

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 681.3

Y. Storozhenko*, S. Gubanski, Y. Serdyuk

COMSOL-SIMULINK INTEGRATED COMPUTER MODEL FOR SIMULATIONS OF HIGH VOLTAGE POWER TRANSFORMERS

Ю.И. Стороженко, С. Губански, Ю. Сердюк

ИНТЕГРИРОВАННАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА В СРЕДЕ COMSOL-SIMULINK

High voltage conventional power transformers are very popular in modern electric power industry. The use of a digital computer to analyze transients in electric power systems requires accurate and efficient simulation models of all major pieces of equipment. Good models exist of transmission lines, synchronous machines and motors but a transformer model with an accurate and realistic representation of the electromagnetic effects has been lacking. A good transformer model is needed not only because transformers exist at every point in electric power systems where a change in voltage level takes place, but even more

Высоковольтные трансформаторы очень популярны в современной электро-энергетической промышленности. Использование ЭВМ для анализа переходных процессов в электроэнергетических системах требует точных и эффективных моделей всех основных составных элементов. Хорошие модели существуют для линий электропередачи, синхронных машин и двигателей, но модели трансформаторов с точным и реалистичным представлением электромагнитных эффектов отсутствуют. Проработанная модель трансформатора необходима не только потому, что трансформаторы

* This work became possible owing to the research grant received from the Swedish Academy of Sciences, which gives me an opportunity to visit this beautiful University and this marvelous country named Sweden. I would like to thank Prof. Stanislaw Gubanski and Associate Prof. Yuriy Serdyuk for making this visit possible and their kind attention during my stay in Sweden. Also many thanks go to all staff in high voltage engineering division, with whom I contacted. It was really nice time to work with so highly skilled professionals.

The aim of this project is the development of the mathematical and computer models and algorithms allowing performing analysis of characteristics of high voltage power transformers under different working load conditions in Comsol-Simulink environment.

* Данная работа стала возможной благодаря исследовательскому гранту Шведской Королевской Академии наук, который дал мне возможность поработать в качестве гостевого исследователя в Чалмерском технологическом университете г. Гетеборг, Швеция. Я хотел бы выразить свою благодарность Профессору Станиславу Губански и профессору Юрию Сердюку за организацию этого визита и их чуткое отношение во время моего пребывания в Швеции. Также большое спасибо всем сотрудникам кафедры высоковольтной инженерии, с кем мне приходилось работать. Было действительно интересно, работать со столь высококвалифицированными профессионалами.

Цель проекта – разработка математических и компьютерных моделей и алгоритмов, позволяющих производить анализ характеристик высоковольтных трансформаторов при различных режимах работы в среде Comsol-Simulink.

importantly because often transformer behavior is crucial to the phenomena being investigated. The modeling of iron-core transformer plays an important role in the dynamic simulation of power system transients such as inrush currents, short circuits, and fault conditions.

The interest to computer modeling and simulations of different electromagnetic devices and apparatus has grown increasingly during the last decade. At present, modern computer industry offer a huge amount of tools for computer modeling and simulation. Some of the programs are mainly oriented on electromagnetic field analysis based on the FEM (Finite element method), like Ansys, Comsol Multiphysics, Elcut, etc. Other programs gave us an opportunity of making circuit dynamic simulations. These programs are Matlab (Simulink), Electronic workbench, Pspice, etc.

The main idea of our research work was to integrate these two different types of software to be able to perform robust and accurate simulations of high voltage power transformers. During our research we used two different programs for computer simulation, one is Simulink, which is a part of Matlab package, and another one is Comsol Multiphysics. Integration of these tools gave us an opportunity to combine electromagnetic field computations with dynamic circuit model.

Modeling of electromagnetic fields within a transformer is a challenging task due to complex geometrical structure and the diverse combination of material types. To compute distributions of electromagnetic fields formed in its magnetic circuit, one

присутствуют в каждой точке электро-энергетической системы, где происходит изменение уровня напряжения, но, что даже более важно, потому что работа трансформатора влияет на стабильность всей электроэнергетической системы в целом. Моделирование высоковольтных трансформаторов играет важную роль в динамическом моделировании переходных процессов, происходящих в электроэнергетической системе, таких как броски (пускового) тока, короткие замыкания, несимметрия питающего напряжения и многое другое.

Интерес к компьютерному моделированию различных электромагнитных устройств и аппаратов значительно вырос за последнее десятилетие. В настоящее время современная компьютерная промышленность предлагает огромное количество инструментов для моделирования. Некоторые из программ в основном ориентированы на анализ электромагнитного поля, основаны на FEM (методе конечных элементов), такие как Ansys, Comsol Multiphysics, Elcut, и др. Другие программы дают нам возможность создания динамических схемных моделей. Эти программы – Matlab (Simulink), Electronic workbench, Pspice, и т.д. Главная идея нашей исследовательской работы состояла в том, чтобы объединить эти два различных типа программного обеспечения для выполнения точного моделирования высоковольтных трансформаторов. В процессе нашего исследования мы использовали две различные программы для компьютерного моделирования, одна из них – Simulink, которая является частью пакета Matlab, и другая – Comsol Multiphysics. Интеграция этих программных инструментов дала нам возможность объединить вычисления электромагнитного поля с динамическим схемным моделированием.

Моделирование электромагнитных полей трансформатора – трудная задача из-за сложной геометрической структуры и разнообразной комбинации применяемых типов материалов. Чтобы вычислять распределения электромагнитных полей,

must consider not only main magnetic flux, but also leakage fluxes. A number of factors, such as windings and core properties (type of materials, form and geometry) have to be considered carefully in the modeling process. Special attention will be given to studying sources of losses in a transformer and design solutions for their further reduction. Hence, understanding of electromagnetic phenomena in conventional power transformers is the key for further progress in this field.

In this report, therefore, a methodology and algorithms are presented for coupling two-dimensional Comsol FEM computation of magnetic fields in a transformer with the system dynamic simulator Simulink. The main objective is to provide methods for constructing a large-scale simulation model in Simulink, with the FEM computation included as a simple functional Comsol block representing the transformer. The benefits obtained by such a methodology are ease model construction and simulation, flexible options for post processing and possibility of extending the finite element analysis for engineers without comprehensive knowledge of FEM computation. The use of the finite element method in modeling of transformers provides a significant advance in the degree of accuracy with which their performance can be predicted.

The mathematical representation of the transformer model

For making such simulation possible we have to develop two different models, and then integrate them, one in Comsol Multiphysics and another one in Simulink environment. The Comsol model is necessary to compute all electromagnetic parameters of transformer during simulation. Then all needed calculated parameters should be transferred to Simulink from Comsol model for making dynamic simulation.

сформированных в его магнитной цепи, нужно рассмотреть не только главный магнитный поток, но также и потоки рассеяния. Множество факторов, таких как тип обмотки и свойства сердечника должны быть тщательно рассмотрены и учтены в процессе моделирования. Особое внимание также следует уделить изучению источников потерь в трансформаторе и разработке решений по их дальнейшему сокращению. В связи с чем понимание электромагнитных явлений в высоковольтных силовых трансформаторах является ключевым моментом для дальнейшего прогресса в данной области.

В статье представлены методология и алгоритмы для объединения двухмерного Comsol FEM моделирования магнитных полей в трансформаторе с динамической моделью в среде Simulink. Главная цель состоит в том, чтобы обеспечить методы построения крупномасштабной модели в Simulink, связанной с FEM вычислением, интегрированным в Simulink как простой функциональный блок Comsol, представляющий собой трансформатор. Преимуществами, полученными в результате использования такой методологии, являются простота в моделировании, гибкость анализа, а также возможность использования FEM анализа инженерами и специалистами без обширных знаний в компьютерном моделировании. Использование метода конечных элементов в моделировании трансформаторов предусматривает существенное увеличение степени точности при анализе переходных процессов трансформаторов.

Математическое представление модели трансформатора

Для достижения поставленной цели мы должны разработать две различные модели, и затем объединить их: одну в Comsol Multiphysics, другую в Simulink. Модель Comsol необходима для расчета электромагнитных параметров трансформатора во время моделирования. Полученные в модели Comsol параметры в дальнейшем используются для проведения динамического моделирования в среде Simulink.

But before developing integrated Comsol-Simulink model its mathematical background is to be worked out.

Let's write the balance voltage equation for the transformer:

$$U = Ri + \frac{d\psi}{dt} . \quad (1)$$

In the equation (1) the first term in the right part is the voltage drop on the active resistance of the winding and the second term represent the straight line flux linkage with winding. As one can see from the equation (1), it includes not only circuit parameters but also electromagnetic field parameters. This equation gave us an opportunity to combine electromagnetic field parameters with circuit equations.

It is possible to rewrite the equation (1) for all windings in matrix form:

$$\begin{bmatrix} u_{abc} \\ u_{ABC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{abc} & 0 \\ 0 & R_{ABC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{ABC} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{abc} \\ \psi_{ABC} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

Here u_{abc} , i_{abc} , R_{abc} , ψ_{abc} are the voltage, current, resistance, self inductance, and the flux linkage of the primary winding, respectively; u_{ABC} , i_{ABC} , R_{ABC} , ψ_{ABC} are the corresponding parameters of the secondary winding.

As we know from the transformer fundamental theory the second term in the equation (2) represent the back e.m.f.:

$$e_{ABC} = \frac{d\psi_{ABC}}{dt}, \quad (3)$$

where $\psi_{abc} = L_1 i_{ABC} + M_{12} i_{abc}$;

$$e_{abc} = \frac{d\psi_{abc}}{dt}, \quad (4)$$

where $\psi_{abc} = L_2 i_{abc} + M_{21} i_{ABC}$, here L_1 , L_2 – self inductances of primary and secondary windings; M_{12} , M_{21} – are the mutual inductances between the primary and secondary windings.

The flux linkages ψ_{abc}, ψ_{ABC} , are non liner variables representing the nonlinear magnetization of the core. Their values are obtained from the nonlinear FEM computation of the transformer in Comsol. For sim-

Однако на начальном этапе, до разработки интегрированной Comsol-Simulink модели, необходимо разработать математическую модель исследуемого высоковольтного трансформатора.

Запишем уравнение баланса напряжения для трансформатора:

$$U = Ri + \frac{d\psi}{dt} . \quad (1)$$

В выражении (1) первое слагаемое в правой части является падением напряжения на активном сопротивлении обмотки, второе слагаемое представляет собой потокосцепление магнитного поля с обмоткой. Как видно из выражения (1), оно содержит не только параметры цепи, но также и параметры электромагнитного поля. Данное уравнение дает нам возможность объединить параметры электромагнитного поля с уравнением для участка цепи.

Запишем (1) в матричной форме для первичной и вторичной обмоток:

$$\begin{bmatrix} u_{abc} \\ u_{ABC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{abc} & 0 \\ 0 & R_{ABC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{ABC} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{abc} \\ \psi_{ABC} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где u_{abc} , i_{abc} , R_{abc} , ψ_{abc} – напряжение, ток, активное сопротивление, потокосцепление первичной обмотки, u_{ABC} , i_{ABC} , R_{ABC} , ψ_{ABC} – соответствующие параметры вторичной обмотки.

Согласно фундаментальной теории трансформатора, второе слагаемое в выражении (2) представляет собой индуцированные ЭДС:

$$e_{ABC} = \frac{d\psi_{ABC}}{dt}, \quad (3)$$

где $\psi_{abc} = L_1 i_{ABC} + M_{12} i_{abc}$;

$$e_{abc} = \frac{d\psi_{abc}}{dt}, \quad (4)$$

где $\psi_{abc} = L_2 i_{abc} + M_{21} i_{ABC}$, здесь L_1 , L_2 – самоиндукция первичной и вторичной обмоток; M_{12} , M_{21} – взаимные индуктивности между первичной и вторичной обмотками.

Потокосцепления ψ_{abc}, ψ_{ABC} являются нелинейными переменными, представляющими нелинейную намагниченность сердечника. Их значения получены путем применения нелинейного решателя в модели Comsol. Для упрощенной 2D-

plified 2D FEM of a transformer ψ_{abc}, ψ_{ABC} , can be determined from the z component A_z of magnetic vector potential \mathbf{A} in the winding as follows:

$$\psi = \frac{n_c}{S_c} \int_{\Omega} (A_z \cdot \sin\Theta) d\Omega, \quad (5)$$

here n_c is the number of turns in the winding, S_c in the total cross-sectional area of the winding, Θ is the angle from the x -axis., Ω is the space filled with winding.

In our 2D model \mathbf{A} is perpendicular to the x - y axes and hence $\sin\Theta = \sin(90^\circ) = 1$.

Now using equations (3)–(5) we can rewrite (2) as:

$$\begin{bmatrix} u_{abc} \\ u_{ABC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{abc} & 0 \\ 0 & R_{ABC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{ABC} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \frac{n_{cab}}{S_{cab}} \int_{\Omega} (A_z \cdot \sin\Theta) d\Omega \\ \frac{n_{cABC}}{S_{cABC}} \int_{\Omega} (A_z \cdot \sin\Theta) d\Omega \end{bmatrix}. \quad (6)$$

The developed of Comsol-Simulink computer model is based on equation (6).

Comsol model

The 2D power transformer model was developed in Comsol Multiphysics environment. Before integrating this model to Simulink, Comsol model was tested and results of simulation (Induced secondary voltage, inductances and etc.) were compared with measurement results obtained during experiments on real physical model of the transformer. The comparison showed that the Comsol model is robust, and we can use it for our simulation. In Comsol model, we are able to specify type of core materials, winding materials, non-linear properties like anisotropy of core, laminated or unlaminated core, geometrical shape of the transformer and etc. The magnetic field in transformer was produced by current densities in the primary winding of phases $L11$, $L12$, $L13$.

модели трансформатора потокоосцепления ψ_{abc}, ψ_{ABC} могут быть определены из z -составляющей A_z -векторного магнитного потенциала \mathbf{A} в обмотках, согласно выражения

$$\psi = \frac{n_c}{S_c} \int_{\Omega} (A_z \cdot \sin\Theta) d\Omega, \quad (5)$$

где n_c – количество витков в обмотке, S_c – площадь поперечного сечения обмотки, Θ – угол между A_z и осью OX , Ω – объем, заполненный обмотками, по которому проводится интегрирование.

Так как в нашей 2D-модели, \mathbf{A} перпендикулярно плоскости X – Y , то $\sin\Theta = \sin(90^\circ) = 1$.

Используя (3)–(5), запишем (2):

$$\begin{bmatrix} u_{abc} \\ u_{ABC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{abc} & 0 \\ 0 & R_{ABC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{ABC} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \frac{n_{cab}}{S_{cab}} \int_{\Omega} (A_z \cdot \sin\Theta) d\Omega \\ \frac{n_{cABC}}{S_{cABC}} \int_{\Omega} (A_z \cdot \sin\Theta) d\Omega \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Разработанная интегрированная компьютерная Comsol-Simulink модель представляет собой интерпретацию уравнения (6).

Модель Comsol

2D-модель силового трансформатора была разработана в среде Comsol Multiphysics. До объединения этой модели с Simulink, модель Comsol была протестирована и результаты моделирования (индуцированное вторичное напряжение, индуктивности и т.д.) были сравнены с результатами, полученными в ходе экспериментов на реальной физической модели трансформатора в условиях лаборатории. Сравнительный анализ показал, что модель Comsol точно описывает исследуемый трансформатор, и ее можно использовать в дальнейшей разработке нашей модели.

В модели Comsol мы можем задавать: материал сердечника, материал обмоток, нелинейные свойства сердечника, такие как анизотропия, ламинированный либо неламинированный сердечник, форму трансформатора и т.д. Магнитное поле в трансформаторе было сгенерировано за-

A three-phase transformer usually has the windings for each phase placed concentrically on the same leg of the transformer. The cross-section through three legs gives the core and windings window in Fig. 1, which can be used as a two-dimensional model.

For transformer electromagnetic field modeling we have used application mode “Perpendicular Induction Currents, Vector Potential (emqa)” in Comsol. Time-varying currents flowing in conductors produce a time varying magnetic field in planes perpendicular to the conductors. This magnetic field induces eddy currents in the source conductor and in any other conductor parallel to it and can be determined by solving the relationship, which is derived from Maxwell’s equations:

$$\sigma \cdot \frac{\partial A_z}{\partial t} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times A_z) - \sigma \nu \times (\nabla \times A_z) = \sigma \Delta V / L + J_z^e, \quad (7)$$

here μ_r is the relative magnetic permeability, μ_0 is the permeability of vacuum, A_z is the magnetic vector potential, σ is the electrical conductivity, L is the length of the model in z direction, ΔV is the potential difference, ν is the velocity, J_z^e is the external current density.

During simulation one can use static and time-dependent solver. The time-dependent formulation can be used for studying a lot of different parameters in transformer during transients’ processes, like: forces in the transformers windings, losses of different nature etc., by specifying the parameters of currents, obtained from Comsol-Simulink integrated model, into Comsol model directly. Otherwise, in the Comsol-simulink model during modeling the simulation time steps are specifying from Simulink, and every time step the static electromagnetic problem solved in Comsol.

данием плотности тока в первичной обмотке $L1$, $L2$, $L3$.

Трехфазные трансформаторы обычно имеют обмотки, расположенные concentrically на каждом стержне трансформатора. На рис. 1 представлено поперечное сечение, проходящее через 3 стержня трансформатора, лежащее в плоскости $X-Y$.

Для моделирования электромагнитного поля трансформатора был использован модуль Comsol “Perpendicular Induction Currents, Vector Potential (emqa)”. Изменяющиеся во времени токи, протекающие в проводниках, генерируют переменное магнитное поле в плоскостях, перпендикулярных проводникам. Это магнитное поле индуцирует вихревые токи (токи Фуко) в проводниках источника и в любых других перпендикулярных проводниках. Исследуемые процессы могут быть описаны уравнениями Максвелла:

$$\sigma \cdot \frac{\partial A_z}{\partial t} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times A_z) - \sigma \nu \times (\nabla \times A_z) = \sigma \Delta V / L + J_z^e, \quad (7)$$

где μ_r – относительная магнитная проницаемость, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, A_z – магнитный векторный потенциал, σ – электрическая проводимость, L – длина модели в z направлении, ΔV – разность потенциалов, ν – скорость, J_z^e – внешняя плотность тока.

Во время моделирования возможно использовать два типа решателя: статический и динамический (зависящий от времени). Использование динамического решателя позволяет изучать огромное количество различных параметров трансформатора во время переходных процессов, таких как электромагнитные силы в обмотках, частотные отклики, потери различной природы путем задания токов, полученных в Simulink непосредственно в модель Comsol, так как в модели Comsol-Simulink шаг моделирования задается из Simulink, и в любой момент времени в среде Comsol решается статическая задача.

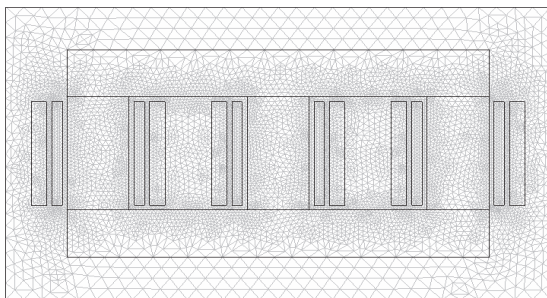


Fig. 1. The transformer geometrical structure with mesh

As shown in Fig.1, a finite-element mesh was generated for the whole computational domain modeling. A large surrounding area is also introduced in order to account the far field effects (this part is not shown in the figures). Flux continuity boundary conditions are imposed around the core; otherwise, the leakage flux would not be simulated correctly.

The magnetization curve of the transformer core is shown in Fig. 2.

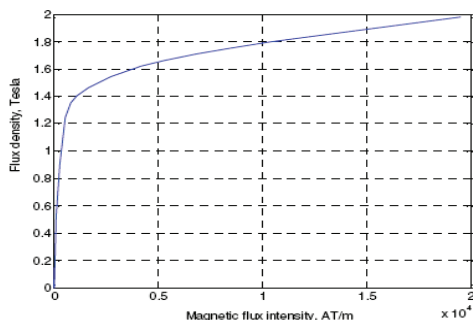


Fig. 2. The B-H magnetization curve

The curve presented in the Fig. 2 was specified as an interpolation function in Comsol.

In real life the winding consist of many strands to reduce the impact of eddy currents. However, it is not practical to use such a detail representation in the model that would require introducing a huge amount of mesh points and much computer memory. Instead, each winding is set to one big copper conductor (see Fig. 1) with the current densities J_{11} , J_{12} and J_{13} specified for the primary windings. At the same time, conductivity is set to zero to avoid eddy current effects in the large equivalent conductor.

The core material is set to iron. In a real

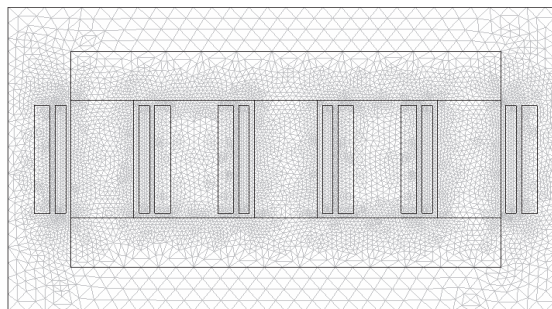


Рис. 1. Геометрическая структура трансформатора

Как видно на рис. 1, сетка конечных элементов была сгенерирована для всей области моделирования. Вокруг трансформатора была включена большая область для учета дальних эффектов (эта часть здесь не показана).

На рис. 2 представлена кривая намагничивания сердечника трансформатора, которая была задана с помощью интерполяционной функции в Comsol.

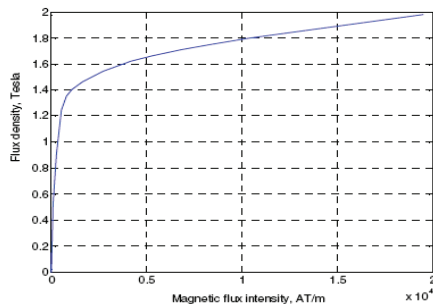


Рис. 2. Кривая намагничивания B-H

Как известно, реальная обмотка трансформатора состоит из множества проводников, для уменьшения вихревых (паразитных) токов. Тем не менее, непрактично использовать такое детальное представление в модели, поскольку это требует большого количества конечных элементов и, как следствие, высокую вычислительную производительность компьютера. В связи с чем, обмотка представлена единичным прямоугольным проводником (см. рис. 1), в котором заданы плотности тока J_{11} , J_{12} и J_{13} . В то же время проводимость проводника приравнена к нулю, дабы избежать вихревых токов в большом эквивалентном проводнике.

В качестве материала сердечника выбрано железо. В реальном трансформаторе сердечник ламинирован, его магнитная проницаемость анизотропна. Анизотропия

transformer, the iron is laminated and oriented, i.e., the permeability is anisotropic. The anisotropy is implemented into the model; however, the core laminations were not considered (again that would require too much memory). Instead, zero conductivity is used to simulate the effect of laminations.

In the Fig.3 one can see a static solution in form of the magnetic flux density shown with streamlines.

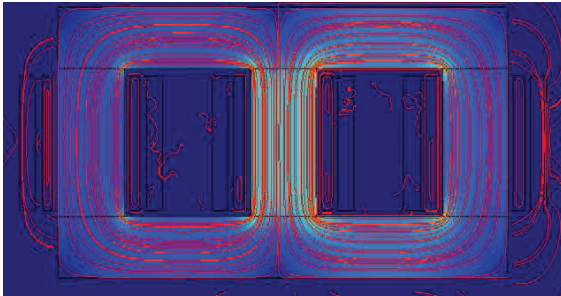


Fig. 3. Magnetic field representation with flux lines

As one can see in Fig.3, the flux streamlines are mainly concentrated in the core. The leakage fluxes are also presented near the windings.

Input and output parameters during simulation

As input parameters for Comsol Multiphysics Subsystem block, we used current density for both windings. The current density for primary winding was calculated from the supply voltage (for more information look at “The Simulink model of the primary winding circuit” chapter). As output parameters, we used flux linkages ψ in both windings. Figure 4 presents a functional block of Comsol FEM model.

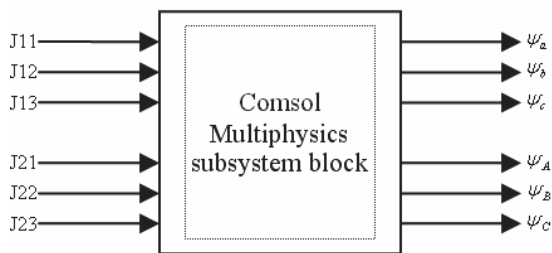


Fig. 4. FEM of the transformer as a functional block with input and output parameters

In the figure, $J_{11}, J_{12}, J_{13}, \psi_a, \psi_b, \psi_c$ are the currents densities and flux linkages

была введена в модель, однако остов представлен неламинированным (так как это потребовало бы большой вычислительной мощности). Чтобы учесть эффект ламинирования, была введена нулевая электрическая проводимость сердечника.

На рис. 3 представлена картина магнитного поля трансформатора с силовыми линиями. Как видно из рис. 3, силовые линии в основном сконцентрированы в сердечнике трансформатора.

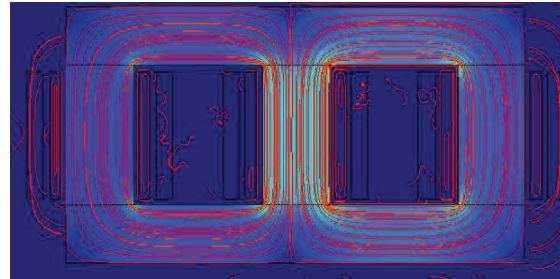


Рис. 3. Картина магнитного поля трансформатора

Здесь же можно видеть и потоки рассеяния, находящиеся в основном около обмоток.

Входные и выходные параметры модели

В качестве входных параметров для блока «Comsol Multiphysics Subsystem» мы использовали плотность тока для обеих обмоток. Плотность тока первичной обмотки была рассчитана через питающее напряжение (для более подробной информации смотрите раздел «Модель Simulink для первичной обмотки»). В качестве выходных было использовано потокоцепление ψ в обеих обмотках. На рис. 4 представлен функциональный блок Comsol.

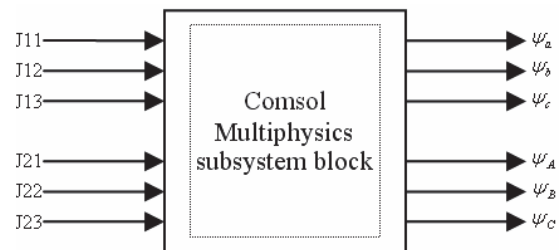


Рис. 4. Функциональный блок Comsol с входными и выходными параметрами

На рис. 4 $J_{11}, J_{12}, J_{13}, \psi_a, \psi_b, \psi_c$ — плотности тока и потокоцепления в пер-

in the primary winding, respectively J_{21} , J_{22} , J_{23} , ψ_A, ψ_B, ψ_C are the corresponding parameters of the secondary winding.

Two types of export from Comsol to Simulink

We have used two different approaches for linking the field and circuit model: direct and indirect coupling between Comsol and Simulink. It was reached by using two different types of data export from Comsol. During computer experiments we were using “General static” export and “Linearized static” export. The first one was used for direct coupling modeling, and the second one for indirect coupling. The direct coupling approach needs more time and computer performance for making simulations but, as a result, we have more accurate calculations. To compute the outputs of the Comsol, the Comsol linear or nonlinear stationary solver is called for each time step, with inputs from Simulink. Otherwise, the “Linearized static” method takes much less time for calculating parameters during simulation, because the Comsol model is linearized about an equilibrium solution and a transfer matrix is computed and is transferred to Simulink. Hence, there is no need to call Comsol block during every time step during simulations. To compute the outputs of the Comsol Multiphysics Subsystem block, the transfer matrix is used.

The Simulink model

After mathematical formulation of the problem, Comsol model implementation and determination of the input and output parameters of Comsol subsystem block, we developed Simulink dynamic model, presented in Fig. 5. As one can see, the Comsol Multiphysics Subsystem block representing the transformer, is integrated into model.

The Simulink block scheme consists from several blocks: Comsol Multiphysics subsystem block, Secondary winding block, Load current secondary winding block, Primary winding currents block.

Comsol Multiphysics Subsystem block is a representation of Comsol model of transformer in Simulink environment. This block compute electromagnetic parameters of

вичной обмотке, J_{21} , J_{22} , J_{23} , ψ_A, ψ_B, ψ_C – соответствующие параметры для вторичной обмотки.

Два способа экспорта из Comsol в Simulink

Во время моделирования мы использовали два различных подхода при объединении моделей в среде Comsol и в среде Simulink. Этого удалось достичь путем использования двух различных типов экспорта данных из Comsol. Во время компьютерного моделирования мы использовали “General static” – экспорт и “Linearized static” – экспорт. Первый способ был использован при прямом объединении моделей, а второй – при косвенном. Метод прямого объединения требует больше времени и производительности компьютера для расчета модели, однако в итоге получается более точное решение. Для расчета выходов функционального блока Comsol линейный или нелинейный решатель на каждом временном шаге запрашивает управляющие значения из Simulink. Метод “Linearized static”, наоборот, требует гораздо меньше времени для решения, так как модель Comsol линейризуется относительно некоторого устойчивого значения и решение в виде трансфертной матрицы передается в Simulink.

Модель Simulink

В связи с вышесказанным нет необходимости на каждом шагу моделирования обращаться в Comsol для расчета выходных параметров (рис. 5). Для получения выходных параметров блока “Comsol Multiphysics Subsystem” используется трансферная матрица.

Принципиальная схема модели в Simulink состоит из нескольких блоков: Comsol Multiphysics subsystem block, Secondary winding block, Load current secondary winding block, Primary winding currents block.

Блок “*Comsol Multiphysics Subsystem*” представляет собой модель трансформатора, разработанную в Comsol и внедренную в Simulink. Этот блок производит вычисле-

modeling transformer and exported as an output parameters flux linkages of the primary and secondary windings. The *Secondary winding* block needed for obtaining the e.m.f. in each phase from linkage fluxes exported from *Comsol Multiphysics subsystem* block. *Load current secondary winding* block specified the initial values of load currents during the first calculation circle. The *Primary winding currents* block calculate the currents specified to the primary windings for generating the electromagnetic field in transformer obtained from the supply voltage sources. The *Current Measurement* elements presented in the load circuit, used to measure the currents flowing in each phase in the secondary windings.

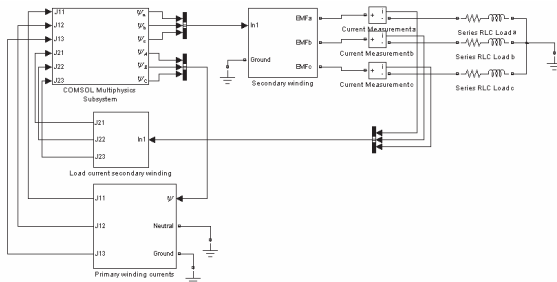


Fig. 5. Simulink block scheme

The Simulink model of the secondary winding circuit

In the beginning of our investigation we faced the problem how to link the load to the secondary winding of the transformer. We investigated the following approach for solving this problem:

During the first simulation circle we are able to determine the *e.m.f.* on the secondary winding terminals, which was induced by the alternating flux, generated by the currents flowing in the primary winding. At this time t_0 the current in the secondary winding equal to zero (this corresponds to open circuit transformer test). During the next simulation step $t_n = t_0 + \Delta t$ (Δt is the simulation time step specified in Simulink), the current (load current) in the secondary winding has some value depending on the load connected to the secondary winding terminals.

In the Fig. 6, one can see the load block, which consist of several subsystems. The "Load block" gave us an opportunity to con-

ние электромагнитных параметров моделируемого трансформатора и экспортирует в качестве выходных параметров потокосцепления первичной и вторичной обмоток. Блок "Secondary winding" необходим для расчета ЭДС в каждой фазе из потокосцеплений, экспортированных из блока "Comsol Multiphysics Subsystem". Блок "Load current secondary winding" позволяет задать начальные значения тока нагрузки на первом цикле расчета. Блок "Primary winding currents" рассчитывает плотности токов первичной обмотки из питающего напряжения. Элементы "Current Measurement" в цепи нагрузки необходимы для измерения токов в каждой фазе вторичной обмотки трансформатора.

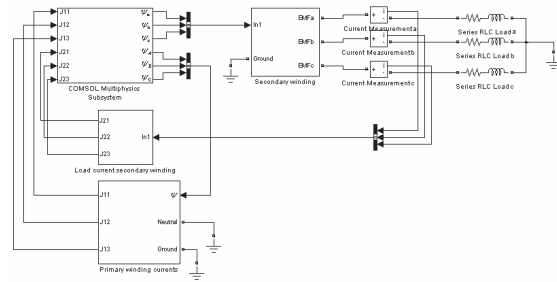


Рис. 5. Блок-схема модели Simulink

Модель Simulink для цепи вторичной обмотки

В начале нашего исследования мы столкнулись с проблемой присоединения нагрузки к вторичной обмотке трансформатора. Нами было найдено следующее решение: во время первого цикла моделирования мы определяем ЭДС на выводах вторичной обмотки, индуцированной переменным электромагнитным полем, сгенерированном токами, протекающими в первичной обмотке. В момент времени t_0 ток во вторичной обмотке равен нулю (что соответствует опыту холостого хода). Во время следующего шага $t_n = t_0 + \Delta t$ (Δt – шаг моделирования задающийся из Simulink), ток нагрузки, протекающий во вторичной обмотке, имеет некоторое значение, зависящее от нагрузки во вторичной цепи.

На рис. 6 представлен блок нагрузки, который состоит из нескольких подсистем. Данный блок дает нам возможность подсоединять различные виды нагрузок,

nect different types of load, and use different types of neutral operating modes (grounded, isolated, compensated), that can be used for simulating all kinds of possible transformer working conditions. The different types of neutral regimes can be specified by modifying the “Ground” port on the “EMF” subsystem.

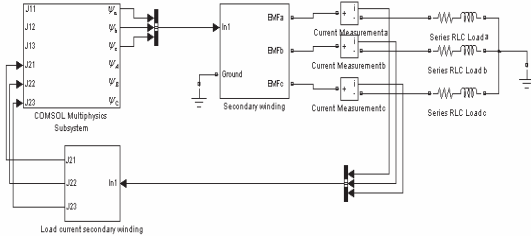


Fig. 6. Secondary winding load block

As it is shown in Fig. 1, we receive parameters ψ_a , ψ_b , ψ_c from the Comsol Multiphysics Subsystem. The mathematical representation of these parameters is:

$$\psi_a = \frac{n_c}{S_c} \int (A_{za}) d\Omega_a; \quad (8)$$

$$\psi_b = \frac{n_c}{S_c} \int (A_{zb}) d\Omega_b; \quad (9)$$

$$\psi_c = \frac{n_c}{S_c} \int (A_{zc}) d\Omega_c. \quad (10)$$

The integration (8)–(10) is performed in Comsol every time step and the obtained magnitudes of the integration are exported to Simulink.

To get back *e.m.f.* in all secondary windings, we have to differentiate equations (7)–(9) with respect to the time t :

$$emf_a = \frac{\partial \psi_a}{\partial t}, \quad emf_b = \frac{\partial \psi_b}{\partial t}, \quad emf_c = \frac{\partial \psi_c}{\partial t}. \quad (11)$$

Because all simulation steps sets from Simulink environment, it is not possible to differentiate these equations in Comsol, because in case of Comsol-Simulink coupling, the task in Comsol became static. If we differentiate equations (11) in Comsol, their derivatives exported to Simulink equal to zero.

As we can see in Fig. 7, three output parameters from Comsol ψ_a , ψ_b , ψ_c are differentiated in this subsystem block and the derivatives are set as an input signal to the CVS (Controlled Voltage Source block). The

а также использовать различные режимы работы нейтрали (заземленная, изолированная, компенсированная), что позволяет смоделировать всевозможные режимы работы трансформатора. Различные режимы работы нейтрали могут быть заданы путем модификации порта “Ground” в блоке “EMF”.

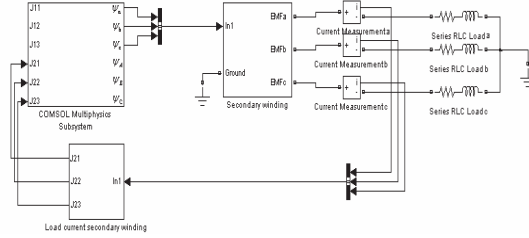


Рис. 6. Блок «Secondary winding load»

Как показано на рис. 1, мы получаем параметры ψ_a , ψ_b , ψ_c из блока “Comsol Multiphysics Subsystem”. Математическое представление этих параметров:

$$\psi_a = \frac{n_c}{S_c} \int (A_{za}) d\Omega_a; \quad (8)$$

$$\psi_b = \frac{n_c}{S_c} \int (A_{zb}) d\Omega_b; \quad (9)$$

$$\psi_c = \frac{n_c}{S_c} \int (A_{zc}) d\Omega_c. \quad (10)$$

Интегрирование выражений (8)–(10) производится на каждом расчетном шаге в Comsol и полученные значения экспортируются в Simulink.

Для получения ЭДС во вторичной обмотке, необходимо продифференцировать выражения (8)–(10) по времени:

$$emf_a = \frac{\partial \psi_a}{\partial t}, \quad emf_b = \frac{\partial \psi_b}{\partial t}, \quad emf_c = \frac{\partial \psi_c}{\partial t}. \quad (11)$$

Шаг моделирования задается из Simulink, поэтому невозможно произвести дифференцирование уравнений в Comsol, так как в случае интегрированной Comsol-Simulink модели задача в Comsol становится стационарной. Если попытаться продифференцировать уравнения (11) в Comsol, то их производные, экспортированные в Simulink, будут равны нулю.

Как видно из рис. 7, три выходных параметра из Comsol ψ_a , ψ_b , ψ_c дифференцируются в этом блоке и их производные передаются в качестве входного сигнала в

Controlled Voltage Source block converts the Simulink input signal into an equivalent voltage source. This decision gave us an opportunity to connect the load to the secondary windings. As we can see in Fig.5 the load is star-connected, and we are able to specify different resistances and inductances in phases, meanwhile we can simulate symmetrical and unsymmetrical load, phaseless regime, etc. During the simulation, we are measuring the load currents in different phases with block CM, and the measured signals are set as an input parameters to the second windings.

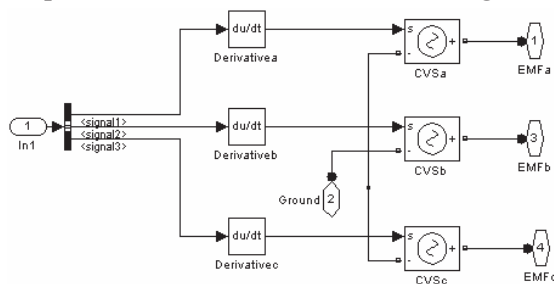


Fig. 7. EMF subsystem

During the first simulation step, to achieve robust calculations, the input load current must be equal to zero. This can be done by using Simulink block "IC" (Initial condition). The IC block sets the initial condition of the signal at its input port, i.e., the value of the signal at the simulation start time ($t=0$, by default). The block does this by providing output for the specified initial condition when one starts the simulation, regardless of the actual value of the input signal. Thereafter, the block output signal is the actual value of the input signal. One can see IC blocks in Fig. 8. As one can see in Fig. 8 the initial condition of the secondary load currents during the first step of simulation are equal to zero.

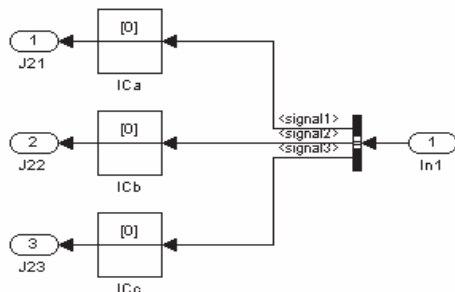


Fig.8. Initial state of the current subsystem

контролируемый источник напряжения (Controlled Voltage Source block). Данное решение дает нам возможность присоединить нагрузку к выводам вторичной обмотки. Как видно на рис. 5, вторичная обмотка соединена в звезду. В качестве нагрузки мы можем задавать различные активные сопротивления и индуктивности в фазах, тем самым моделировать симметричную и несимметричную нагрузку, обрыв фазы и т.д. Во время моделирования производится замер токов в каждой фазе вторичной обмотки с помощью блока "CM" и получаемые значения устанавливаются в качестве входных параметров для вторичной обмотки.

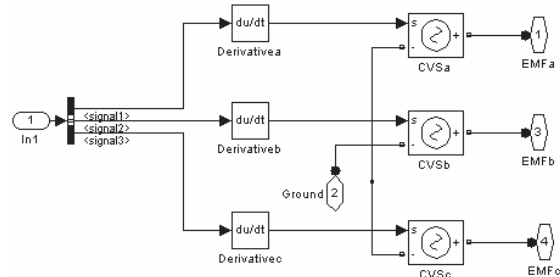


Рис. 7. Подсистема «EMF»

Пересчет полученных значений токов во вторичной обмотке, в плотности токов производится в функциональном блоке Comsol.

Во время первого цикла моделирования для достижения наиболее точного результата и установившегося режима за наиболее короткий интервал времени, входной параметр тока нагрузки должен равняться нулю. Это можно сделать, используя блок "IC" (начальное условие) в Simulink.

Как видно на рис. 8, начальное значение тока в первый шаг моделирования равняется нулю.

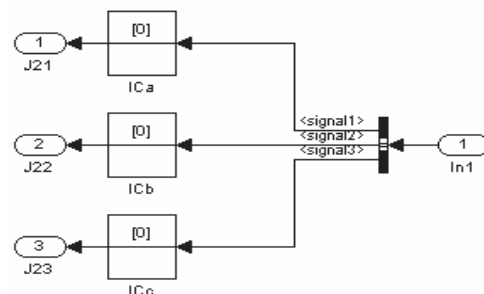


Рис. 8. Блок "Initial state of the current"

The Simulink model of the primary winding circuit

In case we connect the load to the secondary windings, the load current will flow in the windings, and it generates the flux opposite the main flux. As a result, all electromagnetic parameters of the transformer will be changed. To compensate the flux reduction the current in the primary winding have to rise. That is why we have to develop the algorithm how to make the current in the primary winding to be susceptible to the load current in the secondary. To solve this problem, we also decided to use the flux linkages, because they are proportional to fluxes, and reflect all electromagnetic changes in the transformer at every time step during simulation.

In the Fig. 9, one can see the representation of the “Primary winding block”.

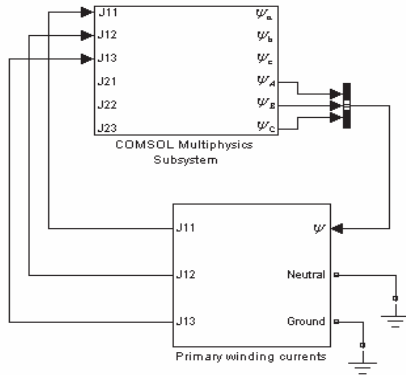


Fig. 9. Primary winding block

From the COMSOL Multiphysics Subsystem we receive three flux linkages of the primary winding ψ_A , ψ_B , ψ_C . The mathematical representation of this linkages is

$$\psi_A = \frac{n_c}{S_c} \int_{\Omega_A} (A_{zA}) d\Omega_A ; \quad (12)$$

$$\psi_B = \frac{n_c}{S_c} \int_{\Omega_B} (A_{zA}) d\Omega_B ; \quad (13)$$

$$\psi_C = \frac{n_c}{S_c} \int_{\Omega_C} (A_{zA}) d\Omega_C . \quad (14)$$

After that we differentiate these linkages with respect to time t to receive the *e.m.f.* induced in each winding.

Модель Simulink для цепи первичной обмотки

В случае присоединения нагрузки к вторичным обмоткам, ток нагрузки протекает в обмотках, и это генерирует магнитный поток, противоположный основному. В результате этого изменяются все электромагнитные параметры трансформатора. Для компенсации снижения потока требуется увеличение тока в первичной обмотке. В связи с этим нам пришлось разработать алгоритм взаимодействия тока в первичной обмотке и тока нагрузки во вторичной. Для решения данной проблемы мы использовали потокосцепление, т.к. оно пропорционально электромагнитным потокам и отражает все электромагнитные изменения в трансформаторе на каждом расчетном шагу моделирования.

На рис. 9 изображен блок первичной обмотки.

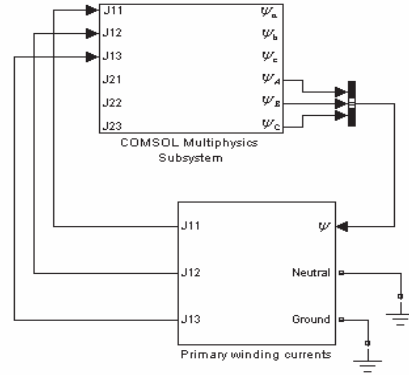


Рис. 9. Блок “Primary winding”

Из подсистемы “COMSOL Multiphysics Subsystem” получаем потокосцепления первичной обмотки ψ_A , ψ_B , ψ_C . Математическое представление потокосцеплений:

$$\psi_A = \frac{n_c}{S_c} \int_{\Omega_A} (A_{zA}) d\Omega_A ; \quad (12)$$

$$\psi_B = \frac{n_c}{S_c} \int_{\Omega_B} (A_{zA}) d\Omega_B ; \quad (13)$$

$$\psi_C = \frac{n_c}{S_c} \int_{\Omega_C} (A_{zA}) d\Omega_C . \quad (14)$$

После этого для получения ЭДС, индуцированных в каждой обмотке, продифференцируем потокосцепления по времени.

Rewriting equation (6) in respect of primary winding currents i_{ABC} , one gets:

$$i_{ABC} = \frac{u_{ABC} - \frac{d}{dt} \left(\frac{n_c}{S_c} \int (A_{zABC}) d\Omega_{ABC} \right)}{R_1}. \quad (15)$$

The “Primary winding currents” block represents equation (15).

As we can see in Fig. 10, the transformer primary windings are supplied by the voltage sources UA, UB, UC. The Controlled Voltage Sources (EMFA, EMFB, EMFC), representing the *e.m.f.* in phases, are connected with voltage sources in opposite direction, according to the transformer fundamentals theory. The resistances RA, RB, RC represent the primary winding active resistances.

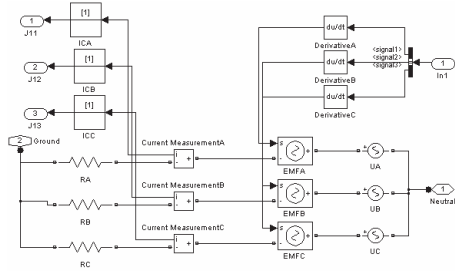


Fig. 10. Primary winding currents block

We can specify different configuration of windings connection like Delta and Wye connections in “Primary winding currents” block by replacing the wire connections. The port “Neutral” and “Ground” give us an opportunity to simulate different working regimes for all kinds of winding connections.

Experimental results

The experimental modeling was conducted on a computer with the following characteristics: ASUS V2-AH2/A2x4200+/2048MB DDR2-800/ Hitachi 160GB.

The magnetic field in the transformer is modeled by two-dimensional FEM model coupled to the circuit equations of the windings. The external circuit model is linked with the transformer model either directly, when all the equations are solved simultaneously in the common system of equations, or indirectly in Simulink, using circuit parameter approach.

Based on the detailed knowledge of the physical properties of different materials,

Запишем (6) по отношению к току первичной обмотки i_{ABC} :

$$i_{ABC} = \frac{u_{ABC} - \frac{d}{dt} \left(\frac{n_c}{S_c} \int (A_{zABC}) d\Omega_{ABC} \right)}{R_1}. \quad (15)$$

Блок “Primary winding currents” представляет собой интерпретацию уравнения (15).

Как видно из рис. 10, первичная обмотка трансформатора подключена к источникам напряжения UA, UB, UC. Контролируемые источники напряжений (EMFA, EMFB, EMFC), представляющие собой ЭДС в фазах, подключены встречно к источникам напряжения, согласно фундаментальной теории электромагнитного поля. Сопротивления RA, RB, RC представляют собой активные сопротивления первичной обмотки.

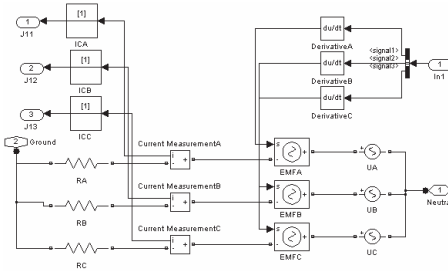


Рис. 10. Блок “Primary winding currents”

В блоке “Primary winding currents”, возможно задавать различные конфигурации первичной обмотки, такие как соединение звездой или треугольником. Модификация портов “Neutral” и “Ground” позволяет смоделировать различные режимы работы трансформатора.

Экспериментальные результаты

Экспериментальное моделирование было произведено на компьютере со следующими характеристиками: ASUS V2-AH2/A2x4200+/2048MB DDR2-800/ Hitachi 160GB.

Магнитное поле в трансформаторе моделируется при помощи 2D FEM модели, соединенной с уравнениями цепи обмоток. Модель внешней цепи связывается с моделью трансформатора напрямую, если все уравнения решаются одновременно в общей системе уравнений, или же косвенно в Simulink, с использованием метода параметров цепи.

Основываясь на детальном знании о

Cosmol-Simulink computations are performed in the case of no-load and for symmetrical and unsymmetrical load.

The effective voltage and the frequency of the power source are 6000(V) and 50(Hz) respectively. The number of turns and the DC resistance of the windings are 3000 and 200 and 1(Om) for both windings respectively. The material of the core hatched in Fig.1 is assumed to be air or steel of which the relative permeability was specified by the function presented on Fig.2 and the conductivity is set to 0 (S/m).

The currents in the secondary windings of a loaded transformer (symmetrical RL load) is shown in Fig. 11.

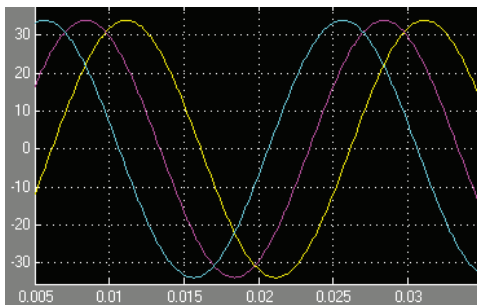


Fig. 11. Secondary windings currents in the case of symmetrical RL load

The currents in the secondary windings of a loaded transformer (unsymmetrical RL load) is shown in Fig. 12–14.

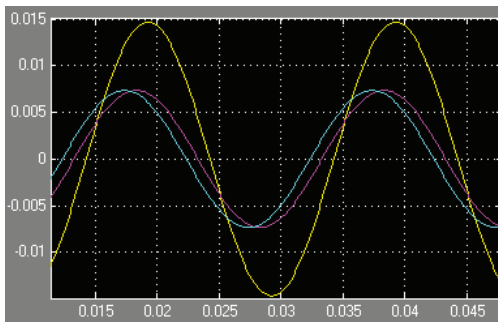


Fig. 12. Secondary windings currents in the case of unsymmetrical RL load

For simulating the transient process due to different faults, it is necessary to specify the initial condition values. To do this, one has to open “Power Gui” in Simulink model and than “Initial State Setting”, where one can specify the initial values.

физических свойствах различных материалов, было произведено моделирование в Cosmol-Simulink при различных режимах симметричной и асимметричной нагрузки.

Питающее напряжение и частота источника 6000 В и 50 Гц соответственно. Количество витков и активное сопротивление обмоток 3000 и 200 и 1 Ом для обеих обмоток.

Материалом сердечника, заштрихованного на рис. 1, предполагается воздух или сталь, относительная магнитная проницаемость которых была определена функцией, представленной на рис. 2, и проводимость проводника приравнена к нулю (см/м).

На рис. 11 представлены токи вторичной обмотки нагруженного трансформатора (симметричная RL нагрузка).

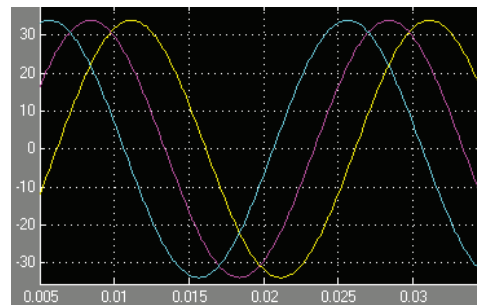


Рис. 11. Токи вторичной обмотки при симметричной RL нагрузке

На рис. 12–14 представлены токи вторичной обмотки нагруженного трансформатора (несимметричная RL нагрузка).

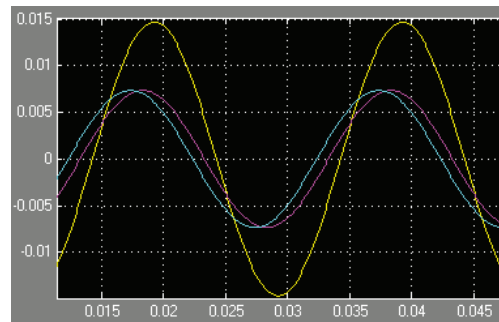


Рис. 12. Токи вторичной обмотки при несимметричной RL нагрузке

Для моделирования переходных процессов, соответствующих различным неисправностям, необходимо задавать значения начальных условий. Это можно сделать в разделе “Power Gui”, “Initial State Setting” в Simulink.

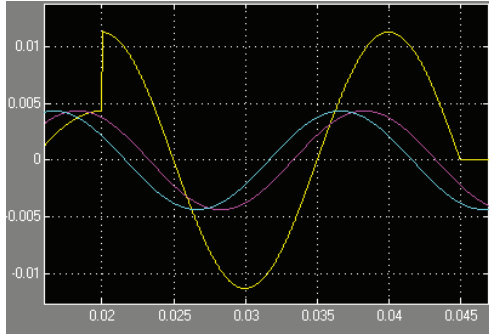


Fig. 13. One phase to ground fault

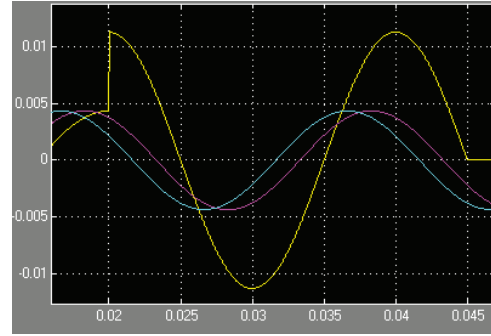


Рис. 13. Замыкание фазы на землю

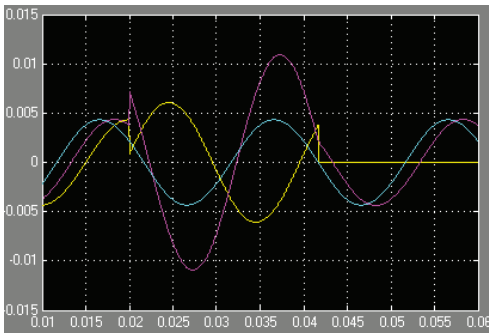


Fig. 14. Phase to phase fault

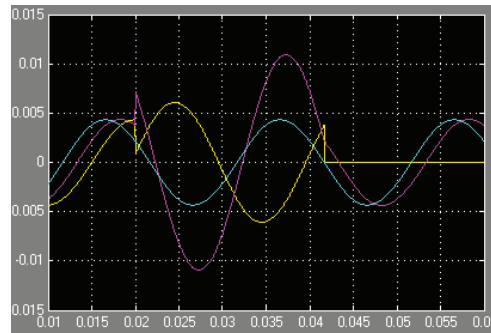


Рис. 14. Межфазное замыкание

After the modeling of coupled processes in Comsol-Simulink environment, one can study many valuable parameters like different transformer losses, eddy currents and etc., by specifying the obtained currents from Simulink in the Comsol model separately.

Conclusion

As a result of this project we have developed efficient and robust algorithms, whose implementation gave us information about physical processes and may lead to operationally more reliable and economically more advantageous design of transformers. The integration of the FEM with electric circuit analysis, presented in our model, gave us a great instrument for High voltage power transformer analysis and simulation with possibility to take into account the geometric complexity, non-linearity, induced eddy currents and electric circuits with general topologies. In particular, these models can be applied for computing magnetic fluxes in 3D magnetic system of a transformer; for studying losses in the core and windings, for detailed analysis of eddy currents in the core and windings taking into account skin-effect, proximity effect

После произведения совместного моделирования в Comsol-Simulink, возможно изучение различных важных параметров трансформатора, таких как потери, вихревые токи и т.д. путем задания полученных в модели Simulink токов непосредственно в Comsol.

Заключение

В ходе выполнения этого проекта был разработан эффективный и надежный алгоритм, применение которого дало нам информацию о физических процессах, протекающих в трансформаторах, что может привести к созданию более надежных и экономически выгодных моделей трансформаторов. Объединение метода FEM с анализом электрических цепей, представленного в нашей модели, предоставило нам возможность анализа высоковольтных силовых трансформаторов и моделирования с возможностью учитывать геометрическую сложность, нелинейность, индуцированные вихревые токи и электрические цепи с общей топологией. В частности, эти модели могут быть использованы для расчета магнитных потоков в 3D магнитной системе трансформатора; для изучения потерь в сердечни-

under different working conditions. We can simulate many kinds of faults such as phase to ground fault, phase to phase fault and making analysis of transient processes. It gave us the freedom to describe physical models in terms of real physics without lumping the field effects into the electrical circuit domain, at the same time, without losing the flexibility to analyze the system behaviors.

The method for analyzing 2-D magnetic fields and currents in transformers excited from voltage sources has been developed. As the currents can be treated as unknown variables, magnetic fields in transformers under actual operating conditions can be analyzed using this method.

The proposed model is suitable to all kinds of structures of large power transformers and can be utilized for HEXAFORMER also.

Future work

The use of computer simulations for analysis of electrical devices is an interesting area where a lot of research needs to be done. Below some topics are outlined as proposed future work.

The enhancement of the S-function describing the Comsol model in Simulink is considered, because it must increase the modeling speed and, as a result, decrease the time and computer performance needed for simulations.

In future we are going to simulate the inrush currents, as one of the most important transformer problems. These currents occur when the unloaded power transformer is connected to the power system and it will usually produce huge magnetizing inrush current.

ке и обмотках; для детального анализа вихревых токов в сердечнике и обмотках с учетом поверхностного эффекта и эффекта близости при различных режимах работы. Мы можем моделировать неисправности различного типа, такие как замыкание фазы на землю, межфазное замыкание и производить анализ переходных процессов. Это дало нам право описывать физические модели в терминах реальных физических процессов без нагромождения полевых эффектов в область электрической цепи и одновременно без потери гибкости при анализе поведения системы.

Был разработан метод для анализа 2D магнитных полей и токов в трансформаторах, полученных от источников напряжения. Так как токи могут рассматриваться как изменчивые величины, то с использованием этого метода могут анализироваться магнитные поля в трансформаторах, работающих в реальных условиях.

Представленная модель может быть адаптирована для любых моделей силовых трансформаторов.

Планы на будущее

Использование компьютерного моделирования для анализа электрооборудования является очень интересной областью с огромным потенциалом для исследования. Ниже представлены возможные направления будущей работы.

Предусматривается улучшение S-функции, описывающей модель Comsol в Simulink, поскольку это должно увеличить скорость моделирования, и как следствие, уменьшить время и производительность компьютера, необходимую для вычислений.

Предусматривается моделирование пусковых токов как одной из важных проблем трансформаторов. Данные токи возникают, когда не нагруженный трансформатор подсоединяется к системе электроснабжения, в результате чего возникают огромные пусковые токи, что приводит к ложному срабатыванию устройств релейной защиты и автоматики, а также

The investigation of possibilities of reducing different types of losses through design modification will be also studied.

We are also going to investigate other modeling packages like Ansys, Elcut, Flux and some others to achieve the most robust and user friendly environment for modeling and simulation of high voltage power transformers.

к возникновению электродинамических сил в обмотках.

Исследование возможности уменьшения различных типов потерь путем изменений дизайна трансформатора также будет изучено.

Планируется изучение других пакетов моделирования, таких как Ansys, Elcut, Flux для достижения наибольшей точности и удобства пользователя при моделировании высоковольтных силовых трансформаторов.

УДК 681.5

С.Г. Фомичева, Б.В. Дубенко

ОПТИМИЗАЦИЯ НЕЙРОЧИПОВ В ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЕ «ПРОФИЛЬ»

При рассмотрении процесса автоматизации обработки фотограмм, полученных при профилировке жестких проводников в вертикальных шахтных стволах [1] станциями типа СИ5М, в Отделе специальных маркшейдерских работ треста «Норильскшахтсервис» ООО «Норильскникельремонт» в 2006 г. была разработана и внедрена экспертная система «Профиль» на основе нейросхем. Внедрение системы «Профиль» показало, что автоматизация наиболее трудоемких этапов – обработки изображения фотограммы и непосредственно вычислений деформации профиля проводников, позволила на порядок увеличить скорость и точность обработки профилировки, появилась возможность выполнения контроля действий оператора, выполняющего обработку фотограмм. Оценка точности методов профилировки подробно была проведена в работе [2]. Структура нейросхемы экспертной системы «Профиль» представлена на рис. 1 и включает в себя 84 нейрочипа, распределенных по четырем слоям нейросхемы.

Нейросхема включает в себя следующие слои:

1) так называемый «глаз» схемы – группа рецепторов R , принимающих информацию об изображении. В текущей системе распознавания их применяется 41 шт., при разрешении изображения 200 т/д.;

2) микросхемы-фильтры S – преобразуют сигнал, используя пороговую систему [2]. Их количество равно количеству рецепторов;

3) микросхема математической M логики (в данном случае, ассоциативный схемный интегратор), вычисляющая среднее значение сигнала – 1 шт.

4) микросхема эффектора E – передает вычисленное значение во внешнюю среду – 1 шт.

В данной работе рассмотрим структуру непосредственно нейрочипов-интеграторов, из которых состоит микросхема математической логики M , и методы их оптимизации.

Стандартный интегратор

В первую очередь необходимо рассмотреть схему стандартного интегратора из набора нейросхем (рис. 2) и описать его работу.