

ции. На магнитной системе указаны точки, которые следует использовать как узлы магнитной цепи. Между этими узлами показаны источники МДС, управляемые токами обмоток. Коэффициенты управления источников МДС, управляемых токами обмоток, вычисляются по изложенной методике.

**Выводы**

1. В режимах, близких к насыщению ферромагнитных элементов магнитопроводов, можно использовать понятие магнитной цепи, если ввести в магнитоэлектрическую схему замещения дополнительные ветви, замыкающие магнитные потоки рассеяния, в которые включаются управляемые источники МДС.

2. Коэффициенты управления распределенных источников МДС рекомендуется вычислять по изложенной методике.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Зиновкин, В. В.* Моделирование нестационарных электромагнитных процессов в неактивных деталях электротехнического оборудования / В. В. Зи-

новкин, М. Ю. Залужный // Вісник КДУ. – 2010. – № 3. – С. 65–69.  
 2. *Вишняков, С. В.* Расчет электромагнитных полей с помощью программного комплекса ANSYS. Учебное пособие / С. В. Вишняков, Н. М. Гордюхина, Е. М. Федорова. – М.: МЭИ, 2004. – 63 с.  
 3. COMSOL Multiphysics (Femlab). Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/femlab>  
 4. *Тиховод, С. М.* Система компьютерного моделирования динамических процессов в нелинейных магнитоэлектрических цепях / С. М. Тиховод // Технічна електродинаміка. – 2008. – № 3. – С. 16–23.  
 5. *Шакиров, М. А.* Анализ неравномерности распределения магнитных нагрузок и потерь в трансформаторах на основе магнитоэлектрических схем замещения / Г. Н. Шакиров // Электричество. – 2005. – № 11. – С. 15–27.  
 6. *Круг, К. А.* Основы электротехники: в 2-х т. Т. 1. Физические основы электротехники / К. А. Круг // М. Л.: Государственное энергетическое издательство. – 1946. – 472 с.

*Стаття надійшла до редакції 25.01.2011.*

**Тиховод С. М., Власенко Е. В.**

**Комп’ютерне моделювання розподілених магніторушійних сил в магнітоелектричних схемах заміщення електротехнічних комплексів**

*При моделюванні перехідних процесів в магнітоелектричних схемах заміщення трансформаторів з метою обліку магнітних потоків розсіяння запропоновано в магнітне коло вводити додаткові гілки з керованими джерелами МДС. Коефіцієнти керування джерел МДС рекомендується обчислювати за викладеною методикою.*

**Ключові слова:** моделювання, магнітоелектричні схеми заміщення, магнітні потоки розсіяння.

**Tikhovod S. M., Vlasenko E. V.**

**Computer simulation of distributed magnetomotive forces in equivalent magnetoelectric circuits of electrotechnical complexes**

*When modeling transients in magnetoelectric equivalent circuits of transformers, it is proposed to include additional branches with controlled MMF sources into the magnetic circuit in order to allow for dispersion magnetic fluxes. It is recommended to calculate the control ratio of MMF sources according to the described procedure.*

**Key words:** modeling, magnetoelectric equivalent circuits, dispersion magnetic fluxes.

УДК 612.315

**О. Г. Волкова**

Запорожский национальный технический университет

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛЕНОК НА КОНТАКТАХ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ КОММУТАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ**

*В данной статье исследовано образование поверхностных пленок на разрывных контактах коммутационных устройств. Показан механизм образования продуктов загрязнения в трансформаторном масле и динамика их осаждения на контактной системе.*

**Ключевые слова:** контактор, трансформаторное масло, контакты, электрическая дуга.

Переходное электрическое сопротивление контактов, которое является основной причиной потерь энер-

гии при прохождении тока через контактное соединение, увеличивается со временем эксплуатации незави-

симо от рабочего состояния контактной системы и рабочей среды.

Целью данной статьи является уточнение механизма образования поверхностных пленок с ростом нагрузки коммутационных устройств.

При длительном воздействии рабочей среды и содержащихся в ней химических реагентов (сера, хлор и т. д.) на поверхностях контактов происходит образование толстых слоев окислов, сульфидов и других элементов. На процесс их нарастания существенно влияет температура контакта. Даже незначительное контактное сопротивление проявляется источником джоулевого тепла, под влиянием которого поверхности контактов более активно реагируют с рабочей средой. Это вызывает рост пленок, а, следовательно, и переходное сопротивление. Существуют имперические зависимости, описывающие эти явления, например [1]:

$$s^2 = 20^2 + t \cdot 10^{8,2 - \frac{1310}{T}}$$

где  $s$  – толщина пленки окислов на меди, Å;  $t$  – время, ч;  $T$  – температура медной поверхности, °К.

На контактных поверхностях образуется несколько видов химических соединений. Их основу составляют оксиды, органические соли, высокомолекулярные нерастворимые кислоты, сульфиды и другие вещества минерального и органического происхождения.

Многочисленные исследования [1, 2, 4] позволяют систематизировать поверхностные пленки по природе их происхождения: пленки потускнения (обычно оксидные или сульфидные); адгезионные пленки; пассивирующие пленки; граничные пленки смазок.

Надо отметить, что в научной и технической литературе содержатся разобщенные данные о степени влияния поверхностных пленок на переходное сопротивление [1–5]. Доказано, что все виды поверхностных пленок толщиной более  $3 \cdot 10^{-9}$  м служат причиной роста переходного сопротивления на контактах и роль рабочей среды при этом является определяющей.

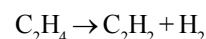
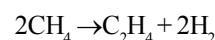
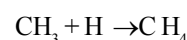
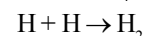
Однако считается, что переходное сопротивление контактов, погруженных в масло или смазанных маслом, меньше, чем у сухих контактов, так как масло способствует очистке поверхностей от загрязнения и пре-

пятствуют их окислению. По данным [3], медные и латунные контакты в трансформаторном масле почти не окисляются, но это не исключает образования пленок от продуктов загрязнения рабочей среды в процессе длительной эксплуатации.

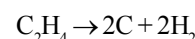
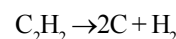
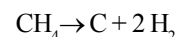
При эксплуатации маслonaполненных контакторов под действием электрической дуги происходит термическое разложение масла с образованием шлама углеродистых соединений и осаждение его на контактных поверхностях. При дуговых разрядах в масляной среде

происходят скачки температуры (свыше  $3500^\circ\text{C}$ ) и давления (более 7 МПа). При этом электродуговые разряды в процессе коммутации сильно изменяют свойства масла, вызывая его деструктивное разложение с выделением углеводородных газов и механических примесей.

Термическое разложение масла начинается уже при температуре  $350 - 450^\circ\text{C}$ , а при  $600^\circ\text{C}$  основу газовых образований составляют метан  $\text{CH}_4$  и водород  $\text{H}_2$ . Диссоциация молекул масла происходит путем отрыва атомов водорода и метильных групп  $\text{CH}_3$ . Появившиеся несвязанные атомы Н и группы  $\text{CH}_3$ , как и их производные, при росте температуры до  $1300^\circ\text{C}$  начинают вступать в реакции между собой с образованием водорода  $\text{H}_2$ , ацетилен  $\text{C}_2\text{H}_2$ , метана  $\text{CH}_4$ , этилена  $\text{C}_2\text{H}_4$ .



Дальнейший рост температуры приводит к выделению из газовой смеси механических примесей в виде частиц сажи:



Одновременно с ростом числа сажевых частиц происходит их объединение в цепочки длиной примерно 10 мкм. Картина роста образовавшихся частиц загрязнения в трансформаторном масле приведена на рис. 1.

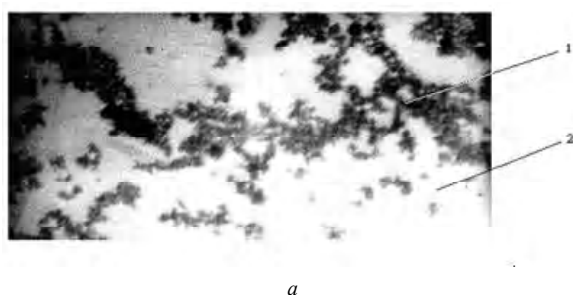


Рис. 1. Продукты термического разложения трансформаторного масла (х 200) а – при 10 тыс. переключений, б – при 15 тыс. переключений: 1 – сажевые цепочки, 2 – трансформаторное масло

На основании фотометрического подсчета количества механических примесей получены данные роста осадка от числа электротермических дуговых разрядов в баке контактора.

Исследования проводились с пробами трансформаторного масла, отобранными из действующих контакторов электропечных трансформаторов на Запорожском алюминиевом заводе и заводе «Днепроспецсталь». Число переключений для различных проб масла составляло от 1000 до 30000 циклов (номинальный ток 150 А, номинальное напряжение обмоток на стороне НН в пределах 394–194 В). Обобщенные результаты гранулометрического состава и подсчет количества частиц в отобранных пробах трансформаторного масла в зависимости от числа коммутаций представлены в табл. 1.

По данным, приведенным в табл. 1, построен график роста загрязнения трансформаторного масла в зависимости от числа переключений (рис. 2).

Анализ полученных результатов показывает, что с увеличением количества переключений общее число частиц загрязнений в масле возрастает, стремясь к некоторому пределу. Особенно заметен этот рост во вре-

мя первых 10 тыс. циклов переключений за счет увеличения числа мелких (от 1 до 5 мкм) частиц. Стабилизация числа частиц загрязнения в масле наступает примерно через 15 тыс. переключений, что объясняется процессом коагуляции и осаждения сажевых хлопьев (выпадение хлопьев уравнивается числом вновь образовавшихся частиц).

Полученный график наглядно представляет механизм образования осадка сажевых частиц на контактных поверхностях как функцию наработки контактора.

Проведенный анализ процесса загрязнения контактной системы продуктами разложения в маслonaполненных коммутационных аппаратах показывает, что интенсивное образование осадка на контактных поверхностях начинается только после достижения определенного числа переключений контактов, что способно привести к резкому росту переходного сопротивления.

**Выводы**

Интенсивное образование поверхностных пленок на контактных поверхностях маслonaполненных коммутационных устройств наступает после определённого числа циклов переключений. Для разных коммутационных устройств это число может иметь различные значения в зависимости от его мощности и типа. Однако, учитывая общий характер среды (трансформаторное масло) и длительность горения дуги (ограничения по нормативным требованиям), автор считает, что его значение может находиться в пределах 13–17 тыс. переключений. Это число можно принять за срок службы трансформаторного масла в баковых коммутационных устройствах.

Таблица 1 – Гранулометрический и численный состав загрязнений в пробах трансформаторного масла

Число переключений, тыс.	Размеры частиц, мкм / Логарифм (lg) числа частиц				
	1–5	5–7	7–10	10–14	14–25
5	45–50	30–35	30–35	28–32	19–23
10	53–57	40–44	40–44	37–41	37–33
15	58–62	44–48	40–45	36–41	28–32
20	58–62	47–51	42–46	30–35	24–29

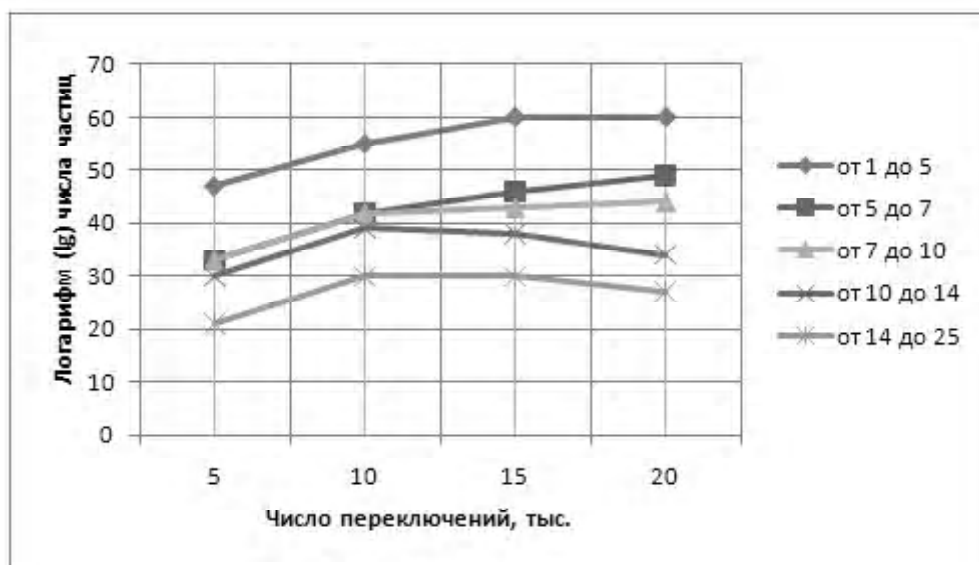


Рис. 2. График зависимости роста загрязнения трансформаторного масла механическими примесями от числа переключений

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Wilson, W.R.* High current arc erosion of electric contacts materials / W.R. Wilson // Trans. AIEE. – 1955. – Vol. 74. – PP. 657–663.
2. *Braunovic, M.* Electrical contacts: fundamentals, applications and technology / M. Braunovic, N.K. Myshkin, V.V. Konchits. – New York : CRC Press. – 2007. – P. 646.
3. *Порудоминский, В. В.* Устройства переключения трансформаторов под нагрузкой / В. В. Порудоминский. – М. : Энергия, 1974. – 288 с.
4. Соединители и коммутационные устройства / [Бондаренко И. Б., Гатчик Ю. А., Иванова Н. Ю., Шилкин Д. А.]. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2007. – 151 с.
5. *Липштейн, Р. А.* Трансформаторное масло / Р. А. Липштейн, М. И. Шахнович. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.

Стаття надійшла до редакції 10.02.2011.

Після доробки 22.03.2011.

**Волкова О. Г.**

**Дослідження механізму утворення поверхневих плівок на контактах маслонаповнених комутаційних пристроїв**

*У даній статті досліджено процес утворення поверхневих плівок на розривних контактах комутаційних пристроїв. Показано механізм процесу утворення продуктів забруднення у трансформаторній олії та динаміка утворення їх осаду на контактній системі.*

**Ключові слова:** контактор, трансформаторна олія, контакти, електрична дуга.

**Volkova O.G.**

**Investigation of formation mechanism of surface film on contacts of oil-filled switching devices**

*Surface films formation on contacts of switching devices is investigated. The mechanism of contamination products formation in transformer oil and dynamics of their precipitation on the contact system is described.*

**Keywords:** contactor; transformer oil, contacts, electric arc.

УДК 621.316.53:621.382.233

**А. В. Близняков канд. техн. наук, В. Л. Миронченко канд. техн. наук**

Запорожский национальный технический университет

## АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ТЕМНИТЕЛЕЙ СВЕТА

*Выполнен анализ и синтез системы управления регулятора напряжения для темнителей света на запираемых тиристорах. Представлен пример схемной реализации системы управления.*

**Ключевые слова:** анализ, синтез, регулятор напряжения, система управления, запираемые тиристоры, управляющий импульс.

Тиристорные регуляторы напряжения находят широкое применение в качестве регуляторов освещения жилых и производственных помещений [1], а также в качестве регуляторов освещения в театрах, в том числе и для темнителей света [2]. При этом регуляторы для темнителей света имеют преимущественно ручное управление. Следует отметить, что регуляторы, построенные на обычных тиристорах, отпираемых в произвольный момент времени и запираемых в нуле питающего напряжения, характеризуются относительно низким (порядка 0,5...0,8) коэффициентом мощности [1].

Его повышения можно добиться за счет регулятора с коэффициентом мощности емкостного характера. Наибольший эффект при этом достигается в том случае, если система управления регулятора обеспечивает включение тиристоров в нуле питающего напряжения, а запираение – в произвольный момент времени относительно полуволны питающего напряжения в зависимости от требуемой мощности.

Целью данного исследования является синтез системы управления регулятора для темнителей света, силовой элементной базой которого являются запираемые