

УДК 621.316

В. В. Зиновкин, О. Г. Волкова, В. В. Карпенко

Исследование электротермических процессов в контактах переключающих устройств при резкопеременной нагрузке

Приведены результаты исследований электротермических процессов в контактах переключающих устройств. Проанализированы причинно-следственные факторы аварийности переключающих устройств трансформаторного оборудования. Предложены методики вероятностного анализа и экспериментальных исследований сопротивления контактов в зависимости от несинусоидальности тока и количества коммутаций.

Общая характеристика вопроса

Эффективность работы энергоемких электротехнологических комплексов существенно зависит от функциональной надежности электротехнического оборудования и в значительной степени переключающих устройств, поскольку контакты последних подвергаются значительно большему износу по сравнению с другими коммутирующими устройствами [1–6]. Регулировка мощности комплексов осуществляется при помощи устройств регулирования переключения напряжения под нагрузкой (РПН), которые встроены в трансформаторное оборудование. Резкопеременные нагрузки ужесточают условия работы РПН в силовых и электропечных трансформаторах. В таких условиях работа РПН характеризуется большим числом коммутаций, широким диапазоном переключений напряжения, несимметрией и несинусоидальностью токов нагрузки (при этом отдельные параметры нагрузки обычно превышают требования нормативно-технической документации и государственных стандартов). Особенности резкопеременных нагрузок способствуют повышению местных и общих добавочных потерь, перегреву в деталях и отдельных узлах трансформаторов [5–7]. В результате многократных повторений и кумулятивного эффекта снижается надежность и эффективность работы комплексов, и в конечном итоге происходят аварийные выходы из строя электротехнического и электротехнологического оборудования. Аварийность электротехнического оборудования в системах общего назначения и с резкопеременным характером нагрузки достигает 40 % и 90 % соответственно [7].

Причинно-следственные факторы износа контактов переключающих устройств трудно диагностируются, скрыты, не контролируются и требуют дальнейших исследований. При этом сбои в работе РПН могут быть первопричиной повреждений в обмотках, вводах и других деталях трансформаторного оборудования. Поэтому вопросы исследования электротермических процессов в контактах переключающих устройств при резкопеременной нагрузке являются актуальными.

Вопросам исследования надежности и повышения эффективности эксплуатации РПН посвящено значительное количество публикаций [1–4]. В них рассматривается довольно большой класс контактов, их принцип работы в масляной среде при нормируемых показателях качества электроэнергии, условиях ох-

лаждения дугового столба, времени горения дуги, эксплуатационных факторов и др. Известно, что надежность работы контактов и срок их службы в значительной степени зависят от материала контактов и скорости их размыкания. Влияние резкопеременного характера нагрузки и вероятностный анализ переходных сопротивлений до настоящего времени не рассматривались. При этом износ контактов обычно оценивается по формуле Пухера для контактов из медновольфрамовых композиций [5]:

$$q = kI_K^\alpha \tau^\beta, \quad (1)$$

где q – износ пары контактов, выраженный в миллиграммах на одну операцию; I_K – отключаемый ток, кА; τ – время горения дуги, мс; k – коэффициент, зависящий от материала и типов контактов (берется в пределах $1,7 \div 2,7$); α – полуэмпирический коэффициент (принимают равным $1,4 \div 1,8$); β – полуэмпирический коэффициент (зависит от скорости движения контактов).

Анализ влияния эксплуатационных факторов (таких как, неоднородность свойств контактирующих материалов, состояние окружающей среды, скорость расхождения контактов, теплоотдача) показал, что расчеты по этой формуле приводят к погрешности, превышающей 40 % [6]. Влияние резкопеременного характера нагрузки и несимметрии не учитывалось. Таким образом, вопросы исследования электротермических процессов в области контактирующих поверхностей, их влияния на износ и эрозию дугогасящих контактов изучены не достаточно. Очевидно, для установления причинно-следственных факторов снижения функциональной надежности контактов РПН необходимо изучить влияние скорости размыкания, контактного сопротивления, а также охлаждающей среды при многократных коммутациях и несинусоидальности тока, исследованию которых посвящена настоящая публикация.

Систематизированный анализ аварийности трансформаторного оборудования (типоисполнений ЭТЦН-32000/35, ЭТЦН-52000/35, ЭТП-63000/35, ЭТЦНК-20000/110, ТРДЦНС-63000/110, ТРДЦН-160000/110, ТРДН-63000/220, ТРДНС-63000/220, ТРДЦН-63000/220, ТРДЦН-160000/220, ТРДНЦН-160000/220, ТРДЦНМ-160000/220, АТДЦТН-125000/330, АТДЦТН-200000/330, АТДЦТН-250000/330, АОДЦТН-267000/500, АТДЦН-500000/500, АТДЦТН-250000/500 и др.) в системах классов напряжений

35 ÷ 500 кВ по причинам выхода из строя соответствующих узлов за период с января 1997 г. по ноябрь 2005 г. приведен в табл. 1 (выполнен авторами статьи по данным протоколов расследования аварий межведомственной комиссии). В этой таблице приняты следующие обозначения: $N_{35} \div N_{500}$ – количество аварий по узлам в системах соответствующих классов напряжения. Для каждого класса напряжения указана первопричина аварии, а также доля аварий по узлам (в процентах относительно анализируемого количества узлов, которое принималось за 100 %).

Из табл. 1 видно, что наиболее повреждаемыми являются высоковольтные вводы, обмотки и переключающие устройства, удельные показатели аварийности которых составляют 22,0; 16,0 и 13,5 % относи-

Таблица 1. Аварийность трансформаторного оборудования по узлам и классам напряжений

Узел	Класс напряжения, кВ											
	35		110		220		330		500		Всего	
	N_{35}	%	N_{110}	%	N_{220}	%	N_{330}	%	N_{500}	%	N_{Σ}	%
Обмотки	61	30	43	13	10	7	1	8	0	0	115	16
РПН	4	2	61	18	26	19	1	8	5	24	97	13,5
Вводы	27	13	77	23	44	32	3	23	7	34	158	22
Другие узлы и причины	81/31	40/15	126/31	37/9	55/1	41/1	8/0	61/0	9/0	42/0	279/0	39,5/9
Итого	204	100	338	100	136	100	13	100	21	100	712	100

тельно общего числа аварий в системах напряжением 35 ÷ 500 кВ. В системах электроснабжения 110 и 220 кВ энергоемких промышленных предприятий с резкопеременным характером нагрузки повреждаемость переключающих устройств достигает 18 и 19%. Эти повреждения являются трудно прогнозируемыми и приводят к довольно существенному экономическому ущербу.

Выполненный авторами анализ аварийности трансформаторного оборудования в системах с резкопеременным характером нагрузки по причине повреждаемости переключающих устройств показан в табл. 2. Из табл. 2 видно, что наибольшая аварийность имеет место в системах напряжением 35, 150 и 220 кВ, от которых питаются электротехнологические комплексы с резкопеременным характером нагрузки.

Следует отметить, что причины аварийности устанавливаются на поврежденном оборудовании, и не всегда представляется возможным установить ее реальные причинно-следственные факторы. Более детальный анализ показал, что повреждениям в обмот-

Таблица 2. Аварийность переключающих устройств трансформаторов в системах с резкопеременным характером нагрузки

Параметры	Класс напряжений, кВ	Количество отказов и повреждений по годам			
		1964–1978	1979–1983	1984–1990	1990–2005
Общего назначения	330	40	33	31	30
	500	20	13	14	15
Резкопеременные нагрузки	220	65	56	57	62
	150	49	51	48	46
	35	86	71	69	67

ках и вводах предшествовали отказы в переключающих устройствах. Таким образом, электромагнитные процессы, которые имели место в частично поврежденных переключающих устройствах, были первопричиной развития аварий во вводах, обмотках, трансформаторном оборудовании и системе в целом.

Объектом исследования являются электротермические процессы в контакторах переключающего устройства типа РНОА-110/1250, которое показано на рис.1, а его электрические характеристики приведены в табл. 3.

Методика и схема исследований

Структурная схема устройства для экспериментальных исследований электротермических процессов показана на рис. 2. Исследования выполнялись на однофазной модели переключающего устройства,

Таблица 3. Основные параметры исследуемого контактора переключающего устройства.

№	Наименование параметра	Величина
1	Номинальное напряжение, кВ	110
2	Номинальный ток, А	1250
3	Ресурс механической износостойкости, не менее тысяч переключений	500
4	Ресурс электрической износостойкости контактов, разрывающих ток при переключении, не менее тысяч переключений	50
5	Время переключения с одного фиксированного положения на другое, с	3,8±20%
6	Количество переключений до смены масла в контакторе, не менее тысяч переключений	50
7	Масса переключающего устройства без масла, кг	1300

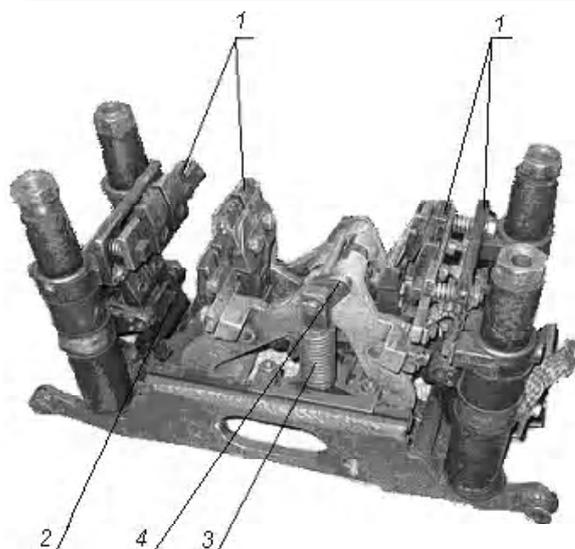


Рис. 1. контактор переключающего устройства типа РНОА -110/1250 1 и 2 – дугогасящие и главные контакты; 3 и 4 – пружинный и шарнирный механизмы, соответственно.

которое подключалось к фазе А электропечного трансформатора. Питание подавалось от источника переменного напряжения при помощи выключателя 1. Характер тока и его несинусоидальность устанавливались при помощи формирователя 2, управляемого блоком 3. Параметры испытательных режимов измерялись приборами 4, 5, 6, 15. Киносъемка электротермического процесса размыкания контактов производилась кинокамерой 11. Измерения нагрева контактов производилось хромель-копелевыми термопарами 15 и тепловизором 16. Нагрузка во вторичной обмотке трансформатора 8 служила для выбора номинального тока. Блок 13 использовался для согласования работы короткозамыкателя 14, кинокамеры 11, термопар 15 и трансформатора 8. После каждой серии опытов измерялось сопротивление контактирующих поверхностей, а так же производилась киносъемка электротермических процессов при их размыкании по методике из [3, 9].

Результаты исследований и их анализ

Результаты экспериментальных исследований сопротивления контактирующих поверхностей контактов при соответствующих количествах переключений для шести значений коэффициента несинусоидальности тока приведены в табл. 4.

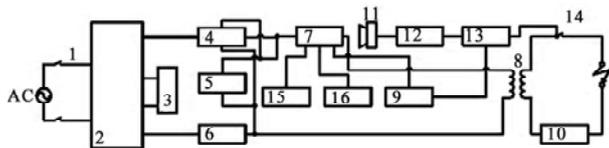


Рис. 2. Структурная схема устройства для исследования электротермических процессов в контактах: 1 – выключатель; 2 – формирователь несинусоидальности; 3 – блок управления несинусоидальностью тока; 4,5,6 – измерители мощности, напряжения и тока соответственно; 7 – испытуемый РПН; 8 – трансформатор; 9 – привод РПН; 10 – нагрузка; 11 – кинокамера; 12 – привод кинокамеры; 13 – блок согласования пуска привода; 14 – короткозамыкатель; 15 – хромель-копелевые термопары; 16 – тепловизор (термовизион-470).

Таблица 4. Экспериментальные значения сопротивления контактирующих поверхностей при соответствующих количествах переключений

Количество переключений $N \times 10^4$, перекл.	Сопротивление σ контактирующих поверхностей, контактов (при различных значениях коэффициента k_{Si} несинусоидальности, %), о.е					
	$k_{Si} = 4,0$	$k_{Si} = 6,3$	$k_{Si} = 9,5$	$k_{Si} = 13,5$	$k_{Si} = 22,0$	$k_{Si} = 31,7$
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,1	0,99	0,99	0,99	0,97	0,97	0,97
0,3	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90	0,88
0,5	0,96	0,92	0,88	0,84	0,80	0,76
0,7	0,94	0,88	0,83	0,77	0,72	0,66
0,9	0,92	0,85	0,79	0,73	0,66	0,60
1,2	0,88	0,80	0,73	0,65	0,58	0,50
1,6	0,86	0,77	0,68	0,60	0,51	0,42
2,0	0,79	0,71	0,64	0,56	0,49	0,41
2,4	0,75	0,68	0,62	0,54	0,48	0,41
2,7	0,71	0,65	0,59	0,53	0,47	0,41
3,0	0,69	0,64	0,58	0,52	0,46	0,41

Данные результаты отражают вероятностный характер зависимости сопротивления от количества переключений и резкопеременного характера тока. Поэтому при обработке результатов экспериментальных данных используем параметры вероятностно-статистического анализа: математическое ожидание, дисперсию, корреляционную функцию и плотность распределения вероятности [8]. Математическое ожидание $\bar{\sigma}^*(i)$ сопротивления контактирующих поверхностей при выбранных значениях количества переключений рассчитывалось из следующего выражения:

$$\bar{\sigma}^*(i) = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{n}, \tag{2}$$

где i – порядковый номер опыта; n – общее количество опытов в исследуемом сечении; σ_i – сопротивление контактирующих поверхностей при i -м опыте.

Поскольку, даже при $n \rightarrow \infty$, практически невозможно получить плавное распределение сопротивления, то дисперсия D^*_i сопротивления контактирующих поверхностей, с учетом поправочного коэффициента Бесселя, вычислялась по следующей формуле:

$$D^*_i = \frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_i - \bar{\sigma}^*(i))^2}{n-1}. \tag{3}$$

Корреляционная функция сопротивления в зависимости от условных номеров сечений количества переключений была получена в соответствии с соотношением:

$$K(l) = \frac{\sum_{l=2}^m (\sigma_{l-1} - \bar{\sigma}^*_{l-1})(\sigma_l - \bar{\sigma}^*_l)}{2 * m + 1}, \tag{4}$$

где l – порядковый номер сечения (соответствующего значения N); m – количество сечений.

Плотности распределения вероятностей сопротивлений контактирующих поверхностей (в виде дискретных значений вероятности их попадания в заданные интервалы) определялись согласно выражению:

$$f_j(\sigma_i) = \frac{k_j}{K * h}, \quad (5)$$

где k_j – количество значений сопротивления, попадающих в интервал $\sigma_{j-1} < \sigma_i \leq \sigma_j$; K – общее количество значений сопротивления, полученных в опыта; h – ширина интервала, $h = \sigma_j - \sigma_{j-1}$.

Математическое ожидание и дисперсия сопротивления контактирующих поверхностей, рассчитанные по экспериментальным данным в зависимости от количества переключений, приведены на рис. 3. Корреляционная функция показана на рис. 4, а плотность распределения вероятности на рис. 5.

Анализ дисперсии свидетельствует о том, что наибольшие отклонения сопротивлений имеют место в диапазоне $(1,0 \div 2,4) \times 10^4$ переключений (область II на рис. 3). Это можно пояснить следующим. В начальной стадии испытаний (область I на рис. 3) контактирующие поверхности под воздействием электротермических процессов изнашиваются в меньшей степени. При дальнейшей эксплуатации влияние электротермических процессов на износ контактов существенно возрастает (область II на рис. 3). Однако, при достижении определенного уровня износа это влияние начинает уменьшаться (область III на рис. 3).

Корреляционная функция (рис. 4) отражает зависимость между сопротивлениями в соседних сечениях при соответствующих значениях количества переключений (т. е. влияние значений сопротивления контакта в предшествующих сечениях, которые характеризуют степень износа контактирующих поверхностей).

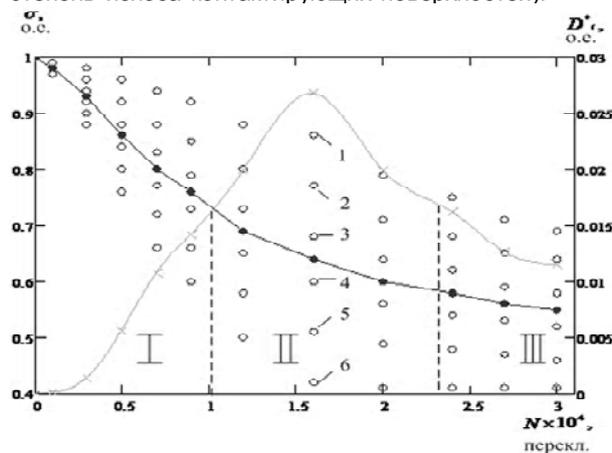


Рис. 3. Экспериментальные значения сопротивления (σ), его математическое ожидание (●) и дисперсия (×) при различных значениях коэффициента несинусоидальности k_{Si} (где индексы 1,2,3,4,5,6 обозначают $k_{Si} = 4,0; 6,3; 9,5; 13,5; 22,0; 31,7$ соответственно).

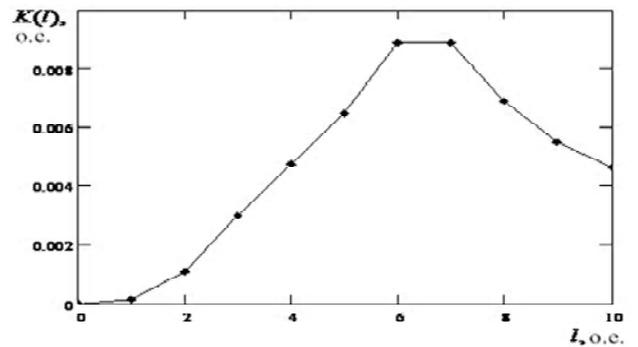


Рис.4. Корреляционная функция сопротивления в зависимости от порядкового номера сечения (l) графика дисперсии

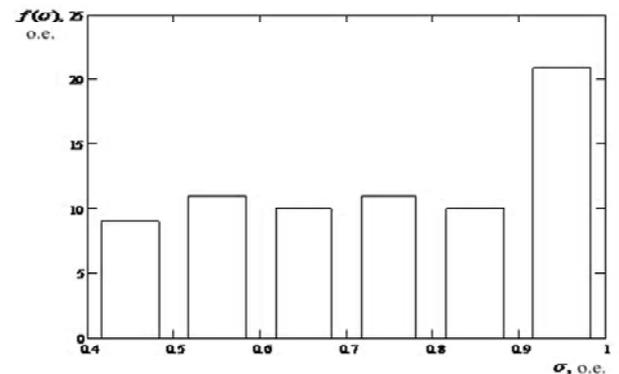


Рис.5. Плотность распределения вероятности сопротивления

Из рис. 5 видно, что плотность распределения вероятности сопротивления подчиняется равномерному закону. Это позволяет оценить количество значений сопротивления, которые попадают в соответствующие интервалы.

Результаты кино съемки возникновения и развития дуговых процессов показаны на рис. 6 и рис. 7. Исследования выполнялись при скорости движения контактов, равной 2,5 м/с. Процессы фиксировались во временном интервале $(2,5 - 3,0 \cdot 10^{-4})$ с [9].

Исследования свидетельствуют, что дуговое развитие электротермического процесса состоит из образования стримеров (рис. 6, область «а») и непосредственно дуги (рис. 6, область «б»). В начальной стадии электротермического процесса образуются стримеры, которые охватывают незначительную часть пространства контактов и последующего полномасштабного дугового процесса (который охватывает контакты и частично распространяется в охлаждающую среду). Исследования позволили установить закономерности, которые можно условно разбить на две стадии: во-первых, эрозию в результате образования и разрушения структуры расплавленного металла между контактами и, во-вторых, эрозию в результате воздействия непосредственно электрической дуги на контактные поверхности.

Выше изложенные результаты можно пояснить тем, что дуговой разряд происходит при образовании парогазового канала вдоль первичного стримерного канала проводимости. Интенсивное образование па-

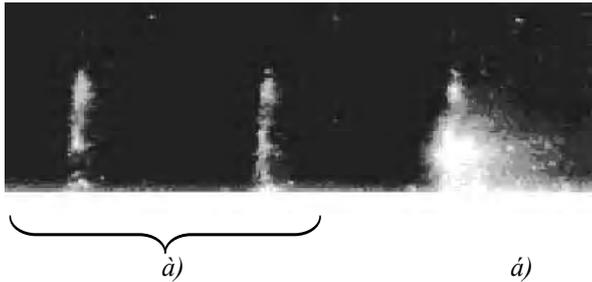


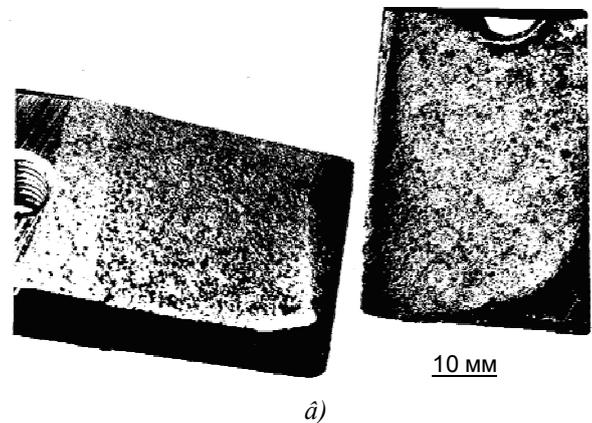
Рис. 6. Киносъемка перехода стримерной стадии (а) в дуговую (б) электротермического процесса при изменении скорости движения контактов



а)



а)



а)

10 мм

Рис. 7. Киносъемка развития дугового электротермического процесса дугогасящих контактов в масляной (а) и воздушной (б) средах, а также поверхности контактов (в)

ров материала контактов приводит к формированию газового объема, который зависит от интенсивности и характера тока. Интенсивность и форма тока приводят к сложным электромагнитным процессам: всплыванию микрованн расплавленного металла, его испарению и конденсации. Разбрызгивание расплавленного металла и выброс его паров приводит к эрозии поверхности контактов: от 40 % до 80 % в зависимости от длительности протекания электротермического процесса. Наиболее интенсивно разрушаются контакты при малых межконтактных расстояниях, когда

большая часть тепловой энергии поглощается контактными поверхностями. При этом существенное влияние оказывает кумулятивный эффект в результате многократного воздействия электротермических процессов в области контактов. Чем меньше по времени воздействие электрической дуги на контактную систему, тем меньше ее износ и тем выше надежность работы переключающего устройства.

Из рис. 7 видно, что дуговые процессы между контактами в масляной среде распространяются в большем объеме (рис. 7, а) по сравнению с воздушной средой (рис. 7, б). На рис. 7, показана фотография поверхности контактов после 1×10^4 переключений.

Для случая работы контактов в трансформаторном масле картина электротермического процесса усложняется. Здесь дуговой процесс приводит к ударной ионизации межконтактного промежутка и созданию проводящего канала. Выделение джоулевого тепла интенсифицирует горение дуги в парах продуктов термического разложения масла. При этом происходит расширение зоны дуги относительно поверхностей контактов. Вместе с тем пары масла, содержащие до 70–80 % водорода, способствуют охлаждению столба дуги (вследствие высокой теплопроводности водорода – в 9 раз больше, чем воздуха). Масляная среда способствует более выраженной области дугового процесса и теплообменным процессам между плазмой дуги и окружающей средой. Это увеличивает выделение тепловой энергии и создает газовые и жидкостные потоки в приконтактной области. Поскольку часть энергии, выделяющейся в дуге, передается контактам, то это приводит к более интенсивному их разрушению и износу.

Следует отметить, что горение дуги в масле приводит к интенсивному испарению, повышению давления в баке контактора (более 10 атм.) и, в результате, к гидродинамическим ударам. При этом загрязнение масла механическими включениями при работе контактов является неизбежным, что приводит к выделению водорода, углеводородных газов, паров низкокипящих жидкостей и твердых включений. Эти частицы концентрируются в зоне горения дуги и активно влияют на деионизацию межконтактного промежутка.

Электротермические процессы в сочетании с электродинамическими усилиями и выделением газов приводят к более интенсивному нарушению структуры и повреждению контактных поверхностей. Чем длительнее действие дуги на локальном участке, тем больше эрозия контактов. Даже наличие значительного содержания тугоплавких компонентов в композиционных материалах контактов не гарантирует их высокую дугостойкость.

Выводы

1. В существующих литературных источниках отсутствуют исследования электротермических процессов в контактах переключающих устройств, направленные на установление причинно-следственных факторов снижения их функциональной надежности при резкопеременном характере нагрузки.

2. Предложена методика исследований и выполнен с использованием статистических параметров

вероятностный анализ контактного сопротивления (в зависимости от количества переключений и несинусоидальности резкопеременного тока).

3. Установлено, что коммутации при резкопеременном характере нагрузки приводят к ускорению эрозии контактов и увеличению их переходного сопротивления.

4. Целесообразно продолжить дальнейшие исследования влияния характера нагрузки, условий эксплуатации и физических характеристик проводящих и изоляционных материалов, а также охлаждающих сред на электротермические процессы в силовых контактах переключающих устройств.

Перечень ссылок

1. Плохов И. В. Исследование сопротивления стягивания электрического контакта // Электротехника. – 2004. – № 5. – С. 13–18.
2. Близняков А. В. Качественная характеристика электродугового процесса в жидком диэлектрике // Электротехника та електроенергетика. – 2001. – № 1. – С. 34–37.
3. Власов А. Б. Расчет эксплуатационных показателей надежности контактных соединений с помощью тепловизионного контроля // Электротехника. – 2002. – № 8. – С. 30–35.

4. Раховский В. И., Левченко Г. В., Теодорович О. К. Разрывные контакты электрических аппаратов. М.–Л.: Энергия, 1966. – 249 с.
5. Порудоминский В. В. Устройства переключения трансформаторов под нагрузкой. – М.: Энергия, 1974. – 288 с.
6. Б. В. Ванин, Ю. Н. Львов, М. Ю. Львов. О повреждениях силовых трансформаторов напряжением 110–500 кВ в эксплуатации // Электрические станции. – 2001. – № 9. – С. 53–58.
7. В. В. Зиновкин, О. И. Сисуненко, С. Л. Сергиенко, Д. В. Зозуля. Нестационарные режимы силовых трансформаторов при резкопеременной нагрузке // Энергетика и электрификация. – 1994. – №5. – С. 48 – 52.
8. Виленкин С. Я. Статистическая обработка результатов исследования случайных функций. – М.: Энергия, 1979. – 250 с.
9. Кудрявцев Н. Н. Специальные киносъемки. – М.: Искусство, 1978 – 286 с.

Поступила в редакцию 19.10.06 г.

После доработки 03.11.06 г.

Наведено результати досліджень електротермічних процесів в контактах перемикаючих пристроїв. Проаналізовано причинно-наслідкові фактори аварійності перемикаючих пристроїв трансформаторного обладнання. Запропоновано методики ймовірнісного аналізу та експериментальних досліджень опору контактів в залежності від несинусоїдності струму і кількості комутацій.

The results of electrothermal processes researches in switching devices contacts are given. The cause-sequence factors of switching devices breakdown are analyzed. The technique of probability analysis and experimental researches of contact resistance that depends on non-stationary current and switching quantity are offered.

УДК 621.365.5

Д. С. Ярымбаш, А. В. Тютюнник, О. Л. Загрунный

Повышение эффективности управления режимами электрического обогрева при прессовании заготовок подовых блоков

Предложена методика оптимизации управления электрическим обогревом при прессовании заготовок подовых блоков.

При прессовании заготовок подовых блоков применяются массивные мундштуки для прессов с усилием от 3500 до 6300 кН, оборудованные системами индукционного электрообогрева с автоматическим регулированием температурных режимов прессования. Они, как объекты управления, характеризуются большой потребляемой мощностью и значительной продолжительностью времени работы в динамических режимах [1]. Стабильность температурного режима прессования заготовок из высокотеплопроводной

массы с увеличенным содержанием графита определяет качественный уровень подовых блоков. Дефекты, возникающие из-за нарушения температурных режимов, являются скрытыми и выявляются на завершающих этапах производственного процесса. Это приводит к повышению удельной доли брака в готовой продукции, дополнительному расходу сырья и электроэнергии на дополнительные туры прессования заготовок. Кроме того, существующие системы автоматического управления и температурные задания