

УДК: 621.31

UDC: 621.31

СТРАТЕГИЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ АКТИВНОЙ ЧАСТИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С УЧЕТОМ СМЕЩЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УВЛАЖНЕНИЯ И НАЛИЧИЯ ВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В ОБМОТКАХ

MAINTENANCE STRATEGY BASED ON THE DIAGNOSTIC RESULTS OF POWER TRANSFORMERS ACTIVE PART WITH ACCOUNT FOR RESONANCE FREQUENCY BIAS DEPENDING ON HUMIDIFICATION AND INTER-WINDING FAULTS

Иванова Зинаида Геннадьевна
аспирант

Ivanova Zinaida Gennadyevna
postgraduate student

Рыбаков Леонид Максимович
д-р техн. наук, профессор
*Марийский государственный университет,
Йошкар-Ола, Россия*

Rybakov Leonid Maksimovich
Dr.Sci.Tech., professor
Mari State University, Yoshkar-Ola, Russia

В статье рассмотрены существующие методы выявления дефектов в обмотках силовых трансформаторов и их недостатки, предложены новые методы и средства оценки работоспособности трансформаторов на основе изменения резонансных частот в обмотках вызванных увлажнением и появлением витковых замыканий

The article contains an overview of the existing methods for the detection of defects in the windings of the power transformers and their shortcomings, presented new methods and tools to evaluate performance of transformers based on the change of the resonance frequencies caused windings humidification and the advent inter-winding fault

Ключевые слова: РЕЗОНАНСНАЯ ЧАСТОТА, РАБОТОСПОСОБНОСТЬ, СИЛОВОЙ ТРАНСФОРМАТОР, МЕЖСЛОЕВАЯ ЕМКОСТЬ, МЕЖВИТКОВАЯ ЕМКОСТЬ ОБМОТОК, ВИТКОВЫЕ ЗАМЫКАНИЯ

Keywords: RESONANCE FREQUENCY, FUNCTIONAL ABILITY, POWER TRANSFORMER, INTERLAYER CAPACITANCE, WINDING CAPACITANCE, INTER-WINDING FAULT

Введение

Надежность электроснабжения АПК в значительной мере зависит от состояния силовых трансформаторов, число которых ежегодно возрастает.

Число отказов силовых трансформаторов 10/0,4 кВ в среднем за год составляет 7,5-9% от числа находящихся в эксплуатации. Главной причиной отказов данных трансформаторов является витковые замыкания (55,2 %) и дефекты в главной изоляции (15,6 %) [1]. Учитывая значительное количество трансформаторов в эксплуатации, обеспечение их работоспособности возможно только за счет качественного обслуживания с использованием новых средств диагностирования т. к традиционные (старые) средства [2, 3] не выявляют дефектов на ранней стадии их возникновения, трудоемкие, обладают большой погрешностью,

чувствительны к температурным изменениям, влиянию электромагнитных полей.

Поэтому важной задачей является создание новых средств диагностирования для выявления дефектов на ранних стадиях их возникновения и организация рациональной стратегии обслуживания электрооборудования по результатам данных диагностирования, что делает работу актуальной.

Объектами исследования являются силовые трансформаторы и средства для их диагностирования.

Предмет исследования. Закономерности, связывающие процесс изменения технического состояния активной части силовых трансформаторов с сопутствующими диагностическими признаками

Методика исследования. Теоретические исследования базировались на законах и методах теоретической электротехники, техники высоких напряжений и волновых процессах в обмотках трансформаторов. Экспериментальные исследования проводились на общепринятых и частных методиках с применением электронно-цифровой аппаратуры и ПЭВМ.

Цель работы. Обеспечение длительного сохранения работоспособного состояния силовых трансформаторов эксплуатируемых на объектах АПК путем организации рациональной стратегии обслуживания на основе использования новых средств и методов диагностирования.

Задачи работы:

– разработать методику расчёта резонансных частот обмоток с учетом изменения диэлектрической проницаемости изоляционной системы активной части «твердая изоляция-масло» и наличии витковых замыканий в обмотках высших напряжений;

- экспериментально замерить изменения резонансных частот обмоток от их состояния и сравнить с расчетными значениями,
- исследовать влияние дефектов на изменение параметров АЧХ,
- разработать устройство диагностирования активной части силовых трансформаторов на основе изменения параметров АЧХ обмоток,
- разработать обобщенную стратегию обслуживания силовых трансформаторов по результатам данных диагностирования.

Состояние исследования и актуальность работы.

Существующие способы выявления дефектов, а именно – увлажнения изоляции в силовых трансформаторах и витковых замыканий в обмотках, в большей степени, являются косвенными и не дают полноценного и достоверного ответа о наличии дефектов.

По результатам литературного обзора составлена таблица сравнения традиционных методов по выявлению увлажнению изоляции и витковых замыканий в активной части трансформатора, таблица 1 [3,4, 10-12]

Таблица 1. – Существующие методы диагностирования состояния силовых трансформаторов и их недостатки

Метод	Недостатки
Измерение сопротивления изоляции	Не выявляется увлажнение изоляции не имеющей сквозного характера. Весьма трудоемок – необходимо измерить по схеме: обмотка ВН-бак, НН-бак, ВН-НН. Зависимость измеряемых значений сопротивления изоляции от местных загрязнений, температуры активной части, влияния диэлектрических показателей масла. Требуется отключение трансформатора на время контроля
Измерение коэффициента абсорбции	Недостаточная чувствительность: значительные изменения степени объемного увлажнения сопровождаются малыми изменениями $K_{абс}$. Требуется отключение трансформатора на время контроля
Метод «емкость–частота»	Малая чувствительность. Зависимость от температуры активной части. Влияние диэлектрических показателей масла. Требуется отключение трансформатора на время контроля
Метод «емкость–температура»	Малая чувствительность. Неоднозначная оценка зависимости отношения $C_{гор}/C_{хол}$ от степени увлажнения. Необходимость подогрева трансформатора до 70–80 °С. Требуется отключение трансформатора на время контроля
Метод «емкость–время»	Значительное влияние характеристик масла, которым заполнен трансформатор, на полученные показатели; требуется отключение трансформатора на время контроля
Метод	Недостатки
Измерение коэффициента истинной абсорбции	Влияние характеристик масла на значение $K_{и}$. Изменение проводимости масла приводит к заметному изменению постоянной времени релаксационного процесса τ . Требуется отключение трансформатора на время контроля.
Измерение тока разрядов	Неоднозначная зависимость тока абсорбции от влагосодержания изоляции, вызванная возрастанием скорости спада тока абсорбции при увлажнении. Значительное влияние характеристик масла. Требуется отключение трансформатора на время контроля
Измерение $tg\delta$	Необходимо использование высокого напряжения для измерения, что сопряжено с повышенной опасностью. Весьма трудоемок – измерение производится по схемам: обмотка ВН-бак, НН-бак, ВН-НН. Обладает высокой погрешностью при проведении измерения: показатели зависят от состояния масла, залитого в трансформатор, температуры активной части. Влияние внешних электромагнитных полей. Выявляет распределенные дефекты, к сосредоточенным не чувствителен. Требуется отключение трансформатора на время контроля.
Измерение параметров ЧР	Значительное влияние на результаты измерений внешних электромагнитных полей. Сложность измерительной установки

Метод	Недостатки
Мониторинг частотных характеристик обмоток силовых трансформаторов	Отсутствие количественных показателей частотных характеристик от степени увлажнения обмоток.
Измерение тока и потерь ХХ при малом напряжении	Сложность снятия остаточного намагничивания перед проведением испытания, которое производится в несколько циклов. Снятие потерь холостого хода требует проведение трех однофазных опытов при номинальном напряжении, что сопряжено с большими затратами времени.
Метод определения полного сопротивления КЗ трансформатора	Сложность проведения измерения связанная с возбуждением обмоток со стороны высокого напряжения ВН и СН, необходимость сопоставления измеренных значений с исходными базовыми значениями, определенными на заводе изготовителя или в ремонтном предприятии. В качестве базовых для трехфазного трансформатора приводятся среднеарифметические значения Z_k всех трех фаз, использование их в качестве базовых не рекомендуется при наличии деформации какой-либо обмотки одной из фаз.
Метод НВИ	Использование метода НВИ затруднено из-за отсутствия базы данных номограмм силовых трансформаторов. Характеристики, снятые для одного оборудования с малыми промежутками времени, могут отличаться друг от друга. Кроме того, диагностика методом НВИ не позволяет количественно оценить возникшие остаточные деформации и требует отключения и расшиновки трансформатора
Метод	Недостатки
Метод частотного анализа	Сложность метода в выявлении характера деформации обмоток, необходимость наличия спектрограммы для каждой обмотки трансформатора. Необходимость снятия остаточного намагничивания трансформатора, использование высокоточных измерительных приборов, испытательная схема должна быть идентична предыдущим испытаниям.

На основании анализа современных методов диагностирования обмоток трансформаторов можно сделать следующие **выводы**:

1. Опыт профилактических проверок состояния изоляции свидетельствует о том, что методы, используемые в настоящее время, еще недостаточно эффективны и не удовлетворяют требованиям эксплуатации.
2. Существующие методы проверки изоляции (измерение $\text{tg}\delta$, $K_{\text{абс}}$, C_2/C_{50} и др.) не обнаруживают опасных ухудшений состояния изоляции, не чувствительны к ее старению, а в некоторых случаях ошибочно оценивают ее изоляции.

3. Все рассмотренные методы (R_{60}/R_{15} , C_2/C_{50} , $C_{гор}/C_{хол}$, $K_{и}$, $\Delta C_{абс}/C$) диагностирования основаны на использовании явления абсорбции. На абсорбционные зависимости изоляции, кроме увлажнения, влияет целый ряд факторов, например, температура, погрешность измерительной аппаратуры, затрудняющих определение состояния изоляции.

4. Существующие методы сложны и трудоемки, требуют привлечения для контроля высококвалифицированных специалистов, а также отключения оборудования на период проверки.

5. Всем методам, кроме метода «емкость-температура», присуща зависимость результатов измерений от физико-химических показателей масла. Продукты разложения масла и твердой изоляции вносят большие погрешности при оценивании состояния изоляции.

6. Многие методы подвержены влиянию электромагнитных полей, которые вносят значительные погрешности в результаты измерения.

7. Все существующие методы контроля состояния обмоток силовых трансформаторов базируются на оценке изменения критериев, прямо или косвенно отражающих изменение емкостных характеристик обмоток.

8. Измерение тока и потерь XX при малом напряжении не может являться методом, гарантирующим обнаружения витковых замыканий в обмотках. Виной тому является факт влияния магнитопровода на результаты измерений.

9. Измерение полного сопротивления короткого замыкания (Z_k) применимо только для предварительного анализа повреждений обмоток силовых трансформаторов и требует уточнения при помощи других более точных методов.

10. Проблемы метода НВИ заключается в отсутствии базы данных номограмм силовых трансформаторов. Характеристики, снятые для одного

оборудования с малыми промежутками времени, могут отличаться друг от друга. Кроме того, диагностика методом НВИ не позволяет количественно оценить возникшие остаточные деформации и требует отключения и расшиновки трансформатора. По осциллограммам НВИ возможно лишь качественная оценка деформации и не всегда удается с полной уверенностью интерпретировать изменения в кривых НВИ.

Метод является наиболее чувствительным для диагностики механического состояния обмоток трансформаторов.

Поэтому нужны дальнейшие исследования по разработке средства диагностирования для выявления увлажнения, наличия витковых замыканий более чувствительных в начальной стадии их возникновения реагирующие к изменению собственных частот колебаний обмоток и возможности использования данных диагностирования для прогнозирования остаточного ресурса.

На основе литературного обзора сделан вывод, что наиболее приемлемым по технической сущности для выявления увлажнения изоляции силовых трансформаторов является переносное устройство контроля изоляции [13], основанное на выявлении частотных характеристик, однако даже данный метод не полностью отражает состояние изоляции, т.к. не регистрируются количественные параметры по обоснованию состояния изоляции.

Для выявления витковых замыканий более объективным является метод частотных характеристик (МЧА) [6, 7]. Он более предпочтителен по сравнению с методом НВИ, т.к. мало зависит от схемы измерений (взаимное расположение измерительных кабелей, влияние ошиновки вблизи объекта, внешние факторы) и позволяет количественно оценивать возникающие в обмотках остаточные деформации, механические смещения.

Постановка и решение задачи по выявлению увлажнения

С точки зрения контроля изоляции силового трансформатора схема замещения обмотки меняется при изменении частоты приложенного напряжения от 0 до бесконечности по следующему алгоритму:

$$R \rightarrow RL \rightarrow RLC \rightarrow LC \rightarrow C, \quad (1)$$

где

R – активное сопротивление изоляции;

L – индуктивность слоя катушки или всей обмотки;

C – емкость обмоток.

Возникновение дефектов, связанные с увлажнением обмоток, сопровождаются изменением значений емкостей, определяемых геометрическими параметрами витка, слоя, обмотки, катушки в целом и их состоянием, и отклонением основной резонансной частоты колебаний обмотки ВН от резонансной (опорной) частоты, имеющейся в базе данных амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) на контролируемый трансформатор.

Для упрощенной схемы замещения обмотки, состоящей из элементов R – L – C (рис. 1), собственная частота контура определяется:

$$f_{\text{соб}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C_{\omega}}}, \quad (2)$$

$$C_{\omega} = C_r + \frac{\Delta C}{1 + \omega^2 T^2},$$

$$T = \Delta C \cdot r,$$

где

C_r – геометрическая емкость, определяемая геометрическими размерами изоляции,

r – сопротивление токам смещения или токам абсорбции;

ΔC – переменная емкость, определяемая процессами поляризации и характеризующая состояние рассматриваемого диэлектрика.

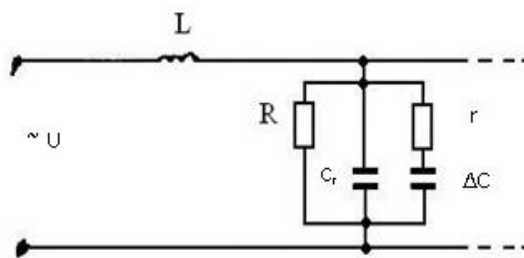


Рисунок 1. - Упрощенная схема замещения обмотки

Изменение собственной частоты данной схемы замещения электрооборудования зависит от величин ΔC и r . При увеличении $\omega \rightarrow \infty$ эквивалентная емкость $C_\omega \rightarrow C_r$. При увлажнении изоляции ΔC возрастает в отличие от C_r , при этом r уменьшается.

Если материал изоляции отвечает требованиям эксплуатации, то соответствующая собственная частота является опорной, относительно которой сравниваются последующие отклонения собственной частоты вследствие изменения состояния изоляции, т.е. ΔC и r . Изменение собственной частоты рассматриваемой схемы замещения находится в зависимости от изменения величин ΔC и r .

Отклонение собственной частоты контролируемого элемента электрооборудования, и в целом электрооборудования, может быть зафиксировано отклонением от состояния резонанса по частоте испытательного напряжения, поданного на электрооборудование. При этом частота испытательного напряжения соответствует опорной частоте.

Резонансные частоты обмоток силовых трансформаторов могут определяться расчетным путем в зависимости от величины диэлектрической проницаемости. Условием расчета является емкостная связь между обмотками низшего и высшего напряжений. При этом параметры схемы замещения принимаются средними по обмотке высшего напряжения.

Методика (алгоритм) расчета резонансных частот обмоток с учетом изменения диэлектрической проницаемости изоляционных систем «твердая изоляция – масло», разработана на основании теории волновых процессов в обмотках трансформаторов [5].

При расчете собственных резонансных частот обмоток имеются затруднения в определении эквивалентной диэлектрической проницаемости изоляционной системы «твердая изоляция – масло» ϵ_r при разных состояниях изоляции по увлажнению.

Обработка результатов анализа влагосодержания в масле эксплуатируемых трансформаторов позволила получить эмпирические выражения для эквивалентной диэлектрической проницаемости от влажности изоляции $\epsilon_r = F(W\%)$ в зависимости от мощности трансформатора (следовательно, с учетом объема масла, залитого в трансформатор). Экспериментально полученные зависимости $\epsilon_r = F(W)$ для изоляции силовых трансформаторов I-II габаритов со слоевой обмоткой приведены на рисунке 2.

Расчетные значения резонансных частот в зависимости от мощности для некоторых типов трансформаторов приведены в таблице 2.

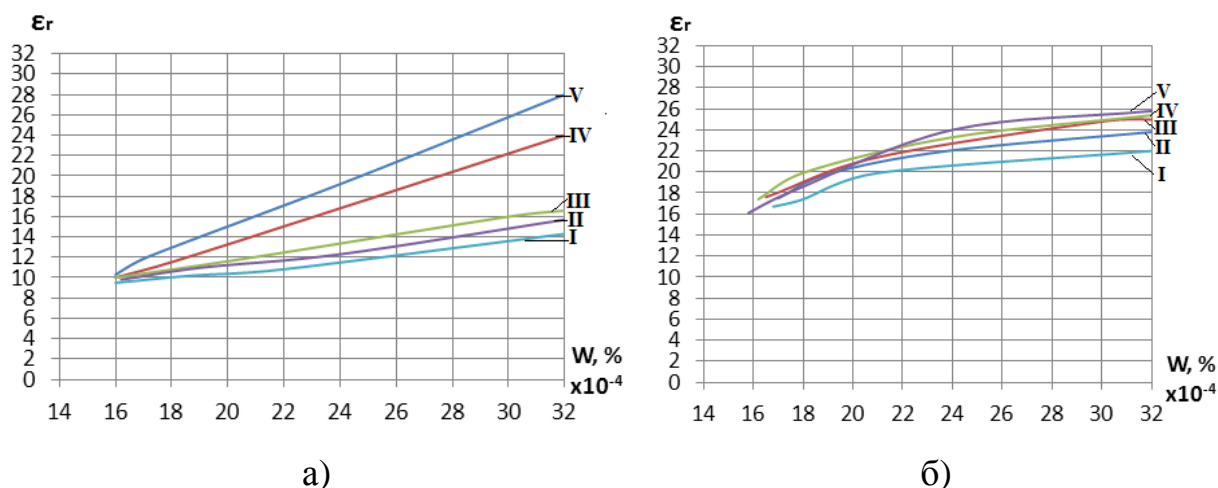


Рисунок 2 – Зависимости $\epsilon_r = F(W\%)$ для низковольтных (а) и высоковольтных (б) обмоток трансформаторов ТМ-30/10 кВ (I); ТМ-63/10

кВ(II); ТМ-100/10 кВ(III); ТМ-160/10(IV); ТМ-250/10 кВ(V)

Таблица 2 – Расчетные значения резонансных частот силовых трансформаторов I-II габаритов при различных состояниях изоляции

Состояние изоляции по увлажнению	Марка трансформатора								
	ТМ-30/10 кВ			ТМ-63/10 кВ			ТМ-160/10 кВ		
	фаза А, кГц	фаза В, кГц	фаза С, кГц	фаза А, кГц	фаза В, кГц	фаза С, кГц	фаза А, кГц	фаза В, кГц	фаза С, кГц
I ($\epsilon_{r1} = 16$)	62,17	64,22	63,5	57,91	56,11	59,9	52,47	56,5	54,41
II ($\epsilon_{r2} = 17,6$)	61,57	64,0	62,4	55,65	52,72	57,65	51,93	55,4	53,44
III ($\epsilon_{r3} = 24,8$)	60,2	63,2	60,8	54,22	51,51	54,22	51,83	53,71	52,92
$f_{рез}$ (опорная), кГц	63			60			56		

Постановка и решение задачи по выявлению витковых замыканий

В настоящее время выявление витковых замыканий используются многочисленные методы, которые приведены в таблице 1.

Методика расчета резонансных частот трансформаторов при моделировании витковых замыканий в обмотках высшего напряжения аналогична расчету резонансных частот при увлажнении и рассчитывается по формуле

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \tag{3}$$

где

L – индуктивность обмотки высокого напряжения;

C – полная емкость обмотки.

Экспериментальные исследования по обоснованию диагностических признаков по увлажнению и витковых замыканий в обмотках

Экспериментальное исследование по обоснованию диагностических признаков силовых трансформаторов проводилось с учетом содержания

влаги в масле 15–33 г/т, что соответствует увлажнению изоляции на основе целлюлозы (главной и витковой) – 2,5–6 %, и моделировании витковых замыканий в верхней, средней, нижней частях обмоток с процентами повреждений 2,5 %; 5 %; 7,5 % и 10 %.

Результаты экспериментальных исследований параметров АЧХ полученных при моделировании увлажнения приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Экспериментальные значения параметров АЧХ трансформатора ТМ-160/10 кВ при I-III состояниях увлажнения внутренней изоляции

$f, \text{кГц}$	47	49	51	52	53	55	56	57	59	61	63	65	
$U_{\text{вк}}, \text{В}$	I	0,065	0,088	0,115	0,130	0,144	0,171	0,178	0,174	0,159	0,134	0,114	0,096
	II	0,084	0,115	0,145	0,155	0,164	0,155	0,145	0,134	0,110	0,090	0,080	0,067
	III	0,095	0,125	0,152	0,160	0,156	0,140	0,130	0,116	0,095	0,080	0,070	0,055
U_{Γ}	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	
$U_{\text{вк}}-U_{\Gamma}, \text{В}$	I	0,015	0,038	0,065	0,08	0,094	0,12	0,128	0,124	0,109	0,084	0,064	0,046
	II	0,034	0,065	0,095	0,105	0,114	0,105	0,095	0,084	0,060	0,040	0,030	0,017
	III	0,045	0,075	0,102	0,110	0,106	0,090	0,080	0,066	0,045	0,030	0,020	0,005
$U_{\text{вк}}/U_{\Gamma}$	I	1,3	1,75	2,3	2,6	2,88	3,42	3,56	3,48	3,18	2,68	2,28	1,92
	II	1,68	2,30	2,90	3,1	3,28	3,10	2,90	2,68	2,20	1,80	1,60	1,34
	III	1,90	2,50	3,04	3,2	3,12	2,80	2,60	2,32	1,94	1,60	1,4	1,10

Сравнение расчетных значений и экспериментально полученных результатов отличаются на 5 %. Смещение резонансных частот от опорных значений в сторону уменьшения свидетельствуют об ухудшения изоляции при увлажнению обмоток.

На рисунке 3 приведены амплитудно-частотная характеристика для одной из фаз силового трансформатора ТМ-160/10 кВ при увлажнении обмоток (влажносодержание в масле 1 – $W < 10$ г/т; 2 – $10 < W < 18$ г/т; 3 – $18 < W < 24$ г/т; 4 – $W > 25$ г/т)

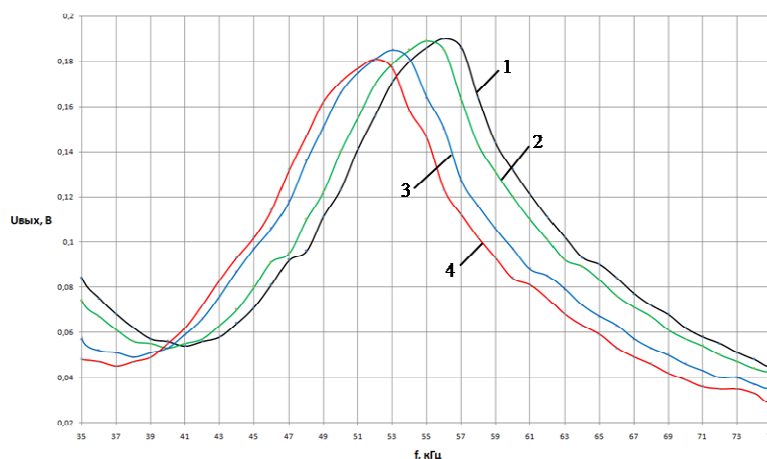


Рисунок 3. Частотные характеристики обмоток трансформатора ТМ-160/10 при их увлажнении.

Результаты моделирования витковых замыканий влияющие на параметры АЧХ приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты исследования АЧХ при витковых замыканиях

Поврежденная фаза, место виткового замыкания (ВЗ)	% повреждений	Смещение резонансных частот на неповрежденных фазах от опорных значений			
		фаза В		фаза С	
		кГц	%	кГц	%
ВЗ в верхней части обмотки ВН фазы А	0 %	67	0 %	67	0 %
	2,5 %	70	4,48 %	67,5	0,75 %
	5 %	72	7,46 %	68,5	2,24 %
	7,5 %	72,5	8,21 %	70	4,48 %
	10 %	74	10,45 %	71	5,97 %
ВЗ в нижней части обмотки ВН фазы А	0 %	67	0 %	67	0 %
	2,5 %	70	4,48 %	67,5	0,75 %
	5 %	71	5,97 %	68,5	2,24 %
	7,5 %	72,5	8,21 %	71	5,97 %
	10 %	74	10,45 %	72	7,46 %

Моделированием витковых замыканий также установлено, что при увеличении количества короткозамкнутых витков от 0,1 до 10 % резонансная частота возрастает практически пропорционально уровню повреждения, следовательно, смещение резонансных частот в сторону увеличения является диагностическим признаком наличия витковых замыканий (рисунок 4). Уровни напряжения АЧХ и основной резонансной частоты будут значительно отличаться от опорных значений.

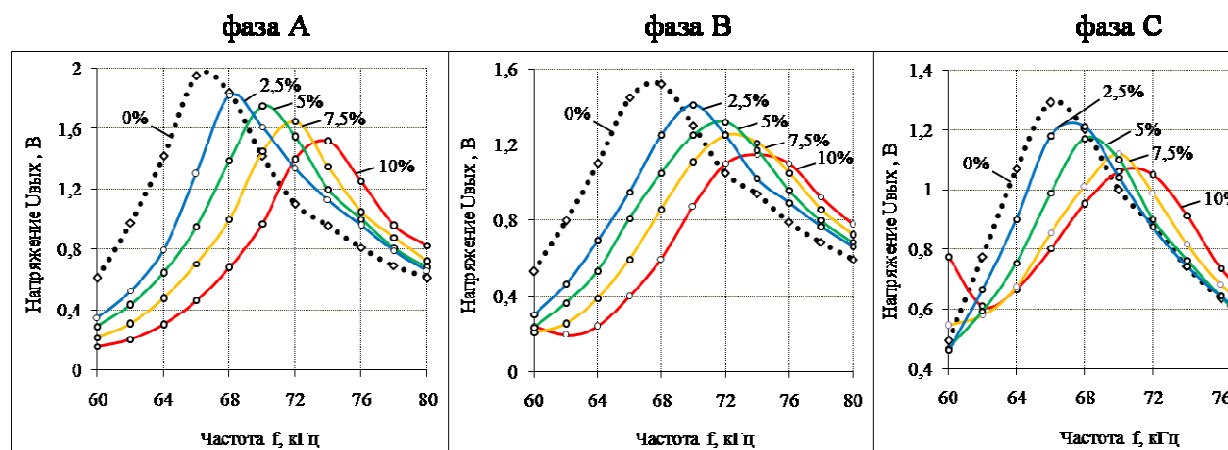


Рисунок 4 - Графики АЧХ фаз А, В и С при витковом замыкании в верхней части обмотки ВН фазы А.

Оценка масштаба повреждения производится определением величины смещения резонансной частоты обмотки при очередном контроле относительно основной резонансной частоты, снятой при вводе трансформатора в эксплуатацию.

Разработка устройств диагностирования активной части силовых трансформаторов на основе изменения параметров АЧХ обмоток

Для повышения достоверности выявления дефектов в обмотках высокого напряжения силовых трансформаторов предлагается устройство для выявления витковых замыканий и определения увлажнения изоляции обмоток силовых трансформаторов (рисунок 5).

Устройство содержит в своем составе генератор синусоидальных сигналов высокой частоты 1, цифровой осциллограф 2 для контроля формы входного сигнала, милливольтметр 3 – для контроля величины входного сигнала. Блок управления переключениями 4 – осуществляет

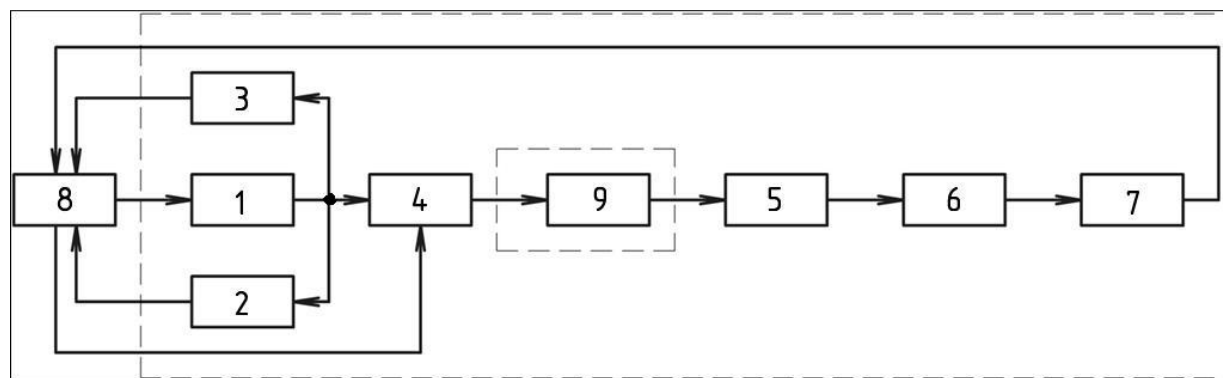


Рисунок 5 – Схема устройства контроля состояния обмоток

выбор исследуемой фазы (А, В или С) одновременно выполняет заземление выводов «свободных» обмоток фаз. Также в состав устройства входят блок приема сигналов 5 – обеспечивает одновременный прием сигналов-откликов с обмоток ВН фаз А, В и С, милливольтметр 6 – для определения величины выходного сигнала, аналого-цифровой преобразователь 7 и компьютер 8. Силовой трансформатор обозначен под цифрой 9.

Полученные сигналы с АЦП поступают для обработки в компьютер 8 и сохраняются в базе данных.

Устройство работает следующим образом.

Генератор 1 вырабатывает высокочастотный синусоидальный сигнал, который поступает в блок управления 4, затем на низковольтную обмотку НН контролируемого силового трансформатора 9, далее передается на обмотку высокого напряжения ВН и поступает на блок приема сигналов 5, милливольтметр 6, аналого-цифровой преобразователь 7 и в итоге на компьютер 8. Базовые высокочастотные сигналы от генератора 1 также поступает в компьютер 8. Компьютер 8 по заданной программе проводит расчет критериев оценки состояния изоляции. В дальнейшем производится сравнение текущих величин с предыдущими величинами хранящимися в памяти компьютера. Метод контроля состояния обмоток силового трансформатора базируется на явлении: при наличии витковых замыканиях в обмотках нелинейные частотные

характеристики смещаются в сторону увеличения частоты от опорного значения резонансной частоты. Уровень дефектов в обмотках вызванных витковыми замыканиями оценивается процентным отношением смещения резонансной частоты от опорного значения приведенных на рисунке 4. Анализ графиков АЧХ позволяет выявить фазы и место повреждения по характеру изменения амплитудно-частотных характеристик (таблица 4). При увлажнении изоляции резонансная частота смещается в сторону уменьшения от опорного значения (рисунок 3, таблица 3). В результате оценочные величины будут отличаться от первоначальных, когда в обмотке не было витковых замыканий и уровень изоляции соответствовал эксплуатационным нормативным требованиям [9]. По динамике отклонения измеренных величин АЧХ контролируемого трансформатора можно оценить характер, уровень и место расположения дефектов, что позволяет прогнозировать и сохранить работоспособность силового трансформатора на основе выявления динамики ухудшения состояния обмоток.

Разработка стратегии обслуживания силовых трансформаторов с использованием результатов диагностирования по данным их отказов за многолетний период наблюдений.

Обобщенная стратегия обслуживания трансформаторов по результатам диагностирования технического состояния представлено на рисунке 6.

На основе предложенной стратегии обслуживания проводится определение показателя эффективности для различных видов обслуживания:

$$OC - УГД - Т - АЗ(К), \quad (4)$$

где

OC – осмотр

УГД – углубленный осмотр с применением средств диагностирования,

Т – текущий ремонт

АЗ – аварийная замена

К – капитальный ремонт.

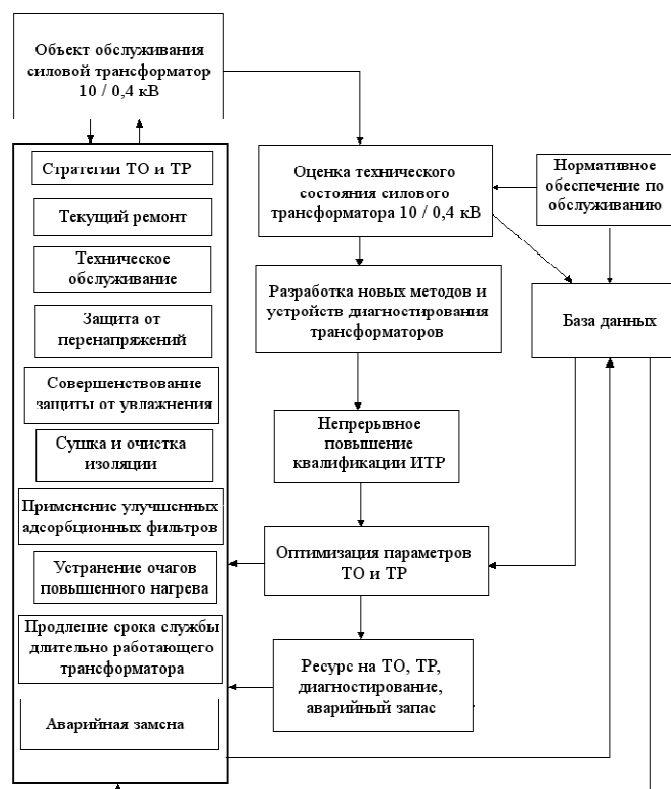


Рисунок 6. – Обобщенная стратегия обслуживания трансформаторов I-II габаритов

Для принятия видов стратегий необходимо иметь статистические данные по отказам и авариям оборудования на предприятиях АПК, удельное число отказов силовых трансформаторов по годам за последние 10 лет. При обработке статистических данных по годам вычисляются среднее арифметическое, дисперсия, среднее квадратическое отклонение, коэффициенты вариации. Проводится анализ однородности исходного статистического материала с целью объединения объема информации в одну общую выборку для проведения дальнейших исследований,

определение резко выделяющихся данных наблюдений, доверительных интервалов, значения показателя безотказности с доверительной вероятностью 0,9. Для обработки статистического материала применяется пакет программы Statistika 6.0.

Для использования статистических данных при определении параметров обобщенной стратегии технического обслуживания в математических моделях оптимизации ТО потребовалось математическое описание исследуемых величин. При исследовании вероятностных характеристик отказов из множества законов распределения использовались следующие: нормальный, логарифмический нормальный, Вейбула-Гнеденко, Гамма, геометрический, равномерный, биномиальный, Пуассона, Эрланга, экспоненциальный, χ -квадрат. Для определения параметров распределения использовались методы моментов и наименьших квадратов. Проверка гипотезы отказа аппаратов и элементов электрооборудования, согласованности статистической функции распределения плотности вероятности отказов с выбранной теоретической осуществлялась по критерию Колмогорова, χ^2 -Пирсона, которые основаны на различных принципах и характеризуют выборку с различных сторон и дополняют друг друга.

Для выявления периодических и квазипериодических свойств временных рядов распределения числа отказов по месяцам, интерпретации динамики временных рядов использовалось дискретное преобразование Фурье, которое позволило провести оценку спектра ряда.

Проведенный анализ безотказности трансформаторов показывает целесообразность перехода на стратегию обслуживания по фактическому состоянию с применением специальных средств диагностирования на основе регистрации параметров АЧХ силовых трансформаторов, которые позволяют не только обнаружить дефекты на ранней стадии их возникновения, но и определить остаточный ресурс работы до следующего

технического обслуживания. Основным документом регламентирующим перечень контроля состояния силовых трансформаторов в процессе их эксплуатации, предельно допустимых значений контролируемых параметров и периодичности контроля является РД 34.45-51.300-97. Однако указанный документ не позволяет прогнозировать и обосновать продление срока службы длительно эксплуатируемых трансформаторов. Нужны дополнительные диагностические признаки для своевременного вывода в ремонт и предупреждения аварий, связанных с состоянием трансформаторов, так как капитальный ремонт трансформатора при раннем выявлении дефектов обходится на порядок дешевле, чем приобретение нового. Наряду с изоляцией и витковыми замыканиями необходима оценка состояния магнитопровода, что связано с увеличением потерь холостого хода, фактические значения которых превышают каталожные в два раза и более у длительно работающих трансформаторов.

Заключение

1. Разработана методика расчета резонансных частот обмоток силовых трансформаторов для работоспособного трансформатора и при наличии дефектов, связанных с увлажнением и наличием витковых замыканий.

2. Проведены экспериментальные исследования по изменению параметров резонансных частот при моделировании различных видов дефектов. Расчетные и экспериментальные значения параметров резонансных частот отличаются не более чем на 5 %.

3. В качестве диагностических признаков оценки состояния обмоток трансформаторов рекомендуется использовать смещение резонансных частот от опорных (начальных) значений: смещение резонансных частот в сторону уменьшения свидетельствует о наличии увлажнения изоляционной системы «твердая изоляция – масло»; смещение

резонансных частот в сторону увеличения свидетельствует о наличии витковых замыканий в обмотках.

4. Предложено устройство диагностирования активной части трансформаторов на основе изменения параметров АЧХ.

5. Для обработки статистических данных по отказам силовых трансформаторов I-II габаритов при определении обобщенной стратегии обслуживания использовались законы распределения отказов электрооборудования и его элементов. Проведенный анализ безотказности трансформаторов показывает целесообразность перехода на обобщенную стратегию обслуживания по фактическому состоянию с применением непрерывного контроля и мониторинга специальными средствами диагностирования на основе регистрации параметров АЧХ силовых трансформаторов, которые позволяют оценить характер, уровень, место расположения дефектов и определить остаточный ресурс.

Литература

1. Рыбаков, Л.М. Методы и средства обеспечения работоспособности электрических распределительных сетей 10 кВ: науч. изд. / Л.М. Рыбаков. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 421 с.
2. Макарова, Н.Л. Диагностирование состояния изоляции силовых трансформаторов сельских электрических сетей: монография [Текст] / Н.Л. Макарова, Р.С. Ахметшин. – М.: МГАУ, 2012. – 90 с.
3. Сви, П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения / П.М. Сви. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.
4. Калявин, В.П. Надежность и диагностика элементов электроустановок: учеб. Пособие / В.П. Калявин, Л.М. Рыбаков. – СПб.: Элмор, 2009. – 336 с.
5. Геллер, Б. Волновые процессы в электрических машинах / Б. Геллер, А. Веверка. – М.: ГЭИ, 1960. – 631 с.
6. Хренников, А.Ю. Диагностические модели для контроля механического состояния обмоток силовых трансформаторов на основе метода низковольтных импульсов и частотного анализа / А.Ю. Хренников // Энергоэксперт. – 2010. – №6. – с.42-47.
7. Дробышевский, А.А. Количественная оценка результатов импульсного дефектографирования обмоток силовых трансформаторов / А.А. Дробышевский, Е.И. Левицкая // Электротехника. – 1990. – №5.
8. Хренников А.Ю. Опыт диагностики силового трансформаторного оборудования / Хренников А.Ю. // Электротехника. – 2010.

9. Объем и нормы испытания электрооборудования [Текст]/ под общ. ред.: Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконянц. – 6-е изд., с изм. и доп. – М.: Изд-во НУ ЭНАС, 2002. – 256 с.
10. ГОСТ 3484.1-88. Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний; введ. 01.01.90. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 40 с.
11. ГОСТ 3484.3-88 Трансформаторы силовые. Методы измерений диэлектрических параметров изоляции; введ. 01.01.90. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 8 с.
12. Диагностическая установка «Импульс-10» [Электронный ресурс] // Режим доступа http://www.vei.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=151&Itemid=44 свободный.
13. Пат. 2245559 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/14. Переносное устройство для контроля состояния изоляции силовых трансформаторов [Текст] / Рыбаков Л.М.,Ахметшин Р.С.; заявитель и патентообладатель Марийский государственный университет (RU). – № 2003133332; заявл. 17.11.2003; опубл. 27.01.2005, Бюл. № 3. - 4 с. : ил.

References

1. Rybakov, L.M. Metody i sredstva obespechenija rabotosposobnosti jelektricheskikh raspredelitel'nyh setej 10 kV: nauch. izd. / L.M. Rybakov. – М.: Jenergoatomizdat, 2004. – 421 s.
2. Makarova, N.L. Diagnostirovanie sostojanija izoljicii silovyh transformatorov sel'skih jelektricheskikh setej: monografija [Tekst] / N.L. Makarova, R.S. Ahmetshin. – М.: MGAU, 2012. – 90 s.
3. Svi, P.M. Metody i sredstva diagnostiki oborudovanija vysokogo naprjazhenija / P.M. Svi. – М.: Jenergoatomizdat, 1992. – 240 s.
4. Kaljavin, V.P. Nadezhnost' i diagnostika jelementov jelektrostanovok: ucheb. Posobie / V.P. Kaljavin, L.M. Rybakov. – SPb.: Jelmor, 2009. – 336 s.
5. Geller, B. Volnovye processy v jelektricheskikh mashinah / B. Geller, A. Veverka. – М.: GJeI, 1960. – 631 s.
6. Hrennikov, A.Ju. Diagnosticheskie modeli dlja kontrolja mehanicheskogo sostojanija obmotok silovyh transformatorov na osnove metoda nizkovol'nyh impul'sov i chastotnogo analiza / A.Ju. Hrennikov // Jenergojekspt. – 2010. – №6. – s.42-47.
7. Drobyshevskij, A.A. Kolichestvennaja ocenka rezul'tatov impul'snogo defektografirovanija obmotok silovyh transformatorov / A.A. Drobyshevskij, E.I. Levickaja // Jelektrotehnika. – 1990. – №5.
8. Hrennikov A.Ju. Opyt diagnostiki silovogo transformatornogo oborudovanija / Hrennikov A.Ju. // Jelektrotehnika. – 2010.
9. Ob'em i normy ispytaniya jelektrooborudovanija [Tekst]/ pod obshh. red.: B.A. Alekseeva, F.L. Kogana, L.G. Mamikonjanc. – 6-е изд., с изм. и доп. – М.: Изд-во НУ JeNAS, 2002. – 256 с.
10. GOST 3484.1-88. Transformatory silovye. Metody jelektromagnitnyh ispytanij; vved. 01.01.90. – М.: Jenergoatomizdat, 1990. – 40 s.
11. GOST 3484.3-88 Transformatory silovye. Metody izmerenij dijelektricheskikh parametrov izoljicii; vved. 01.01.90. – М.: Jenergoatomizdat, 1990. – 8 s.
12. Diagnosticheskaja ustanovka «Impul's-10» [Jelektronnyj resurs] // Rezhim dostupa http://www.vei.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=151&Itemid=44 svobodnyj.
13. Pat. 2245559 Rossijskaja Federacija, MPK G 01 R 31/14. Perenosnoe ustrojstvo dlja kontrolja sostojanija izoljicii silovyh transformatorov [Tekst] / Rybakov L.M.,Ahmetshin

R.S.; заявитель и патентообладатель Мариjsкий государственный университет (RU). – № 2003133332; заявл. 17.11.2003; опubl. 27.01.2005, Вjul. № 3. - 4 с. : ил.