

D. D. Truong, M. P. Belov  
Saint Petersburg Electrotechnical University

## DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR NONLINEAR ELECTRIC DRIVES OF EXOSKELETON AND SUBORDINATE SELF-TUNING CONTROL USING A NEURAL NETWORK

*Proposes a subordinate controller with self-tuning adaptation of the position control loop coefficients by an analog neural network for a nonlinear electric drive of an exoskeleton. An excellent blend of slave controller and neural network with powerful continuous learning, adaptation and nonlinearity problem solving capabilities, it provides a new nonlinear neural network controller based on proportional integral differential (PID) control methods. To correct the coefficients of traditional PID controllers, it is proposed to use a neural network (NN), which allows self-tuning the coefficients directly at its outputs based on the errors of the control system. The development of a dynamic model of an exoskeleton includes five links of two legs and a body, taking into account non-linear electric drives as a control object. The nonlinear approach to modeling is due to the use of a control system for the electric drives of the exoskeleton under various conditions, which is multi-mass rotating in two directions with nonlinearities of the form of viscous and Coulomb friction, elasticity and external disturbance. A method of subordinate regulation of exoskeleton nonlinear electric drives with a neural network for tracking control of the trajectory of exoskeleton joints is presented. Also, the results of the experiment on the MatLab/Simulink program were obtained to illustrate the effectiveness of the proposed control strategy.*

**Exoskeleton, electric drive, slave regulator, self-tuning, neural network, mathematical model**

---

УДК 621.314.222

А. Г. Лавров, Д. С. Ильяшов, М. А. Ситников  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Новый метод учета нелинейности параметров силового трансформатора при его моделировании в MatLab/Simulink

*Проведен анализ методов расчета параметров Simulink-модели трехфазных нелинейных силовых трансформаторов. Предложена разработанная методика расчета кривой намагничивания трансформатора из паспортных данных трансформатора.*

*Результаты проведенных численных исследований позволяют сделать вывод, что кривая намагничивания трансформатора, полученная на основании предложенного метода расчета с учетом всех принятых допущений, корректна и с достаточной степенью точности совпадает с точной кривой, полученной при помощи полного электромагнитного расчета трансформатора.*

*Оценка возможных погрешностей, вносимых принятыми допущениями в предложенном методе расчета кривой намагничивания, проводилась моделированием режима холостого хода с анализом значений тока холостого хода. Корректность предложенного метода доказана анализом внешних и рабочих характеристик трансформатора.*

*Предложенный метод расчета кривой намагничивания достаточно прост и понятен, позволяет значительно сократить время подготовки исходных данных для моделирования и может успешно использоваться в учебных и научно-исследовательских целях.*

**Simulink-модели, трехфазный нелинейный трансформатор, кривая намагничивания, паспортные данные трансформатора, характеристики силового трансформатора**

В настоящее время расчет технико-экономических показателей и характеристик трехфазных силовых трансформаторов, анализ различных режимов их работы, исследование их функциониро-

вания в составе различных систем электроснабжения целесообразно осуществлять с помощью компьютерного моделирования, используя специализированные программные продукты.

Одним из современных пакетов, реализующих численные методы, является MatLab – высокоуровневая среда программирования, содержащая множество функций и встроенных пакетов, к которым относится Simulink, имеющий большое количество встроенных блоков для расчета как линейных, так и нелинейных систем [1].

MatLab/Simulink с библиотекой блоков SimPowerSystems позволяет моделировать сложные электротехнические системы, сочетая методы имитационного и структурного моделирования. В модели с блоками SimPowerSystems можно использовать блоки из остальных библиотек Simulink, а также функции самого MatLab, что дает практически неограниченные возможности для моделирования электротехнических систем [2]. Также MatLab/Simulink имеет удобный и понятный интерфейс, большое количество блоков, предназначенных для получения результатов измерений как в аналитическом, так и в графическом виде.

Однако при моделировании нелинейных трехфазных силовых трансформаторов возникает ряд сложностей, связанных с отсутствием методик расчета параметров модели, и в первую очередь, – кривой намагничивания магнитной системы, для расчета которой необходимо знание параметров, не входящих в каталожные данные трансформатора. В руководстве пользователя SimPowerSystems рассматриваются демонстрационные модели трансформаторов с уже вычисленными параметрами без ссылок на источники с методами и алгоритмами их определения [3], [4].

Целью статьи является анализ существующих методов расчета параметров Simulink-модели трехфазных нелинейных силовых масляных трансформаторов, разработка метода расчета кривой намагничивания трансформатора, исходными данными которого служат его каталожные данные, с целью существенного облегчения процесса и значительного сокращения времени подготовки исходных данных. Разработка указанного метода даст возможность проведения в учебных и научно-исследовательских целях сравнительного анализа параметров и характеристик большого количества различных по паспортным данным трансформаторов без их сложного и трудоемкого полного электромагнитного расчета.

Обзор научно-технической литературы по вопросам моделирования нелинейных трансформаторов в среде MatLab Simulink показал, что модели трехфазных стержневых силовых трансформаторов, представленные в [5], [6], состоят из двух частей – модели магнитной системы и модели электрической системы. Модель магнитной системы описывается системой нелинейных алгебраических уравнений, а электрической системы – системой нелинейных дифференциальных уравнений. Параметры этих уравнений представлены теми данными, которые необходимо ввести в модель. Часть этих данных – некаталожные, и могут быть получены только после электромагнитного расчета трансформатора. Нелинейные свойства материала магнитопровода задаются с помощью кривой намагничивания, которая представляет собой кусочно-линейную интерполяцию табличной функции кривой намагничивания стали.

В [7], [8] силовой двухобмоточный трансформатор в MatLab представляется совместным моделированием трех однофазных трансформаторов и основывается на T-образной схеме замещения. Авторы приводят корректные и адекватные для инженерных расчетов формулы, использующие только каталожные данные трансформаторов, для определения параметров схемы замещения, за исключением нелинейной взаимной индуктивности, которая определяет кривую намагничивания трансформатора.

В [7] рассматриваемая модель необходима для анализа работы трансформатора в области сильного насыщения. Исходя из этого кривая намагничивания аппроксимируется двумя прямыми, каждая из которых характеризуется своим значением индуктивности. Первая прямая соответствует характеристике намагничивания в линейной области, т. е. работе трансформатора в номинальном режиме, вторая – работе трансформатора с вошедшим в режим глубокого насыщения магнитопроводом.

В [8] используемая в модели кривая намагничивания получена усреднением рассчитанных кривых намагничивания трансформаторов одного номинального напряжения, но выполненных из различных марок электротехнической стали.

Таким образом, использованные в [7], [8] способы задания кривой намагничивания трансформатора не отвечают поставленной в данной статье цели.

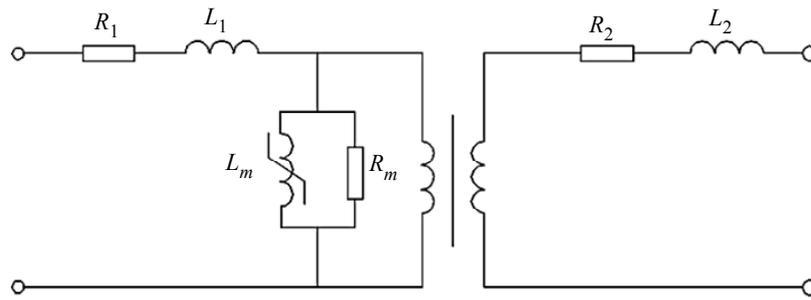


Рис. 1

Для моделирования трансформаторов в программе MatLab предусмотрены следующие основные блоки в зависимости от назначения трансформаторов, количества обмоток и их схемы соединения – Linear Transformer, Saturable Transformer, Tree-Phase Transformer (Two Windings) и Tree-Phase Transformer (Three Windings) [9].

В дальнейшем рассматривается моделирование трансформатора с использованием блока Tree-Phase Transformer (Two Windings), который моделирует трехфазный двухобмоточный трансформатор с учетом насыщения стали сердечника.

Блок трансформатора функционирует в соответствии с электрической схемой замещения, рис. 1.

Расчет активных сопротивлений обмоток  $R_1$ ,  $R_2$  индуктивностей рассеяния обмоток  $L_1$ ,  $L_2$ , активно-сопротивления ветви намагничивания  $R_m$  хорошо разработан и не вызывает никаких затруднений [7]–[9]. Исходными данными для этого расчета служат паспортные данные трансформатора.

Основные проблемы при расчете параметров схемы замещения возникают при расчете кривой намагничивания магнитной системы, необходимой для определения нелинейной индуктивности взаимной индукции  $L_m$ . Трудности связаны с тем, что для этого необходимо знание геометрических и электрических параметров исследуемого трансформатора, которые в паспорте трансформатора не указываются.

Кривая намагничивания трансформатора задается парой чисел  $[I_{0rm}; \psi_{1m}]$ , в которых указываются амплитудные значения реактивной составляющей тока холостого хода и потокосцепления первичной обмотки трансформатора.

Для расчета кривой намагничивания трансформатора существуют два хорошо разработанных метода [10], [11].

Первый метод заключается в расчете магнитной цепи трансформатора на основании закона полного тока. Для его реализации необходимы данные об электромагнитной системе исследуе-

мого трансформатора, которые не относятся к каталожным данным и могут быть известны только после расчета его магнитной системы. Кроме этого, данный метод не позволяет при расчетах учесть анизотропию магнитных свойств холоднокатаных электротехнических сталей, которые в настоящее время применяются для изготовления магнитопроводов, а также их ухудшение вследствие влияния ряда конструктивных особенностей и технологических факторов изготовления данной конкретной магнитной системы [11].

Второй метод расчета основан на вычислении намагничивающей (реактивной) мощности, необходимой для намагничивания магнитопровода трансформатора. Метод подробно, с учетом конструктивных особенностей магнитных систем, их материала и технологии изготовления магнитопровода, представлен в [11]. Однако и данный метод позволяет рассчитать кривую намагничивания только после выполнения расчетов магнитной системы и обмоток трансформатора.

Из проведенного анализа следует, что указанные методы неудобны для инженерного использования, не позволяют относительно просто и оперативно произвести расчет кривой намагничивания трансформатора, сложны и трудоемки. Для их реализации требуется высокая квалификация в области проектирования трансформаторов, которую могут не иметь специалисты, исследующие характеристики отдельных трансформаторов или их работу в системе электроснабжения с помощью MatLab Simulink.

Исходя из сказанного, возникает необходимость в разработке удобного для инженерного использования метода расчета кривой намагничивания трансформатора, исходными данными которого служат его каталожные данные и который позволил бы существенно облегчить процесс, а также значительно сократить время подготовки исходных данных.

Разработанный инженерный метод базируется на расчете кривой намагничивания методом вы-

Таблица 1

Марка стали	Мощность трансформатора $S$ , кВА		
	До 16	25...110	160 и более
	Индукция в стержнях масляных трансформаторов, Тл		
3411, 3412, 3413	1.45...1.50	1.50...1.55	1.55...1.60
3404, 3405, 3406, 3407, 3408	1.50...1.55	1.55...1.60	1.55...1.65

числения намагничивающий мощности и основан на двух основных допущениях.

Первое допущение – это предположение о незначительном влиянии марки стали, из которой изготовлен магнитопровод трансформатора, на параметры и характеристики исследуемого трансформатора. Магнитопровод силовых трансформаторов изготавливается из холоднокатаных анизотропных тонколистовых электротехнических сталей марок 3404, 3405, 3406, 3407, 3408, 3411, 3412, 3413, которые близки по своим магнитным свойствам [11].

Вторым допущением служит предположение о значении номинальной индукции в стали трансформатора. В [9] собраны данные о диапазонах номинального значения индукции в стержнях магнитной системы масляных силовых трансформаторов в зависимости от их полной мощности, приведенные в табл. 1.

Этими данными можно успешно пользоваться для задания номинального значения индукции магнитного поля в стержнях сердечника исследуемого трансформатора, поскольку даже возможная ошибка не внесет значительной погрешности в расчет кривой намагничивания.

С учетом указанных допущений предлагаемая методика расчета кривой намагничивания, основанная на паспортных данных трансформатора и предназначенная для ввода в блок трансформатора Three-Phase Transformer (Two Windings) в среде MatLab Simulink, представлена следующим алгоритмом:

1. Действующее значение полного тока холостого хода:  $I_{0н} = \frac{I_1 I_0}{100}$ , где  $I_1$  и  $I_0$  – номинальный полный ток и ток холостого хода (в процентах от номинального) соответственно.

2. Действующее значение активной составляющей тока холостого хода:  $I_{0ан} = \frac{P_0}{m U_{1ф}}$ , где  $P_0$  – потери холостого хода;  $m$  – количество фаз и  $U_{1ф}$  – номинальное фазное напряжение

3. Действующее и амплитудное значения намагничивающего тока (реактивная составляющая тока холостого хода):  $I_{0рн} = \sqrt{I_{0н}^2 - I_{0ан}^2}$ ,

$$I_{0рнм} = I_{0рн} \sqrt{2}.$$

4. Амплитуда потокосцепления первичной обмотки в номинальной точке:  $\Psi_{1нм} = \frac{U_{1ф}}{4.44 f}$ , где

$f$  – частота сети.

5. Выбирается марка стали магнитопровода.

6. Задается номинальное значение индукции магнитного поля в сердечнике трансформатора в зависимости от марки стали магнитопровода и мощности трансформатора на основании данных, приведенных в табл. 1.

7. Из справочных данных находится удельная намагничивающая мощность в зависимости от номинального значения индукции магнитного поля для выбранной стали.

8. Для значений индукций магнитного поля в стали сердечника, отличных от номинального, определяются соответствующие значения удельной намагничивающей мощности и находится значение намагничивающего тока с учетом пропорции  $I_{0рм} = \frac{q_c}{q_{сн}} I_{0рнм}$ , где  $q_c$  – удельные поте-

ри для данного намагничивающего тока,  $q_{сн}$  – номинальные удельные потери.

9. Находятся амплитуды потокосцепления для значений индукции магнитного поля в стали выше и ниже номинальной через пропорцию  $\Psi_{1м} = \frac{B}{B_n} \Psi_{1нм}$ , где  $B$  – магнитная индукция в данной точке,  $B_n$  – номинальное значение индукции.

Для моделирования выбран трехфазный двухобмоточный масляный трансформатор ТДН 40 000/110 [12]. Для выбранного трансформатора по методике [5], [6], [10] рассчитаны параметры схемы замещения.

Таблица 2

Параметр	Значение									
	0	0.05	0.18	0.33	0.49	0.88	1.31	2.15	4.91	9.26
$I_{0rm}, A$	0	0.05	0.18	0.33	0.49	0.88	1.31	2.15	4.91	9.26
$\Psi_{1m}, Bб$	0	54.6	127	182	218	273	298	315	329	344
$\Psi_{1m}, Bб$	0	54.2	127	174	217	277	299	316	331	355

Для подтверждения корректности предложенного алгоритма расчета кривой намагничивания трансформатора произведен полный электромагнитный расчет трансформатора ТДН 40 000/110 и на его основании получены точки точной кривой намагничивания, представленные в табл. 2 (значения, представленные в первой и второй строках). В этой же таблице (первая и третья строки) приведены точки кривой намагничивания, полученные в результате расчета по предложенному алгоритму.

Сравнительный анализ представленных данных говорит о достаточной точности предложенного алгоритма. Аналогичные результаты были получены при расчете указанными методами кривой намагничивания трансформатора ТДНС-40 000/35.

По предложенному алгоритму разработана и зарегистрирована компьютерная программа для расчета кривой намагничивания трансформатора [13].

В программу вводятся паспортные данные исследуемого трансформатора, марка стали магнитопровода и значение номинальной индукции в стержне трансформатора. Выходными данными служат расчетные значения точек кривой намагничивания в формате, необходимом для введения в блок трехфазного двухобмоточного трансформатора в MatLab Simulink.

Оценка возможных погрешностей, вносимых принятыми допущениями в предложенном методе расчета кривой намагничивания, проводилась моделированием режима холостого хода с анализом значений тока холостого хода. Корректность

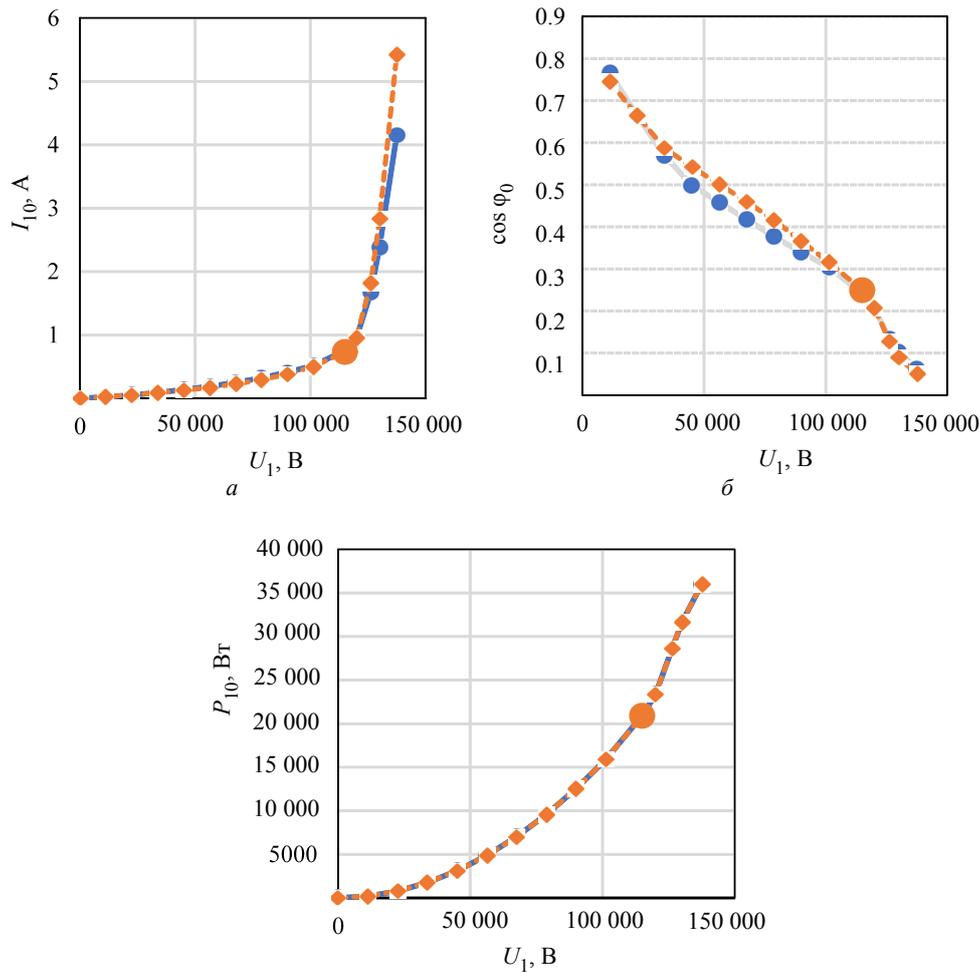


Рис. 2

предложенного метода доказана анализом внешних и рабочих характеристик трансформатора.

Сравнение характеристик холостого хода трансформатора ТДН 40 000/110 представлены на рис. 2 (штриховая – рассчитанная, сплошная – полный электромагнитный расчет). На графиках

этого рисунка представлен сравнительный анализ работы модели по двум кривым намагничивания: одной, полученной из полного электромагнитного расчета, второй – из разработанного метода расчета. На рис. 2, а представлено сравнение характеристик тока холостого хода от приложенного напряжения;

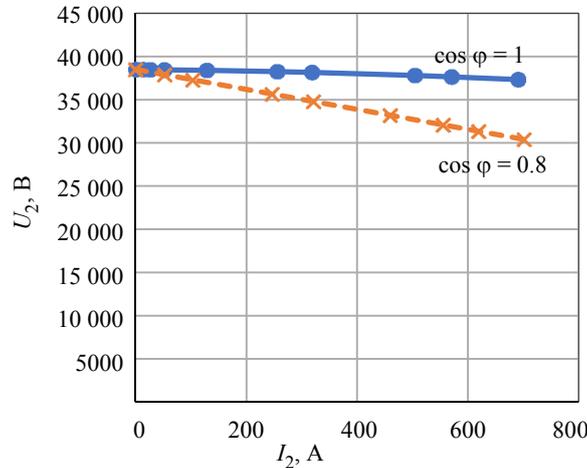


Рис. 3

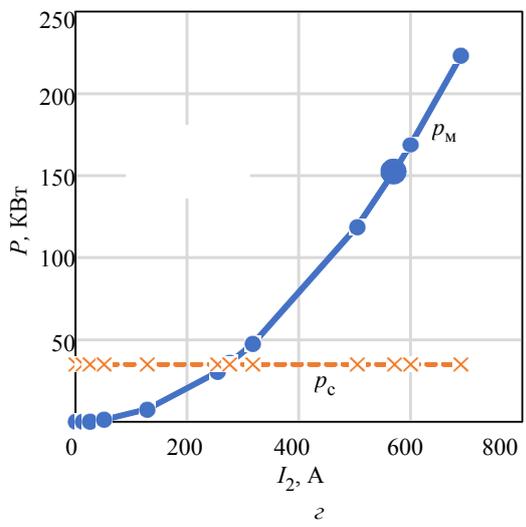
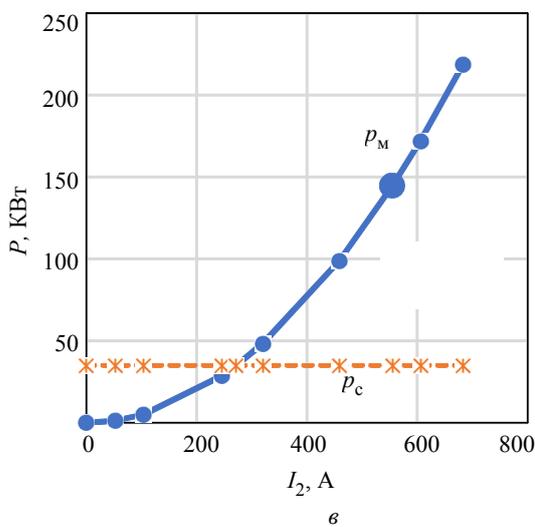
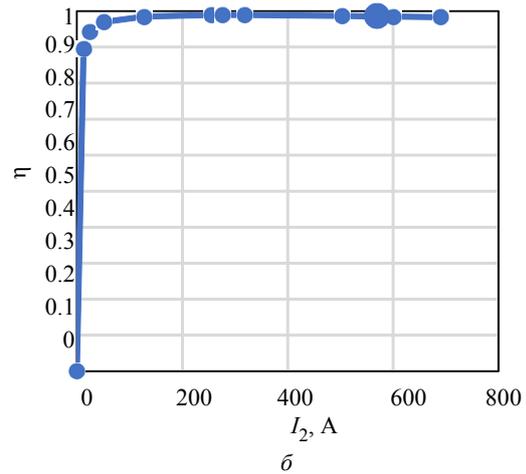
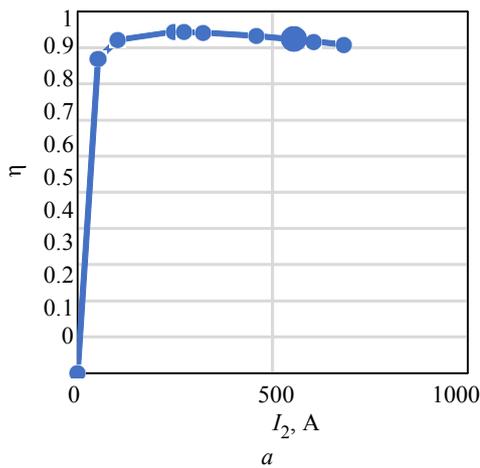


Рис. 4

на рис. 2, б – сравнение характеристик коэффициента мощности в режиме холостого хода от приложенного напряжения; на рис. 2, в – сравнение характеристик мощности, потребляемой трансформатором на холостом ходу, от приложенного напряжения. На рис. 2 обозначены:  $U_1$  – действующее значение напряжения;  $I_0$  – ток холостого хода;  $\cos \varphi_0$  – коэффициент мощности трансформатора на холостом ходу.

На графиках рис. 2 выделена номинальная точка работы трансформатора. Характеристики холостого хода, полученные с использованием двух кривых намагничивания, почти полностью совпадают. Полученные характеристики согласуются с теорией [10], таким образом, в режиме холостого хода модель трансформатора функционирует корректно.

На рис. 3 представлен график внешних характеристик для двух значений коэффициента мощности 0.8 и 1.

На рис. 4 представлены зависимости КПД, электрических потерь ( $p_M$ ) и потерь в стали сердечника ( $p_c$ ) трансформатора в функции тока нагрузки при значении коэффициентов мощности 0.8 и 1.

На рис. 4, а и в показана зависимость КПД и потерь в трансформаторе от тока нагрузки при коэффициенте нагрузки, равном единице (активная нагрузка). На рис. 4, б и г показана зависимость КПД и потерь в трансформаторе от тока нагрузки при коэффициенте нагрузки, равном 0.8 (активно-индуктивная нагрузка).

Для оценки погрешностей, вносимых допущением о произвольном выборе марки стали и толщине ее листов, производился расчет тока холостого хода в функции приложенного напряжения при выполнении сердечника трансформатора из сталей марок 3404 и 3405 и толщиной листов 0.3 и 0.35 мм. Анализ выполненных расчетов показал, что отличие значений тока холостого хода от его значения, полученного по точной кривой намагничивания, для конкретной применяемой стали отличается не более чем на 2–4 % в области нормального насыщения и достигает 5–7 % в области перенасыщения электротехнических сталей.

Аналогичный анализ проведен для оценки погрешностей, вносимых допущением о выборе значения номинальной индукции в стали магнитопровода. Сравнение проводится для точной и приближенных кривых намагничивания, в которых приняты крайние из предлагаемого диапазона значения номинальной индукции – 1.55 и 1.65 Тл. Анализ расчетов показал, что погрешность в расчетах значения тока холостого хода не превышает 4–5 % при нормальном насыщении стали и довольно значительна (около 30 %) в области технического насыщения. Следовательно, для исследования трансформаторов с ненасыщенной магнитной системой и в номинальном режиме работы с нормальным насыщением выбор номинальной индукции не вносит существенной погрешности в результаты расчета его характеристик.

Кроме трехфазного трансформатора ТДН 40 000/110 объектами исследований с применением предложенной модели были трансформаторы ТДНС-40000/35 и ТС-10/066. Полученные результаты подтвердили полученные ранее выводы.

С целью подтверждения возможности проведения научных исследований на предложенной модели проведен анализ влияния несимметрии питающего напряжения на эксплуатационные характеристики силового трансформатора.

Результаты проведенных численных исследований позволяют сделать вывод о том, что кривая намагничивания трансформатора, полученная на основании предложенного метода расчета, основанного на знании только паспортных данных трансформатора, с учетом всех принятых допущений корректна и с достаточной степенью точности совпадает с точной кривой, полученной путем полного электромагнитного расчета трансформатора. Предложенный метод расчета кривой намагничивания достаточно прост и понятен, позволяет значительно сократить время подготовки исходных данных для моделирования и может успешно применяться в учебных и научно-исследовательских целях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герман-Галкин С. Г. MatLab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: КОРОНА-Век, 2008.

2. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2007.

3. Saturable Transformer. URL: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/saturabletransformer.html> (дата обращения 13.04.2020).

4. Three Phase Transformer (Two Windings). URL: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/threephasetransformertwowindings.html> (дата обращения 13.04.2020).

5. Моделирование несимметричных режимов работы трехфазного трансформатора в пакете Simulink / А. А. Кралин, Б. Ю. Алтунин, И. А. Карнавский, В. В. Гуляев // Тр. Нижегородского гос. техн. ун-та им. П. Е. Алексеева. 2014, № 2(104). С. 166–172.

6. Кралин А. А., Тюриков М. П. Моделирование трехстержневого трансформатора в Simulink // Тр. Нижегородского гос. техн. ун-та им. П. Е. Алексеева. 2014, № 3(110). С. 238–242.

7. Новаш И. В., Румянцев Ю. В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки MatLab-Simulink с учетом насыщения магнитопровода // Энергетика. Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. 2015. № 1. С. 12–24.

8. Дед А. В. Расчет параметров Simulink-модели силового трехфазного трансформатора для исследования длительных несимметричных режимов // Омский науч. вестн. Сер. Приборы, машины и технологии. 2017. № 3(153). С. 68–74.

9. Имитационное моделирование систем электроснабжения в программе MATLAB: учеб. пособие / Л. П. Костюченко; Краснояр. гос. аграр. ун-т. Красноярск, 2012.

10. Вольдек А. И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. 3-е изд., перераб. Л.: Энергия, 1978.

11. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1986.

12. ГОСТ 12965–85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения классов напряжения 110 кВ и 150 кВ. Технические требования. Введ. 1985-26-09. М.: Изд-во стандартов, 1985.

13. Ильяшов Д. С., Лавров А. Г. Расчет параметров схемы замещения силовых нелинейных трансформаторов. Св-во о регистрации программы на ЭВМ 2020666875, 17.12.20. Заявка № 2020666255 от 09.12.20.

A. G. Lavrov, D. S. Ilyashov, M. A. Sitnikov  
Saint Petersburg Electrotechnical University

## A NEW METHOD FOR TAKING INTO ACCOUNT THE NONLINEARITY OF THE POWER TRANSFORMER PARAMETERS IN MATLAB/SIMULINK

*The analysis of methods for calculating the parameters of the Simulink model of three-phase nonlinear power transformers is carried out. The developed methodology for calculating the magnetization curve of the transformer is proposed, based on the knowledge of only the transformer nameplate data, significantly reducing the preparation time of the source data. The results of numerical studies allow us to conclude that the magnetization curve of the transformer obtained on the basis of the proposed calculation method, taking into account all the assumptions made, is correct and with a sufficient degree of accuracy coincides with the exact curve obtained by the full electromagnetic calculation of the transformer. Assessment of possible errors introduced by the accepted assumptions in the proposed method for calculating the magnetization curve was carried out by simulating the no-load mode, with the analysis of the no-load current values. The correctness of the proposed method is proved by analysis of the external and operating characteristics of the transformer. The proposed method for calculating the magnetization curve is quite simple and understandable, it can significantly reduce the time it takes to prepare the initial data for modeling and can be successfully used for educational and research purposes. The development of this method will make it possible to conduct a comparative analysis of the parameters and characteristics of a large number of different transformers according to passport data without their complex and time-consuming full electromagnetic calculation.*

**Simulink models, three-phase nonlinear transformer, magnetization curve, transformer rating data, power transformer characteristics**