

## РАЗДЕЛ V. СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

нию границы, тем самым «уменьшая» фрактальность линии.

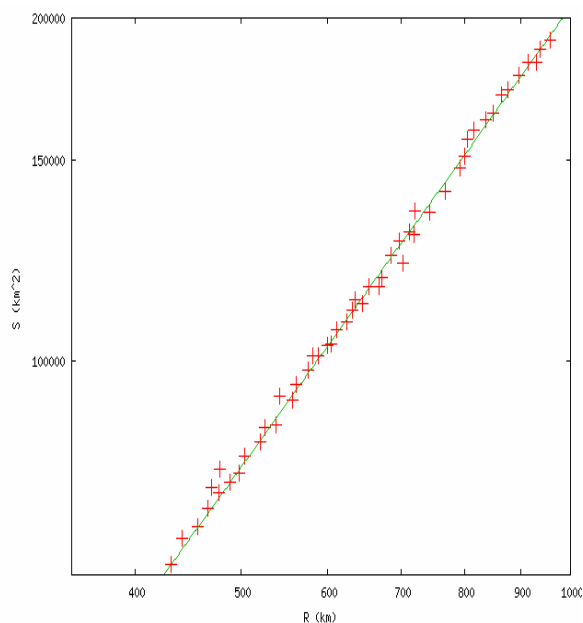


Рисунок 3 - Зависимость площади облаков от характеристического радиуса

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lovejoy S. Area-perimeter relation for rain and clouds areas // Science. - 1982. - 216. - Pp. 185–187.
2. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – М: Институт компьютерных исследований, 2002 – с. 656.
3. Tamas V., Marshak A. MODIS observations of enhanced clear sky reflectance near clouds // Geophys. Res Lett. – 2009. – 36. – P. L06807
4. Salomonson V. V., Barnes W. L., Maymon P. W. et al. MODIS: Advanced facility instrument for studies of the Earth as a system // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. - 1989. - v.27. - Pp. 145–153.
5. Hentshel E. H. G., Procaccia I. Fractal nature of turbulence as manifested in turbulent diffusion // Phys. Rev. - 1983. - A27. - Pp. 1266–1269.
6. Федер Е. Фракталы. - М.: Мир, 1991.- С. 254.
7. Якунин М. А., Лагутин А. А. Вычисление фрактальной размерности облаков по данным спутниковых наблюдений MODIS/TERRA // Измерение, контроль, информатизация: Материалы одиннадцатой международной научно-технической конференции. - 2010. - С. 112–114.

УДК: 621.314.222.6:621.3.095.2

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПРИ ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПО МЕТОДУ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

А.А. Грибанов, С.О. Хомутов

В статье рассматривается задача создания математического описания процессов, протекающих при диагностике силовых трансформаторов по методу низковольтных импульсов. Особое внимание уделено моделированию волнового затухающего колебательного процесса в обмотках и разложению диагностического сигнала в спектр.

**Ключевые слова:** диагностический сигнал, силовой трансформатор, волновые затухающие колебания, спектральный анализ

В настоящее время вопросы диагностирования мощного электротехнического оборудования приобретают особое значение по ряду причин. Во-первых, в последние годы произошёл резкий рост доли оборудования, отработавшего нормативный срок службы. Во-вторых, для достижения успеха в условиях рыночной экономики необходимо соизмерять затраты и прибыль от любых технических мероприятий. Поэтому часто с этой точки зрения диагностика бывает оправдана, так как своевременное принятие мер по её результатам позволит избежать затрат на доро-

гостоящий капитальный ремонт в случае внезапного выхода электрооборудования из строя и финансовых издержек, связанных с нарушением и расстройством технологических процессов [1].

Всё вышесказанное имеет непосредственное отношение к силовым трансформаторам. Для их диагностики используется ряд методов, к которым относятся следующие [1–4]:

– комплексные испытания с обязательным проведением опытов холостого хода и короткого замыкания;

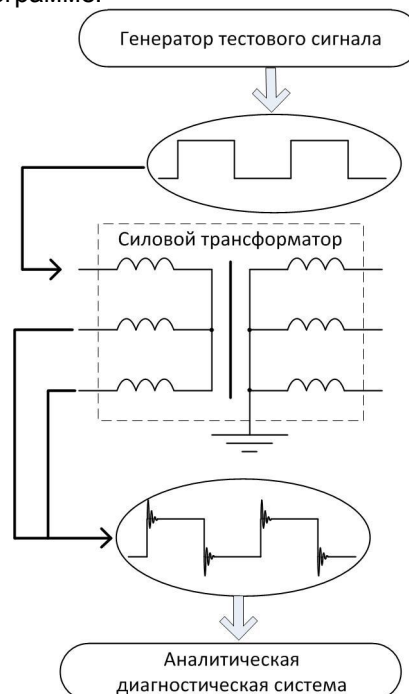
## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПРИ ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПО МЕТОДУ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

- физико-химические анализы трансформаторного масла с определением содержания и состава фурановых производных, ионола, объёмного удельного сопротивления и т.п.;
- хроматографический анализ газов, растворенных в масле (трансформатора и вводов высокого напряжения);
- тепловизионное обследование трансформаторов;
- измерение наличия и уровней частичных разрядов в изоляции;
- контроль характеристик изоляции под рабочим напряжением;
- определение мутности масла оптоэлектронными методами;
- ультразвуковое обследование трансформаторов;
- вибрационное обследование трансформаторов.

Основной проблемой использования этих методов является то, что ни один из них не позволяет выявить дефекты или повреждения всех узлов трансформаторов. Поэтому актуальным является разработка новых способов диагностики, которые позволят получить максимум информации о текущем состоянии трансформатора. Одним из таких эффективных методов является метод низковольтных импульсов [5, 6]. Его суть состоит в подаче на один из выводов обмотки одного напряжения тестирующего сигнала прямоугольной формы и фиксации с последующим анализом диагностического сигнала с другого вывода. Этот анализ может заключаться либо в сопоставлении полученной осциллограммы с имеющейся для условно-идеального состояния трансформатора, либо в разложении диагностического сигнала в спектр с выявлением характерных для каждого вида дефектов гармонических составляющих. Под условно-идеальным состоянием силового трансформатора понимается совокупность его характеристик при изготовлении с соблюдением всех технологических норм и полным отсутствием дефектов. Схема диагностики для трансформатора 6-10/0,4 кВ со схемой соединения «звезда – звезда с нулём» приведена на рисунке 1.

Несомненным достоинством метода является его высокая чувствительность к дефектам электроизоляционной системы и деформациям обмоток. Высокая чувствительность метода объясняется тем, что даже при очень небольших механических перемещениях в обмотках ёмкости отдельных элементов обмотки (межвитковые и межкатушечные ёмкости) обычно меняются весьма существ-

венно. Это приводит к изменению собственных частот колебаний соответствующего контура и, соответственно, к изменениям в осциллограмме.



*Рисунок 1 – Схема диагностирования обмоток высокого напряжения силового трансформатора 6-10/0,4 кВ*

Для технической реализации метода низковольтных импульсов в виде автоматизированной диагностирующей системы научный интерес представляет математическое моделирование диагностического сигнала (сигнала, прошедшего через обмотки трансформатора) с последующим выполнением его спектрального анализа.

Для решения этой задачи в первую очередь необходимо выбрать схему замещения обмоток силового трансформатора и рассчитать её параметры. В работе [6] предлагается использовать схему замещения, приведённую на рисунке 2. Эта схема описывает электромагнитные процессы, протекающие в одной фазе трансформатора. Чтобы использовать эту схему замещения для схемы диагностирования, приведённой на рисунке 1, необходимо выполнить пересчёт параметров по следующим правилам:

$$\begin{aligned}
 C_{\text{прод}} &= 2 \cdot C_{\text{прод.ф}}; R_{\text{в}} = 2 \cdot R_{\text{в.ф}}; R_{\mu} = 2 \cdot R_{\mu.ф}; \\
 L_{\mu} &= 2 \cdot L_{\mu.ф}; R_{\text{об}} = 2 \cdot R_{\text{об.ф}}; L_{\text{об}} = 2 \cdot L_{\text{об.ф}}; \quad (1) \\
 R_{\kappa} &= \frac{R_{\kappa.ф}}{2}; C_{\kappa} = \frac{C_{\kappa.ф}}{2}.
 \end{aligned}$$

Здесь  $C_{\text{прод.ф}}$  и  $C_{\text{прод}}$  – соответственно, фазная и результирующая продольная ём-

## РАЗДЕЛ V. СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

кость;  $R_{\text{в.ф}}$  и  $R_{\text{г}}$  – фазное и результирующее межвитковое сопротивление;  $R_{\text{м.ф}}$  и  $R_{\text{м}}$  – фазное и результирующее сопротивление магнитной цепи;  $L_{\text{м.ф}}$  и  $L_{\text{м}}$  – фазная и результирующая индуктивность магнитной цепи;  $R_{\text{об.ф}}$  и  $R_{\text{об}}$  – фазное и результирующее сопротивление обмотки;  $L_{\text{об.ф}}$  и  $L_{\text{об}}$  – фазная и результирующая индуктивность обмотки;  $R_{\text{к.ф}}$  и  $R_{\text{к}}$  – фазное и результирующее сопротивление изоляции относительно корпуса;  $C_{\text{к.ф}}$  и  $C_{\text{к}}$  – фазная и результирующая ёмкость изоляции относительно корпуса.

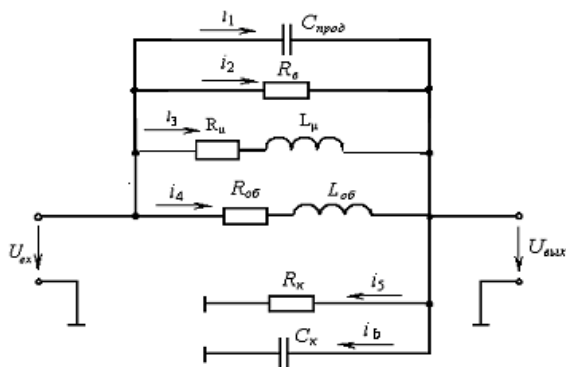


Рисунок 2 – Схема замещения для расчёта переходного процесса трансформатора при диагностировании обмоток одного напряжения

Эти параметры схемы замещения можно рассчитать по методике, приведённой в [6]. Однако следует учитывать, что в справочниках отсутствуют значения ряда важных параметров, которые используются в расчётах. Поэтому возникает необходимость выполнить расчёты в соответствии с методиками, приведёнными в [7, 8], которые включают в себя:

- расчёт основных размеров трансформатора;
- расчёт основных электрических величин;
- определение минимально допустимого изоляционного расстояния;
- выбор конструкций обмоток;
- расчёт обмоток высокого и низкого напряжений;
- определение размеров магнитной системы.

Следующим этапом является расчёт переходного процесса и определение конфигурации диагностического сигнала.

Расчёт переходного процесса классическим методом выполним в следующей последовательности. Рассчитаем схему до коммутации, найдём значения токов в индуктивно-

сти и напряжений на ёмкостях  $i_{(-0)}$ ;  $U_{C(-0)}$ . Эти значения позволяют определить на основании законов коммутации независимые начальные условия  $i_{(-0)} = i_{(+0)}$ ,  $U_{C(-0)} = U_{C(+0)}$ . Далее рассчитаем схему после коммутации, найдём принуждённые составляющие искомых токов и напряжений, для этой же схемы составим характеристическое уравнение и определим его корни. Искомые величины представим как сумму принуждённых и свободных составляющих и вычислим постоянные интегрирования. Начальные значения искомых величин и их производных, необходимых для вычисления постоянных интегрирования, найдём с помощью независимых начальных условий и уравнений цепи.

Произведём расчёт переходного процесса с учётом выходных параметров генератора:  $C$ ,  $R$  – соответственно, выходные ёмкость и сопротивление. Введём следующие обозначения:

- $i_{(-0)}$  – время, непосредственно предшествующее моменту коммутации;
- $i_{(0)}$  – в момент коммутации;
- $i_{(+0)}$  – после коммутации.

До коммутации:

$$i_{(-0)} = 0; U_{C(-0)} = 0. \quad (2)$$

После коммутации:

$$C \cdot R \cdot \frac{dU_{Cnp}}{dt} + U_{Cnp} = U_{\text{вх}}, \quad (3)$$

$$U_C = U_{Cnp} + U_{Cce}, \quad (4)$$

$$C \cdot R \cdot \frac{dU_{Cnp}}{dt} + U_{Cce} = 0, \quad (5)$$

Составляем характеристическое уравнение:

$$p \cdot C \cdot R + 1 = 0, \quad (6)$$

$$p = -\frac{1}{C \cdot R} = -\frac{1}{\tau}, \quad (7)$$

где  $\tau = C \cdot R$  – постоянная времени.

$$U_C = A_1 e^{pt} + U_{Cnp}, U_{Cnp} = U_{\text{вх}}, \quad (8)$$

$$U_{C(-0)} = U_{C(0)} = 0, A_1 + U_{Cnp} = 0; \quad (9)$$

$$A_1 = -U_{\text{вх}}; \quad (10)$$

$$U_C = -U_{\text{вх}} e^{-\frac{t}{CR}} + U_{\text{вх}}; \quad (11)$$

$$U_{\text{вых1}} = U_C = -U_{\text{вх}} e^{-\frac{t}{CR}} + U_{\text{вх}}. \quad (12)$$

Рассчитываем цепь до коммутации. Составляем систему дифференциальных уравнений по законам Кирхгофа.

До коммутации все токи в схеме равны нулю.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПРИ ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПО МЕТОДУ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

$$\begin{aligned} i_{1(-0)} = i_{2(-0)} = i_{3(-0)} = i_{4(-0)} = i_{5(-0)} = \\ = i_{6(-0)} = 0; \end{aligned} \quad (13)$$

$$U_{Cnpод(-0)} = 0; U_{Cк(-0)} = 0.$$

Рассчитаем схему после коммутации.

На основании первого и второго закона Кирхгофа составим систему дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} i_1 + i_2 + i_3 + i_4 = i_5 + i_6; \\ i_4 \cdot R_{o\delta} + L_{o\delta} \cdot \frac{di_4}{dt} + i_5 \cdot R_{\kappa} = U_{\text{вых1}}; \\ i_4 \cdot R_{o\delta} + L_{o\delta} \cdot \frac{di_4}{dt} - \frac{1}{C_{\kappa}} \cdot \int i_6 dt = U_{\text{вых1}}; \\ i_4 \cdot R_{o\delta} + L_{o\delta} \cdot \frac{di_4}{dt} - \frac{1}{C_{npод}} \cdot \int i_1 dt = 0; \\ \frac{1}{C_{\kappa}} \cdot \int i_6 dt - i_5 \cdot R_{\kappa} = 0; \\ i_4 \cdot R_{o\delta} + L_{o\delta} \cdot \frac{di_4}{dt} + L_{\mu} \cdot \frac{di_3}{dt} + i_4 \cdot R_{o\delta} = 0. \end{cases} \quad (14)$$

Выполним ряд преобразований и получим уравнение, которое можно назвать передаточной функцией схемы замещения. Оно имеет вид

$$\begin{aligned} Z = & \left[ (R_{o\delta} + p \cdot L_{o\delta}) \cdot R_{\kappa} \cdot (R_{\mu} + p \cdot L_{\mu}) \right] : \\ & \left( p \cdot C_{npод} \right) \cdot \left( R_{\kappa} \cdot (R_{\mu} + p \cdot L_{\mu}) \right) / \left( p \cdot C_{npод} \right) + \\ & + (R_{o\delta} + p \cdot L_{o\delta}) \cdot (R_{\mu} + p \cdot L_{\mu}) / \left( p \cdot C_{npод} \right) + \\ & + (R_{o\delta} + p \cdot L_{o\delta}) \cdot R_{\kappa} \cdot (R_{\mu} + p \cdot L_{\mu}) + \\ & + (R_{o\delta} + p \cdot L_{o\delta}) \cdot R_{\kappa} / \left( p \cdot C_{npод} \right) + \\ & + (R_{\kappa} / (p \cdot C_{\kappa})) / (1 / (p \cdot C_{\kappa} + R_{\kappa})). \end{aligned} \quad (15)$$

По этому уравнению можно получить характеристическое уравнение, которое будет иметь вид

$$\begin{aligned} p^3 \cdot (L_{\mu} \cdot R_{\kappa} \cdot L_{o\delta} \cdot R_{\kappa} \cdot C_{npод} + L_{\mu} \cdot L_{o\delta} \cdot R_{\kappa} \times \\ \times R_{\kappa} \cdot C_{\kappa}) + p^2 \cdot (L_{\mu} \cdot R_{\kappa} \cdot R_{\kappa} \cdot C_{npод} \cdot R_{o\delta} + \\ + R_{\mu} \cdot R_{\kappa} \cdot C_{npод} \cdot R_{\kappa} \cdot L_{o\delta} + L_{\mu} \cdot R_{\kappa} \cdot C_{\kappa} \cdot R_{\kappa} \times \\ \times R_{o\delta} + R_{\mu} \cdot R_{\kappa} \cdot C_{\kappa} \cdot R_{\kappa} \cdot L_{o\delta} + L_{\mu} \cdot L_{o\delta} \cdot R_{\kappa} + \\ + L_{\mu} \cdot R_{\kappa} \cdot L_{o\delta}) + p \cdot (R_{o\delta} \cdot R_{\kappa} \cdot L_{\mu} + R_{\mu} \cdot R_{\kappa} \times \\ \times R_{o\delta} + L_{\mu} \cdot R_{\kappa} \cdot R_{\kappa} + R_{\kappa} \cdot L_{o\delta} \cdot R_{\kappa} + R_{\mu} \cdot R_{\kappa} \times \\ \times L_{o\delta} + L_{\mu} \cdot R_{o\delta} \cdot R_{\kappa} + R_{o\delta} \cdot R_{\mu} \cdot R_{\kappa} \cdot C_{\kappa} \cdot R_{\kappa} + \\ + R_{\kappa} \cdot R_{\mu} \cdot R_{\kappa} \cdot C_{npод} \cdot R_{o\delta}) + R_{o\delta} \cdot R_{\kappa} \cdot R_{\mu} + \\ + R_{\kappa} \cdot R_{\mu} \cdot R_{\kappa} + R_{\mu} \cdot R_{o\delta} \cdot R_{\kappa} + R_{\kappa} \cdot R_{o\delta} \cdot R_{\kappa} = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Корнями данного уравнения являются три корня: один – вещественный и два – комплексно-сопряженных, то есть:

$$p_1 = \alpha_1, \quad p_{2,3} = \alpha_2 \pm j\omega_2. \quad (17)$$

Все корни имеют отрицательные вещественные части, что является необходимым и

достаточным условием статической устойчивости системы [9].

Это позволяет составить уравнение переходного процесса

$$U(t) = U_{\text{ex}} + A_1 \cdot e^{\alpha_1 \cdot t} + A_2 \cdot e^{\alpha_2 \cdot t} \times \sin(\omega_2 \cdot t + \varphi_2). \quad (18)$$

Уравнение содержит три неизвестных:  $A_1$ ,  $A_2$  и  $\varphi_2$ . Составим систему уравнений, продифференцировав пошагово уравнение (18) при  $t=0$ . Получим:

$$\begin{cases} A_1 + 2 \cdot A_2 \cdot \sin \varphi_2 = U_{\text{ex}}; \\ p_1 \cdot A_1 + 2 \cdot A_2 \cdot \alpha_2 \cdot \sin \varphi_2 + \\ + 2 \cdot A_2 \cdot \omega_2 \cdot \cos \varphi_2 = U_{\text{ex}}; \\ p_1^2 \cdot A_1 + 2 \cdot A_2 \cdot \alpha_2^2 \cdot \sin \varphi_2 + \\ + 2 \cdot A_2 \cdot \omega_2^2 \cdot \cos \varphi_2 = U_{\text{ex}}. \end{cases} \quad (19)$$

Решая систему (19), можно найти нужные неизвестные.

Разработанная методика расчёта параметров диагностического сигнала использовалась для расчётных экспериментов, которые заключались в следующем. Была выбрана группа наиболее распространённых силовых масляных трансформаторов напряжением 10/0,4 кВ со схемой соединения «звезда – звезда с нулём» и номинальной мощностью 100, 160, 400, 1000, 1600, 2500, 4000. Для условно-идеального состояния этих трансформаторов выполнялся расчёт параметров схемы замещения и определялись значения параметров диагностического сигнала.

В практике использования автоматизированных систем диагностики может оказаться полезным использование кривых или аппроксимированных выражений для упрощённого расчёта основных коэффициентов уравнения переходного процесса в обмотках силовых трансформаторов, как составной части общей функции диагностического сигнала. Такая аппроксимация необходима не только при использовании микропроцессорных систем диагностики применительно к уже используемым трансформаторам, но и к трансформаторам нестандартной мощности, которые также используются в отечественных системах электроснабжения (изготовлены иностранными производителями). Для этого по результатам выполненных исследований построены графики, представленные на рисунках 3 – 6.

Анализируя приведённые графики можно заметить, что существуют ярко выраженные тенденции изменения значений выбранных параметров. Эти тенденции нарушаются в отдельных случаях только для трансформа-

## РАЗДЕЛ V. СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

торов малой мощности. Поэтому целесообразность аппроксимации кривых простыми выражениями при формировании алгоритмов работы микроконтроллерных и микропроцессорных диагностических устройств имеет практическую ценность.

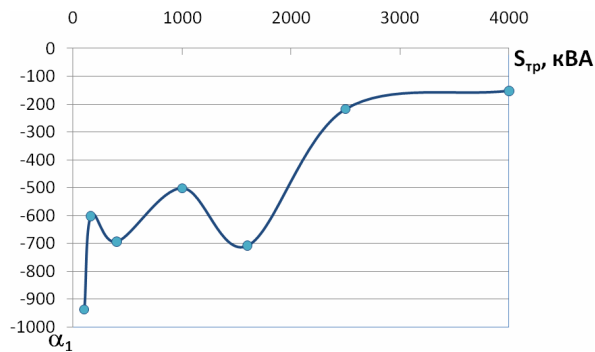


Рисунок 3 – Зависимость вещественного корня от мощности трансформатора

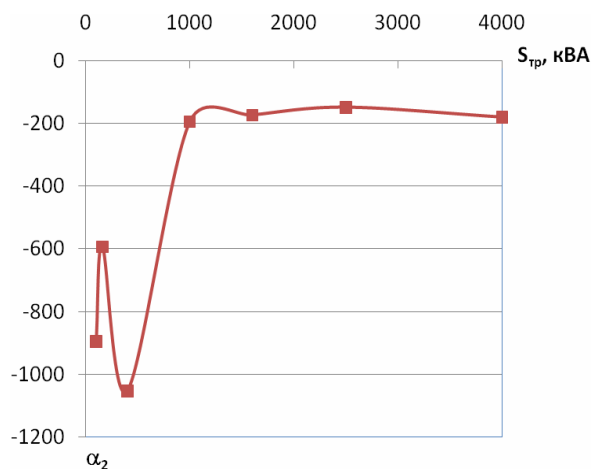


Рисунок 4 – Зависимость вещественной части пары комплексно-сопряжённых корней от мощности трансформатора

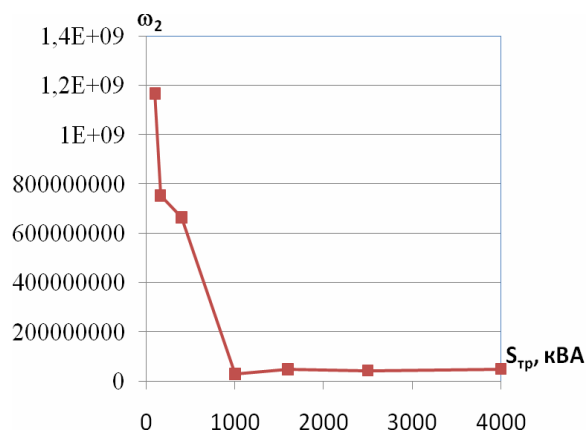


Рисунок 5 – Зависимость мнимой части пары комплексно-сопряжённых корней от мощности трансформатора

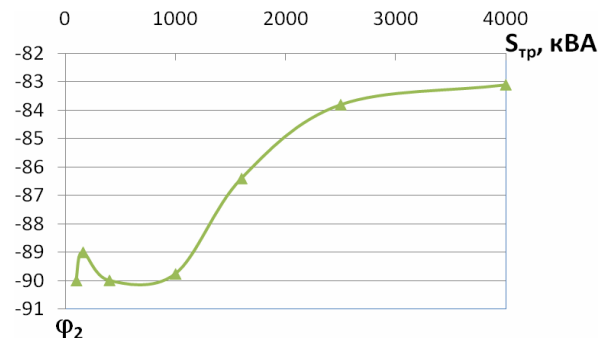


Рисунок 6 – Зависимость начальной фазы волнового затухающего процесса от мощности трансформатора

Остановимся подробнее на этих закономерностях. Значения вещественного корня отрицательны и с ростом мощности по модулю уменьшаются. Аналогичная тенденция характерна и для вещественной части пары комплексно-сопряжённых корней, но здесь наблюдается стабилизация значений в диапазоне мощности от 1000 до 4000 кВА. Отрицательность вещественных частей корней характеристического уравнения обеспечивает экспоненциальное затухание переходного процесса. В нашем случае из-за наличия пары комплексно-сопряжённых корней процесс затухает по синусоидальному закону.

Мнимая часть пары комплексно-сопряжённых корней положительна и её значение с ростом мощности трансформатора уменьшается. Этим параметром определяется частота и период затухающих колебаний. Таким образом, можно сделать вывод о том, что частота колебаний с ростом мощности трансформатора падает, а период колебаний увеличивается.

Полученные значения начальной фазы колебаний позволяют объяснить, почему колебательный процесс в течение первого периода может иметь вид неустойчивого процесса, у которого амплитуда первого положительного полупериода может оказаться меньше амплитуды второго положительного полупериода. В нашем случае значения начальной фазы колебаний близки к  $-90^\circ$ . Такое значение фазы можно объяснить воздействием больших индуктивных сопротивлений магнитной цепи трансформатора, поглощающей часть энергии тестового сигнала в начальный момент времени. По графику, приведённому на рисунке 6, мы видим, что с ростом мощности трансформатора происходит снижение модуля значения рассматриваемого параметра, что как раз и объясняется ростом сопротивления магнитной цепи.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПРИ ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПО МЕТОДУ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Построение кривой диагностического сигнала для условно-идеального состояния трансформатора, которая получила название нормограммы, является актуальным не только при использовании устаревших методик диагностики по методу низковольтных импульсов, основанных на визуальном сравнении текущих осциллограмм (дефектограмм) и нормограмм, но и при использовании современных методик диагностики, основанных на спектральном анализе этих осциллограмм. Поэтому дополнительно был проведён комплекс исследований по разложению в спектр полученных расчётным путём диагностических сигналов для выбранной группы трансформаторов.

Операция разложения изучаемых сигналов в спектр является трудоёмкой. Поэтому исследования проводились с использованием программ-спектроанализаторов, работа которых основана на использовании преобразования Фурье. Необходимо отметить, что современные программы-спектроанализаторы нацелены на обработку реальных сигналов. Поэтому исходная информация в виде математических формул ими не воспринимается. Эта проблема решалась следующим образом. В результате изучения функционального наполнения рассматриваемых программ было установлено, что некоторые из них позволяют сохранять аналоговую кривую, полученную из внешних источников, в дискретном виде в текстовый файл. Для выполнения исследований выбрана программа SpectralAB. Проводился расчёт дискретной кривой диагностического сигнала. Частота дискретизации выбиралась высокой для того, чтобы не снижалась чувствительность при последующей обработке сигнала. Результаты расчёта сохранялись в текстовый файл с особыми параметрами и загружались в программу. В дальнейшем выполнялся анализ спектрального состава диагностических сигналов. В результате получены спектрограммы для условно-идеального состояния выбранной группы силовых трансформаторов, которые будем называть спектроноормограммами. В отличие от них спектрограммы, полученные в ходе проведения диагностики, будем называть спектродефектограммами.

Рассмотрим анализ спектроноормограмм на примере трансформатора ТМ2500. На рисунках 7 и 8 приведены, соответственно, кривая переходного процесса в обмотке этого трансформатора и полученная спектроноормограмма. Эти кривые построены при условии, что на обмотку 10 кВ заявленного трансфор-

матора подаётся тестовый сигнал, имеющий амплитуду 100 В и частоту 1000 Гц.

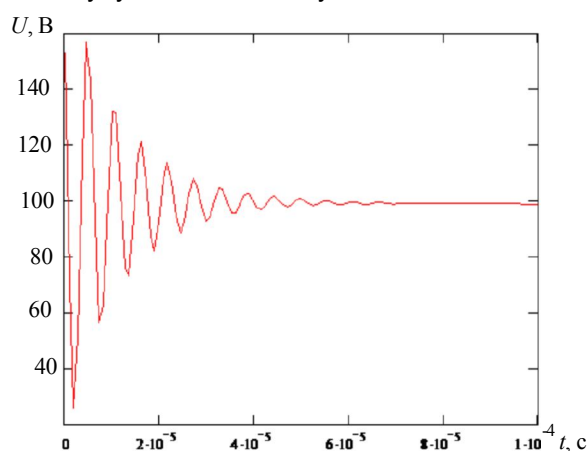


Рисунок 7 – Волновой затухающий колебательный процесс в обмотках трансформатора ТМ2500/10/0,4

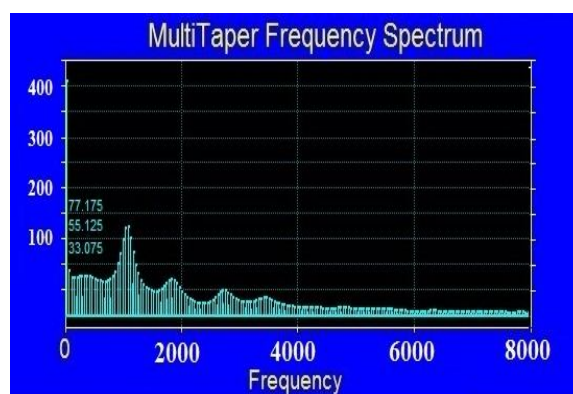


Рисунок 8 – Спектроноормограмма трансформатора ТМ2500/10/0,4

Обычно заранее известно вероятное расположение и ширина пиков спектра анализируемого сигнала. Например, пики спектров случайных сигналов часто созданы путем фильтрации широкополосных случайных сигналов физическими системами, имеющими резонансы с определенными значениями коэффициента добротности  $Q$  (т.е. коэффициента усиления в области резонанса). Значения этого коэффициента часто связаны с параметрами используемых материалов, конструкцией и т.д., поэтому могут быть заранее предсказаны. Более того, ввиду обратной пропорциональности коэффициента добротности  $Q$  к относительной (процентной) ширине резонансного пика также можно предсказать приблизительную ширину пиков спектров анализируемых случайных сигналов.

В нашем случае необходимо понимать, что львиная доля гармоник полезной информации не несёт, так как необходима для

формирования меандра, который описывает исходный тестовый сигнал. Для выделения диагностических признаков необходимо выявить изменения, вызванные изменением формы кривой переходного процесса. Поэтому анализирующая диагностическая система должна обладать определённым уровнем чувствительности. При условно-идеальном состоянии трансформатора наблюдается наибольшее отклонение форм спектрограммы и спектрограммы меандра. При ухудшении состояния отдельных узлов или появлении дефектов появятся ярко выраженные изменения, которые получили название диагностических признаков.

Для рассматриваемого трансформатора наблюдается ярко выраженный максимум при значении частоты 1000 Гц. Такой рост значения обусловлен совпадением частоты с частотой основного тестирующего сигнала. Все последующие локальные максимумы не являются строгими кратностями основной частоте колебаний, что вызвано изменением в спектрограмме из-за наличия волнового затухающего колебательного процесса. Увеличение частоты, как видно из рисунка 8, предполагает снижение вклада каждой последующей гармоники в общую форму кривой.

Как мы видим, математическое моделирование разложения диагностических сигналов хоть и не является оригинальным, но достаточно трудоёмко. В связи с этим актуальным является использование при диагностике автоматизированных рабочих мест со специальным программным обеспечением, поскольку современные потребности в применении информационных технологий для решения задач диагностики электрооборудования предполагают необходимость обработки большого количества информации за сравнительно короткое время. Созданное математическое описание и алгоритмы обработки информации позволят совершенствовать методики диагностики с использованием метода низковольтных импульсов.

Таким образом, с теоретической точки зрения рассмотрен процесс формирования диагностического сигнала в обмотке силового трансформатора и получены математические модели, применение которых в автоматизированных системах диагностики позволит повысить полноту и достоверность получаемой информации о техническом состоянии исследуемого объекта и сократить время диагностики.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

8. Аракелян, В. Г. Цели, понятия и общие принципы диагностического контроля высоковольтного электротехнического оборудования [Текст] / В. Г. Аракелян // Электротехника. – 2002. – № 5. – С 23-27.
9. Алексеев, Б. А. Контроль влажности изоляции силовых трансформаторов. Использование поляризационных явлений [Текст] / Б. А. Алексеев // Электрические станции. – 2004. – № 2. – С. 57-63.
10. Долин, А. П. Повреждаемость, оценка состояния и ремонт силовых трансформаторов [Текст] / А. П. Долин, В. К. Крайнов, В. В. Сmealов, В.Н. Шамко // Энергетик. – 2001. – № 7. – С. 30–34.
11. Долин, А. П. Опыт проведения комплексных обследований силовых трансформаторов [Текст] / А. П. Долин // Электрические станции. – 2000. – № 6. – С. 46–52.
12. Грибанов, А. А. Диагностирование силовых трансформаторов на основе анализа параметров переходного процесса в обмотках фаз одного напряжения [Текст] / А. А. Грибанов // Вестник Томского государственного университета: Общественный периодический журнал. Бюллетень оперативной научной информации. Социальные, информационные и энергетические проблемы региона. – №82. –Томск: Томский государственный университет, 2006. – С. 15 – 23.
13. Грибанов, А.А. Повышение достоверности диагностики силовых трансформаторов на основе спектрального анализа параметров переходного процесса в обмотках фаз одного напряжения [Текст] / А. А. Грибанов // Ползуновский вестник. – 2009. – №4. – С. .
14. Лейтес, Л. В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов [Текст] / Л. В. Лейтес. – М. : Энергия, 1981. – 392 с. : ил.
15. Тихомиров, П. М. Расчет трансформаторов : учеб. пособие для вузов [Текст] / П. М. Тихомиров. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1986. –528 с. : ил.
16. Веников, В. А. Электрические системы. Математические задачи электроэнергетики : учебник для студентов вузов [Текст] / В. А. Веников [и др.] / под ред. В.А. Веникова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. школа, 1981. – 288 с. : ил.

*К.т.н., доцент Грибанов А.А. –Алтайский государственный технический университет, каф. ЭПП, (Барнаул), тел. (3852) 29-07-76, e-mail: [diread@mail.ru](mailto:diread@mail.ru) ; К.т.н., доцент Хомутов С.О. – Алтайский государственный технический университет, каф. ЭПП, (Барнаул), тел. (3852) 29-07-76, e-mail: [soh@mail.ru](mailto:soh@mail.ru)*