

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ

Институт электродинамики

На правах рукописи

ЗОЗУЛЯ Дмитрий Викторович

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ  
ПРИ РЕЗКОПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ**

Специальность: 05.09.01.- "Электрические машины"

**АВТОРЕЗЮМЕ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Киев - 1994



00778516 (Y)

Робота виконана в Інституті

- Научний керівитель - доктор технічних наук, професор  
Кравченко Адольф Никитович
- Научний консультант - кандидат технічних наук, старший  
науковий співробітник.  
Владимир Васильевич Зиновкин
- Офіційні опоненти - доктор технічних наук, доцент  
Сергей Евгеньевич Зирка
- кандидат технічних наук, доцент  
Андрей Владимирович Новиков
- Ведущая організація - Український інститут трансформаторо-  
строєння, Міністерство оборони,  
(г. Запоріжжя)

Захиста проводиться "26" грудня 1995 г.  
в 11:00 час. на засіданні спеціалізованого Ученого ради  
Д 016.30.04 в Інституті електродинаміки НАН України по адресу:  
252680, Київ-57, проспект Перемоги, 56, тел. спецради 446-91-15

С дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту  
електродинаміки НАН України.

Автореферат розіслав "20" лютого 1995 г.

Учений секретар  
спеціалізованого  
Ученого ради,  
доктор технічних наук

Г. М. Федоренко

ЛНБ ім. В. Стефаніка

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Необходимость обеспечения промышленного комплекса Украины современным электротехническим оборудованием, согласно Государственной научно-технической программы "Электросбережение в электроэнергетике", требует разработки, внедрения и организации серийного выпуска на предприятиях Украины новых видов силовых трансформаторов.

Современные энергоёмкие установки (дуговые сталеплавильные печи, преобразовательные устройства, приводы прокатных станов) являются источниками резкопеременных возмущений. Неучёт резкопеременного характера нагрузки на стадии проектирования вызывает в готовом трансформаторе ряд нежелательных воздействий, что приводит к снижению эксплуатационной надёжности и в итоге к повышенной аварийности.

Для создания надёжного трансформаторного парка принципиально важное значение приобретают вопросы исследования нестационарных резкопеременных режимов работы трансформаторов и другого электротехнического оборудования, разработки методик исследования и инженерных расчётов резкопеременных электромагнитных процессов, проработки конструктивных решений, обеспечивающих электродинамическую устойчивость обмоток силовых трансформаторов.

Отдельные положения диссертации выполнялись по разделу программы ИКНТ "Высокоэффективное генерирующее оборудование для парогазовых и газотурбинных энергокомплексов".

Изложенное выше свидетельствует об актуальности диссертационной работы и ее связи с соответствующими направлениями науки и народного хозяйства.

Цель и задачи исследования. Основной целью работы является разработка методов экспериментального исследования и инженерного расчёта резкопеременных электромагнитных процессов в силовых трансформаторах, и внедрение их в практику трансформаторостроения. При достижении указанной цели решены следующие задачи:

-выполнен анализ аварийности трансформаторов в системах электроснабжения потребителей резкопеременных нагрузок;

-разработаны устройства и методики экспериментального

исследования осредненных и мгновенных параметров нестационарных резкопеременных режимов трансформаторов в условиях эксплуатации;

-определены, классифицированы и изучены характерные особенности нестационарных резкопеременных режимов, их источники и проявления в трансформаторах;

-разработаны методики и устройства физического моделирования резкопеременных электромагнитных процессов в трансформаторах;

-исследованы резкопеременные электромагнитные процессы в массивном полуограниченном металлическом теле;

-с учетом резкопеременного характера нагрузки исследованы системы прессовки и подпрессовки обмоток силовых трансформаторов для определения наиболее оптимальных применительно к трансформаторам, работающим при резкопеременной нагрузке.

Методы исследований. Используются аналитические и численные методы математической физики, методы физического моделирования, а также экспериментальные методы измерений электромагнитного поля, потерь и эксплуатационных параметров. Экспериментальные методы проводились на образцах, масштабных моделях, опытно-промышленном трансформаторе мощностью 63 МВА.

Теоретическая ценность. Разработаны принципиальные основы и методики исследования резкопеременных электромагнитных процессов, осредненных и мгновенных параметров силовых трансформаторов. Уточнены определяющие критерии подобия электромагнитного поля в модели и оригинале применительно к нестационарным режимам силовых трансформаторов. Получены нормализованные характеристики эквивалентной магнитной проницаемости конструкционных сталей, применяемых в трансформаторостроении. Аналитически показана принципиальная возможность эквивалентирования определяющих параметров резкопеременного электромагнитного поля в массивных ферромагнитных и немагнитных телах.

Практическая ценность. Разработана комплексная методика физического моделирования нестационарных электромагнитных

процессов в трансформаторах специального назначения. Сформулированы технические требования к трансформаторам, предназначенным для питания мощных пирометаллургических технологических установок. Выявлены рекомендации для осуществления прессовки и подпрессовки систем возбуждения силовых трансформаторов специального назначения. Определены характерные особенности нестационарных воздействий в сочетании с аварийностью силовых трансформаторов.

Научная новизна. Впервые выполнен комплекс теоретических исследований и экспериментальных измерений нестационарных эксплуатационных параметров силовых трансформаторов, обобщены и систематизированы их наиболее характерные особенности. Конкретизирована теория физического моделирования электромагнитных процессов в силовых трансформаторах при нестационарных резкопеременных режимах. Сформулированы методологические основы измерения осредненных и мгновенных величин трансформаторов, физического моделирования резкопеременных электромагнитных процессов, а также разработаны специализированные устройства для решения указанных задач.

Реализация результатов работы. Обобщенные и систематизированные характерные особенности нестационарных резкопеременных режимов силовых трансформаторов, методики физического моделирования и отдельные специальные устройства использованы во Всеукраинском институте трансформаторостроения (г. Запорожье) и Институте электродинамики АН Украины (г. Киев) при разработке трансформаторов специального назначения, предназначенных для питания мощных дуговых сталеплавильных печей.

Апробация работ. Основные результаты диссертационной работы докладывались:

- на научно-технической городской конференции молодых специалистов и ученых (г. Запорожье, 1992 г.);
- на заседании электротехнической секции научно-технической конференции Запорожского машиностроительного института (г. Запорожье, 1993-1994 гг.);
- на заседании электротехнической секции отдела диагностики Украинского института трансформаторостроения (г. За-

порожье, 1993-1994 гг.);

- на семинаре "Электромагнитные и тепловые процессы в электрических машинах" научного совета АН Украины (ИЭД АН Украины, г. Киев, 1992-1994 гг.);

- на семинаре "Нелинейные краевые задачи математической физики и их приложения" научного совета АН Украины (Ин-т математики АН Украины, г. Киев, 1993 гг.).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы отражены в 10 публикациях, в том числе: 6 статьях, 1 препринте, 2 тезисах докладов, 1 научном отчете.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, списка литературы (84 наименования) и приложения. Изложена на 234 стр., из них 147 стр. машинописного текста, 70 рисунков, 17 таблиц. Список литературы представлен на 11 стр., приложение - на стр.

На защиту выносятся:

-методики аналитических и численных исследований резкопеременных электромагнитных процессов в массивных телах и деталях конструкций силовых трансформаторов;

-комплексная методика физического моделирования нестационарных электромагнитных процессов в сочетании с методами эквивалентирования применительно к резкопеременному характеру нагрузки силовых трансформаторов;

-нормализованные электромагнитные характеристики ферромагнитных материалов, применяющихся в трансформаторостроении;

-систематизированные и обобщенные особенности нестационарных воздействий в трансформаторах, питающих резкопеременную нагрузку в сочетании с анализом их аварийности;

-методологические и принципиальные основы моделирования и исследования нестационарных режимов трансформаторов, характерных для работы мощных прометаллургических устройств, а также регистрации нестационарных воздействий;

-комбинированная система подпрессовки обмоток силовых трансформаторов специального назначения с силовыми элементами памяти формы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, выполнены краткий обзор и анализ методов исследования осредненных электрических параметров мощных пирометаллургических установок. Определены основные направления исследования. Показана необходимость исследования резкопеременных электромагнитных процессов в силовых трансформаторах и разработки инженерных методик расчета и исследований. Определены цель и задачи работы. Дана краткая аннотация разделов диссертации.

Первая глава посвящена вопросам исследования аварийности трансформаторов в системах электроснабжения резкопеременных нагрузок, разработке специализированных устройств и методик исследования резкопеременных режимов, причин, их вызывающих. Наиболее распространенными источниками резкопеременных возмущений являются пирометаллургические устройства. Нестационарные резкопеременные режимы, которые являются причиной возникновения и развития целого ряда нежелательных явлений, приводят к повышенной их аварийности. Результаты анализа аварийности трансформаторного парка Запорожского промышленного региона приведены в табл.1, из которой следует, что повреждаемость силовых трансформаторов, питающих сети потребителей резкопеременной нагрузки, составляет 88%, в то время как аварийность в сетях общего назначения - 12% от числа поврежденных трансформаторов. Резкопеременный характер

Таблица 1.

Тип трансформатора на подстанции	Характер нагрузки	Количество трансформаторов, эксплуатируемых на подстанции	Аварийность трансформаторов, %	Повреждения	
				внут.	внеш.
63 МВА	Нестационарный, резкопеременный	10	80	4	4
		5	140	4	3
		6	67	2	2
		4	25	1	-
		2	50	1	-
	2	50	1	-	
	Смешанный	1	100	1	-
		2	50	1	-
3		33	1	-	

нагрузки является первопричиной аварийности. Нагрев, ускоренное механическое и электрическое старение изоляции и спо-

сообствует дальнейшему развитию нежелательных явлений в активной части трансформатора (распрессовка обмоток, потеря динамической стойкости, пробой изоляции и т.д.).

На рис. 1 показаны характерные осциллограммы нагрузочных токов и напряжения, а в табл. 2 даны количественные показатели нагрузки трансформаторов. Из них видно, что трансформаторы подвержены значительному числу превышений токов различной кратности, превосходящих номинальные значения, которые не оговорены в нормативно-технической и эксплуатационной документации.

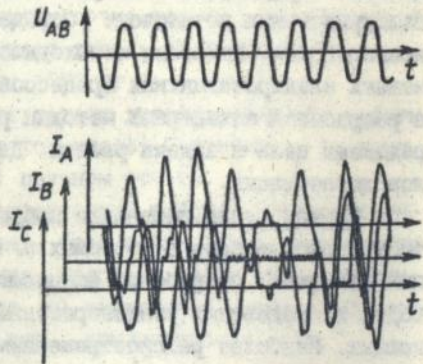


Рис. 1.

Таблица 2.

Номер плавки	Число оросков и толчков эксплуатационных токов при кратности					Суммарное за плавку	Продолжительность плавки, мин
	1,1-1,3	1,3-1,5	1,5-2,0	2,0-2,5	2,5-3,0		
1	1751	248	67	4	3	2109	80
2	1073	362	165	6	2	1603	50
3	982	318	174	3	0	1477	42
4	995	279	141	2	2	1419	30
5	1793	254	82	3	4	2136	70
6	1810	401	150	5	3	2369	60
7	895	350	160	5	1	1411	40
8	1547	276	89	6	4	1922	78
Средняя плавка	1356	315	128	4	2	1806	56

В резкопеременных режимах имеет место несинусоидальность тока, гармонические составляющие которой приведенные в табл. 3. Высшие гармонические составляющие в токах нагрузки приводят к повышенным добавочным потерям, дополнительным нагревам в деталях конструкций и, как следствие, к ускоренному износу изоляции. Наиболее характерные особенности эксплуатационных режимов трансформаторов в сетях резкопеременной нагрузки даны в табл. 4.

Таблица 3.

Номер гармоники	Кратность тока нагрузки, %					
	0,6-0,8	0,8-1,0	1,0-1,5	1,5-2,0	2,0-2,5	
2	9,1	6,2	4,0	2,8	1,3	
3	19,4	10,3	7,1	3,9	2,5	
4	4,3	4,1	1,9	1,1	0,8	
5	5,3	2,3	1,2	0,9	0,4	
7	2,6	1,2	0,8	0,3	0,2	
11	1,9	1,3	0,6	0,5	0,3	
Коэффициент потерь, о.е.	сред	1,09	1,06	1,04	1,03	1,02
	макс.	1,20	1,17	1,15	1,14	1,13

Таблица 4.

Характерные особенности	Определяющие параметры
Частые толчки, броски токов, вызванные включением и отключением энергоёмких потребителей	Кратности, длительности и количество превышают требования нормативных документов
Наличие высших гармонических составляющих	В зависимости от технологического процесса, вплоть до 19-й гармоники
Несимметричные режимы в определенные моменты технологического процесса	Работа потребителей в двухфазных режимах, чередующихся с технологическими КЗ
Активные детали конструкции работают в полях, изменяющихся во времени по несинусоидальному закону	Превышение нагрузок в сравнении с режимом общего назначения
Большое количество электродинамических и тепловых воздействий	Релаксационные, механические, резонансные явления в изоляции и активной части трансформаторов
Чрезмерная аварийность и сокращенные сроки службы	Неполное соответствие требованиям нормативной и эксплуатационной документации

Экспериментальные исследования нестационарных резкопеременных режимов силовых трансформаторов,

потребовали разработки специализированных устройств (одно из них показано на рис. 2) и методик исследований. Они использованы для измерений нестационарных

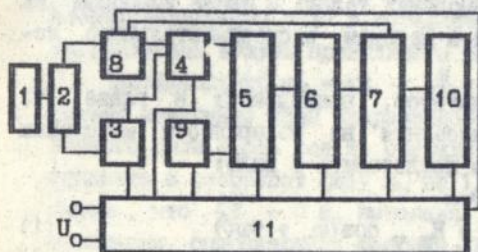


Рис. 2.

нагрузочных режимов и частично представлены на рис. 1, 3, 4

и табл.2,3. На рис.3 показаны регистрограммы активной и реактивной составляющих мощности, а также коэффициента мощности пирометаллургических установок типа ДСП-150 "Круш". Сопоставление данных рис.3 и данных, полученных теоретически, (рис.4) показало, что в течение технологического процесса режимы

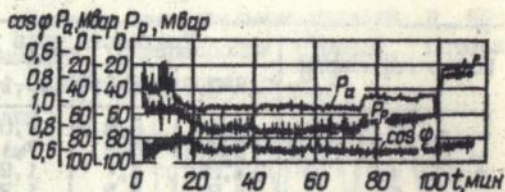


Рис. 3.

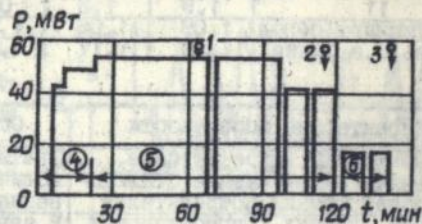


Рис. 4.

трансформаторов являются резкопеременными и в отдельные моменты времени трансформатор подвергается воздействиям толчков, бросков, несимметрии по фазам и другим нестационарным воздействиям, которые приводят к сокращению срока службы, а в отдельных случаях к аварийным выходам.

Таким образом, по казана необходимость учета и исследования резкопеременных явлений, которые приводят к нежелательным или аварийным последствиям как в трансформаторах, так и в другом электротехнологическом оборудовании.

Вторая глава посвящена вопросам теоретических и экспериментальных исследований резкопеременных электромагнитных процессов в массивных проводящих телах, а также вопросам их физического моделирования и методам экспериментального исследования.

Как следует из результатов, приведенных в главе 1, электромагнитное поле, рассеяния на поверхности массивных деталей конструкции можно представить в виде:

$$H_O(\Sigma\nu, t) = H_O + \sum_{\nu=1}^{\nu=\infty} H_{m,\nu} \cos(\varphi_\nu + \omega t) \quad (1)$$

Исходными уравнениями аналитического исследования являются уравнения Максвелла, решение которых получено в векторной

форме имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \sum_{\nu=1}^{\nu=\infty} \bar{H}_{\nu} &= \sum_{\nu=1}^{\nu=1} \gamma \bar{E}_{\nu}; & \operatorname{rot} \sum_{\nu=1}^{\nu=\infty} \bar{E}_{\nu} &= -\mu \sum_{\nu=1}^{\nu=\infty} \frac{\partial \bar{H}_{\nu}}{\partial t} \\ \operatorname{div} \sum_{\nu=1}^{\nu=\infty} \bar{H}_{\nu} &= 0; & \operatorname{div} \sum_{\nu=1}^{\nu=\infty} \bar{E}_{\nu} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Уравнения (2) преобразуются к координатной форме записи при дальнейшем решении, где уравнения (2)  $\rho$  и  $\gamma$  - удельные электрические сопротивления и проводимости металла,  $\mu = \operatorname{const}$  - магнитная проницаемость,  $\delta = \gamma E = \frac{E}{\rho}$  - плотность тока проводимости,  $D = \epsilon E$  - индукция электрического поля,  $B = \mu H$  - индукция магнитного поля.

Уравнения (2) получены при условии, что ток смещения  $\frac{\partial D}{\partial t}$  бесконечно мал по сравнению с током проводимости  $\delta$ , и описывает электромагнитные процессы в металлическом теле. После ряда преобразований, переходя к координатной форме записи, имеем:

$$\sum_{\nu=1}^{\nu=\infty} \bar{H}_{\nu} = \sum_{\nu=1}^{\nu=\infty} H_{\text{OM} \nu} e^{-\frac{z}{\Lambda_{\nu}}} \cdot e^{j(\omega t - \frac{z}{\Lambda_{\nu}})} \quad (3)$$

$$\sum_{\nu=1}^{\nu=\infty} \bar{E}_{\nu} = \sum_{\nu=1}^{\nu=\infty} H_{\text{OM} \nu} \frac{\sqrt{2} e^{-\frac{z}{\Lambda_{\nu}}}}{\gamma \Lambda_{\nu}} \sin(\omega t - \frac{z}{\Lambda_{\nu}} + \frac{\pi}{4}), \quad (4)$$

где  $\Lambda_{\nu} = \sqrt{\frac{2}{\mu \gamma}} \cdot \frac{1}{2\nu} = \frac{1}{2\nu \sqrt{\mu \gamma}}$  - эквивалентная глубина проникновения электромагнитного поля в металлическое тело, а  $z$ -координата, направленная вглубь проводящего тела.

Коэффициенты  $\varphi_H = \omega t - \frac{z}{\Lambda_{\nu}}$ ;  $\varphi_E = \omega t - \frac{z}{\Lambda_{\nu}} + \frac{\pi}{4}$  описывают изменение фазы напряженности магнитного и электрического поля вдоль оси  $z$ . Очевидно, что фаза  $E_{\nu}$  в любой координате  $z$  опережает фазу  $H_{\nu}$  на  $1/8$  ( $\pi/4$ ) длины волны. Учитывая, что  $\frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0$  и, выполняя преобразования, приходим к уравнению, описывающему фазовую  $v_{\Phi}$  скорость и длину  $\lambda_{\Phi}$

электромагнитной волны  $v_{\Phi} = \omega \Lambda_{\nu} = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu \gamma}}$   $\lambda = \frac{v_{\Phi}}{f} = 2\pi \Lambda_{\nu}$ .

Поверхностные потери получены из уравнения вектора Умо-

ва-Пойтинга:

$$S = \frac{1}{2} \left[ H_0 \frac{1+j}{\gamma \Delta_B} e^{-\frac{1+j}{\Delta_B} z} \cdot H^* e^{-\frac{1-j}{\Delta_B} z} \right] = H_0^2 \frac{1+j}{2\gamma \Delta_B} e^{-\frac{2z}{\Delta_B}}$$

являются средними за период в направлении движения электромагнитной волны и имеют следующий вид:

$$P_{II} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} Z |H_{(0)}|^2; P_{II} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} Z^{-1} E_{(0)}^2; P_{II} = \frac{1}{2} \omega^2 \operatorname{Re} Z^{-1} \Phi_{II}^2 \quad (5)$$

где  $Z = \sqrt{1 + \omega \mu_B (|H_{(0)}|/\sigma)}$ .

При резкопеременном характере электромагнитного поля из уравнения (5) получаем коэффициенты эквивалентирования тока, которые связаны с известными коэффициентами эквивалентирования частоты следующим соотношением:

$$k_{IP} = \left[ \sum_{\nu=1}^{\nu=N} \nu^{1/2} \cdot \alpha_{H\nu}^2 \right]^{1/2} = k_{\omega E} \sum_{\nu=1}^{\nu=N} \frac{1}{\nu^{1/2}} \alpha_{E\nu}^2 = \frac{1}{k_{\omega B}} \cdot \alpha_{\omega\nu}^2 \nu^{3/2} \quad (6)$$

Экспериментальные исследования, приведенные на рис.5, подтверждают эффективность использования коэффициентов эквивалентирования частоты и тока для резкопеременного электромагнитного поля. На рис.5 обозначены:  $\bullet$  и  $\circ$  — экспериментальные параметры коэффициента эквивалентирования тока и частоты, — — — расчетные зависимости.

Одним из методов определения эффективности конструкторской проработки трансформаторов является исследование электромагнитных

процессов в трансформаторах с помощью масштабной модели. В основе метода лежит определяющий критерий подобия:

$$m_l^2 m_t^2 m_\sigma m_\mu = 1, \quad (7)$$

полученный из уравнений Максвелла для магнитного поля, изменяющегося во времени по гармоническому закону  $I = I_m e^{-j\omega t}$ .

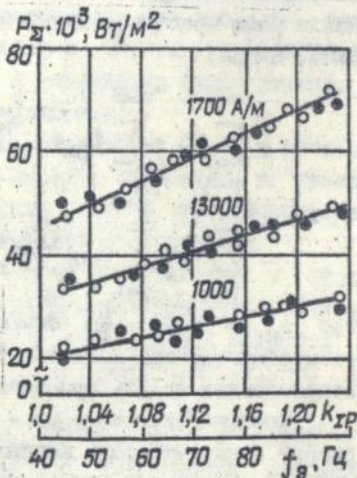


Рис. 5.

В (7) приняты следующие обозначения:  $m$  - масштабный коэффициент, а индексы  $i, t, \sigma, \mu$  - обозначают принадлежность к линейным размерам, времени, удельной электрической проводимости и магнитной проницаемости соответственно.

Использование коэффициентов эквивалентирования резкопеременного магнитного поля позволило уточнить критерии электромагнитного подобия в модели и реальном трансформаторе. При этом эквивалентный ток резкопеременной нагрузки модели равен:

$$I_{\text{вФ}}^{(M)} = I^{(0)} \cdot m_1 \cdot \rho_{\text{РФ}}^{1/2} \cdot h(H^{(0)}, H_1), \text{ при условии:} \\ \omega = \omega_1^{(M)}; \mu = \mu^{(0)} = \mu^{(M)} \left[ \frac{H^{(M)}}{H^{(0)}} \right]. \quad (8)$$

При этом постоянное подмагничивающее поле

$$H_0' = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{R^{(M)} (|H^{(0)}|)}{R^{(0)} (|H^{(0)}|)} \quad (9)$$

выбирается таким образом, чтобы соблюдалось подобие магнитных свойств в исследуемых деталях модели и оригинала ( $m_\mu = 1$ ).

Для экспериментальной проверки эквивалентных параметров резкопеременного электромагнитного поля разработано специализированное устройство для моделирования нестационарных резкопеременных режимов силовых трансформаторов (рис.6) и методика ис-

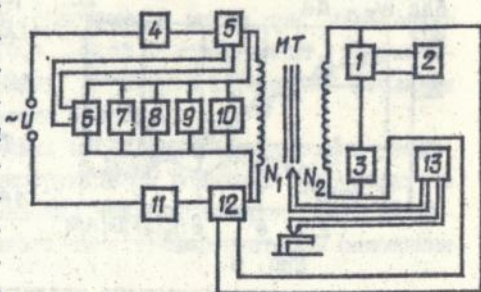


Рис. 6.

следований. Достоверность полученных теоретически результатов подтверждена экспериментальными данными, полученными на масштабной модели трансформатора (рис.7), которые показывают, что характер распределения потерь и величина коэффициента увеличения потерь, рассчитанная по гармоническому составу намагничивающего тока, весьма близки к измеренным. На рис.8 показана зависимость удельных потерь  $W_{\Sigma,0}'$  и погрешность их моделирования  $\delta$  от напряженности подмагничивающего магнитно-

го поля при фиксированных значениях: 2000; 4000; 6000; 8000

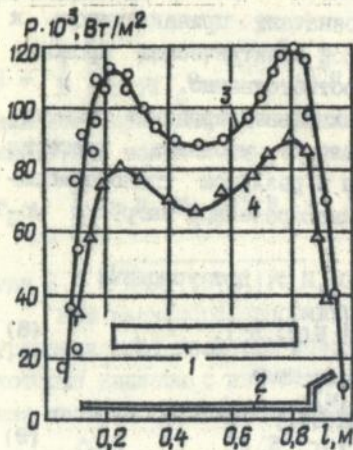


Рис. 7.

А/м в соответствующих обозначениях  $o$ ;  $+$ ;  $\Delta$ , а на рис.9 удельные поверхностные потери  $W'_{\Sigma,0}$  в зависимости от напряженности синусоидального ( $+$ ), несинусоидального ( $\Delta$ ) и подмагничивающего магнитного поля ( $o$ ) при подмагничивании постоянной составляющей.

Приведенные результаты свидетельствуют о эффективности разработанных методик с использованием специализированных устройств и методов эквивалентирования для исследований резкопеременных электромагнитных процессов в силовых трансформаторах.

переменных электромагнитных процессов в силовых трансформаторах.

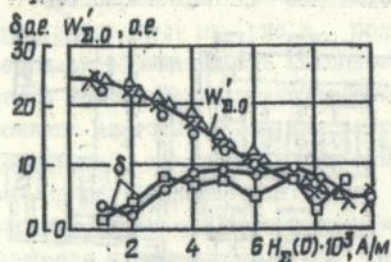


Рис. 8.

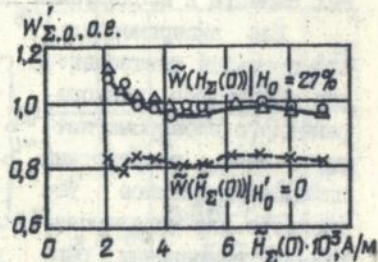


Рис. 9.

Третья глава посвящена исследованию и разработке конструктивных решений с использованием ряда инженерных и технологических задач, направленных на повышение эксплуатационной надежности трансформаторов для резкопеременных нагрузок. С учетом исследований характерных особенностей нестационарных резкопеременных воздействий проведена классификация пресущих устройств, которая показана на рис.10. Из приведенной классификационной схемы в практике трансформаторостроения используются три основных реализации. При определении наиболее эффективной из трех реализаций учитывались ха-

рактерные особенности нестационарных резкопеременных режи-

Без подпрессовки	Прессующие устройства		Постоянная подпрессовка	
	Периодическая подпрессовка		Комбинированные системы	Элемент памяти формы
Устройства стяжки и нажимные винты	Гидродомкраты	Нажимные винты		
Осевая и радиальная прессовка	Осевая прессовка		Осевая прессовка	
Трансформаторы общего назначения	Трансформаторы общего назначения		Трансформаторы спецназначения	

Рис. 10.

мов, их качественные и количественные показатели.

Дополнительно исследованы характерные особенности блока "обмотка-система прессовки" на его физической и механической моделях. Оценка состояния системы обмоток  $L_{\text{обм}\Sigma}$ , прессующей системы  $L_0$  и опор  $\gamma_0$  достаточно полно описывается уравнениями:

$$L_{\text{обм}\Sigma} = \Delta U_{\text{обм}} (1-K) \Delta P_0, \quad (10)$$

$$L_0 = \Delta U_{\text{оп}} / \Delta P_0, \quad (11)$$

$$\gamma_0 = \Delta U_{\text{оп}} / \Delta U_{\text{обм}}, \quad (12)$$

где  $\Delta U_{\text{обм}}$ ,  $\Delta U_{\text{оп}}$ ,  $\Delta U_{\text{в}} = U_{\text{обм}} + \Delta U_{\text{оп}}$  - перемещения верхнего торца обмоток, верхней опоры, прессующего винта при увеличении прессовки  $P_0$  на  $\Delta P_0$ ;  $K = 0,1 \dots 0,15$  - коэффициент, учитывающий, что податливости верхней и нижней концевой изоляции считались частью податливости обмоток.

На основании выполненных исследований определены требования, предъявляемые к конструктивным решениям прессующих и подпрессующих устройств силовых трансформаторов для резкопеременных нагрузок. Для такого типа трансформаторов основными требованиями являются:

-обеспечение усилия прессовки в процессе изготовления обмоток;

-обеспечение необходимого усилия подпрессовки в течение эксплуатационного срока трансформатора.

Проведен анализ существующих конструктивных решений и способов прессовки и подпрессовки обмоток силовых трансформаторов. Показано, что из всего многообразия анализируемых устройств наиболее эффективными являются конструкции комбинированных систем, которые осуществляют постоянную подпресс-

совку. Силовыми элементами таких систем могут быть пружины тарельчатого типа или элементы специальных сплавов с памятью формы.

Результаты выполненных исследований термомеханических характеристик сплавов с памятью, эффективность их использования в качестве силовых элементов позволили выделить три определяющих механизма подпрессовки:

- использование стяжных шпилек;
- применение специальных домкратов с рабочим элементом с памятью формы, например, из нитинола;
- использование деформации телескопической системы из сплавов с памятью формы.

Исследование способов прессовки, конструктивных решений подпрессовывающих устройств и оптимального технологического процесса обработки обмоток на простых физических моделях столов прокладок и на реальном печном агрегате ТРДЦН-160000/200 показали:

-механические характеристики термоупругих элементов с памятью, реализация которых представлена на рис.11, подтверждают эффективность использования их в транс-

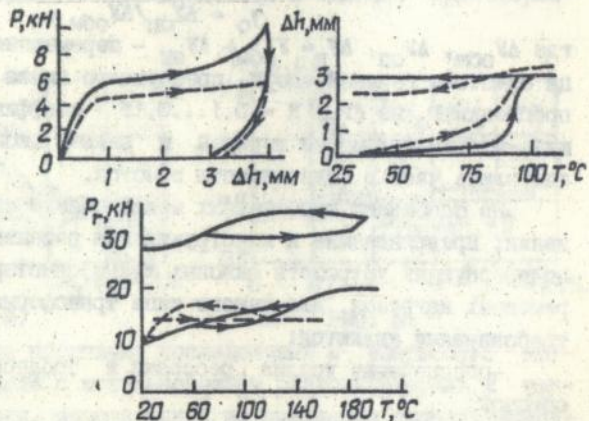


Рис. 11.

форматоростроении для подпрессовки систем возбуждения силовых трансформаторов при резкопеременной нагрузке;

-системы возбуждения силовых трансформаторов при резкопеременной нагрузке целесообразно проводить по разработанной технологической схеме, которая позволяет вдвое сократить время технологического процесса, уменьшить затраты, обеспе-

чить высокую стабильность высоты обмоток;

-в трансформаторах, работающих при резкопеременных нагрузках, необходимо осуществлять постоянный контроль за состоянием систем возбуждения.

### ВЫВОДЫ

Научные и практические результаты исследования можно сформулировать в виде следующих выводов:

1. Выполнен анализ повреждаемости силовых трансформаторов в системах электроснабжения потребителей резкопеременных нагрузок. Установлено, что аварийность трансформаторов при резкопеременных нагрузках на 50-80% выше, чем у таких же трансформаторов, работающих в системах общего назначения.

2. В системах электроснабжения резкопеременных потребителей работают трансформаторы общего назначения, которые не рассчитаны на такой характер нагрузки. В этой связи в диссертации разработаны технические требования к трансформаторам, предназначенным для питания резкопеременных пирометаллургических установок типа дуговой сталеплавильной печи.

3. С помощью разработанных устройств и методик экспериментального исследования мгновенных параметров выявлено, что нестационарные эксплуатационные режимы трансформаторов имеют сложный, вероятностный характер, где имеют место: несинусоидальность тока со сложным гармоническим составом, включая пульсацию отдельных полупериодов; несимметрия нагрузки по фазам (при коэффициенте несимметрии до 30%), включая чередующиеся и изменяющиеся с модулированной частотой 5-10Гц; превышения номинального тока в отдельных фазах до 2,6; наличие технологических коротких замыканий кратностью до 3,2 в количестве до 5 за один технологический цикл; перенапряжения кратностью до 10, вызванные спецификой коммутационной аппаратуры;

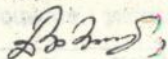
4. С учетом резкопеременного характера нагрузки исследованы системы прессовки и подпрессовки обмоток силовых трансформаторов. На основании результатов предложена комбинированная система прессовки с одновременной подпрессовкой в процессе эксплуатации с элементами тарельчатого типа и силовов с памятью.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Зиновкин В.В., Сисуненко О.И., Сергиенко С.Л., Зозуля Д.В., Лютый А.П. Нестационарные режимы силовых трансформаторов в системах электроснабжения потребителей резкопеременных нагрузок // Энергетика и электрификация. - 1994. - №5. - С.48-52.
2. Зиновкин В.В., Зозуля Д.В. Электромагнитные характеристики конструкционных сталей, применяемых в трансформаторостроении // Энергетика и электрификация. - 1994.
3. Зиновкин В.В., Зозуля Д.В., Кравченко А.Н., Фещенко П.П. Исследование потерь в трансформаторах для резкопеременных нагрузок // Техн. электродинамика. - 1993. - №6. - С.11-15.
4. Зиновкин В.В., Зозуля Д.В., Свирский В.Р. Электромагнитная диагностика силовых трансформаторов при резкопеременной нагрузке // Нелинейные краевые задачи математической физики и их приложения / АН Украины. Ин-т математики. - Киев. - 1993. - С.57-60.
5. Зозуля Д.В. Способы подпрессовки обмоток трансформаторов с использованием эффекта памяти формы // Энергетика и электрификация. - 1992. - №4. - С.47-49.
6. Кравченко А.Н., Зозуля Д.В. Подпрессовка обмоток трансформаторов силовыми элементами с памятью // Техн. электродинамика. - 1992. - №3. - С.67-72.
7. Березовский А.А., Зозуля Д.В., Кравченко А.Н. Статическая и динамическая устойчивость отдельного витка обмотки силового трансформатора при действии сил короткого замыкания // Нелинейные краевые задачи математической физики и их приложения / АН Украины. Ин-т математики. - Киев. - 1993. - С.20-22.
8. Кравченко А.Н., Зозуля Д.В. Подпрессующие устройства силовых трансформаторов. - Киев, 1992. - 33 с. - (Препр./АН Украины. Ин-т электродинамики; №728).
9. Фещенко П.П., Зиновкин В.В., Зозуля Д.В., Сергиенко С.И. Анализ аварийности силовых трансформаторов при резкопеременной нагрузке // Энергетика и электрификация. - 1993. - №4. - С.24-27.

Личный вклад. В работах, написанных в соавторстве, лично соискателю принадлежат: разработка методик, моделей, анализ полученных результатов и численные расчеты (1,2,3,4), анализ и постановка экспериментов, разработка (выбор) оптимального прессующего узла (5,6,7,8). В работе 9 авторам принадлежат равные авторские права.

Соискатель



Д.В. Зозуля

Zozulia D.V. Elektromagnetic processes in force transformers under a very sharp variable loads.

The submission of dissertation for a master's degree by speciality 05.09.01-"Elektrical mashines", Institute of Elektrodynamics, National Ukranian Academy of Sciences, Kiev, 1994.

Dissertation is to be presented which contain theoretical as well as experimental research of a very sharp variable elektromagnetic processes in force transformers.

It was found out that unsteady very sharp variable regimes are the causes of force transformers emergencies. Developed methods and technical means while using them in the course of projecting manufacturing and operation allow to increase reliability of the transformer as well as other elektrotechnological equipment and electrical supply systems of a very sharp variable loads power consumers.

Зозуля Д.В. Електромагнітні процеси у силових трансформаторах при різкозмінних навантаженнях.

Дисертація на здобуття вченого ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01-"Електричні машини", Ін-т електродинаміки НАН України, Київ, 1994.

Захищається дисертаційна робота, яка містить теоретичні та експериментальні дослідження різкозмінних електромагнітних процесів у силових трансформаторах. Виявлено, що нестационарні різкозмінні режими є причиною аварійності силових трансформаторів. Використання розроблених методів і технічних засобів у процесах проектування, виготовлення та експлуатації дозволяють підвищити надійність роботи як трансформаторного, так і іншого електротехнологічного обладнання та систем електропостачання енергоємних споживачів різкозмінного навантаження.

Ключові слова: силовий трансформатор, експлуатаційна надійність, аварійність, різкозмінне навантаження.

AB 31.752

Подписано к печати 17.01.1995 г. Формат 60x84/16  
Бумага офсетная Усл.-печ. лист 1,0. Уч.-изд. лист 1,0.  
Тираж 100. Заказ 24.

Полиграф. уч-к Института электродинамики АН Украины,  
252057, Киев-57, проспект Победы, 56.