

## К ВОПРОСУ О ДИАГНОСТИРОВАНИИ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Рогозин Г.Г., Пятлина Н.Г.

Донецкий национальный технический университет  
r gg@elf.dgtu.donetsk.ua

Мосципан В.П., Бочаров Р.В., Шевченко В.В.

Энергоснабжающая компания ООО «Сервис-инвест»  
servisinvest@dn.farlep.net

*The main idea of the paper is associated with the diagnostic check of the mains transformer magnetic system by analysing its transient functions. Two methods destined for experimental determining the latter ones are considered in detail. It is shown that the method based on the DC decay test is best suited for measuring the transient functions than the method using the unipolar current impulse. The results obtained by the former method for the TM-100/6 transformer are analyzed. The lines of attack on the problem of checking the functioning state of the transformer magnetic system using the standard and routine measurements of the transient functions are proposed.*

### ВВЕДЕНИЕ

Магнитная система силовых трансформаторов наряду с активными проводниковыми материалами и изоляцией обмоток следует отнести к важнейшим элементам конструкции. Ряд повреждений в элементах магнитной системы неизбежно приводит к отключению трансформатора и длительному ремонту в условиях специализированных предприятий.

К числу характерных повреждений магнитной системы следует отнести местный пожар в стали с выгоранием части листов стали шихтованного магнитопровода, замыкание отдельных листов между собой, повреждение изоляции стяжных шпилек магнитопровода. Наличие дефектов изоляции (лакового покрытия) между листами или ухудшение её изолирующих свойств приводит в эксплуатации к снижению удельного сопротивления межлистовой изоляции пакетов магнитопровода и увеличению потерь холостого хода трансформатора.

Между тем, контроль состояния межлистовой изоляции связан с проведением специальных испытаний [1], включающих выполнение следующих измерений на выемной части трансформатора:

- определение потерь холостого хода при намотке контрольной обмотки, необходимой для создания уровня рабочей индукции в магнитопроводе трансформатора;
- измерение потерь холостого хода при замыкании крайних листов магнитопровода по его наружной поверхности;
- измерение напряжения между крайними листами и пакетами магнитопровода по его наружной и внутренней поверхностям
- измерение напряжений по пакетам (для обнаружения пакетов с закороченными листами);
- измерение удельного сопротивления постоянному току для отдельных пакетов по методу амперметра и вольтметра.

Трудоёмкость и значительные затраты времени на проведение указанных испытаний указывают на наличие определённой проблемы, связанной не только с контролем работоспособности магнитной системы, но и предотвращением роста потерь энергии в этой системе в процессе эксплуатации трансформаторов. Следует отметить что большинство трансформаторов в энергосистемах Украины находится в эксплуатации десятки лет и очередность их замены должна обуславливаться, в частности, и требованием снижения потерь энергии на её преобразование.

Очевидно, что внедрение новой системы диагностирования должно обосновываться возможностью распознавания не только роста потерь холостого хода, но и установлением повреждённого элемента конструкции магнитной системы трансформатора (сталь шихтованного магнитопровода, стяжные шпильки, смещение обмоток в результате электродинамических воздействий при сквозных коротких замыканиях).

### 1 ВЫБОР МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ФУНКЦИЙ ТРАНСФОРМАТОРА

К числу наиболее целесообразных способов определения переходных функций следует отнести известный подход, основанный на проведении опыта затухания постоянного тока [2] (рис. 1) и нашедший широкое применение для определения электромагнитных параметров турбогенераторов, а также новый способ [3], включающий в себя известный приём гашения магнитного поля постоянного тока в электрическом контуре путём включения в этот контур ёмкостного сопротивления (рис. 2).

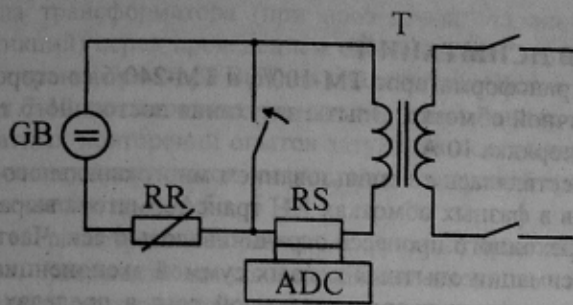


Рис. 1 Принципиальная схема определения переходных функций с использованием ступенчатого воздействия

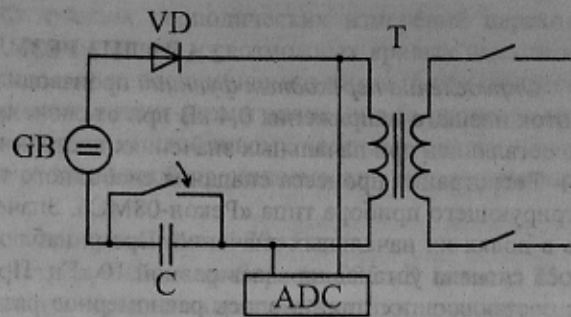


Рис. 2 Принципиальная схема определения переходных функций с использованием видеоимпульсного воздействия

Первая из приведённых схем, как это следует из рис. 1 позволяет получить переходную функцию как реакцию на ступенчатое воздействие  $I(t)U_0$ ; вторая

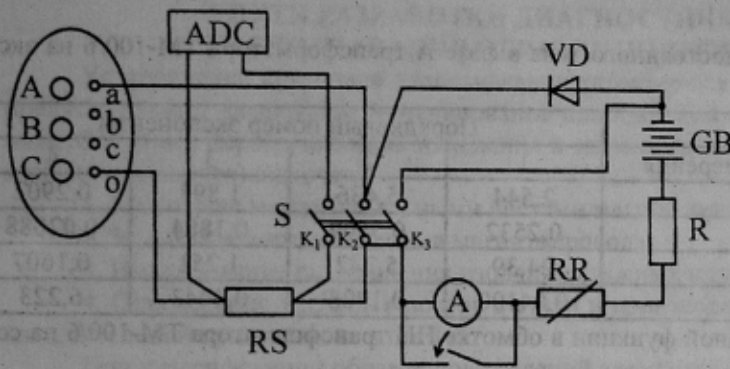


Рис. 4 Рабочая схема проведения опыта затухания постоянного тока

формировать видеоимпульсное воздействие (инициальный импульс) во вторичной обмотке трансформатора (см. рис. 3), возбуждающее ЭДС и токи в магнитно связанных цепях в процессе колебательного заряда конденсатора (до момента перехода тока конденсатора через нулевое значение). Возникающий затем свободный переходный процесс в контурах магнитной системы трансформатора наводит ЭДС в разомкнутой (благодаря включённому диоду VD) обмотке цепи формирования видеоимпульса. Регистрируемое при этом напряжение на зажимах указанной обмотки представляет собой производную переходных функций токов магнитно связанных контуров, то есть импульсную переходную функцию. Определение последней путём непосредственной реализации функции Дирака  $\delta(t)$ , очевидно, физически не реализуемо.

Как показал опыт применения рассматриваемого подхода к определению переходных функций турбогенераторов при этом вносятся существенные погрешности в наиболее информативный начальный участок переходной функции за счёт искажений, вносимых работой диода (VD). Поскольку реальная характеристика полупроводникового вентиля в цепи колебательного заряда конденсатора не позволяет реализовать его идеальную характеристику в момент изменения знака тока, то обрыв даже весьма малых значений тока приводит к перенапряжениям в цепи формирования импульсного воздействия. Применение устройств ограничения перенапряжений приводит к потере информации в начальный период регистрации в этой цепи производной переходной функции тока, затухающей в магнитно связанных контурах. В рассматриваемом случае неизбежен срез реакции магнитной системы на видеоимпульс тока в цепи конденсатора. Характер изменения токов и напряжений при использовании рассматриваемого метода показан на рис. 3.

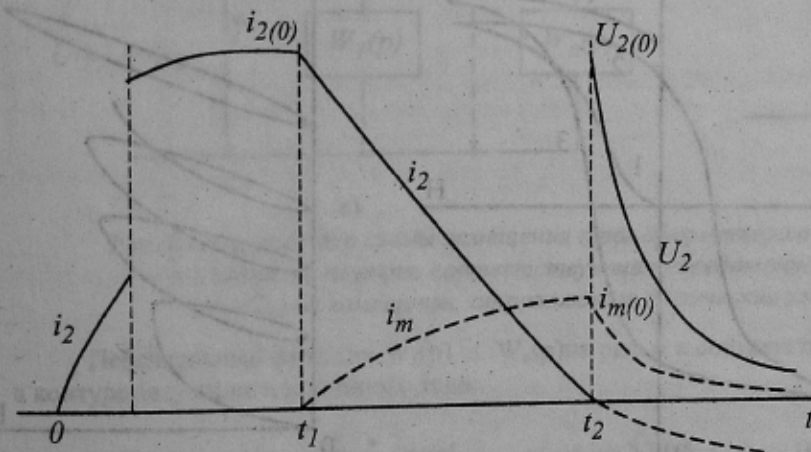


Рис. 3 Изменение токов в элементах магнитопровода и напряжения на выводах обмотки трансформатора

$0 - t_1$  - подъём тока от источника постоянного тока;  
 $0 - t_2$  - формирование входного импульса;  
 $t_1 - t_2$  - гашение магнитного поля тока во вторичной обмотке трансформатора с помощью конденсатора;  
 $t_2 - t_{\infty}$  - свободное изменение вихревых токов в элементах магнитопровода.

Таким образом, использование первого подхода, связанного с закорачиванием небольшого значения постоянного тока (в пределах 10 А) в цепи одной из обмоток силового трансформатора представляется более предпочтительным.

Опыт затухания постоянного тока проводится с использованием рабочей схемы (рис. 4), предусматривающей (конструктивно) опережающее включение контакта ( $K_1$ ) рубильника для ввода в действие регистрирующего устройства. Диод VD предназначен для исключения подпитки короткозамкнутого контура вторичной обмотки трансформатора за счёт изменения падения напряжения на сопротивлении контакта  $K_2$ , создаваемого током источника постоянного тока GB.

## 2 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

Определение переходных функций производилось для трансформаторов ТМ-100/6 и ТМ-240/6 со стороны обмоток низшего напряжения 0,4 кВ при отключенной первичной обмотке. Опыты затухания постоянного тока осуществлялись при начальных значениях постоянного тока порядка 10 А.

Регистрация процесса спадающего свободного тока осуществлялась с использованием многоканального регистрирующего прибора типа «Рекон-08МС». Значения токов в фазных обмотках НН трансформатора выражались в долях их начальных значений. Время наблюдения переходного процесса ограничивалось 6 сек. Частота опроса сигнала устанавливалась равной 10 кГц. При аппроксимации опытных кривых суммой экспоненциальных составляющих принималось равномерное разделение временных координат кривой тока в пределах отдельных интервалов, устанавливаемых по данным предварительных экспериментов. С указанной целью по данным разложения кривой тока на составляющие экспоненты устанавливалась равномерная шкала времени для десяти значений тока в каждом из следующих временных интервалов:  $0 - \tau_1$ ;  $\tau_2 - \tau_1$ ;  $\tau_3 - \tau_2$ ;  $\tau_4 - \tau_3$ . Значения постоянных времени ( $\tau$ ), а также других параметров отдельных экспоненциальных составляющих для трансформатора ТМ-100/6 для фазы А приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Разложение кривой затухания постоянного тока в фазе А трансформатора ТМ-100/6 на экспоненциальные составляющие

Параметр		Порядковый номер экспоненты			
Наименование	Единица измерения	1	2	3	4
Начальное значение тока, $i_K$	А	2,544	5,436	1,893	0,2902
	д.е.	0,2532	0,5409	0,1884	0,02888
Коэффициент затухания, $\alpha_K$	с <sup>-1</sup>	24,39	5,242	1,251	0,1607
Постоянная времени, $\tau_K$	с	0,04100	0,1908	0,4443	6,223

Из анализа результатов разложения переходной функции в обмотке НН трансформатора ТМ-100/6 на составляющие экспоненты следует:

- диапазон существенных изменений переходных функций, определяемый величиной наибольшей постоянной времени экспонентной составляющей, эквивалентирующей опытную кривую, находится в пределах 3 сек;
- имеется существенное различие в параметрах экспоненциальных составляющих переходной функции фазной обмотки среднего стержня трёхстержневого магнитопровода трансформатора по сравнению с обмотками крайних стержней;
- постоянные времени наибольшей из двух быстрозатухающих экспоненциальных составляющих тока находятся в пределах 0,05 и 0,2 сек.;
- значение двух быстрозатухающих составляющих тока в начальный момент переходного процесса находится в пределах 0,8 д.е.

Выделение четырёх существенно отличающихся по значениям параметров экспоненциальных составляющих в переходной функции тока трансформатора указывает на наличие в переходных функциях информации, отражающей переходные процессы в отдельных элементах магнитной системы: стальных листах шихтованного магнитопровода; массивных элементах конструкции, в частности, в шпильках и других подобных элементах магнитопровода; элементах конструкции, создающих пути магнитных потоков рассеяния через бак трансформатора.

В целях совершенствования методики проведения эксперимента и более полного использования возможностей регистрирующего прибора целесообразно выполнять следующие рекомендации:

- для стабилизации магнитного состояния магнитопро-

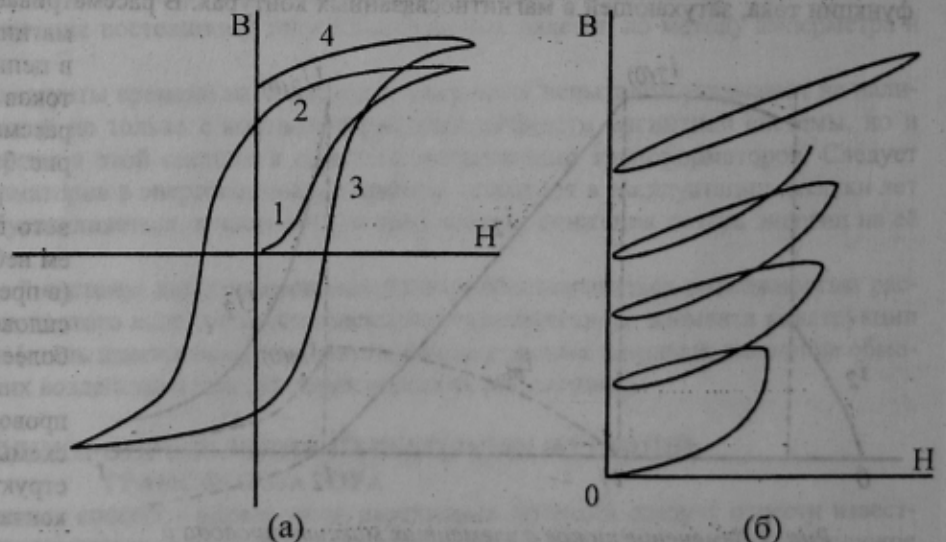


Рис. 5 Стабилизация магнитной проницаемости магнитопровода трансформатора

- а – процесс многократного намагничивания магнитопровода  
б – переход от кривой начального намагничивания к несимметричному частному циклу при многократном проведении опыта затухания постоянного тока.

вода трансформатора (при проведении эталонного и последующих периодических измерений переходных функций) перед проведением опыта следует осуществлять перевод одной из возможных кривых намагничивания трансформатора  $B(H)$  на спадающий участок кривой предельного гистерезисного цикла путём осуществления 7-10-ти последовательных несимметричных циклов намагничивания-размагничивания (в процессе многократных повторений опытов затухания постоянного тока). Переход к устойчивому частному циклу, обеспечивающему адекватность результатов измерений при постоянной магнитной проницаемости стали магнитопровода, показан на рис. 5 а, б [4];

- регистрацию переходных функций проводить при частоте опроса равной 20 кГц;
- увеличить начальное значение входного сигнала регистрирующего прибора до 225 мВ (вместо 75 мВ в проведённых опытах), что позволит гарантировать минимальную среднеквадратическую погрешность измерений  $\delta_{\min} = 0,8\%$  в диапазоне изменения переходной функции тока от 1,0 до 0,5 д.е.;
- увеличить количество значений переходной функции тока в диапазонах, выделяемых по признаку изменения постоянных времени аппроксимирующих экспонент.

### 3 ПУТИ РАЗРАБОТКИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МАТРИЦ И КРИТЕРИЕВ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ ПОВРЕЖДЕНИЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Установление критериев распознавания характерных повреждений магнитных систем трансформаторов предусматривает физическое моделирование повреждений отдельных конструктивных элементов магнитопровода. Основные неразрушающие изменения в элементах конструкции магнитопровода (с использованием временных перемычек) включают:

1. Замыкание между отдельными листами магнитопровода по наружной и внутренней поверхности;
2. Замыкание между пакетами магнитопровода;
3. Имитирование повреждения изоляции стяжных шпилек;
4. Определение удельных потерь в стали и производство специальных измерений стандартными методами для условий приведённых в пп. 1-3.

При классификации образов повреждений элементов конструкции магнитопровода и разработки соответствующих матриц симптомов моделируемых повреждений исследуется эффективность применения метрических и неметрических мер сходства образов состояний [5] во временной и частотных областях. Важное значение имеет установление границ между выделяемыми образами (классами).

Повышение чувствительности исходной информации к повреждениям в элементах магнитной системы трансформатора может быть достигнуто путём синтеза эквивалентных схем замещения, отражающих, например, электромагнитные контуры попарной комбинации участков магнитопровода по данным опытов питания постоянным током фаз а-б, б-с и а-с. В рассматриваемом случае исключается реакция обмоток, соединённых по схеме треугольника. Пример синтезируемой схемы замещения, исключающей из анализа участок магнитопровода одной из фаз, приведён на рис. 6 б.

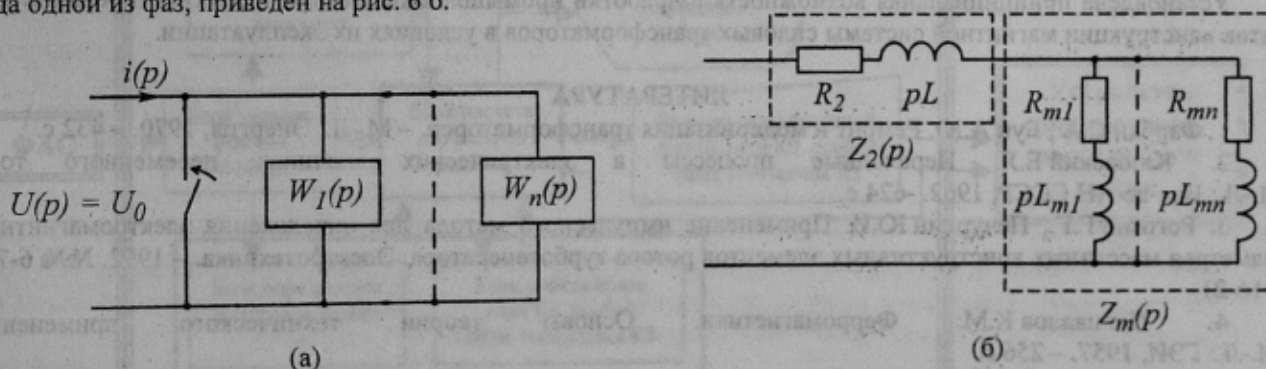


Рис. 6 Операторные схемы замещения трансформатора в опыте затухания постоянного тока  
 а – схема замещения, соответствующая передаточной функции объекта испытания;  
 б – Схема замещения, отражающая физические элементы объекта испытания.

Передаточные функции  $W_1(p) \dots W_n(p)$  на рис. 6 а соответствуют экспоненциальным составляющим тока в контуре затухания постоянного тока.

$$\text{Поскольку } i(t) = \sum_{k=1}^n i_k e^{-\alpha_k t}, \text{ то } i(p) = \sum_{k=1}^n W_k(p) = W(p),$$

где  $W_k(p)$  – передаточная функция  $k$ -той экспоненциальной составляющей затухающего тока в короткозамкнутом контуре вторичной обмотки трансформатора,

$$W_k(p) = i_k \frac{p\tau_k}{1 + p\tau_k}$$

При использовании математического аппарата теории распознавания образов в частотной области комплексного переменного на основании известной связи между интегральными преобразованиями Лапласа и Фурье принимается, что

$$W_k(j\omega) = W_k(p)_{p=j\omega} = \operatorname{Re} W_k(j\omega) + j \operatorname{Im} W_k(j\omega).$$

Значения признаков проводимостей  $W_k(j\omega)$  выбираются в диапазоне высоких значений частот ( $\omega > 1,0$ ), отражающих начальный момент затухания вихревых токов в элементах конструкции магнитопровода.

Образы неисправностей, при применении меры евклидова расстояния, оцениваются по данным расчёта показателя

$$D^2 = \left\| \underline{W} - \underline{W}_{\text{Э}} \right\|^2,$$

где  $\underline{W}$ ,  $\underline{W}_{\text{Э}}$  – подлежащий классификации и эталонный векторы состояния объекта.

При применении метрической меры во временной области

$$W = \begin{pmatrix} W(t_1) \\ W(t_2) \\ \dots \\ W(t_n) \end{pmatrix}, \quad W_{\text{Э}} = \begin{pmatrix} W_{\text{Э}}(t_1) \\ W_{\text{Э}}(t_2) \\ \dots \\ W_{\text{Э}}(t_n) \end{pmatrix}.$$

В частотной области, например, для действительной и мнимой частей эталонного вектора состояний, имеем

$$\operatorname{Re}[W_{\text{Э}}(j\omega)] = \begin{pmatrix} W_{\text{Э}}(s_1) \\ W_{\text{Э}}(s_2) \\ \dots \\ W_{\text{Э}}(s_n) \end{pmatrix}, \quad \operatorname{Im}[W_{\text{Э}}(j\omega)] = \begin{pmatrix} jW_{\text{Э}}(s_1) \\ jW_{\text{Э}}(s_2) \\ \dots \\ jW_{\text{Э}}(s_n) \end{pmatrix}.$$

#### ВЫВОД

Установлена принципиальная возможность разработки промышленной методики диагностирования элементов конструкции магнитной системы силовых трансформаторов в условиях их эксплуатации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Фарбан С.А., Бун А.Ю. Ремонт и модернизация трансформаторов. – М.-Л.: Энергия, 1970. – 432 с.
2. Казовский Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1962. – 624 с.
3. Рогозин Г.Г., Печуркин Ю.И. Применение импульсного метода для определения электромагнитных параметров массивных конструктивных элементов ротора турбогенератора. Электротехника. – 1992. №№ 6-7. – С. 16-21.
4. Поливанов К.М. Ферромагнетики. Основы теории технического применения. – М.-Л.: ГЭИ, 1957. – 256 с.
5. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. – М.: Мир, 1978. – 411 с.