии процесса потребления этих компонентов, процесса взаимодействия некоторых образующихся газов с активными компонентами субстрата.

4. Количество убывающего CO_2 в опыте с аргоном не соответствует количеству образу-

ющегося CO . Следовательно, процессы, с ними происходящие, протекают независимо, и рассматривать эти изменения как простой процесс восстановления CO_2 в CO некорректно.

5. В опыте с воздухом CO_2 образуется не больше, чем в опыте с аргоном. Но концентрация CO_2 не снижается к второму часу, а продолжает расти. Резко растёт CO и H_2 , что также подтверждает невысокую роль процесса прямого окисления. Рост углеводородов снижается: наличие кислорода, хоть и формирует образование легких углеводородов, но не так интенсивно, как это происходит в его отсутствие.

6. Константы скорости расходования кислорода, рассчитанные попарно по трём имеющимся точкам (табл.1), не совпадают, что свидетельствует о более сложной зависимости изменения концентрации кислорода от времени, чем просто экспоненциальной. Следовательно, первопричина, определяющая потребление кислорода, в количественном отношении не является постоянной и меняется во времени.

7. Количество израсходованного кислорода в опыте с воздухом намного превышает количество кислорода в газообразных продуктах реакции: примерно 26 мкл против 360. Следовательно, основная масса кислорода образует нелетучие конечные продукты.

8. Если из концентрации 36000 мкл/л кислорода образовалось 1286 CO + 663 CO_2 и, вероятно, столько же воды (эквивалентное количество O_2 равно $(1286/2 + 663) \cdot 2 = 2600$ мкл/л), т.е. потрачена 1/14 часть на газообразные, остальные 13/14 поглощены в жидкие и твёрдые конечные продукты, то соответствующая доля от 660 мкл/л кислорода в опыте с аргоном составит 48 мкл/л O_2 . Суммарно в опыте с аргоном за 1 ч (когда кислород практически кончился, а концентрация CO_2 ещё не падала) образовалось 2090 мкл/л газообразных компонентов. Следовательно, более 2000 мкл/л компонентов в опыте с аргоном образовалось из субстрата без воздействия кислорода, т.е. кислородсодержащие газообразные компоненты образуются из кислородсодержащих компонентов субстрата.

9. В опыте с воздухом обращает на себя внимание расположение точек этана и пропана. Соединительные линии вогнуты, особенно линия этана. На протяжении первого часа эти компоненты образовывались неактивно. Этот

Экспериментальные данные теплового воздействия на отечественное касторовое масло (за вычетом исходной концентрации компонента; неопределяемые отсутствуют; начальная концентрация кислорода примерно — 1400 мкл/л)

Температура, °С	Время, мин	Концентрация, мкл/л					
		H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C ₂ H ₆	C ₃
Медицинское касторовое масло							
60	81	76	0			0	0
	117	114	0		37	0	0
	191	195	0		65	2	0
	229	240	0		130	3	0
	267	315	0		94	5	1
	302	389	0	6	159	8	1
	335	428	1	14	233	13	1
70	125	280	0		135	15	1
	165	352	0		198	23	1
	202	490	0	8	263	27	2
	241	531	0	11	264	30	3
	282	606	3	19	313	37	4
90	83	523	0	18	360	50	2
	120	770	0	37	545	77	4
	155	1031	0	54	708	109	7
	190	1322	0	94	992	173	13
	225	1556	0	119	1219	197	15
	262	1739	0	132	1317	250	20
	296	1973	12	130	1362	221	23
110	30	291		20	165	49	4
	70	1306		151	1016	228	20
	105	2248		312	1929	457	40
	160	2960	20	415	2487	632	57
Техническое касторовое масло							
80	160	25	0	8	80	9	1
	220	37	0	11	100	15	1
	270	47	0	13	115	17	2
	315	53	0	15	135	21	5
90	150	30	0	11	105	23	2
	180	36	0	14	130	23	3
	225	47	0	17	160	28	5
	275	57	0	21	195	32	7
	345	68	0	25	230	40	10
110	150	39	0	30	216	45	15
	185	45	0	38	271	59	20
	220	52	1	46	330	73	23
	255	64	2	54	380	82	26
	295	73	3	60	422	93	30
130	30	73	3	60	422	93	30
	30	10	1,5	10	65	23	8
	70	21	3	25	130	50	13
	105	36	7	42	245	81	28
	140	55	10	60	370	140	39
	180	65	11	81	500	160	54
	220	75	13	95	605	175	62
	255	84	16	112	760	210	74
320	97	18	135	860	238	90	

интервал времени характеризуется высокой концентрацией кислорода. Либо кислород тормозит процесс образования этих углеводородов (например, из субстрата), либо окси-радикалы не производят эти углеводороды в процессе своего превращения. Когда концентрация кислорода заметно снизилась, начался процесс более активного образования этих углеводородов. Не исключено, что такое положение распространяется и на другие углеводороды, но в меньшей степени, и потому остаётся незамеченным. При термическом разложении (т.е. без кислорода) образование этана и пропана шло наравне с метаном (см. табл. 1). В кислородной среде концентрация этих компонентов разнится на порядок.

Опыт с касторовым маслом.

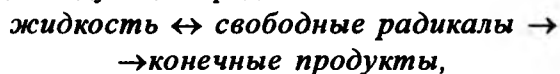
1. Линии в графиках, которые могут быть построены по данным табл. 2, в большей или меньшей степени воспроизводят S-образную форму. С повышением температуры очевидна тенденция перехода от слабой S-образной зависимости к ярко выраженной. Яркая S-образная зависимость наиболее характерна для российского касторового масла для технического сорта при 130°C и для медицинского сорта уже при 110°C.

2. В плане газообразования, вероятно, индукционного периода, обусловленного присутствием антиоксиданта (т.е. в общепринятом понимании), нет.

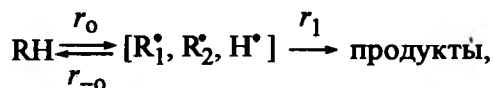
Кинетика термического разложения изоляционной жидкости

Формирование концепции механизма термического разложения изоляционной жидкости

Равновесие жидкости с позиции старения в бескислородной среде можно представить в виде следующего ряда:



что применительно к углеводородному субстрату можно схематично выразить:



где $r_o = r_{-o} + r_1$.

Сочетание скоростей прямых (r_o и r_1) и обратной (r_{-o}) реакции и энергии активации этих процессов определяют термическую стойкость жидкости.

При любой температуре в любой жидкости существует определенное, равновесное количе-

ство свободных радикалов, соответствующее данной температуре – это термодинамическое свойство. Зависимость концентрации свободных радикалов c_R от температуры T (К) выражается уравнением

$$\ln c_R = A' - B'/T.$$

На новом уровне температуры равновесие устанавливается на новом уровне концентрации свободных радикалов: из состояния равновесия $c_R^{T_1}$ система переходит в состояние равновесия $c_R^{T_2}$. С ростом концентрации свободных радикалов в системе становятся заметными реакции, завершающиеся образованием конечных продуктов. Какие-либо колебания скорости прямой реакции r_1 будут компенсироваться обратной реакцией r_{-o} , так что при постоянной температуре система стремится поддерживать концентрацию радикалов постоянной.

Переход от одной температуры к другой из-за разницы констант скорости и порядков прямой и обратной реакций осуществляется в неравновесных условиях. При повышении температуры некоторые химические соединения попадают в термодинамически невыгодное положение, накапливают энергию, в связи с чем переходят в возбужденное состояние и распадаются, образуя некоторое дополнительное количество свободных радикалов. Именно это временное неравновесное повышение концентрации свободных радикалов создает условия для конкурентных реакций r_{-o} и r_1 и инициирует образование конечных продуктов. Чем резче повышение температуры, тем более вероятно образование большей концентрации неравновесных свободных радикалов. Этот механизм действует не только при наличии в системе лабильных веществ, но и веществ, попавших в энергетически невыгодное положение в новых условиях. Так, вследствие повышения температуры возникают "нестабильные компоненты", которые подвергаются разложению.

В равной степени все изложенное справедливо для кислородсодержащего субстрата, для природных и синтетических изоляционных жидкостей и их смесей, тем более что формально кинетические уравнения не отражают химическое содержание протекающего процесса.

Таким образом, повышение температуры для сложного органического субстрата имеет два последствия: 1) создаёт условия для воз-

можно постоянного разложения на новом уровне температуры за счёт повышения равновесной концентрации радикалов субстрата $c_{R_{cyб}}$, 2) формирует некоторое количество вещества в виде концентрации нестабильных компонентов $c_{н.к}$, которое при разложении образует продукты и свободные радикалы $c_{R_{н.к}}$.

Все образованные газообразные компоненты пока они растворены в изоляционной жидкости – в этом химическом реакторе – являются объектами воздействия активных свободных радикалов, вступают с ними в реакции и перерабатываются в другие химические соединения, более устойчивые и энергетически выгодные в данных условиях.

Итак, в проведённых опытах каждый из газообразных компонентов имеет два источника образования – субстрат и нестабильные компоненты, и один канал потребления – вторичные реакции образовавшихся компонентов, остающихся в реакционной зоне действия свободных радикалов.

Схема жидкофазного термического разложения изоляционной жидкости и кинетическое уравнение

Прежде чем приступить к составлению кинетической схемы процесса, дифференциальных уравнений и их решению, необходимо рассмотреть влияние технического фактора. Технически нельзя создать новый уровень температуры изоляционной жидкости, не затратив на это некоторое время. В выполненных экспериментах использовался пассивный (т.е. без принудительной циркуляции) воздушный термощкаф. Температура изучаемой жидкости поднимается от начальной T_0 до заданной T не мгновенно, и константы скорости претерпевают соответствующие изменения во времени, некоторые из которых можно учесть. Эти изменения описываются экспоненциальной зависимостью. Например, текущее значение константы скорости образования свободных радикалов k_{oR} , полагая, что исходное значение незначительно,

$$k_{oR} = k_{oR}^T (1 - e^{-k_T t}), \quad (1)$$

где k_{oR}^T – константа скорости при новом значении температуры T ; k_T – техническая константа скорости установления нового значения температуры; t – время.

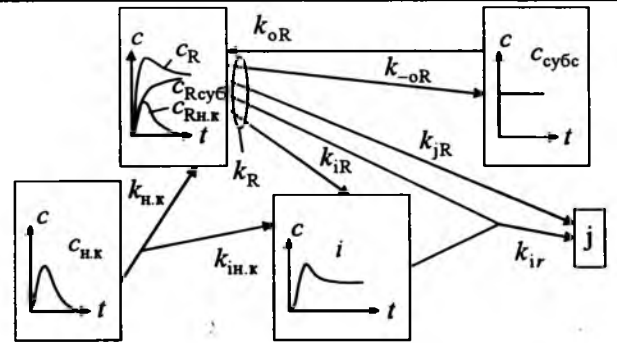


Рис.3. Кинетическая схема термического старения изоляционной жидкости

Схема образования газообразных компонентов и продуктов реакции в отсутствие кислорода с учётом технического фактора выполненного эксперимента представлена на рис.3. Кинетическая схема отражает некоторую задержку образования $c_{н.к}$ и c_R , и концентрации компонентов i . В соответствии со схемой с момента повышения температуры начинает формироваться концентрация радикалов $c_{R_{cyб}}$. Скорость образования радикалов R^\bullet из субстрата (константа скорости k_{oR}) и скорость их расходования (константа скорости k_R), в конечном счёте, сформируют постоянную концентрацию радикалов $c_{R_{cyб}}$ на новом уровне температуры. Концентрация нестабильных компонентов $c_{н.к}$ также сформируется не мгновенно, а со скоростью, определяемой константой скорости изменения температуры k_T . Распад нестабильных компонентов приводит к одновременному образованию газообразных компонентов и радикалов R^\bullet , которые суммируются с радикалами R^\bullet , непосредственно образованными из субстрата. Концентрация дополнительных радикалов R^\bullet ($c_{R_{н.к}}$) меняется от нуля вначале, достигает максимума и за счёт израсходования источника радикалов ($c_{н.к}$) при постоянном расходе на образование продуктов старения с константой скорости k_R снова падает до нуля. Свободные радикалы одновременно расходуются на образование газов и конечных продуктов, а образовавшиеся газообразные компоненты взаимодействуют со свободными радикалами и превращаются в конечные продукты j .

Теперь приступим к составлению дифференциальных уравнений в соответствии с приведённой схемой и их решению.

1. Если бы не было расходования нестабильных компонентов на образование свободных

радикалов, концентрация нестабильных компонентов $c_{н.к}$ достигла бы некоторого постоянно-го, характерного для данного субстрата с его загрязнением и для нового уровня температуры значения $c_{н.к}^0$:

$$c_{н.к} = c_{н.к}^0 (1 - e^{-k_T t}). \quad (2)$$

Это уравнение проистекает из дифференциального

$$dc_{н.к}/dt = k_T c_{н.к}^0 e^{-k_T t}.$$

Но поскольку образующиеся нестабильные компоненты сразу же начинают разлагаться, то полное дифференциальное уравнение запишется так:

$$dc_{н.к}/dt = k_T c_{н.к}^0 e^{-k_T t} - k_{н.к} c_{н.к},$$

где $k_{н.к}$ – константа скорости расщепления нестабильных компонентов.

После умножения уравнения на $e^{k_{н.к} t}$, перегруппировки и определения константы интегрирования получим:

$$c_{н.к} = k_T c_{н.к}^0 (e^{-k_{н.к} t} - e^{-k_T t}) / (k_T - k_{н.к}). \quad (3)$$

Уравнение (3) полностью отражает существо явления: 1) чем больше темп подъёма температуры (чем больше значение k_T), тем круче кривая изменения концентрации (и на стадии роста, и на стадии падения) и тем выше максимально достигаемое текущее значение $c_{н.к}$; 2) с течением времени $c_{н.к}$ падает до нуля.

2. В соответствии с выработанной концепцией и приведённой схемой изменение концентрации радикалов c_R происходит за счёт образования из субстрата с константой скорости k_{oR} , образования из нестабильных компонентов с константой скорости $k_{н.к}$ и расщепления с константой скорости k_R . Константа k_R объединяет все направления расщепления радикалов. Колебания расщепления по отдельным направлениям компенсируется изменением скорости обратной реакции k_{oR} , так что константа скорости k_R остаётся постоянной. Скорость образования радикалов из субстрата не зависит от концентрации субстрата (поскольку последняя остаётся постоянной), а скорость образования из нестабильных компонентов и скорость расщепления зависят от концентрации, соответственно, $c_{н.к}$ и c_R :

$$dc_R/dt = k_{oR} + k_{н.к} c_{н.к} - k_R c_R. \quad (4)$$

С учётом выражений (1) и (3) при новой температуре после умножения уравнения (4) на $e^{k_R t}$, перегруппировки и интегрирования, получим:

$$c_R = \frac{k_{oR}}{k_R} \left(1 - \frac{k_T e^{-k_R t}}{k_T - k_R} + \frac{k_R e^{-k_T t}}{k_T - k_R} \right) + \frac{k_{н.к} k_T c_{н.к}^0}{k_T - k_{н.к}} \left(\frac{e^{-k_R t} - e^{-k_{н.к} t}}{k_{н.к} - k_R} - \frac{e^{-k_R t} - e^{-k_T t}}{k_T - k_R} \right), \quad (5)$$

где все константы скорости – взяты при температуре опыта;

(k_{oR} и $k_{н.к}$ определяют образование c_R , k_R – его расход, а k_T – задержку в начальный период; при $t \rightarrow \infty$ предельное $c_R^0 = k_{oR} / k_R$).

3. С учётом того, что нестабильные компоненты формируют радикалы R^* (что отражено в уравнении (5) и одновременно выделяют газообразные компоненты, а образуемые компоненты вступают во вторичную реакцию с имеющимися в реакционной массе свободными радикалами (что отражено в схеме), образование компонентов i можно записать так:

$$dc_i/dt = k_{iR} c_R + k_{и.н.к} c_{н.к} - k_{iR} c_i, \quad (6)$$

где k_{iR} и $k_{и.н.к}$ – константы образования компонента i из субстрата и из нестабильных компонентов; c_R – определяется по уравнению (5), $c_{н.к}$ – по уравнению (3); k_{iR} – константа скорости взаимодействия образовавшегося компонента со свободными радикалами.

Уравнение (6) не имеет точного решения, так что исходная, первообразная функция остаётся невыраженной. Приближённые решения (6) приводят к существенным ошибкам в определении искомых констант. Поэтому все решения осуществляются непосредственно по дифференциальному уравнению (6): возможности итерации обеспечивают намного большую точность, чем та, с которой могут быть получены экспериментальные данные.

Уравнение (6) позволяет описать кинетическую зависимость концентрации компонента i с учётом прогиба в начале и отражает все особенности процесса термического старения, обозначенные принятой концепцией. Предельное значение концентрации компонента при $t \rightarrow \infty$ равно k_{iR}/k_{iR} .

Кинетика термоокислительного разложения изоляционной жидкости

Формирование концепции механизма термоокислительного разложения изоляционных жидкостей

Формирование концепции осуществляется по результатам выполненных опытов на основе рассмотрения особенностей разложения минерального изоляционного масла ГК в присутствии кислорода, которые были отмечены выше в виде предварительной оценки. Главное из них: а) расход кислорода протекает по более сложному закону, чем просто экспоненциальный; б) в присутствии кислорода рост углеводородных газов менее интенсивен, чем в его отсутствие, т.е. кислород через окси-радикалы производит меньше углеводородов и тормозит их образование непосредственно из углеводородного субстрата; в) образование CO_2 протекает не столь интенсивно.

Одновременное воздействие на субстрат температуры и кислорода должно приводить к изменениям, характерным для повышения температуры (некоторой задержке в формировании равновесной концентрации радикалов из субстрата и возникновению неравновесной концентрации нестабильных компонентов, из которых формируется дополнительная концентрация радикалов вдобавок к равновесной), и к изменениям, характерным для присутствия кислорода (связыванию свободных радикалов с образованием окси-радикалов).

Пока концентрация кислорода высока и в основном определяет направление течения реакций, образующиеся газы будут оставаться химически неизменными, невовлеченными во вторичные реакции – кислород будет полностью связывать свободные радикалы, которые ответственны за протекание вторичной реакции. Разложение нестабильных компонентов по типу бескислородного распада будет заблокировано: вся масса углеводородных радикалов из субстрата и из нестабильных компонентов будет претерпевать изменения только через окси-радикалы, по тому же маршруту, что и уже имеющиеся окси-радикалы нестабильных компонентов. Это первая стадия процесса.

По мере снижения концентрации кислорода наступает момент, когда все молекулы кислорода оказываются связанными радикалами. Соотношение концентрации свободных радика-

лов и концентрации кислорода в этот момент обозначим как коэффициент связывания $k_c = c_R^t / c_{\text{O}_2}^t$, а сам момент времени как t_3 – время экранирования. После этого момента некоторое количество свободных радикалов остаётся несвязанным и принимает самостоятельное участие в формировании промежуточных компонентов и конечных продуктов по типу бескислородного процесса. На этом этапе концентрация свободных радикалов, способных образовывать собственные продукты разложения, c_R^Δ , определяется разницей текущей концентрации свободных радикалов c_R и концентрацией связанных кислородом свободных радикалов, равных $k_c c_{\text{O}_2}$,

$$c_R^\Delta = c_R - k_c c_{\text{O}_2} \quad (\text{для } t > t_3). \quad (7)$$

В момент времени t_3 концентрация $c_R^\Delta = 0$ и

$$c_R^t = k_c c_{\text{O}_2}^t \quad (\text{для } t = t_3) \quad (8)$$

Соответственно, продукты разложения до момента времени t_3 формируются только из окси-радикалов. После момента времени t_3 остающийся кислород продолжает формировать окси-радикалы, из которых образуются компоненты, а оставшиеся нестабильные компоненты начинают продуцировать газы, как в бескислородной среде, и к ним добавляются компоненты, образуемые несвязанными радикалами субстрата. Имеющиеся в реакционной среде газообразные компоненты начинают вовлекаться во вторичную реакцию с несвязанными кислородом радикалами, и рост их концентрации затормаживается.

Наконец, когда концентрация кислорода становится незначительной, процесс переходит в третью стадию, рассмотренную ранее как чисто термическое старение, в которой концентрация компонента со временем приближается к равновесному значению $k_{iR}/k_{iR'}$.

Кинетические уравнения жидкофазного термоокислительного разложения изоляционной жидкости

Отразим описанные события в виде дифференциальных уравнений.

Итак, до момента времени t_3 конечные продукты образуются из окси-радикалов (c_{ox}), образуемых кислородом и радикалами R^\bullet (субстрата и нестабильных компонентов), и из ранее образованных в виде нестабильных компо-

нентов ($c_{н.к}$). Скорость образования газообразных компонентов по этому направлению выразит дифференциальным уравнением

$$dc_i/dt = k_{iox}(c_{ox} + c_{н.к}) \quad (\text{для } t \leq t_3) \quad (9)$$

Концентрация окси-радикалов формируется концентрацией кислорода, концентрацией радикалов c_R и константой скорости k_{O_2} , а скорость расходования определяется концентрацией окси-радикалов c_{ox} и константой скорости k_{ox}

$$dc_{ox}/dt = k_{O_2}c_{O_2}c_R - k_{ox}c_{ox} \quad (10)$$

Расходование кислорода определяется его концентрацией, концентрацией радикалов c_R и константой скорости k_{O_2}

$$dc_{O_2}/dt = -k_{O_2}c_{O_2}c_R$$

Текущие значения c_R определены уравнением (5) с учётом того, что система стремится поддерживать концентрацию радикалов постоянной, компенсируя изменение её расхода обратной реакцией. Константа скорости k_{O_2} , характерная для исследуемой температуры, также устанавливается не сразу, а как $k_{O_2}(1 - e^{-k_T t})$. Поэтому

$$dc_{O_2}/dt = -k_{O_2}(1 - e^{-k_T t})c_{O_2} \left[\frac{k_{oR}}{k_R} \left(1 - \frac{k_T e^{-k_R t}}{k_T - k_R} + \frac{k_R e^{-k_T t}}{k_T - k_R} \right) + \frac{k_{н.к} k_T c_{н.к}^0}{k_T - k_{н.к}} \left(\frac{e^{-k_R t} - e^{-k_{н.к} t}}{k_{н.к} - k_R} - \frac{e^{-k_R t} - e^{-k_T t}}{k_T - k_R} \right) \right]$$

Решение этого дифференциального уравнения даёт точное аналитическое описание сложной кинетической зависимости для концентрации кислорода в соответствии с выбранной концепцией, которая учитывает последствия реального изменения температуры в опыте,

$$\ln c_{O_2} = \ln c_{O_2}^0 - k_{O_2} \left[\frac{k_{oR}}{k_R} \left(t + \frac{k_T (e^{-k_R t} - 1)}{k_R (k_T - k_R)} - \frac{k_R (e^{-k_T t} - 1)}{k_T (k_T - k_R)} + \frac{e^{-k_T t} - 1}{k_T} - \frac{k_T (e^{-(k_R + k_T)t} - 1)}{(k_T - k_R)(k_T + k_R)} + \frac{k_R (e^{-2k_T t} - 1)}{2k_T (k_T - k_R)} \right) + \frac{k_{н.к} k_T c_{н.к}^0}{k_T - k_{н.к}} \times \left(\frac{e^{-2k_T t} - 1}{2k_T} - \frac{e^{-(k_R + k_T)t} - 1}{k_R + k_T} - \frac{e^{-k_T t} - 1}{k_T} + \frac{e^{-k_R t} - 1}{k_R} - \frac{e^{-(k_{н.к} + k_T)t} - 1}{k_{н.к} + k_T} - \frac{e^{-(k_R + k_T)t} - 1}{k_R + k_T} - \frac{e^{-k_{н.к} t} - 1}{k_{н.к}} + \frac{e^{-k_R t} - 1}{k_R} \right) \right]$$

Уравнение (11) отражает некоторый начальный индукционный период, когда концентрация кислорода снижается незначительно в связи с температурной инерцией. Далее скорость падения возрастает и достигает максимума, после чего снова падает до постоянного значения при $t \rightarrow \infty$ и $c_{O_2} \rightarrow 0$.

В уравнениях (9) и (10) фигурируют константы скорости: разложения окси-радикалов k_{ox} и образования компонента i из окси-радикалов k_{iox} . По сути своей константы k_{iox} и $k_{н.к}$ отражают одно и то же явление – образование компонента i из разлагающегося окси-радикала, но они отличаются в численном выражении, поскольку константа k_{iox} действует в кислородной среде, а константа $k_{н.к}$ – в бескислородной среде, так что эти интегральные константы, отражающие фактически теоретический выход компонента i в данной реакции, не равны. С другой стороны, становится ясно, что константы k_{ox} и $k_{н.к}$ не только отражают одно и то же явление – превраще-

ние окси-радикалов, но и равны, так как определяются только химической сущностью исходных веществ: и в том, и в другом случае это – перекисные соединения.

Теперь, когда определены основные составляющие уравнения (10) (c_R – по уравнению (5) и c_{O_2} – по уравнению (11)), можно рассчитать концентрацию окси-радикалов c_{ox} и концентрацию компонентов i (уравнение (9) в любой момент времени до t_3).

После времени t_3 концентрация кислорода снижена до такого уровня, когда кислород не может полностью связывать радикалы субстрата, и несвязанная часть свободных радикалов субстрата начинает производить продукты реакции самостоятельно, в дополнение к уже накопленным. В это же время начинается частичное разложение ещё сохранившихся к этому моменту нестабильных компонентов по типу бескислородного процесса. Чем дальше протекает реакция в закрытой системе, тем больше снижается концентрация кислорода и тем больше возрастает доля продуктов, производимых непосредственно субстратом. При этом уже образовавшиеся продукты, в том числе и газообразные, вовлекаются во вторичные реакции со свободными радикалами, оставшимися несвязанными кислородом.

Поскольку основные процессы этой стадии начинаются с момента t_3 , обозначим эту точку как начало координат отсчёта времени τ , т.е. для $t > t_3$ $t = t_3 + \tau$. Дифференциальное уравнение, отражающее этот процесс, запишем так:

$$dc_i/d\tau = k_{iR} (c_R - k_c c_{O_2}) + k_{iox} (c_{ox} + c_{н.к}^*) + k_{ин.к} c_{н.к}^{**} - k_{ir} c_i (c_R - k_c c_{O_2}),$$

где $(c_R - k_c c_{O_2})$ – концентрация свободных радикалов, способных образовывать собственные продукты разложения, т.е. текущая концентрация оставшихся несвязанными свободных радикалов R^\bullet , образованных субстратом и нестабильными компонентами, c_R^Δ (уравнение (10)); $k_{iR}(c_R - k_c c_{O_2})$ – часть компонентов, которая начинает образовываться из несвязанных кислородом радикалов R^\bullet по типу бескислородного распада; $k_{iox}(c_{ox} + c_{н.к}^*)$ – часть компонентов, которая продолжает образовываться из

окси-радикалов, образующихся из оставшегося кислорода, и из ещё остающихся связанных кислородом нестабильных компонентов $c_{н.к}^*$;

$k_{ин.к} c_{н.к}^{**}$ – часть компонентов, которая начинает образовываться из оставшихся к этому моменту нестабильных компонентов $c_{н.к}^{**}$, не связанных кислородом; кислород уже не может затормаживать этот распад, протекающий по типу бескислородного; $k_{ir} c_i (c_R - k_c c_{O_2})$ – расход образовавшихся компонентов c_i на вторичные реакции с остающимися несвязанными кислородом радикалами.

Соотношение концентрации связанной $c_{н.к}^*$ и несвязанной $c_{н.к}^{**}$ кислородом частей, в сумме составляющих $c_{н.к}$, рассчитываемую по уравнению (3), с течением времени меняется в сторону увеличения $c_{н.к}^{**}$. Это соотношение легко определить через отношение связанных и несвязанных кислородом радикалов R^\bullet к их общему количеству в данный момент времени t (т.е. как для всех радикалов R^\bullet , так и для их части в виде радикалов, образуемых из $c_{н.к}$):

$$c_{н.к}^{**} = c_{н.к} (c_R^t - k_c c_{O_2}^t) / c_R^t - \text{остающаяся несвязанная часть радикалов};$$

$$c_{н.к}^* = c_{н.к} k_c c_{O_2}^t / c_R^t - \text{связанная кислородом часть радикалов}.$$

Введём обозначение для доли связанных кислородом радикалов для $t > t_3$

$$L = k_c c_{O_2}^t / c_R^t \quad (12)$$

и запишем окончательное уравнение термоокислительного процесса образования компонента i в условиях возрастающего дефицита кислорода для $t > t_3$

$$dc_i/d\tau = k_{iR}(c_R - k_c c_{O_2}) + k_{iox} c_{ox} + k_{iox} c_{н.к} L + k_{ин.к} c_{н.к} (1 - L) - k_{ir} c_i (c_R - k_c c_{O_2}). \quad (13)$$

Отыскать первообразное уравнение не представляется возможным. Но с учётом уравнений (3), (5), (10) – (12) для отдельных составляющих это уравнение может быть использовано непосредственно для расчёта точек кинетической зависимости или для расчёта констант по данным эксперимента. При решении

необходимо иметь ввиду, что при $\tau = 0$ концентрация компонента c_i равна значению, рассчитываемому по уравнению (9) для $t = t_3$.

Уравнение (13) отражает процесс образования газообразных компонентов после времени t_3 , когда в системе начинают развиваться процессы, характерные для бескислородного старения, и затухать процессы, определяемые влиянием кислорода. Уравнение (13) характеризует вторую стадию термоокислительного процесса, после которой в связи с полным израсходованием кислорода процесс старения переходит в термический.

Уравнение (13) является универсальным. Если начальная концентрация кислорода равна нулю, а следовательно, $t_3 = 0$ и $\tau = t$, уравнение принимает форму уравнения (6) для термического процесса. При бесконечно большом времени процесса уравнение (13) будет отражать бескислородный процесс старения и для $t = \infty$ также примет форму уравнения (6). Если $\tau = 0$, т.е. $t = t_3$, уравнение (13) переходит в уравнение (9) для первой стадии термоокислительного старения.

Во второй части статьи будут представлены расчёт кинетических параметров старения изоляционных жидкостей и их практическое использование.

Список литературы

1. **Mayoux C.** On the degradation of insulating materials withstanding electrical stress // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. 2000. Vol.7. P.590–601.
2. **Черножуков Н.И., Крейн С.Э.** Окисляемость минеральных масел. М.: Гостоптехиздат, 1959.
3. **Липштейн Р.А., Шахнович М.И.** Трансформаторное масло. М.: Гостоптехиздат, 1983.
4. **Ferguson R, Lobeiras A., Sabau J.** Suspended particles in the liquid insulation of aging power transformers // IEEE Elec. Insul. Magazine. 2002. Vol.18, №4. С.17–23.
5. **Burton P.J., Carballeira M., Duval M.** Application of liquid chromatography to the analysis of electrical insulation materials // Internat. Conf. on Large High Voltage Electric Syst. Paris, 28 August – 3 Sept., 1988. P.15–08.
6. **Семенов Н.Н.** // Успехи химии. 1957. Т.26, вып.3, С.350.
7. **Duval M., Lamarre C., Giguere Y.** Reverse-Phase HPLC analysis of polar oxidation products in transformer oils // J. Chrom. 284. 1984. P.273–280.
8. **Kurz R.A., Leedy J.** Stabilization of transformer oil against oxidation – old practice with renewed interest for preventive maintenance // Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, Chicago'97. P.529–536.
9. **Kachler A.J., Hohlein I.** Aging of cellulose at transformer service temperature. P.1. Influence of type of oil and air on the degree of polymerization of pressboard, dissolved gases, and furanic compounds in oil // IEEE Elec. Insul. Magazine. 2005. Vol.21, №2. С.15–21.
10. **DePablo A., Pahlavanpour B.** Furanic compounds analysis: a tool for predictive maintenance of oil-filled electrical equipment // Electra.1997. №175. P.9–32.
11. **Arakelian V.G.** The long way to the automatic chromatographic analysis of gases dissolved in insulating oil // IEEE Elec. Insul. Magazine. 2004. Vol.20, №6. P.8–25.

Аракелян Вадим Гарегинович – ведущий научный сотрудник ФГУП "ВЭИ". Окончил Московский институт тонкой химической технологии им. М.В.Ломоносова в 1967 г. Защитил кандидатскую диссертацию по газохроматографическим проблемам физической химии в 1969 г. В 1995 г. защитил докторскую диссертацию по физико-химическим проблемам высоковольтной электротехники.

Многофункциональный контроль параметров технологического процесса в электротермической установке высокочастотного диэлектрического нагрева

МАРКОВ А.В., ЮЛЕНЕЦ Ю.П.

Предложен метод непрерывного контроля параметров технологического процесса по мгновенным электрическим параметрам высокочастотного генератора для диэлектрического нагрева. Приведён пример практического использования метода – на основе предложенного выражения для мощности внутренних источников тепла получена зависимость текущей температуры в сварном соединении в процессе высокочастотной сварки пластмасс.

Применение высокочастотного (ВЧ) диэлектрического нагрева [1, 2] наиболее эффективно в процессах сушки и термической обработки (сварка пластмасс, склеивание, скоростное размораживание, стерилизация). Физические преимущества метода (отсутствие тепловой инерции нагревателя, концентрация значительной энергии в небольших объёмах, простота и точность регулирования теплового режима и др.) определяют возможность создания технически совершенного, автоматизированного электротехнологического оборудования, обеспечивающего оптимальные условия процесса. Однако практическая реализация сдерживается рядом причин, к числу которых в первую очередь относится отсутствие надёжных средств измерения текущих технологических параметров – температуры и влагосодержания материала, темпа нагревания, скорости сушки. Достаточно сказать, что термопара, термометр сопротивления, жидкостный термометр и любое другое измерительное устройство, помещённое внутрь рабочего конденсатора, вызывают искажение ЭМ-поля, что приводит к нарушению условий термообработки. Показания такого измерителя зависят не только от температуры обрабатываемого материала, но и от прямого ВЧ-нагрева термочувствительного элемента. Наиболее совершенный способ контроля – дистанционное измерение температуры с помощью приборов инфракрасной (ИК)

A method to control the characteristics of dielectric heating process via high – frequency generator instantaneous parameters is proposed. Among the examples there's considered the dielectric welding process in plastics, its instantaneous characteristics being reproduced by the means of suggested expression for high – frequency power.

техники [3]. Однако возможности и этого способа ограничены. Так, при ВЧ-сварке плёночных и листовых термопластов не представляется возможным наблюдать за областью сварного соединения даже с помощью самых современных ИК-термометров с оптическим наведением [4].

В настоящей работе рассматривается метод многофункционального контроля параметров технологического процесса по мгновенным параметрам электрического режима высокочастотного генератора электротермической установки.

Генераторы для высокочастотного нагрева диэлектриков, как правило, выполняются по двухконтурной схеме (рис.1). На рис.1: C_{eq} – эквивалентная ёмкость генераторной лампы, включающая ёмкость монтажа; L_1 – анодная индуктивность; L_b – индуктивность катушки связи; L_2 – индуктивность нагрузочного (вторичного) контура; C_1, C_2 – ёмкости настроенных конденсаторов; C_{pser} – ёмкость рабочего конденсатора; r_1, r_2 – сопротивления активных потерь в первичном (анодном) и вторичном контурах соответственно.

Здесь нагреваемый материал представлен последовательной схемой замещения – рабочий конденсатор C_{pser} (его ёмкость учитывает диэлектрическую проницаемость ϵ материала) и включённое последовательно с ним активное сопротивление r_2 . Анализ работы генератора, нагруженного системой двух контуров, прове-

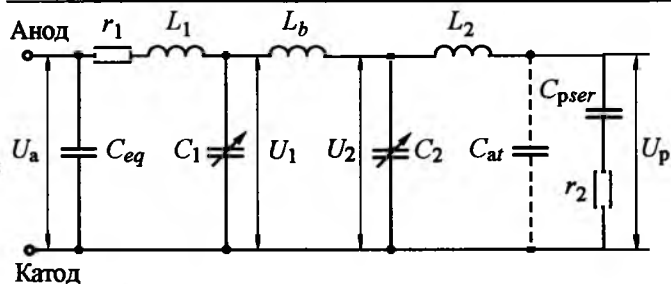


Рис.1. Схема выходной цепи генератора для высокочастотного диэлектрического нагрева

дём в предположении настройки обоих в резонанс токов.

Мощность в нагрузке и тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ материала выражаются через параметры принятой схемы замещения следующим образом:

$$P_l = \frac{1}{2} I_2^2 r_2 = \frac{1}{2} U_p^2 \omega C_{psер} \frac{\text{tg}\delta}{1 + \text{tg}^2\delta}; \quad (1)$$

$$\text{tg}\delta = \omega C_{psер} r_2, \quad (2)$$

где I_2 – амплитуда тока в нагрузочном контуре; U_p – амплитуда напряжения на рабочем конденсаторе; ω – угловая частота.

Любая двухконтурная цепь может быть сведена к схеме простого колебательного контура, активные потери в котором

$$r = r_1 + r_{imp}, \quad (3)$$

где r_1 – собственное сопротивление потерь в первичном (анодном) контуре; r_{imp} – сопротивление, вносимое нагрузочным контуром в первичный.

Развиваемая генераторной лампой колебательная мощность P_1 складывается из мощности в нагрузке P_l (полезной) и собственной (теряемой) мощности P_s , расходуемой на сопротивлении r_1 :

$$P_1 = P_s + P_l = \frac{1}{2} I_1^2 (r_1 + r_{imp}) = \frac{1}{2} I_{a1} U_a, \quad (4)$$

где I_1 – амплитуда тока в первичном контуре; U_a – амплитуда напряжения на аноде; I_{a1} – амплитуда первой гармоники анодного тока,

$$I_{a1} = \gamma I_{a0}, \quad (5)$$

$\gamma = \frac{\alpha_1}{\alpha_0}$; α_1, α_0 – коэффициенты постоянной составляющей I_{a0} и первой гармоники I_{a1} импульса анодного тока [5].

В [6] получено выражение для определения

$\text{tg}\delta$ материала и его влагосодержания через мгновенные электрические параметры режима генератора:

$$\text{tg}\delta(\tau) = \frac{x_b^2 \omega C_p}{2r_1} \times$$

$$\times \left[\sqrt{1 + \left(\frac{2r_1}{x_b}\right)^2 \left(\frac{\alpha_1 I_{a0}(\tau)}{\alpha_0 \sqrt{2r_1 C_{eq} C_p \omega^2 U_p(\tau)}} - 1 \right)} - 1 \right]. \quad (6)$$

Здесь τ – текущее время технологического процесса; x_b – реактивность элемента связи, $x_b = \omega L_b$; \bar{U}_p – действующее значение напряжения на рабочем конденсаторе.

Формула (6) предполагает, что генератор настроен в слабоперенапряжённый (критический) режим по "горячей точке", т.е. при максимальной нагрузке ($r_2 = \text{max}$), когда эквива-

лентное сопротивление $R_{eq} = \frac{P_1}{(r_1 + r_{imp})}$ конту-

ра минимально и равно эквивалентному оптимальному (требуемому лампой) сопротивлению $R_{eq,opt}$ (ρ_1 – характеристическое сопротивление первичного контура). Тогда при любой другой нагрузке будет выполняться: $R_{eq} > R_{eq,opt}$ что приведёт к рассогласованию генератора с нагрузкой. Однако при этом генератор не выйдет из области перенапряжённого режима, а значит его КПД

$$\eta = \frac{P_1}{P_0} = \frac{I_{a1} U_a}{2 I_{a0} E_a} = \frac{1}{2} \gamma \xi \quad (7)$$

будет оставаться приблизительно постоянным [5].

В (7) $\xi = \frac{U_a}{E_a}$ – коэффициент использования анодного напряжения; P_0 – мощность выпрямителя; E_a – напряжение анодного питания.

При выводе формулы (6) использовано упрощённое (в сравнении с (1)) выражение для мощности P_l , справедливое при $\text{tg}\delta \leq 0,3$ (как это имеет место в большинстве практических случаев ВЧ диэлектрического нагрева):

$$P_l = \frac{1}{2} \omega C_p \text{tg}\delta U_p^2. \quad (8)$$

Ёмкости рабочего конденсатора в последо-

вательной и параллельной схемах замещения однозначно связаны между собой:

$$C_{ppar} = \frac{C_{pser}}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad (9)$$

При $\operatorname{tg} \leq 0,3$ $C_{ppar} \approx C_{pser} = C_p$.

Включим параллельно рабочему конденсатор большой ёмкости C_{ar} так, чтобы $C_{ar} \gg C_p$ (рис. 1). Тогда даже при значительном изменении диэлектрической проницаемости материала в течение технологического цикла резонансная частота вторичного контура не будет изменяться. Очевидно, что

$$\frac{U_2}{U_p} \approx \frac{C_{ar} + C_p}{C_2}$$

или

$$C_p = \frac{U_2 C_2}{U_p} - C_{ar} \quad (10)$$

Подставим (10) и (6) в (8). Получим следующее выражение для мощности:

$$P_l(\tau) = \frac{\omega^2 x_b^2 [\bar{U}_2(\tau) C_2 - \bar{U}_p(\tau) C_{ar}]^2}{2r_1} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{2r_1}{x_b}\right)^2} \times \left[\frac{\gamma(\tau) I_{a0}(\tau)}{\sqrt{2r_1 C_{eq}} \omega^2 [\bar{U}_2(\tau) C_2 - \bar{U}_p(\tau) C_{ar}]} - 1 \right] - 1 \right\}, \quad (11)$$

где \bar{U}_2, \bar{U}_p – действующие значения напряжений.

Для того чтобы воспользоваться уравнением (11), необходимо сначала настроить генератор в критический режим при максимальной нагрузке ($r_2 = \max$). Критерием настройки или, иначе, косвенным показателем равенства $R_{eq} = R_{eq,opt}$ является условие: $I_{a0} / I_{g0} = 5 \div 7$ [7], где I_{g0} – постоянная составляющая сетевого тока. Затем также при максимальной нагрузке ($r_2 = \max$) измеряют напряжения \bar{U}_p, \bar{U}_2 и ток I_{a0} . Задаются углом отсечки анодного тока θ (в критическом режиме $\theta = 70 \div 90^\circ$) и определяют коэффициент γ . Далее рассчитывают ВЧ-напряжение на аноде, которое для схемы на рис. 1 с учётом (10) будет равно:

$$\bar{U}_a = \frac{C_p}{C_{eq}} \bar{U}_p = \frac{\bar{U}_2 C_2 - \bar{U}_p C_{ar}}{C_{eq}}. \text{ Вычисляют коэф-}$$

фициент использования анодного напряжения

$$\xi = \frac{U_a}{E_a} \text{ и по формуле (7) – КПД генератора.}$$

Полагая далее $\eta = \operatorname{const}$, в произвольный момент времени (в ходе технологического процесса) по измеренным значениям \bar{U}_p, \bar{U}_2 , и I_{a0} аналогичным путём находят параметры U_a, ξ и γ ($\gamma = \eta/\xi$), а затем по формуле (11) – мгновенную мощность $P_l(\tau)$.

Рассмотрим примеры практического применения метода.

При высокочастотной сушке прогрев материала до температуры фазового превращения T_{ph} стремятся вести как можно более интенсивно. В таких условиях вплоть до температуры T_{ph} испарение влаги из материала пренебрежимо мало [8, 9]. При достижении температуры T_{ph} начинается собственно период испарения – интенсивный режим сушки [9], в течение которого, как принято считать [8–10], температура материала и скорость сушки постоянны. Заметим, что в действительности период постоянной скорости сушки при внутренних источниках тепла будет иметь место только, если выполняется дополнительное условие $P_l = \operatorname{const}$ [11], что без искусственного регулирования режима генератора обычно не соблюдается, поскольку ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ влажных диэлектриков зависят от температуры и влагосодержания. Период прогрева материала и период испарения (интенсивный режим ВЧ-сушки) описываются уравнениями для средних значений температуры \bar{T} и влагосодержания \bar{W} :

$$\frac{d\bar{T}}{d\tau} = \frac{P_l}{c_0 M}, \quad \bar{T}|_{\tau=0} = T_0; \quad (12)$$

$$-\frac{d\bar{W}}{d\tau} = \frac{P_l}{qM}, \quad \bar{W}|_{\tau=\tau_1} = W_0. \quad (13)$$

Здесь M – масса материала в рабочем конденсаторе; c_0 – удельная теплоёмкость материала; q – удельная теплота парообразования; T_0, W_0 – начальные значения температуры и влагосодержания материала соответственно; τ_1 – момент достижения материалом температуры T_{ph} .

Из (12) следует, что снимая и записывая информацию о мгновенной мощности $P_l(\tau)$, можно осуществлять непрерывный контроль за ходом технологического процесса. Например,

для контроля за текущей температурой материала в процессе сушки достаточно контролировать мгновенные электрические параметры $I_{a0}(\tau)$, $\bar{U}_2(\tau)$, $\bar{U}_p(\tau)$ и выполнить вычисления по формулам (11) и (12) в режиме реального времени (уравнение (12) интегрируется на интервале от 0 до τ).

В качестве второго примера практического использования описанного метода рассмотрим более сложный случай, когда в технологическом устройстве (рабочем конденсаторе) осуществляется процесс ВЧ-сварки термопластов. В этом процессе температура в зоне сварного соединения не поддается непосредственному измерению.

Уравнение, описывающее распределение температуры при ВЧ-сварке двух наложенных друг на друга листов материала в однородном электрическом поле, имеет вид [2]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c_0(T)\rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{p(\tau)}{c_0(T)\rho}, \quad (14)$$

$$T|_{\tau=0} = T_0, \quad 0 < x < l; \quad T|_{x=l} = T_f, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0. \quad (15)$$

Здесь $T(\tau, x)$ – локальная температура материала; T_0 – начальная температура материала; T_f – температура электродов рабочего конденсатора (предполагается, что в течение цикла сварки значение T_f остаётся постоянным, а изменяется лишь при переходе от одного цикла к другому); l – полутолщина материала (толщина свариваемой детали); x – текущая координата (текущая толщина); $x = 0$ – координата свариваемой поверхности (шва); $T_f(\tau) = T(\tau, 0)$ – температура свариваемой поверхности (шва); ρ, λ – плотность и коэффициент теплопроводности материала; $p(\tau)$ – мгновенная удельная мощность внутренних источников тепла.

Уравнения (14), (15) решались численно методом конечных разностей [12] в режиме реального времени на основе текущей информации об объекте – режиме работы генератора на изменяющуюся нагрузку: $I_{a0}(\tau)$, $\bar{U}_2(\tau)$, $\bar{U}_p(\tau)$. В качестве вычислительного устройства применялся микропроцессор сигнального типа семейства DSP568xx. Непрерывное измерение параметров $\bar{U}_2, \bar{U}_p, I_{a0}$, осуществляли с помощью универ-

сальных цифровых приборов В7-40, снабжённых интерфейсом КОП (канал общего пользования). Погрешность измерения напряжений прибором В7-40 на частотах до 50 МГц составляет $\pm 1\%$ от 2000 В; погрешность измерения постоянного тока не превышает $\pm 1\%$ от 2 А. Удельная мощность $p(\tau)$ определялась с помо-

щью выражения (11): $p(\tau) = \frac{P_1(\tau)}{V}$, где V – объём материала в рабочем конденсаторе. Параметры выходной цепи и параметры режима генератора (ВЧГ2-4/27): $f = 27,12$ МГц; $E_a = 3$ кВ; $r_1 = 0,5$ Ом; $C_{eq} = 20$ пФ; $C_1 = 125$ пФ; $L_1 = 2$ мкГн; $L_b = 2$ мкГн; $C_2 = 20$ пФ; $L_2 = 0,44$ мкГн; $C_{st} = 75$ пФ; $\bar{U}_2 = 2340 \div 2060$ В; $\bar{U}_p = 600 \div 510$ В; $I_{a0} = 0,18 \div 0,30$ А, $\gamma = 1,55 \div 1,75$.

На рис.2 и 3 представлены зависимости мгновенной удельной мощности p и температу-

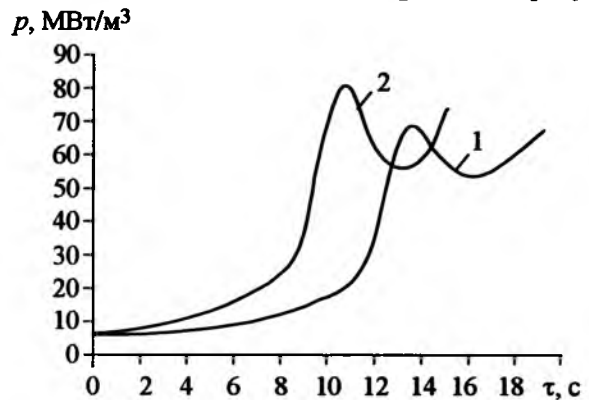


Рис.2. Зависимость удельной мощности внутренних источников тепла от времени в процессе ВЧ-сварки деталей из полиамида-610 ($2l = 3,5$ мм):
1 – $T_f = 20^\circ\text{C}$; 2 – $T_f = 40^\circ\text{C}$

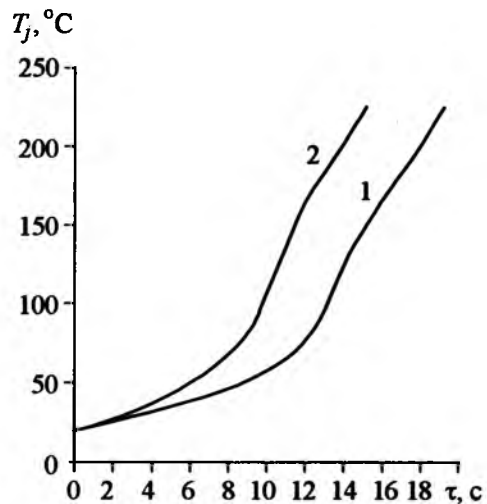


Рис.3. Изменение во времени температуры сварного соединения при ВЧ-сварке деталей из полиамида-610 ($2l = 3,5$ мм):
1 – $T_f = 20^\circ\text{C}$; 2 – $T_f = 40^\circ\text{C}$

ры T_j в сварном шве от времени в процессе ВЧ-сварки листов полиамида ($V = 1,22 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$) при различных значениях температуры электродов рабочего конденсатора.

Кривые мощности имеют резко нелинейный характер, чем проявляет себя весьма сложная зависимость фактора диэлектрических потерь полиамида от температуры [13]. Наибольшая мощность и максимальный темп нагрева достигаются, очевидно, при максимальных значениях фактора диэлектрических потерь (согласно рис.3, в интервале температур 80–130°C). При приближении к температуре плавления (для полиамида $T_m = 220^\circ\text{C}$) мощность и темп нагрева падают – выделяющаяся в материале энергия расходуется не только на нагрев, но и на плавление.

Увеличение температуры электродов рабочего конденсатора закономерно сказывается на повышении развиваемой мощности и сокращении продолжительности сварочного цикла.

Полиамид-610 – ориентированный термопласт с очень узким температурным интервалом вязкотекучего состояния, для которого сварка плавлением не должна вызывать дезориентацию и деструкцию, что возможно только при условии быстрого и локального нагрева свариваемых поверхностей до температуры текучести: $T_l = 225^\circ\text{C}$ (допустимое превышение локальной температуры T в сварном соединении над температурой T_l составляет всего 10 К [2, 14]). Экспериментальная проверка показала, что отключение ВЧ-нагрева по значению найденной на основе рассмотренной методики температуры обеспечивает высокое качество сварки (механическая прочность – на уровне целого материала, герметичность сварного шва не сопровождается изменением формы соединяемых деталей).

Рассмотренный метод может быть использован для контроля текущих технологических параметров различных электротермических процессов в установках высокочастотного диэлектрического нагрева.

Список литературы

1. Нетушил А.В., Жуховицкий Б.Я., Кудин В.Н., Парини Е.Н. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1959.
2. Федорова И.Г., Безменов Ф.В. Высокочастотная сварка пластмасс. Л.: Машиностроение, 1990.
3. Спектор С.А. Электрические измерения физических величин: методы измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1987.
4. Land D.V. An Efficient, Accurate and Robust Radiometer Configuration for Microwave Temperature Measurement for Industrial and Medical Application // J. of Microwave Power. 2001. Vol. 36, №3. P.139–153.
5. Донской А.В., Рамм Г.С., Вигдорович Ю.Б. Электротермические установки с ламповыми генераторами. Л.: Энергия, 1974.
6. Юленец Ю.П., Марков А.В. Определение тангенса угла диэлектрических потерь и влагосодержания по параметрам режима установки высокочастотного нагрева // Известия вузов // Приборостроение. 1997. Т.40, №5. С.60–65.
7. Васильев А.С. Ламповые генераторы для высокочастотного нагрева. Л.: Машиностроение, 1979.
8. Долгополов Н.Н. Электрофизические методы в технологии строительных материалов. М.: Стройиздат, 1971.
9. Архангельский Ю.С. СВЧ-электротермия. Саратов: Саратов. ГТУ, 1998.
10. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968.
11. Марков А.В., Юленец Ю.П. Механизм массопереноса в высокоинтенсивных процессах сушки при наличии внутренних источников тепла // Теор. основы химической технологии. 2002. Т. 36, № 3. С. 268–274.
12. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977.
13. Boyd R.H., Porter C.H. Effects of Melting on Dielectric Relaxation in poly (hexamethylene sebacamide) // J. of Polymer Science. 1972. Part A2. Vol.10, № 4. P.647–656.
14. Волков С.С. Сварка и склеивание полимерных материалов. М.: Химия, 2001.

Марков Андрей Викторович – доцент Санкт-Петербургского государственного технологического института (ТУ) (СПбГТИ (ТУ)), канд. техн. наук. Окончил математико-механический факультет Ленинградского государственного университета в 1975 г. Защитил диссертацию по теме "Обезвоживание гранулированных солей с использованием высокочастотного нагрева" в 1985 г.

Юленец Юрий Павлович – старший научный сотрудник СПбГТИ (ТУ), доктор техн. наук. Окончил радиотехнический факультет Северо-западного политехнического института в 1973 г. Защитил докторскую диссертацию по теме "Автоматизация процессов термической обработки материалов при высокоскоростном нагреве" в 1999 г.

Юрий Моисеевич Иньков

(к 70-летию со дня рождения)

Исполнилось 70 лет Юрию Моисеевичу Инькову. За 48 лет трудовой деятельности Ю.М. Иньков прошел путь от инженера Московского электромеханического завода им. Владимира Ильича до заслуженного деятеля науки РФ, доктора технических наук, профессора кафедры «Электрическая тяга» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ) и воспитал целую плеяду учеников, защитивших кандидатские и докторские диссертации и занимающих ведущие позиции в учебных и научно-исследовательских институтах. Значителен вклад Ю.М. Инькова в развитие теоретических и практических вопросов создания и внедрения новых технологий, обеспечивающих повышение эксплуатационной надёжности и экономичности оборудования и систем тягового электроснабжения и подвижного состава электрифицированного железнодорожного транспорта.

Ю.М. Иньков – ведущий учёный в области электротехники, автор многочисленных статей, многих монографий, в том числе по фундаментальным вопросам электротехники и силовой электроники, один из создателей в России Общества инженеров силовой электроники. Являясь членом ряда диссертационных советов и членом редколлегии ведущих научно-технических журналов, Ю.М. Иньков ведет большую научно-организационную работу.

Ю.М. Иньков действительный член Российской академии транспорта, Академии электротехнических наук РФ, с 2000 г. он главный учёный-секретарь АЭН РФ.

Редакционная коллегия и редакция журнала «Электротехника» сердечно поздравляют Юрия Моисеевича с юбилеем и желают активного творческого долголетия, здоровья и благополучия.

Правила оформления статей, направляемых в журнал "Электротехника"

1. Объем статьи не должен превышать **12 страниц текста**, отпечатанного на машинке или набранного на компьютере **через 2 интервала** с полями 2–3 см, и иметь **не более 5 рисунков**.

2. В статье должны быть: введение, сформулирована постановка задачи, изложено содержание работы, показана достоверность результатов, приведены выводы, рекомендации и эффективность.

К статье должна быть приложена аннотация (2–3 предложения) на русском и английском языках. Название статьи также следует дать на русском и английском языках.

3. Статья должна сопровождаться письмом автора или организации (если она упоминается) и сведениями об авторах. Необходимо привести фамилии, имена и отчества всех авторов полностью, домашние адреса с почтовыми индексами, номера домашнего и служебного телефонов, место работы, ученое звание и степень, какой факультет, какого вуза и когда закончен, тему диссертации и год ее защиты. Можно приложить фотографии авторов.

Желательно, чтобы число авторов **не превышало пяти**. Фамилии лиц, принимавших участие в работе, можно дать в сноске.

4. Формулы должны быть четко вписаны от руки или набраны на компьютере (крупно) в отдельные строчки (а не в текст). Прописные (заглавные) буквы подчеркиваются карандашом двумя черточками снизу, а строчные (малые) – двумя черточками сверху. 0 (ноль) и цифра 3 (три) поясняются на полях простым карандашом. Индексы показываются простым карандашом.

5. Таблицы не должны быть громоздкими, все наименования необходимо писать без сокращения слов, за исключением единиц измерения. Численные значения величин в таблице, на рисунках и в тексте статьи должны быть в единицах измерения СИ.

6. Чертежи, графики, диаграммы и т.д. должны быть выполнены четко. Возможно изготовление рисунков с помощью компьютера. Условные обозначения на самом рисунке должны быть предельно краткими и общеупотребительными. Расшифровка условных обозначений и подписи к рисункам (не громоздкие) даются на отдельном листе.

Фотографии к статье (в двух экземплярах) должны быть отпечатаны на белой матовой бумаге (размером не менее 9×12 см), изображение должно быть контрастным, с хорошо проработанными деталями. **Если фотографии присылаются на дискетах, то разрешение должно быть не менее 300 пикселей на дюйм и размеры фотографии не очень велики**. Все обозначения ставятся на отдельном экземпляре.

7. Список литературы приводится в конце статьи, в порядке последовательности ссылок в тексте. Ссылки на литературу заключаются в квадратные скобки.

Для книг должны быть указаны: фамилия и инициалы всех авторов, название книг, город, издательство, год выпуска. Для журнальной статьи: фамилия и инициалы всех авторов, название статьи, журнала, год издания, номер журнала (том), страницы. Для сборников и продолжающихся изданий: фамилия и инициалы всех авторов конкретной статьи, ее название, название сборника или издания, город, издательство, год, выпуск, страницы.

В список литературы не должны включаться неопубликованные материалы, материалы для служебного пользования, а также малораспространенные издания и материалы, отпечатанные литографическим способом, и т.д.

8. Статью в двух экземплярах (с дискетой) следует высылать в редакцию **простой или заказной бандеролью** или по e-mail elektrotechnika@mtu-net.ru.