

4. Ф е д о р о в а, И. А. Техничко-экономическое сравнение основных средств повышения динамической устойчивости электропередачи / И. А. Федорова // Труды Института энергетики АН Узбекской ССР. – Ташкент, 1955. – Вып. 8. – С. 62–85.
5. П о с п е л о в, Г. Е. О повышении динамической устойчивости дальних электропередач / Г. Е. Поспелов // Электричество. – 1953. – № 6.
6. Ф е д о р о в а, И. А. Эффективность средств повышения динамической устойчивости систем электропередач / И. А. Федорова, Г. Е. Поспелов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1990. – № 7.
7. К а л е н т и о н о к, Е. В. Устойчивость электроэнергетических систем / Е. В. Калентионок. – Минск: Техноперспектива, 2008.
8. П о с п е л о в, Г. Е. Некоторые технические вопросы применения последовательной статической компенсации в дальней мощной электропередаче / Г. Е. Поспелов // Труды института энергетики АН Узбекской ССР. – Ташкент, 1953. – Вып. 7. – С. 28–69.
9. Г р е х о в, А. В. Повышение динамической устойчивости электрических систем включением нагрузочных сопротивлений / А. В. Грехов // Труды Института энергетики АН Узбекской ССР. – Ташкент, 1958. – Вып. 11. – С. 127–155.
10. К о щ е е в, Л. А. Об эффективности применения управляющих устройств в электрической сети / Л. А. Кошеев, В. А. Шлайфштейн // Электрические станции. – 2005. – № 12. – С. 30–38.
11. М е т о д и ч е с к и е указания по устойчивости энергосистем: утверждены приказом Минэнерго России № 277 от 10.06.2003.

Представлена кафедрой  
электрических систем

Поступила 12.02.2009

УДК 621.317.63

## **МЕТОДОЛОГИЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА**

**Докт. техн. наук БРАНОВИЦКИЙ И. И., МАЦКЕВИЧ П. Д., СКУРТУ И. Т.**

*Институт прикладной физики НАН Беларуси*

По оценкам специалистов, средняя выработка ресурса электроэнергетического оборудования, эксплуатируемого в различных отраслях народного хозяйства Беларуси, как и других стран СНГ, составляет 60–70 % и более. Нарушение нормального режима работы, обусловленного, например, появлением дефектов в магнитопроводах или обмотках изделия, приводит к ухудшению его технических характеристик, а при неконтролируемом развитии событий оборудование может выйти из строя с серьезными последствиями. В такой ситуации первостепенное значение приобретает обеспечение надежной работы указанного оборудования, важнейшим элементом которой является его эффективное диагностирование. Например, на стратегически важных силовых трансформаторах целесообразно использование системы контроля и наблюдения в режиме реального времени [1, 2]. Однако из-за высокой себестоимости такие системы оправданы, как сказано выше, лишь на наиболее ответственном оборудовании. Для диагностирования более широкого класса силовых трансформаторов более реальным является проведение их периодических оперативных испытаний по разработанным методикам в условиях эксплуатации. Создаваемые при

этом средства контроля, реализующие указанные методики, могут использоваться и при приемо-сдаточных испытаниях электрооборудования. В данной статье излагаются некоторые результаты работы по созданию методов и средств диагностирования электроэнергетического оборудования (ЭО), включая силовые трансформаторы и электрические машины постоянного тока.

Одной из наиболее распространенных причин выхода трансформаторов из строя являются дефекты в изоляции обмоток [3, 4], обуславливающие при этом витковые замыкания. Появление короткозамкнутых контуров (КЗК), сцепленных с основным магнитным потоком в сердечнике, существенно ухудшает технические характеристики электрооборудования и надежность его работы. Действительно, магнитное поле  $\bar{H}_k$  короткозамкнутого контура с током, противодействуя магнитному полю  $\bar{H}_0$  обмоток, приводит к изменению поля намагничивания  $\bar{H}_n$ , которое может рассматриваться как сумма полей  $\bar{H}_0$  и  $\bar{H}_k$ . Таким образом, появление КЗК непосредственно влияет благодаря собственному магнитному полю  $\bar{H}_k$  на процессы перемагничивания в указанном магнитопроводе [5] и на его магнитные характеристики, например приводит к существенному росту магнитных потерь, уменьшая таким образом КПД изделия. На рис. 1 представлены полученные в результате исследований основные кривые намагничивания материала витого магнитопровода из электротехнической стали в отсутствие и при наличии КЗК при различных значениях сечения провода в короткозамкнутом контуре. Сравнение этих кривых дает наглядное представление о влиянии магнитного поля  $\bar{H}_k$  как размагничивающего фактора, противодействующего магнитному полю обмотки  $\bar{H}_0$ . Действительно, из рис. 1 видно, что для достижения требуемого значения магнитной индукции  $B_m$  в материале магнитопровода напряженность магнитного поля  $\bar{H}_{m0}$  обмотки при наличии КЗК и увеличении в нем сечения  $S$  провода должна быть существенно больше, чем в отсутствие КЗК, в этом случае обеспечено необходимое эффективное поле намагничивания  $\bar{H}_n$ . При этом с увеличением сечения  $S$  провода в КЗК растут индуцированный в нем ток, соответственно напряженность  $\bar{H}_k$  его магнитного поля, противодействующего магнитному полю  $\bar{H}_0$  обмотки.

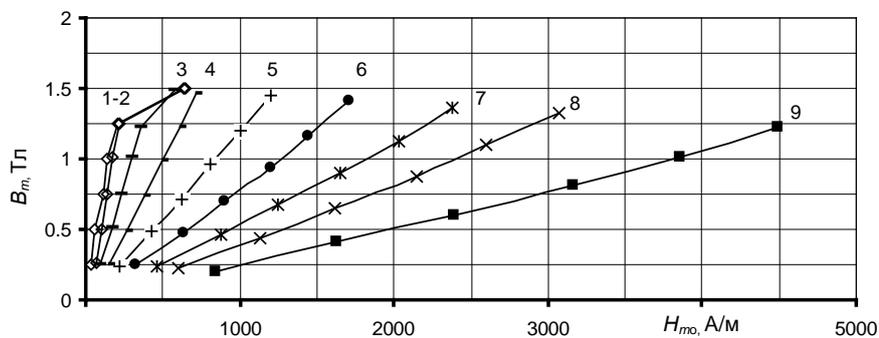


Рис. 1. Кривые намагничивания материала магнитопровода из электротехнической стали при различных значениях сечения  $S$  провода в КЗК: 1 – без КЗК; 2 –  $S = 0,03$  мм<sup>2</sup>; 3 – 0,11; 4 – 0,25; 5 – 0,53; 6 – 0,78; 7 – 1,19; 8 – 1,79; 9 – 2,06 мм<sup>2</sup>

Магнитные характеристики материала магнитопровода, в том числе основные кривые намагничивания, могут ухудшаться в процессе эксплуатации (старение) или, например, благодаря появлению электрического контакта между пластинами из-за нарушения их изоляционного слоя. Все это также приводит к ухудшению технических характеристик ЭО. В этой связи представляется перспективным проводить диагностирование ЭО через анализ информации, получаемой при измерении его основных характеристик, которые являются «отражением» технического состояния изделия. Исходя из этого в Институте прикладной физики в результате исследований получила развитие соответствующая методология испытаний силовых трансформаторов. Она предполагает измерение и расчет основных параметров силовых трансформаторов в режиме холостого хода, таких как значения токов холостого хода по трем фазам с гармоническим анализом соответствующих кривых тока, значений фазных напряжений, величин активной, реактивной и полной мощности по трем фазам, значения углов сдвига фаз между током и напряжением по каждой фазе, величин высокочастотной составляющей в кривой тока по каждой фазе и др. При этом проводится анализ динамики изменения значений указанных параметров трансформаторов при их периодических испытаниях в условиях эксплуатации и соотношений между их значениями. Совокупность получаемых в результате данных содержит объективную информацию, на основе анализа которой можно судить о техническом состоянии изделия. Описанная методология испытаний силовых трансформаторов реализована в приборе ДСТ-1М (рис. 2а), внесенном в Государственный реестр измерительных приборов Республики Беларусь.



Рис. 2. Измерительные средства для испытания электроэнергетического оборудования: а – силовых трансформаторов – прибор ДСТ-1М; б – электрических машин постоянного тока – диагностический комплекс ИПЭМ

Принципиально такие же подходы были использованы при развитии методов и создании средств диагностирования электрических машин постоянного тока, в частности при их приемо-сдаточных испытаниях. Методология испытаний основывается на сравнении измеренных значений параметров испытываемой машины с их предельно допустимыми значениями. Процедура испытаний характерна тем, что измерения параметров электрических машин и сравнительный анализ результатов измерения осуществляются при различных режимах работы этих машин. При каждом режиме работы машины измеряется и анали-

зируется комплекс ее параметров, совокупность измеренных значений которых в сопоставлении с соответствующей совокупностью их нормированных предельных значений дает объективную информацию, на основе анализа которой можно судить о техническом состоянии испытуемой машины. Для осуществления программно реализуемой процедуры измерения и анализа параметров электрических машин при их испытаниях в различных режимах работы разработан и метрологически аттестован диагностический комплекс ИПЭМ (рис. 2б).

Указанные методики испытаний предполагают, о чем говорилось выше, измерение комплекса электрических параметров оборудования. Одним из основных информативных параметров, измеряемых, например, при испытаниях трансформаторов, является мощность. Рассмотрим некоторые вопросы, связанные с обеспечением ее корректного измерения.

Поступающие на вход прибора измеряемые токи и напряжения имеют сдвиг по фазе, который определяется углом  $\theta$ . Однако индуктивные и емкостные элементы, содержащиеся в измерительной схеме прибора, обуславливают дополнительный фазовый сдвиг между ними, определяемый углом  $\varphi$ . Таким образом, истинная активная мощность входного тока

$$P = VI \cos \theta, \quad (1)$$

где  $V$  – действующее значение входного переменного напряжения;  $I$  – то же входного тока;  $\cos \theta$  – истинный коэффициент мощности.

Измеренная прибором мощность входного тока определится следующим образом:

$$P' = k_V k_I V' I' \cos(\theta + \varphi), \quad (2)$$

где  $k_V$  – масштабный коэффициент по напряжению ( $V = k_V V'$ );  $k_I$  – то же по току ( $I = k_I I'$ );  $\cos(\theta + \varphi)$  – измеренный коэффициент мощности.

Следовательно, ошибка измерения мощности, обусловленная влиянием элементов прибора:

$$E = 1 - \frac{P'}{P} = 1 - \frac{\cos(\theta + \varphi)}{\cos \theta}. \quad (3)$$

Дополнительные фазовые сдвиги, вносимые каналами тока и каналами напряжения, суммируются, приводя к ошибке

$$E_{\text{summ}} = 1 - \frac{\cos(\theta + \Delta\varphi_{\text{curr}} - \Delta\varphi_{\text{volt}})}{\cos \theta}, \quad (4)$$

где  $\Delta\varphi_{\text{curr}}$ ,  $\Delta\varphi_{\text{volt}}$  – разность фазовых сдвигов в каналах тока и напряжения, обусловленных влиянием индуктивных и емкостных элементов при колебаниях значений их характеристик относительно номинального в пределах допуска и при точном совпадении с номинальным.

К числу элементов цепи измерительного прибора, влияющих на фазовый сдвиг между током и напряжением, относятся активные фильтры низких частот (ФНЧ) для каждого из каналов по току и напряжению. Проведем статистический анализ влияния ошибок, вносимых ФНЧ на точность измерения мощно-

сти. Причиной дополнительных сдвигов сигнала в каналах, вызванных ФНЧ, является, как сказано выше, нестабильность реальных значений номиналов резисторов и конденсаторов, входящих в их состав и распределенных случайным образом в пределах допусков. Известно, что фазочастотная характеристика (ФЧХ) канала, являющаяся функцией частоты, зависит также от значений номиналов элементов, составляющих входные цепи:

$$\psi(f) = F(f, \{X_1\} \dots \{X_k\}). \quad (5)$$

При фиксированной частоте функция (5) в зависимости от реальных значений номиналов, распределенных в пределах допуска для каждого элемента из каждого массива, будет характеризоваться минимальным и максимальным значениями, которые будут определяться элементами массивов допусков  $\{tolX_1\} \dots \{tolX_k\}$ . Определим функции:

$$F_{high} = F(f, \{X_1 + tolX_1\} \dots \{X_k + tolX_k\}); \quad (6)$$

$$F_{low} = F(f, \{X_1 - tolX_1\} \dots \{X_k - tolX_k\}). \quad (7)$$

Функции (6) и (7) – это зависимости соответственно максимального и минимального значений ФЧХ (5) от значений параметров элементов с учетом допусков. Использование этих функций применительно к каждой паре дуальных каналов позволяет оценить максимально возможное (предельное) значение погрешности измерения, т. е. наихудший случай. Суммарная ошибка измерения активной мощности на фиксированной частоте по всем каналам будет определяться следующим образом:

$$ErrGlobal(\theta, \{tolX_1\} \dots \{tolX_k\}) = m - \sum_{i=1}^m \frac{\cos(\theta + \varphi_{i\,err})}{\cos(\theta)}, \quad (8)$$

где  $\varphi_{i\,err} = (F_{i\,high\,curr}(\theta, \{tolX_1\} \dots \{tolX_k\}) - F_{i\,low\,volt}(\theta, \{tolX_1\} \dots \{tolX_k\}))$  – разный сдвиг  $i$ -го канала;  $m$  – количество каналов, равное количеству фаз сигнала. Для активного ФНЧ прибора функции (5)–(7) для каждой фазы имеют вид:

$$\psi(f) = -\arctg \left[ \frac{(2\pi f)C_2(R_1 + R_2)}{1 - (2\pi f)^2 C_1 C_2 R_1 R_2} \right]; \quad (9)$$

$$F_{high}(f, tolC, tolR) = -\arctg \left[ \frac{(2\pi f)C_2(1 + tolC)[R_1(1 + tolR) + R_2(1 + tolR)]}{1 - (2\pi f)^2 C_1(1 + tolC)C_2(1 + tolC)R_1(1 + tolR)R_2(1 + tolR)} \right]; \quad (10)$$

$$F_{low}(f, tolC, tolR) = -\arctg \left[ \frac{(2\pi f)C_2(1 - tolC)[R_1(1 - tolR) + R_2(1 - tolR)]}{1 - (2\pi f)^2 C_1(1 - tolC)C_2(1 - tolC)R_1(1 - tolR)R_2(1 - tolR)} \right]. \quad (11)$$

Выражения (10) и (11) представляют собой зависимости фазы сигнала от частоты и допусков для «верхнего» и «нижнего» случаев соответственно; здесь  $tolR$  и  $tolC$  – допуски для резисторов и конденсаторов. Зависимости максимальной ошибки измерения активной мощности от угла сдвига фаз  $\theta$  в нагрузке при различных значениях допусков  $\delta R$  и  $\delta C$  соответственно для резисторов и конденсаторов, рассчитанные по формуле (8), представлены на рис. 3.

Реальные значения номиналов резисторов и конденсаторов распределяются в пределах допусков по нормальному закону. Расчет зависимостей ошибки измерения мощности от угла сдвига фаз при нормальном законе распределения значений номиналов резисторов и конденсаторов производился на основе данных, полученных при численном моделировании работы входных цепей, содержащих каскады ФНЧ. Для моделирования вычислялись на основе (9) ряды паразитных фазовых сдвигов  $\{\{\Delta\varphi_i\}_M\}$ .

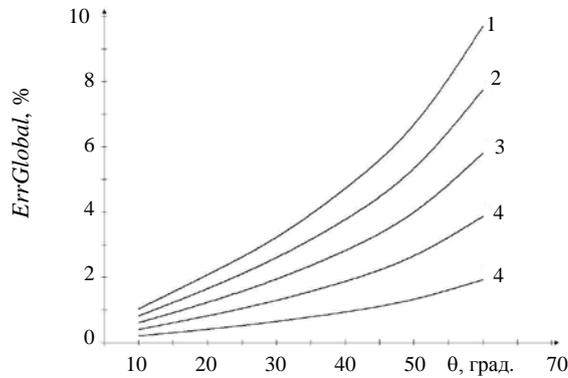


Рис. 3. Максимальная ошибка измерения активной мощности при различных значениях  $\delta R$  и  $\delta C$ : 1 –  $\delta C = 5\%$ ,  $\delta R = 0,5\%$ ; 2 – 4, 0,4; ...; 5 – 1%, 0,1%

Здесь  $M$  – общее количество ФНЧ во входных цепях прибора, равное 18;  $i = 1, \dots, N$ ,  $N = 10000$ . Для вычисления значений элементов 18 рядов генерировались четыре ряда параметров элементов (для двух резисторов и двух конденсаторов) на каждый фильтр. Таким образом, общее количество рядов составляло 72. При этом вычислялись сдвиги для каждого фазового канала как комбинации  $\Delta\varphi_i$ :

$$\{\Delta\varphi_{Ai}\} = (\Delta\varphi_{1i} + \Delta\varphi_{2i} + \Delta\varphi_{3i}) - (\Delta\varphi_{10i} + \Delta\varphi_{11i} + \Delta\varphi_{12i}); \quad (12)$$

$$\{\Delta\varphi_{Bi}\} = (\Delta\varphi_{4i} + \Delta\varphi_{5i} + \Delta\varphi_{6i}) - (\Delta\varphi_{13i} + \Delta\varphi_{14i} + \Delta\varphi_{15i}); \quad (13)$$

$$\{\Delta\varphi_{Ci}\} = (\Delta\varphi_{7i} + \Delta\varphi_{8i} + \Delta\varphi_{9i}) - (\Delta\varphi_{16i} + \Delta\varphi_{17i} + \Delta\varphi_{18i}). \quad (14)$$

В (12)–(14) группирование по три слагаемых в каждой скобке обусловлено наличием в каналах тока (первые скобки в указанных выражениях) и каналах напряжения (вторые скобки) каждой фазы трех ФНЧ второго порядка. Далее с использованием выражения (8) формировался ряд  $\{ErrGlobal_i\}$ , для которого вычислялось среднеквадратическое отклонение:

$$\sigma_{global} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ErrGlobal_i - m_{global})^2}, \quad (15)$$

где  $m_{global} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ErrGlobal_i$ . На рис. 4 представлены полученные из выра-

жения (15) графики 1–5 зависимости среднеквадратического отклонения суммарной ошибки измерения мощности от угла сдвига фаз в нагрузке при различных значениях допусков  $\delta R$  и  $\delta C$  и распределении реальных значений номиналов резисторов и конденсаторов в пределах этих допусков по нормальному закону. Графики 1'–5' дают эту же зависимость для случая, когда паразитный сдвиг в одном канале скомпенсирован с помощью рассчитанного компенсационного полинома [6]. В целях экономии времени и процессорных ресурсов при калибровке серийно выпускаемых приборов полином для цифровой компенсации может рассчитываться только для одной фазы. При этом в процессе калибровки ошибка, описываемая (4), учитывается для одного из фазовых каналов как константа, смещающая полином по оси ординат.

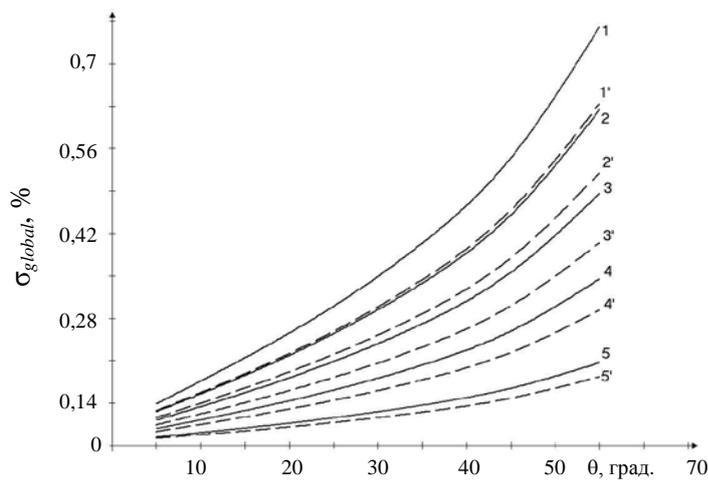


Рис. 4. Среднеквадратическое отклонение ошибки измерения мощности при различных значениях  $\delta R$  и  $\delta C$ : 1, 1' –  $\delta C = 5\%$ ,  $\delta R = 0,5\%$ ; 2, 2' – 4, 0,4; ...; 5, 5' – 1%, 0,1%

## ВЫВОДЫ

1. Рассмотрена методология испытания электроэнергетического оборудования применительно к силовым трансформаторам и электрическим машинам постоянного тока через измерение комплекса их параметров.

2. Проведен анализ влияния индуктивных и емкостных элементов, входящих в состав фильтров низких частот измерительного прибора на величину обусловленного ими дополнительного сдвига фаз между измеряемыми входными токами и напряжениями. Показано, что дополнительный фазовый сдвиг вызывается колебаниями реальных значений индуктивных

и емкостных элементов относительно их номиналов. Рассчитана зависимость среднеквадратического отклонения ошибки измерения мощности от угла сдвига фаз в нагрузке при различных значениях допусков указанных элементов и распределении реальных значений их номиналов в пределах этих допусков по нормальному закону.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. F e s e r, K. Trends in the Insulation Monitoring of Transformers / K. Feser // 10<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering. – Montreal, 1997.
2. M a l e w s k i, R. Continuous Versus Periodic Diagnostics of HV Power Apparatus Insulation / R. Malewski // 10<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering. – Montreal, 1997.
3. A Value Based Methodology for Selecting On-line Condition Monitoring of Substation Power Equipment / D. F. Peelo [et al.] // EPRI Substation Equipment Diagnostic Conference V. – New Orleans, Louisiana, Feb. 17, 1997.
4. A n I n t e r n a t i o n a l Survey on Failures of Large Power Transformers in Service, CIGRE Working Group 12.05. Electra. No.88, January 1983.
5. Б р а н о в и ц к и й, И. И. Исследование влияния короткозамкнутого контура на магнитные характеристики материала магнитопровода / И. И. Брановицкий, П. Д. Мацкевич // Весці НАН Беларусі, сер. фіз.-техн. навук. – 2005. – № 3. – С. 109–112.
6. T a m, K. Current-Transformer Phase-Shift Compensation and Calibration / K. Tam. – Texas Instruments Application Report. SLAA122 – February, 2001.

Поступила 20.02.2009

УДК 621.372.64

### **СИНТЕЗ ЗАГРАЖДАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ С ПЕРЕСТРАИВАЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**

**Докт. техн. наук, проф. БОНДАРЕНКО А. В.,  
кандидаты техн. наук, доценты РЕЗНИЧЕНКО В. В., МОЖАР В. И.,  
БОНДАРЕНКО А. А.**

*Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет,  
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,  
Белорусский национальный технический университет*

Синтез заграждающих фильтров – задача, имеющая широкое применение в приборостроении, акустике, радиотехнике, других областях науки и техники. Поэтому создание устройств с универсальными характеристиками является актуальной задачей, имеющей практическое значение.

Классический подход к решению задачи проектирования предполагает синтез по низкочастотному прототипу с использованием частотного преобразования вида