

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ОБМОТКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСА НАПРЯЖЕНИЯ В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK

Колчанова В.А.<sup>1</sup>, Исаев Ю.Н.<sup>1</sup>, Елгина Г.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «НИ ТПУ» («Национальный исследовательский Томский политехнический университет»), Томск, Россия (634050, Томск, пр. Ленина, 30), e-mail: ni105@mail.ru

Приводится синтез алгоритмической модели обмотки трехфазного двухобмоточного трансформатора в среде MATLAB Simulink. Исходный сигнал входного воздействия в виде импульса короткой длительности раскладывался на составляющие ряда Фурье. Расчётный входной импульс представлен в виде суммы десяти компонент ряда Фурье и дополнительного источника напряжения, представляющего разность исходного импульса и десяти компонент ряда Фурье, из-за отсутствия в последнем влияния скин-эффекта. Для каждой составляющей ряда Фурье в соответствии с принципом суперпозиции рассчитывался переходный процесс как для цепи с распределёнными параметрами. Токи и напряжения отдельных витков обмотки трансформатора и всей обмотки в целом представлялись в виде алгебраической суммы отдельных компонент. Приведены функции исследуемых величин при входном воздействии в виде зондирующего импульса короткой длительности. По данным сравнительного анализа, полученные нами характеристики на основе моделирования и характеристики натурального эксперимента совпадают.

Ключевые слова: обмотки трансформатора, диагностика трансформатора, поперечное сечение провода, метод пространства состояний, скин-эффект, переходные процессы.

## THE SIMULATION OF TRANSFORMER WINDING UNDER THE INFLUENCE OF VOLTAGE PULS BY MATLAB SIMULINK

Kolchanova V.A.<sup>1</sup>, Isaev Y.N.<sup>1</sup>, Elgina G.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National research Tomsk polytechnic university, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, Lenin prospect, 30), e-mail: va-sileva.o.v@mail.ru

The synthesis of the algorithmic model of winding of a three-phase two-winding transformer by MATLAB Simulink has been considered. The original input signal in the form of a short duration pulse into components of the Fourier series has been decomposed. Calculated input voltage pulse has been presented us a sum of ten Fourier components and additional voltage supply. Additional voltage supply does not depend on skin effect and is a subtraction of input voltage pulse and ten Fourier components. In accordance with the superposition principle for each component of decomposition the transient process has been calculated as for the distributed circuit. Currents and voltages of separate turns and transformer winding as a hole have presented as algebraic sum of separate components. The functions of the state variables with input action as a probe pulse of short duration are given. According to a comparative analysis, the modeling characteristics obtained by us and the characteristics of a natural experiment have been coincided.

Keywords: transformer, transformer diagnostics, wire cross-section, state space method, skin effect, transients.

### Введение

Для уменьшения затрат на ревизию трансформаторов предлагается исследовать обмотки трансформаторов с помощью подачи импульсного напряжения короткой длительности [1, 6]. Длина зондирующего импульса составляет 400-500 нс.

### Цель исследования

Поэтому целью данной работы является создание математической модели обмоток трансформатора для формирования эталонного импульса при различного рода деформации обмоток, вызванных током короткого замыкания.

На отдельностоящую катушку высоковольтной обмотки физического макета трансформатора от генератора "Нанотест" прикладывался одиночный импульс (рис. 1). По характеру

полученной осциллограммы на выходе трансформатора можно сделать вывод о характере повреждений обмотки трансформатора или их отсутствии.

### Вывод основных соотношений

Прямоугольный импульс (рис. 1) может быть представлен рядом Фурье. На рисунке снизу – амплитудно частотный спектр. Из спектра импульса видно, что, начиная с 10 гармоники, относительный вклад высших гармоник в импульсе не превышает 5%.

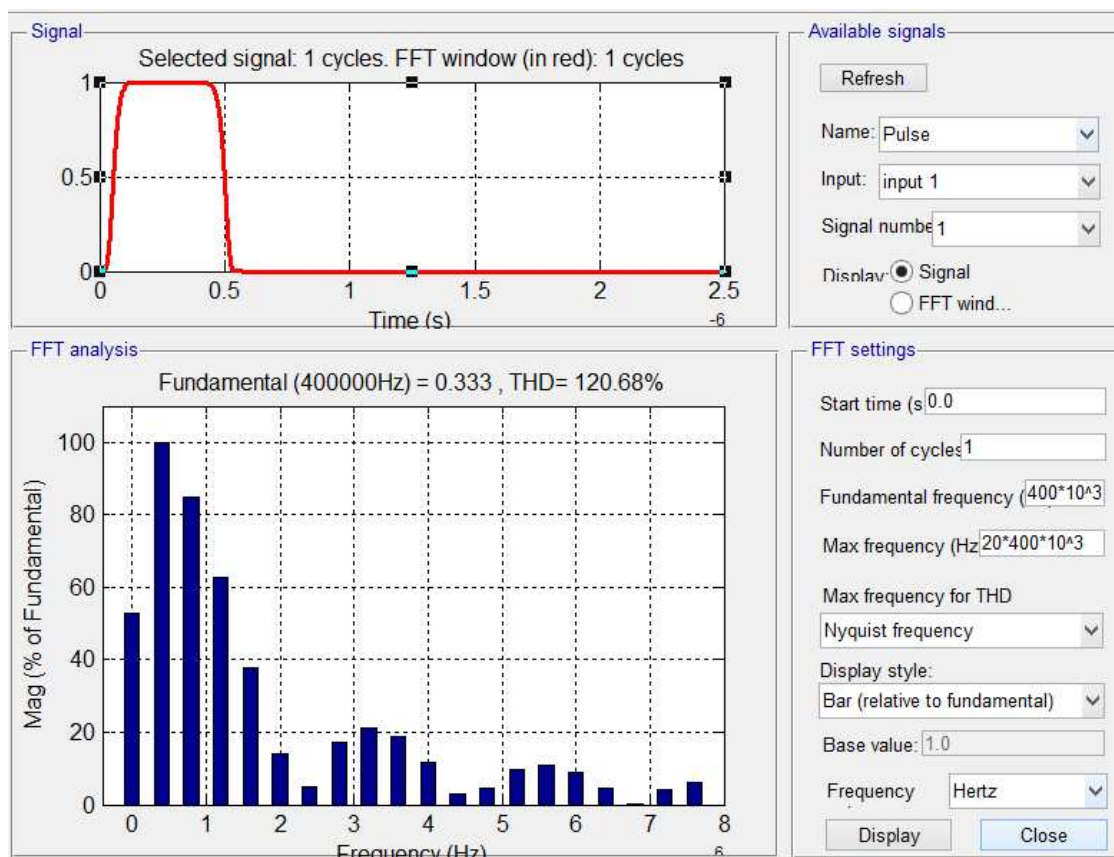


Рис. 1. Зондирующий импульс ( $t$  в мкс) и его амплитудно частотный спектр

В соответствии с принципом суперпозиции (наложения) расчёт можно вести для каждой гармоники отдельно. Причём с учётом того, что обычная индуктивная катушка при достаточно высоких частотах представляет собой линию с распределёнными параметрами. Обмотки трансформаторов должны рассматриваться как цепи с распределёнными параметрами при воздействии на них импульсных токов и напряжений, когда промежуток времени изменения токов и напряжений сравним со временем пробега волн вдоль проволоки обмотки. Поэтому в схеме замещения должны присутствовать кроме индуктивностей межвитковые ёмкости и ёмкости на корпус прибора (на землю). Так как с ростом гармоник частота увеличивается, то ток через ёмкости могут во много раз превышать токи через витки катушки. В этом случае вся катушка в целом будет оказывать прохождению переменного тока ёмкостное, а не индуктивное сопротивление (количественные изменения перешли в качественные), что обя-

зательно должно быть учтено при составлении модели. Схема замещения одного витка катушки индуктивности представлена на рисунке 2, а.

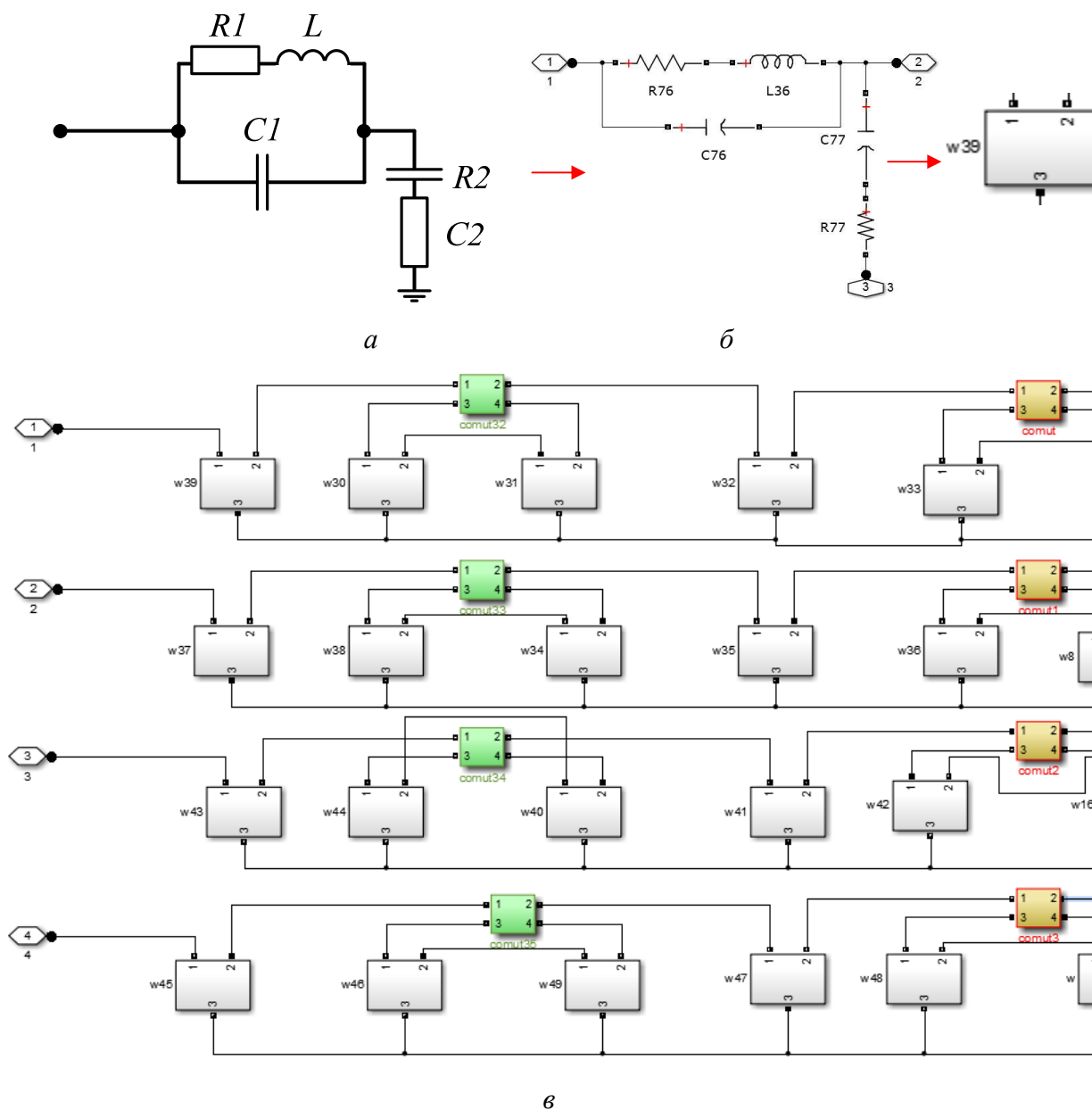


Рис. 2. Модель обмотки трансформатора в среде MATLAB Simulink: а – схема замещения одной обмотки трансформатора, б – подсхема, моделирующая одну обмотку, в – фрагмент цепочечной модели обмотки трансформатора при воздействии различных частот.

Расчёт одного витка удобно вести методом переменных состояния, в качестве которых принимаем величины, однозначно определяющие состояние цепи, т.е. подчиняющиеся законам коммутации  $i_L$  – ток индуктивности;  $u_{C1}$ ,  $u_{C2}$  – напряжения на ёмкостях C1 и C2 соответственно. Тогда уравнение переменных состояния:

$$\begin{pmatrix} \frac{di_L(t, \omega_k)}{dt} \\ \frac{dU_{C1}(t, \omega_k)}{dt} \\ \frac{dU_{C2}(t, \omega_k)}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R1(\omega_k)}{L(\omega_k)} & \frac{1}{L(\omega_k)} & 0 \\ -\frac{1}{C1} & -\frac{1}{C1 \cdot (R2 + r)} & -\frac{1}{C1(R2 + r)} \\ 0 & -\frac{1}{C2 \cdot (R2 + r)} & -\frac{1}{C2(R2 + r)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_L(t, \omega_k) \\ U_{C1}(t, \omega_k) \\ U_{C2}(t, \omega_k) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{E(t, \omega_k)}{C1 \cdot (R2 + r)} \\ \frac{E(t, \omega_k)}{C2 \cdot (R2 + r)} \end{pmatrix}$$

где  $r$  – сопротивление в цепи генератора (внутреннее сопротивления источника прямоугольных импульсов 75 Ом). Расчёт проведён в программно-интегрированной среде MathCAD методом Рунге-Кутты. Число точек дискретизации  $N=10^3$ .

### Методика исследования

Параметры схемы замещения для каждого витка определялись с учётом поверхностного эффекта. Расчет индуктивностей, ёмкостей и сопротивлений витков обмотки трансформатора круглого и прямоугольного сечения с учетом скин-эффекта проводился на основе расчёта поля распределения магнитного потенциала с использованием метода конечных элементов. Для реализации метода конечных элементов был использован пакет COMSOL Multiphysics [2, 3]. Т. о., параметры схемы замещения одного витка трансформатора  $C1 = 2,2$  нФ;  $C2 = 25$  нФ  $R2 = 10$  МОм; индуктивность и сопротивление  $R1$  для каждой составляющей ряда Фурье варьировались в соответствии с расчётными величинами:  $L = 45,75 \div 44,4$  мкГн;  $R1 = 6,5 \div 54,4$  мОм.

Модель одного витка с аналогичными параметрами была создана в среде Simulink MATLAB, совпадение расчётных кривых говорит об адекватности полученных результатов. В состав модели источника питания включены: 9 источников синусоидальных сигналов для каждой гармоники исходного импульса и источник постоянного напряжения, равный по величине среднему значению входного контрольного импульса. В предыдущих исследованиях было показано [3], что изменение параметров электротехнической схемы замещения обмотки трансформатора вследствие поверхностного эффекта происходит при частотах ниже 4мкГц, что соответствует частоте десятой гармонике при разложении в ряд Фурье исходного контролирующего короткого импульса. Поэтому расчётный импульс представлен в виде суммы вышеперечисленных источников и источника, представляющего разность исходного импульса и девяти гармоник ряда Фурье с постоянной составляющей (рисунок 3). Каждый источник подключается к модели обмотки трансформатора как цепи с распределёнными параметрами.

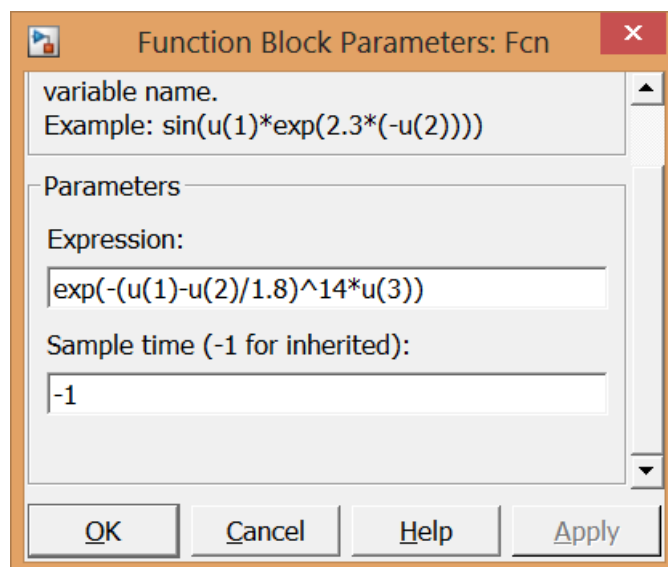
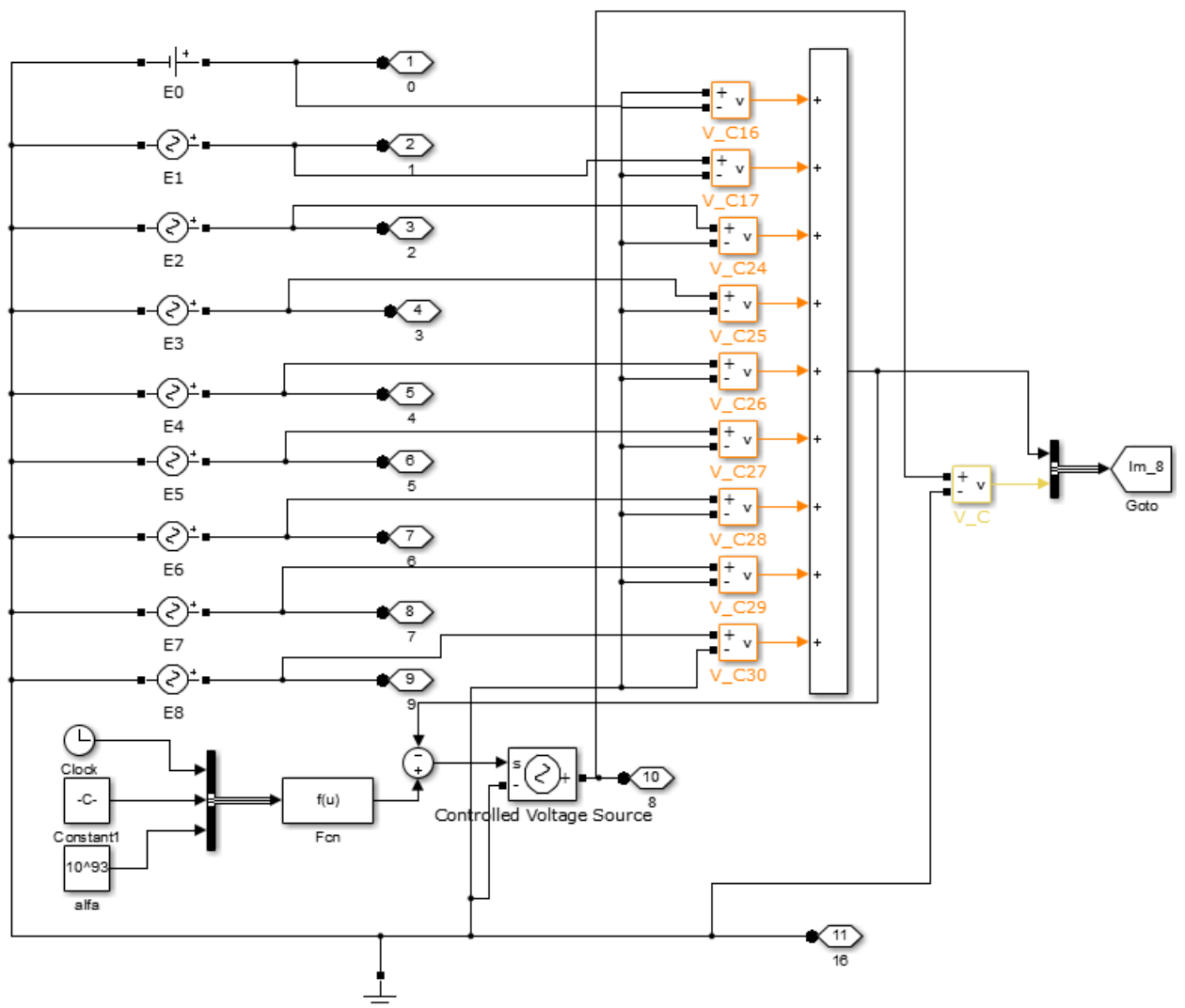


Рис. 3. Модель зондирующего импульса в среде MATLAB Simulink

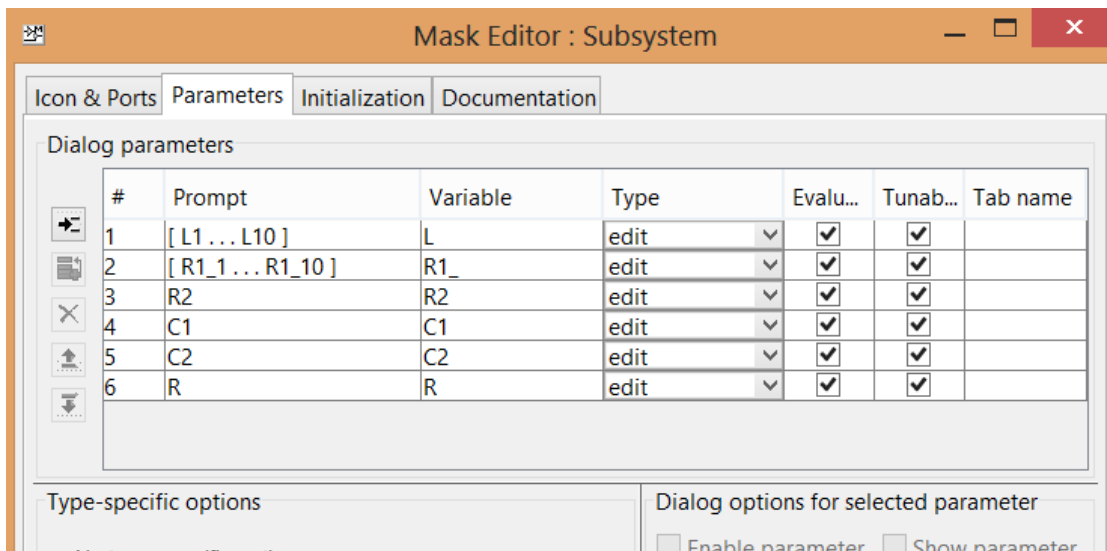


Рис. 4. Диалоговое окно создания параметров подсистемы – Mask Editor

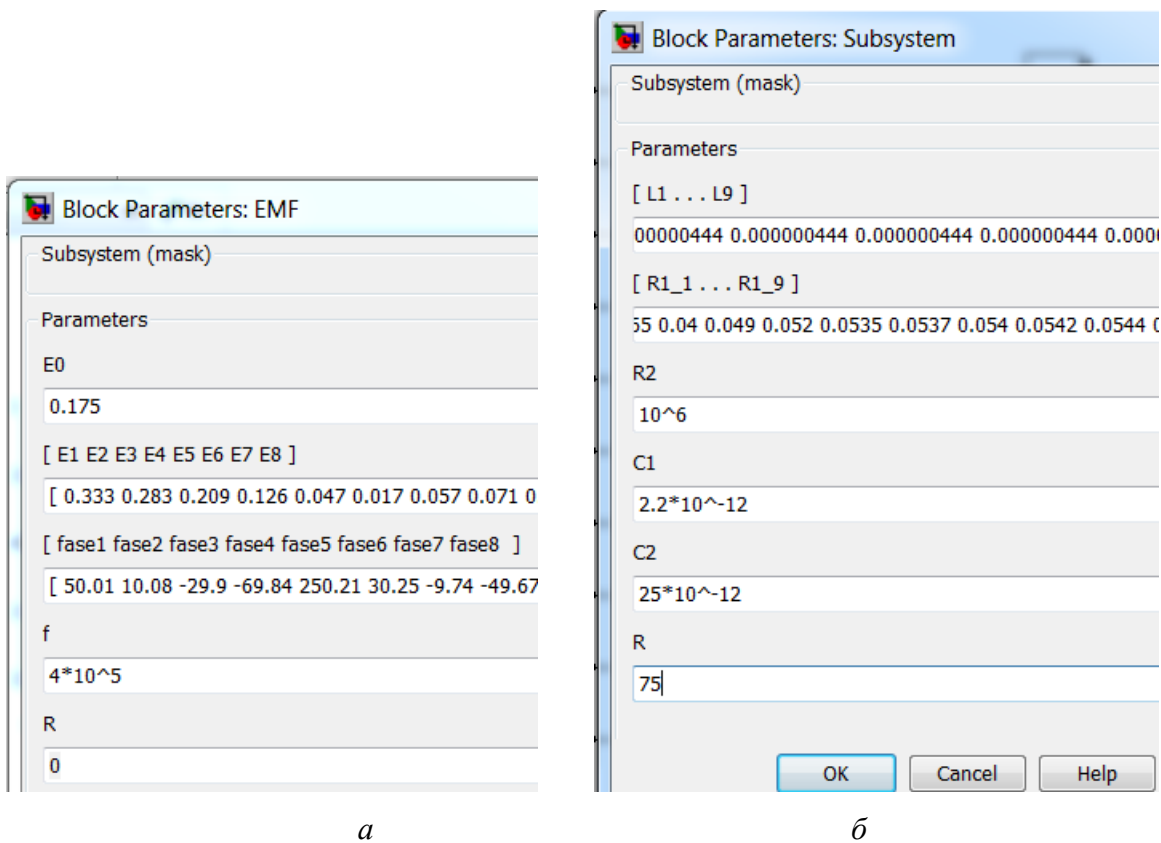
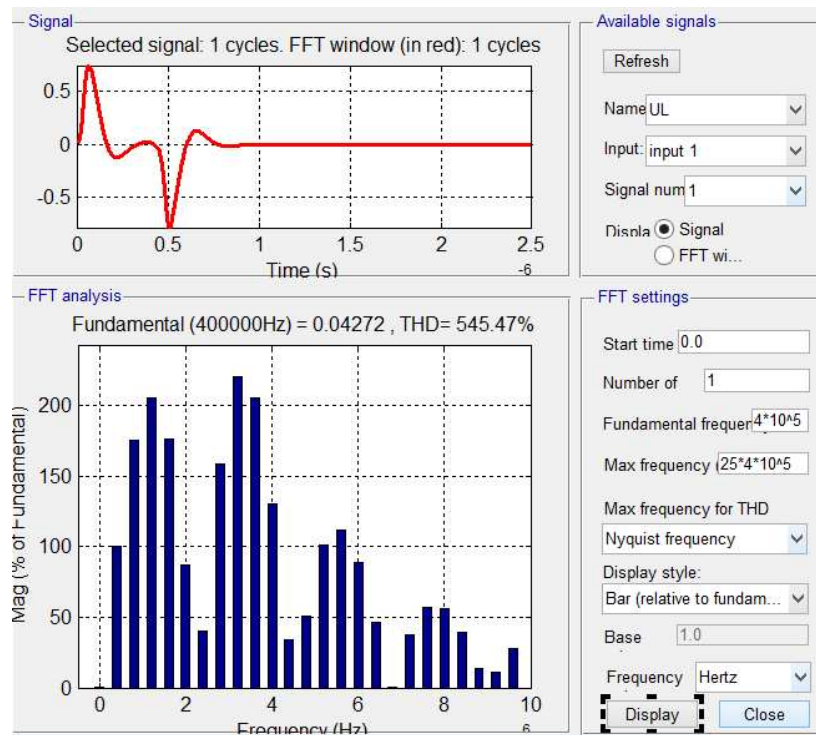


Рис. 5. Диалоговые окна со списком параметров подсхем: а – амплитуды и фазы гармоник, входящих в состав зондирующего входного импульса, б – параметры схемы замещения витков обмотки трансформатора.

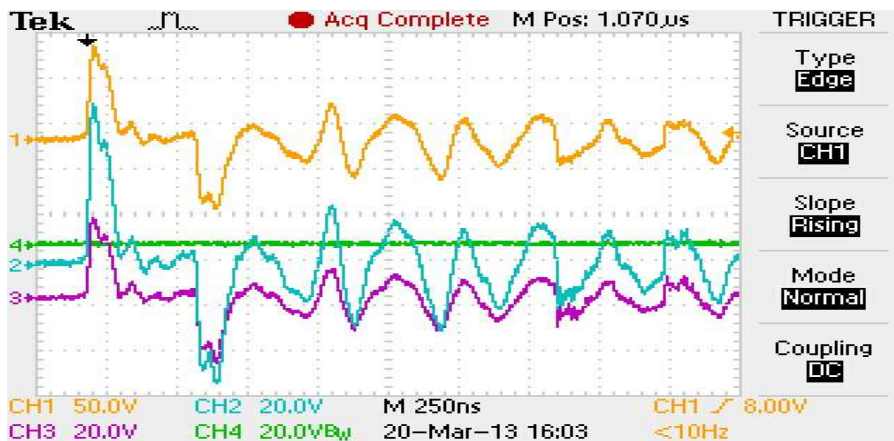
Результаты расчётов от каждой составляющей суммируются в конечный результат для определения токов и напряжений на отдельных витках обмотки трансформатора и всей обмотки трансформатора в целом.

В состав модели обмотки трансформатора включены последовательно соединённые подсистемы, т.о., модель состоит из множества подсхем (рисунок 2, в). Каждая подсистема моде-

лирует один виток трансформаторной обмотки, в соответствии с рисунком 2, а, параметры которой для каждой гармоники сигнала меняются в соответствии с расчётными в предыдущих исследованиях [3].



*a*



*б*

Рис.6. Напряжение на конденсаторе  $U_{C1}(t)$  : *a* – в результате моделирования;

*б* – экспериментальные осциллограммы напряжений на витке при зондировании пробным импульсом

Для удобства изменения параметров схемы замещения с помощью функции редактирования параметров подсхемы Mask Editor (рисунок 4) создано диалоговое окно. Двойной щелчок мышью по блоку модели выводит всплывающее меню со списком параметров (рисунок 5), в котором можно варьировать гармонический состав входного импульса, параметры схемы замещения витков обмотки трансформатора.

Контроль осуществляется с помощью виртуальных осциллографов.

### **Выводы**

Алгоритмическая реализация математической модели в программно интегрированной среде MATLAB Simulink позволяет определять токи и напряжения обмоток трансформатора с достаточной точностью и позволяет проводить исследование без использования натурального эксперимента. Форма напряжения на катушке, полученная с помощью предлагаемого алгоритма, совпадает с осциллограммой, полученной в натурном эксперименте (рисунок б), следовательно, алгоритмическую модель можно использовать для моделирования дефектов обмоток с последующей их регистрацией. Получив спектр выходного сигнала обмоток без дефектов, его можно использовать в качестве эталона при сравнении спектров, полученных при наличии дефектов. Проведя виртуальный эксперимент в среде MATLAB Simulink, можно определить корреляцию между изменением спектра и типом дефекта, с помощью которой производится диагностика трансформатора.

### **Список литературы**

1. Ильдарханов Р.Г., Усачев А.Е. Контроль состояния обмоток силовых трансформаторов путем спектрального анализа передаточных функций // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2010. - № 3-4. – С. 38-47.
2. Исаев Ю. Н. , Васильева О. В. , Елгина Г. А. Определение деформаций проводов обмотки трансформатора, вызванных током короткого замыкания [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2013 - №. 3. – С. 1-8.
3. Исаев Ю. Н. , Колчанова В.А., Елгина Г. А., Лавринович А.В. Математическая модель трансформатора при его диагностике коротким импульсом [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2013 - №. 6. – С. 1-10.
4. Потемкин В.Г. Система инженерных и научных расчетов MATLAB 5.x : в 2 т. / В. Г. Потемкин. — М.: Диалог-МИФИ, 1999. – Т. 2. — 1999. — 304 с.
5. Darwin A.W., Sofian D., Wang Z.D., Jarman P.N. Interpretation of frequency response analysis (FRA) results for diagnosing transformer winding deformation // CIGRE 2009 VI<sup>th</sup> Southern Africa Regional Conference. – USA, 2008. – 503 p.

### **Рецензенты:**

Усов Ю.П., д.т.н., профессор кафедры ЭСиЭ ЭНИН ФГБОУ ВПО «НИ ТПУ», Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск.



Канев Ф. Ю., д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Институт оптики атмосферы им. В.Е.  
Зуева СО РАН, г. Томск.