ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.321

Андрей Ильич Тихонов
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры физики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-27, e-mail: aitispu@mail.ru

Владислав Евгеньевич Розин
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-27, e-mail: kalmar20006@mail.ru

Марина Сергеевна Фадеева
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-27, e-mail: fadeeva-mc@yandex.ru

Евгений Русланович Соловьев
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-27, e-mail: s.er-k@mail.ru

Наталья Владимировна Прохорова
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-27, e-mail: klen7308@mail.ru

Разработка системы проектирования электрических реакторов, дросселей и трансформаторов малой мощности

Авторское резюме

Состояние вопроса. В современных САПР электротехнических устройств определяющую роль играет оптимизация, основанная на использовании поисковых методов решения нелинейных задач с дискретной или даже разрывной областью определения и областью решений. Растет также роль универсальных наукоемких моделей, позволяющих избавиться от необходимости проведения НИОКР и создания опытных образцов продукции, что положительно сказывается на конкуренции в условиях мелкосерийного и штучного производства. При этом на производстве снижается количество опытных специалистов, способных лично разрабатывать методики проектирования устройств нетипового исполнения. В то же время мощные САПР остаются недоступными для предприятий малого и среднего бизнеса в сфере трансформаторостроения. Целью настоящего исследования является разработка доступного программного продукта, способного адаптироваться к изменяющейся номенклатуре конкретного предприятия.
Материалы и методы. Использованы методы теории САПР трансформаторов, методы моделирования физических процессов в трансформаторах, дросселях и реакторах с использованием электрических схем замещения, поисковые методы решения нелинейных задач.
Результаты. Разработана САПР трансформаторов малой мощности, дросселей и реакторов с ферромагнитным сердечником. Для учебной версии САПР использованы пакеты MSExcel и MatLab, для коммерческой версии – MSExcel и математическая библиотека Python. Осуществлен поиск решения методом штрафных функций с использованием генетического алгоритма. Выполнены поверочные расчеты готового изделия с использованием единой научной базы, основанной на построении электрических схем замещения физических процессов произвольной природы. Построены цепные модели на основе авторской библиотеки моделирования электрических цепей.

© Тихонов А.И., Розин В.Е., Фадеева М.С., Соловьев Е.Р., Прохорова Н.В., 2024
Вестник ИГЭУ, 2024, вып. 6, с. 58–66.

Выводы. САПР реакторов, дросселей и трансформаторов малой мощности прошла апробацию на трех предприятиях РФ, специализирующихся на изготовлении трансформаторов малой мощности, а также дросселей и реакторов. Результаты исследования могут быть использованы при создании аналогичных систем проектирования электротехнических устройств.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, трансформаторы малой мощности, электрический реактор, дроссели, цепные модели физических процессов, генетические алгоритмы

Andrei Ilyich Tikhonov
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Physics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-27, e-mail: aitispu@mail.ru

Vladislav Evgenievich Rozin
Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-27, e-mail: kalmar20006@mail.ru

Marina Sergeevna Fadeeva
Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-27, e-mail: fadeeva-mc@yandex.ru

Evgeny Ruslanovich Soloviev
Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-27, e-mail: s.er-k@mail.ru

Natalya Vladimirovna Prokhorova
Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-27, e-mail: klen7308@mail.ru

Development of design system for electrical reactors, chokes and low-power transformers

Abstract

Background. Optimization based on the use of search methods for solving nonlinear problems with a discret or even discontinuous domain of definition and solution domain plays a crucial role in modern CAD systems of electrical devices. The role of universal science-intensive models is also growing, allowing us to get rid of the need to conduct R&D and develop prototypes of products, which has a positive effect on competition in the conditions of small-scale and individual production. At the same time, the number of experienced specialists at production sites who can personally develop design methods for non-standard devices is decreasing. In the meantime, powerful CAD systems remain inaccessible for small and medium-sized businesses in the field of transformer engineering. The purpose of this study is to develop an accessible software product capable of adapting to the changing range of manufacture of a particular enterprise.
Materials and methods. The authors have used the methods of the theory of CAD of transformers, methods of modeling physical processes in transformers, chokes and reactors using electrical equivalent circuits, and search methods for solving nonlinear problems.
Results. A CAD system for low-power transformers, chokes and reactors with a ferromagnetic core has been developed. MSExcel and MatLab packages have been used for the educational version of the CAD system, while MSExcel and the Python mathematical library have been used for the commercial version. A genetic algorithm has been used to find a solution using the penalty function method. A single scientific base based on the construction of electrical equivalent circuits for physical processes of arbitrary nature has been used to verify the calculations of the finished product. The author's library for modeling electrical circuits has been used to develop chain models.
Conclusions. The CAD system of reactors, chokes and low-power transformers has been tested at three Russian enterprises specializing in the manufacture of low-power transformers, as well as chokes and reactors. The results of the work can be used to develop similar systems for designing electrical devices.

Key words: computer-aided design, low-power transformers, electric reactor, chokes, chain models of physical processes, genetic algorithms

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.6.058-066

Введение. Развитие компьютерных технологий в 70–80-е годы XX в. привело к идее создания САПР технических устройств, в которых определяющую роль играет оптимизация, основанная на использовании поисковых методов решения нелинейных

задач с дискретной или даже разрывной областью определения и областью решений. В частности, в плане автоматизированного проектирования трансформаторов можно отметить пособие [1], где предлагается не только одна из самых востребованных на сегодня в России и в мире методик проектирования силовых трансформаторов, но и предлагается обобщенный метод расчета трансформаторов с использованием оптимизации на непрерывной модели.

Определенную роль в развитии теории оптимизации трансформаторов сыграла и школа САПР, созданная в эти годы в ИГЭУ [2, 3]. Материал, наработанный данной школой, был положен в основу современной версии САПР силовых трансформаторов класса напряжения до 35 кВ, разработанной и развиваемой в настоящее время в ИГЭУ на основе современных математических пакетов [4].

Ниже представлены результаты разработки облегченной версии расчетной подсистемы САПР однофазных и трехфазных трансформаторов малой мощности, а также дросселей и реакторов с ферромагнитным сердечником, потребность в которых постоянно растет. Соответственно, растет и количество малых предприятий, специализирующихся на изготовлении данных устройств.

Главная особенность таких предприятий состоит в отсутствии специалистов, способных не только спроектировать устройство с заданными техническими характеристиками по известной методике, но и адаптировать данную методику и расчетную систему к особенностям исполнений конкретных устройств, количество которых значительно, а апробированные методики либо недоступны, либо вообще отсутствуют. И это с учетом ограниченных возможностей в плане проведения НИОКР и создания опытных образцов продукции.

При разработке системы автоматизированного проектирования реакторов, дросселей и трансформаторов малой мощности (САПР РДТ ММ) был использован как опыт советских времен [1, 2, 3, 5], так и рекомендации, адаптированные к настоящему времени [5, 6]. Отличительной особенностью разработанной системы является использование генетических алгоритмов при поиске оптимального решения, а также современных наукоемких методов имитационного моделирования трансформатора на основе теории нелинейных цепей.

Методы исследования. Дроссели и электрические реакторы с ферромагнитным сердечником можно рассматривать как трансформаторы, работающие в режиме холостого хода (ХХ). То есть основные положения методики их проектирования основываются на одинаковых с трансформаторами методах и допущениях.

В частности, наличие ферромагнитного магнитопровода позволяет использовать для магнитного расчета модель нелинейной магнитной цепи. Схема магнитной цепи для однофазного устройства приведена на рис. 1,а, для трехфазного устройства со стержневым магнитопроводом – на рис. 1,б.

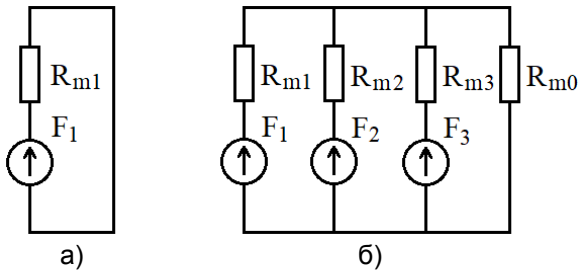

Рис. 1. Схема магнитной цепи однофазного (а) и трехфазного (б) устройств

Магнитное сопротивление магнитной цепи однофазного устройства или одной магнитной ветви трехфазного устройства может быть вычислено по формуле

$$R_{mk} = \sum_{j=1}^{N_k} \nu(B_{kj}) \frac{\ell_{kj}}{S_{kj}} + \sum_{j=1}^{N_{зk}} \frac{1}{\mu_0} \frac{\delta_{kj}}{S_{зkj}}, \qquad (1)$$

где k – номер ветви магнитной цепи; N_k, $N_{зk}$ – количество ферромагнитных участков и количество зазоров в k-й магнитной ветви соответственно; $\nu(B_k)$ – зависимость удельного магнитного сопротивления $\nu = \frac{1}{\mu_0 \mu}$ от амплитуды магнитной индукции на j-м участке k-й ветви B_{kj} (под участком в данном случае понимается фрагмент магнитопровода, имеющий постоянное активное сечение S_{kj}); μ – относительная магнитная проницаемость электротехнической стали магнитопровода; μ_0 – магнитная постоянная; ℓ_{kj} – длина средней линии магнитного поля на j-м участке k-й ветви; δ_{kj}, $S_{зkj}$ – величина и расчетное сечение j-го зазора k-й ветви соответственно.

Если магнитопровод однофазного устройства имеет Ш-образную конструкцию, то его можно рассматривать как 2 параллельных П-образных магнитопровода, приведенных к схеме, показанной на рис. 1,а.

При построении кривой намагничивания электротехнической стали в форме $\nu(B)$ используется табличная кривая, которая берется из каталогов в форме $B(H)$ и пересчитывается по формуле

$$\nu = \frac{H}{B}, \qquad (2)$$

где H, B – табличные значения напряженности и индукции магнитного поля в кривой намагничивания $B(H)$.

При этом индуктивность однофазного дросселя/реактора или одной (k-й) фазной обмотки трехфазного дросселя/реактора вычисляется по формуле

$$L_k = \frac{w_k^2}{R_{mk}} + L_{\sigma k}, \qquad (3)$$

где w_k – количество витков в обмотке, охватывающей k-ю магнитную ветвь; $L_{\sigma k}$ – индуктивность k-й обмотки от потоков за пределами магнитопровода.

Величина R_{m0} (магнитное сопротивление нулевой последовательности) может быть рассчитана только с использованием результатов расчета магнитного поля. В то же время достаточная для инженерных расчетов точность может быть получена при допущении о равенстве величины R_{m0} бесконечности (отсутствие ветви R_{m0}) или достаточно большому значению, например 10^6 А/(Тл·м^3).

Индуктивность от потоков за пределами магнитопровода $L_{\sigma k}$ пренебрежительно мала по сравнению с потоком в магнитопроводе, поэтому ей можно пренебречь или рассчитать приблизительно при допущении об отсутствии в катушке ферромагнитного сердечника. При этом для цилиндрических обмоток справедлива формула

$$L_{\sigma k} = \sum_{i=1}^{N_k}\sum_{j=1}^{N_k} L_{\sigma ij}, \qquad (4)$$

где N_k – количество витков в k-й обмотке (с учетом того, что эффективный проводник может состоять из нескольких параллельных элементарных проводников); $L_{\sigma ij}$ – собственная (при $i = j$) индуктивность круглого витка, расположенного в воздухе, рассчитываемая по формуле Максвелла

$$L_{\sigma ii} = \mu_0 R_i \left(\ln\left(\frac{8R_i}{r}\right) - \frac{7}{4} \right), \qquad (5)$$

или взаимная (при $i \neq j$) индуктивность, рассчитываемая по формулам:

$$L_{\sigma ij} = \mu_0 \sqrt{R_i R_j} \left[\left(k - \frac{2}{k} \right) K(k) + \frac{2}{k} E(k) \right]; \qquad (6)$$

$$k = \sqrt{\frac{4R_i R_j}{\left(R_i + R_j\right)^2 + \left(z_j - z_i\right)^2}}, \qquad (7)$$

где R_i, R_j – радиусы средних линий i-го и j-го витков; $E(k)$ – полный нормальный эллиптический интеграл Лагранжа 2-го рода; $K(k)$ – модуль эллиптического интеграла; z_i, z_j – координаты центров i-го и j-го витков по оси катушки [8].

В случае катушек прямоугольной формы можно воспользоваться одной из приблизительных формул [9, 10], которые выведены из условия о том, что каждый виток катушки имеет форму идеального прямоугольника без учета скруглений углов:

$$L_{\sigma k} = \frac{\mu_0}{\pi} \left(\begin{array}{l} -2\cdot(a+b) + 2\cdot\sqrt{a^2+b^2} - \\ -b\cdot\ln\left(\dfrac{b+\sqrt{a^2+b^2}}{a}\right) - \\ -a\cdot\ln\left(\dfrac{a+\sqrt{a^2+b^2}}{b}\right) + \\ +b\cdot\ln\left(\dfrac{2b}{r}\right) + a\cdot\ln\left(\dfrac{2a}{r}\right) \end{array} \right); \qquad (8)$$

$$L_{\sigma k} = \frac{\mu_0}{\pi} \left(\begin{array}{l} a\cdot\ln\left(\dfrac{2ab}{r\left(a+\sqrt{a^2+b^2}\right)}\right) + \\ +b\cdot\ln\left(\dfrac{2ab}{r\left(b+\sqrt{a^2+b^2}\right)}\right) + \\ +2\cdot\left(r+\sqrt{a^2+b^2}-(a+b)\right) \end{array} \right), \qquad (9)$$

где a, b – длины сторон прямоугольного витка по средней линии; d – диаметр круглого проводника или толщина прямоугольного проводника.

Величина $S_{зkj}$ может быть принята равной геометрической площади зазора (допущение об отсутствии выпячиваний линий магнитного поля в зазоре, величина которого обычно существенно меньше линейных размеров его сечения). Данное допущение тем оправданней, чем меньше величина зазора δ, тем более что технологические факторы оказывают, как правило, гораздо большее влияние на точность параметров изготовленного устройства, чем обозначенные неточности проектного расчета.

В итоге на практике любые неточности в плане несоответствия индуктивности изготовленного устройства результатам расчета компенсируются путем соответствующей коррекции величины зазоров при сборке устройства.

Расчет числа витков фазных обмоток трансформатора и дросселей осуществляется по известной формуле

$$w_k = \frac{U_k}{4{,}44 \cdot f B S}, \qquad (10)$$

где U_k – фазное напряжение k-й обмотки; f – частота; B – амплитуда магнитной индукции в стержне, на котором располагается обмотка; S – активное сечение стержня.

Величина U_k в трансформаторах равна фазному напряжению первичной обмотки. В дросселях и реакторах U_k – это расчетная величина, равная падению напряжения в индуктивном сопротивлении, которая рассчитывается по формуле

$$U_k = 2\pi f L_н I_н, \qquad (11)$$

где $L_н$, $I_н$ – номинальная индуктивность и номинальный ток, заданные техническим заданием на проектирование.

Для теплового расчета проектируемых устройств используется метод электрических схем замещения тепловых процессов [11]. Это позволяет достаточно быстро корректировать алгоритм теплового расчета, при необходимости ввести изменения в САПР РДТ ММ, например при изменении тепловой схемы устройства. Для этого сначала разрабатывается тепловая цепь устройства, затем строится ее электрическая схема замещения, например, в среде MatLab Simulink SimPowerSystems [12]. Так, на рис. 2 приведена электрическая схема устройства с двумя охлаждающими каналами: один – между магнитопроводом и внутренней обмоткой, другой – внутри обмотки.

Данная модель может быть использована только для имитационного моделирования спроектированного устройства в произвольных режимах работы. В функции проектного расчета, которая вызывается многократно непосредственно в процессе оптимизации, такую модель использовать нельзя, так как обращение к модели MatLab Simulink на каждом шаге оптимизации сильно тормозит процесс поиска решения.

В связи с этим при оптимизации в САПР РДТ ММ используется модель тепловой цепи, реализованная с помощью библиотеки ECLib [13]. Для этого сначала в произвольном порядке нумеруются узлы и элементы электрической цепи (рис. 2), затем строятся матрица соединений данной цепи и матрица номиналов. Эти матрицы являются исходными данными для функции формирования и расчета цепной модели с использованием функционала ECLib.

Номиналы элементов модели тепловой цепи, приведенной на рис. 2, рассчитываются по формулам:

1) тепловые сопротивления теплопроводности

$$R_{ттп} = \frac{1}{\lambda}\frac{b}{S}, \qquad (12)$$

где λ – удельная теплопроводность материала; b – толщина участка тепловой цепи; S – площадь, пронизываемая тепловым потоком, на данном участке тепловой цепи;

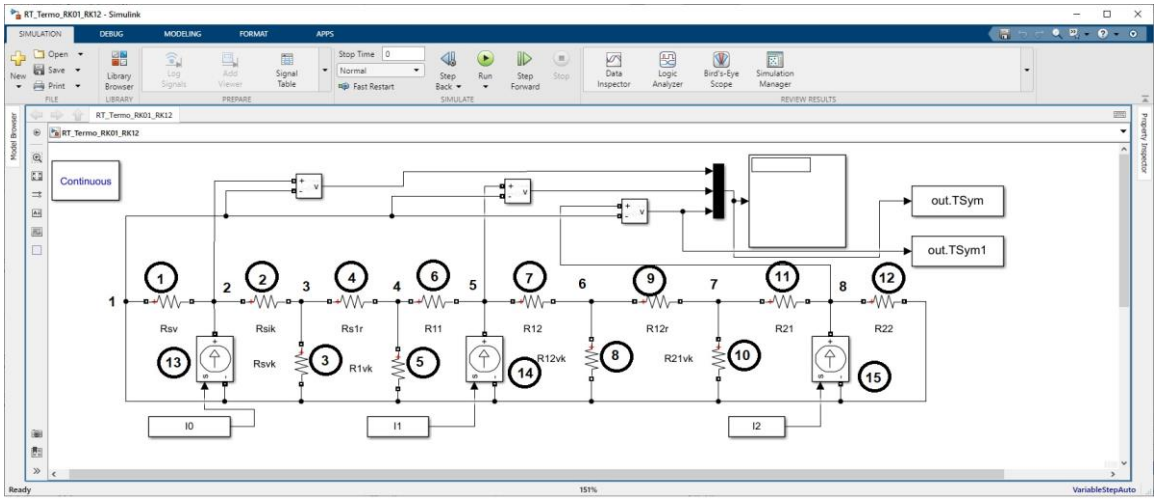

Рис. 2. Электрическая схема замещения теплового состояния устройства с двумя охлаждающими каналами (между магнитопроводом и обмоткой и внутри обмотки) в MatLab Simulink SimPowerSystems

2) тепловые сопротивления теплоотдачи

$$R_{\text{тто}} = \frac{1}{\alpha S}, \quad (13)$$

где α – коэффициент теплоотдачи с поверхности.

Удельные теплопроводности узлов устройства, которые имеют неоднородную структуру, рассчитываются по формуле теплоемкости комбинированной среды, например, для обмотки, изготовленной из изолированных прямоугольных проводников, располагающихся в нескольких слоях:

$$\lambda = \frac{n_s\left(a_{\text{р}} + \delta_{\text{ип}}\right) + \left(n_s - 1\right)\delta_{\text{ис}}}{\dfrac{n_s a_{\text{р}}}{\lambda_{\text{м}}} + \dfrac{n_s \delta_{\text{ип}} + \left(n_s - 1\right)\delta_{\text{ис}}}{\lambda_{\text{и}}}}, \quad (14)$$

где n_s – количество слоев в концентре обмотки; $a_{\text{р}}$ – толщина (в радиальном направлении) голого проводника; $\delta_{\text{ип}}$ – двусторонняя толщина изоляции провода; $\delta_{\text{ис}}$ – толщина межслоевой изоляции; $\lambda_{\text{м}}$, $\lambda_{\text{и}}$ – удельная теплопроводность материала металла проводника и материала изоляции.

Коэффициент теплоотдачи можно принять приблизительно равным:

1) $\alpha_{\text{к}}$ = 4 Вт/(К·м^2) при естественной конвективной теплоотдаче в охлаждающий канал;

2) $\alpha_{\text{р}}$ = 10 Вт/(К·м^2) при радиационном теплообмене между противоположными стенками охлаждающего канала;

3) α = 10–14 Вт/(К·м^2) при естественной теплоотдаче от поверхности обмотки или магнитопровода в открытое пространство.

В настоящее время ведется работа по созданию уточненной методики расчета коэффициентов теплоотдачи с использованием соответствующих критериев подобия [14, 15].

Результатом теплового расчета являются значения температур обмоток и магнитопровода, рассчитываемые из допущения о равенстве температуры во всех точках соответствующего узла устройства.

В качестве функции цели процесса оптимизации проекта принимается стоимость активных материалов $C_{\text{а}}$, которая суммируется с системой штрафных функций:

$$F\left(\{\text{X}\}\right) = C_a\left(\{\text{X}\}\right) + \\ + \sum_{i=1}^{Ns} \begin{cases} \left(Y_{i\,\max} - Y_i\left(\{\text{X}\}\right)\right)K_i, \text{ при } Y_i\left(\{\text{X}\}\right) > Y_{i\,\max}, \\ \left(Y_i\left(\{\text{X}\}\right) - Y_{i\,\min}\right)K_i, \text{ при } Y_i\left(\{\text{X}\}\right) < Y_{i\,\min}, \\ 0, \text{ при } Y_{i\,\min} \le Y_i\left(\{\text{X}\}\right) \le Y_{i\,\max}, \end{cases} \quad (15)$$

где {X} – вектор аргументов функции цели; Y_i({X}) – значение i-го критерия (величина, вычисляемая в подсистеме проектного расчета на данном шаге поиска), на которое накладывается штраф при выходе данного значения за допустимые пределы, определяемые величиной $Y_{i\text{доп}}$; K_i – штрафной коэффициент, значение которого выбирается на основе субъективных оценок таким образом, чтобы соответствующий критерий заметно влиял на значение целевой функции.

Вектор аргументов функции цели можно условно разложить на два вектора:

$$\{\text{X}\} = \{\text{X}\}_{\text{const}} + \{\text{X}\}_{\text{var}}, \quad (16)$$

где $\{\text{X}\}_{\text{const}}$ – вектор аргументов, численные значения которых не изменяются в процессе поиска оптимального решения (как правило, это величины, имеющие справочный характер, например характеристики материалов, допустимые изоляционные расстояния, толщина изоляционного материала и т.п.); $\{\text{X}\}_{\text{var}}$ – вектор варьируемых величин, значения которых изменяются на каждом шаге оптимизации.

На варьируемые величины из вектора $\{\text{X}\}_{\text{var}}$ накладываются параметрические ограничения вида

$$X_{i\,\min} \le X_i \le X_{i\,\max}. \quad (17)$$

Так, в разработанной версии САПР РДТ ММ в качестве варьируемых параметров были использованы следующие величины:

1) магнитная индукция в магнитопроводе;

2) немагнитный зазор в магнитной ветви;

3) ширина стержня;

4) глубина стержня;

5) высота окна;

6) ширина (или диаметр) провода обмотки, в трансформаторах – каждой из обмоток (выбирается из таблицы проводов, имеющихся на складе);

7) толщина провода обмотки/обмоток (в случае использования прямоугольных проводников).

Ядром функции цели является функция проектного расчета. Алгоритм проектного расчета включает в себя следующие проектные процедуры:

1) расчет фазных и линейных токов (для трансформатора) и напряжений;

2) выбор количества параллелей обмотки (по оси и по радиусу); расчет сечения

элементарных и эффективных проводников; расчет размеров изолированных проводников;

3) расчет числа витков обмоток, раскладка обмоток по слоям, расчет геометрических размеров обмоток (с учетом наличия каналов), длины и массы провода, активного сопротивления, напряжения и потерь короткого замыкания;

4) расчет геометрических размеров и массы магнитопровода, средних силовых линий магнитного поля в магнитных ветвях, магнитных сопротивлений ветвей при заданной индукции по (1), индуктивности фазных обмоток (для дросселя и реактора) потерь и тока холостого хода;

5) тепловой расчет устройства;

6) расчет стоимости активных материалов $C_а$, являющейся основным критерием оптимальности найденного решения.

В качестве дополнительных критериев оптимальности найденного решения принимаются некоторые величины Y_i, вычисляемые в функции проектного расчета. На эти величины накладываются ограничения вида

$$Y_{i\,\min} \le Y_i \le Y_{i\,\max} \qquad (18)$$

в виде штрафов в функции цели (15).

В качестве таких дополнительных критериев, на которые накладываются ограничения вида (18), в САПР РДТ ММ используются следующие расчетные величины:

1) температуры обмоток;
2) плотность тока;
3) отношение сторон прямоугольного сечения стержня магнитопровода;
4) потери холостого хода;
5) потери короткого замыкания;
6) ток холостого хода;
7) напряжение короткого замыкания;
8) высота устройства;
9) ширина устройства;
10) глубина устройства;
11) масса устройства;
12) число слоев внутренней обмотки;
13) число витков в слое внутренней обмотки.

Следует отметить, что итоговая индуктивность дросселя/реактора определяется не только числом витков, найденным по (10), но и геометрическими размерами магнитопровода, особенно величиной зазора. Поэтому величина индуктивности спроектированного устройства, рассчитанная по (3), может существенно отличаться от требуемого значения. В связи с этим при оптимизации дросселей и реакторов еще одним (причем основным) критерием оптимальности текущего варианта расчета является именно итоговая индуктивность L_t, рассчитанная по (3) на t-й итерации поиска при текущих значениях составляющих вектора $\{X\}_{var\,t}$, т. е. в (15):

$$\begin{aligned} &Y_1 = L_t, \\ &Y_{1\min} = L_н - \Delta L_{доп}, \\ &Y_{1\max} = L_н + \Delta L_{доп}, \end{aligned} \qquad (19)$$

где $L_н$ – индуктивность обмотки, заданная техническим заданием на проектирование; $\Delta L_{доп}$ – допустимое отклонение расчетной индуктивности от технического задания.

Таким образом, формулируется задача оптимизации, которая в итоге приводит к решению с минимальной стоимостью активных материалов, для которого выполняются условия критериальных ограничений.

На рис. 3 приведена схема поиска решения в САПР РДТ ММ.

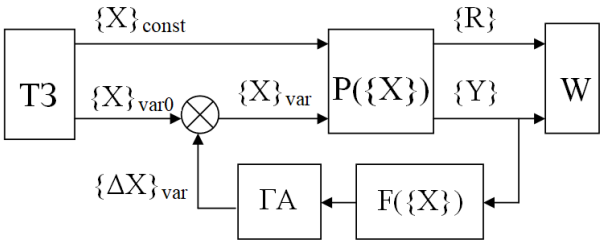

Рис. 3. Схема поиска решения в САПР РДТ ММ

В блоке ТЗ формулируется техническое задание, состоящее из двух векторов $\{X\}_{const}$ и $\{X\}_{var0}$. В последнем векторе содержатся начальные значения варьируемых переменных (стартовая точка оптимизации). Поиск решения осуществляется с использованием генетического алгоритма, реализованного в пакете MatLab, или математической библиотеки scipy.optimize на языке Python. Это не гарантирует нахождения глобального экстремума функции цели, но позволяет достаточно уверенно за несколько попыток находить приемлемое решение, близкое к оптимальному, для которого выполняются все требования технического задания.

Генетический алгоритм (рис. 3, блок ГА) меняет значения варьируемых переменных на каждом шаге поиска. Проектный расчет устройства осуществляется в блоке P({X}). Результаты расчета выдаются в виде двух

векторов: {Y} – вектор критериев, составляющие которого используются при построении функции цели F({X}) по (15); {R} – вектор результатов проектного расчета. Оба этих вектора передаются в подсистему выдачи результатов *W*.

Результаты исследований. В качестве интегрированной среды для создания и функционирования САПР РДТ ММ был использован табличный процессор MS Excel (рис. 4).

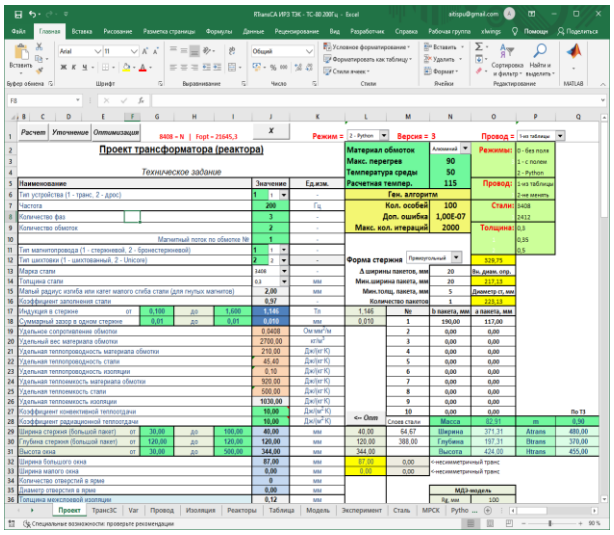

Рис. 4. Интерфейс расчетной подсистемы САПР РДТ ММ

Сервисные процедуры написаны на языке VBA во встроенной в MS Excel системе программирования. В учебной версии системы необходимый для функционирования САПР РДТ ММ математический аппарат заимствован из математического процессора MatLab, связанного с MS Excel посредством приложения SpreadSheetLink, позволяющего осуществлять двусторонний обмен данными между MS Excel и MatLab [14]. В коммерческой версии системы математический аппарат реализуется с использованием функций математических библиотек, написанных на языке Python.

Для оценки принятых проектных решений в случае проектирования устройств нетиповой конструкции используется метод имитационного моделирования в среде MatLab Simulink, разработанный в [17]. Ведется работа по созданию авторской системы имитационного моделирования физических процессов в технических устройствах с использованием электрических схем замещения.

Выводы. В условиях современного производства велик удельный вес мелкосерийной и штучной продукции. При этом количество опытных специалистов, способных решать задачи проектирования подобных устройств неуклонно снижается. В связи с этим возрастает роль наукоемких методов, которые могут быть использованы в имитационных моделях технических устройств, способных адекватно отразить особенности функционирования данных устройств даже при отсутствии апробированных инженерных методик. Предложенный пример создания расчетной подсистемы САПР РДТ ММ, которая относительно легко адаптируется под различные исполнения проектируемых устройств, позволяет отказаться от необходимости проведения НИОКР и создания опытных образцов продукции.

Реализованная в двух версиях: учебной (с использованием математического аппарата MatLab) и коммерческой (с использованием математических библиотек на языке Python), система в последнем случае может быть развернута на любом малом предприятии с соблюдением требований лицензионной чистоты.

Представленная САПР РДТ ММ прошла апробацию на трех предприятиях РФ, специализирующихся на изготовлении трансформаторов малой мощности, а также дросселей и реакторов.

Результаты исследования и разработки могут быть использованы при создании аналогичных систем проектирования электротехнических устройств.

Список литературы

1. **Тихомиров П.М.** Расчет трансформаторов: учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

2. **Бородулин Ю.Б., Попов Г.В.** Математические методы в САПР электрических машин: учеб. пособие / Иван. гос. ин-т; Иван. энерг. ин-т. – Иваново, 1986. – 80 с.

3. **Автоматизированное** проектирование электрических машин: учеб. пособие / Ю.Б. Бородулин, В.С. Мостейкис, Г.В. Попов, В.П. Шишкин / под ред. Ю.Б. Бородулина. – М.: Высш. шк., 1989. – 280 с.

4. **Тихонов А.И.** САПР силовых трансформаторов до 35 кВ // Актуальные проблемы науки и техники: материалы II Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 70-летию ИМИ – ИжГТУ и 60-летию СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», Сарапул, 19–21 мая 2022 г. – Ижевск: Изд-во УИР ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2022. – С. 716–720.

5. **Ермолин Н.П.** Расчет трансформаторов малой мощности. – Л.: Энергия, 1969. – 192 с.

6. **Стародубцев Ю.Н.** Теория и расчет трансформаторов малой мощности. – М.: ИП РадиоСофт, 2005. – 320 с.

7. **Баранов Д.С., Никитин К.К.** Простейшие рекомендации инженеру по расчету дросселей и трансформаторов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2018. – № 9. – С. 64–68.

8. **Maxwell J.C.** A Treatise on Electricity and Magnetism // Art. 701. To find M by Elliptic Integrals. – 1954. – Vol. 2. – P. 338–340.

9. **Grover F.W.** Inductance Calculations: Working Formulas and Tables, 1946 and 1973. Dover Phoenix Edition 2004. ISBN: 0 486 49577 9.2009 reprint ISBN13: 9780486474403 (https://coil32.net/ru/loop. html)

10. **Paul C.R.** Inductance: Loop and Partial. – New-York: Wily, 2011. – 379 p. (https://cyberleninka.ru/article/n/induktivnost-pryamougolnyh-konturov/viewer)

11. **Стулов А.В., Тихонов А.И., Корнев И.А.** Разработка многоуровневой подсистемы тепловых расчетов САПР активной части распределительных трансформаторов / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2014. – 96 с.

12. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

13. **Тихонов А.И., Стулов А.В., Дрязгов Д.Е.** Разработка автономной библиотеки моделирования электрических цепей для создания виртуальных лабораторий численного исследования моделей электрических машин // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 1. – С. 34–39.

14. **Михеев М.А., Михеева И.М.** Основы теплопередачи. – Изд. 2-е, стереотип. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.

15. **Бухмиров В.В.** Расчет коэффициента конвективной теплоотдачи (основные критериальные уравнения). – Иваново, 2007. – 40 с.

16. **Spreadsheet** Link (for Microsoft Excel) // MathWorks. – URL: https://www.mathworks. com/products/spreadsheet-link.html

17. **Создание** цифровых двойников силовых трансформаторов на основе имитационных моделей и их использование в САПР / А.И. Тихонов, А.В. Стулов, И.С. Снитько, А.В. Подобный. – Иваново, 2023. – 124 с.

References

1. Tikhomirov, P.M. *Raschet transformatorov* [Calculation of transformers]. Moscow: Energoatomizdat, 1986. 528 p.

2. Borodulin, Yu.B., Popov, G.V. *Matematicheskie metody v SAPR elektricheskikh mashin* [Mathematical methods in CAD of electrical machines]. Ivanovo, 1986. 80 p.

3. Borodulin, Yu.B., Mosteykis, V.S., Popov, G.V., Shishkin, V.P. *Avtomatizirovannoe proektirovanie elektricheskikh mashin* [Automated design of electrical machines]. Moscow: Vysshaya shkola, 1989. 280 p.

4. Tikhonov, A.I. SAPR silovykh transformatorov do 35 kV [CAD of power transformers up to 35 kV/V collection]. *Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 70-letiyu IMI – IzhGTU i 60-letiyu SPI (filial) FGBOU VO «IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova»: «Aktual'nye problemy nauki i tekhniki», Sarapul, 19–21 maya 2022 g.* [Materials of the II Int. scientific-technical conf., dedicated to the 70th anniversary of IMI – ISTU and the 60th anniversary of SPI (branch) of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “ISTU named after M.T. Kalashnikov”: “Actual problems of science and technology”, Sarapul, May 19–21, 2022]. Izhevsk: Izdatel'stvo UIR IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova, 2022, pp. 716–720.

5. Ermolin, N.P. *Raschet transformatorov maloy moshchnosti* [Calculation of low-power transformers]. Leningrad: Energiya, 1969. 192 p.

6. Starodubtsev, Yu.N. *Teoriya i raschet transformatorov maloy moshchnosti* [Theory and calculation of low-power transformers]. Moscow: IP RadioSoft, 2005. 320 p.

7. Baranov, D.S., Nikitin, K.K. Prosteyshie rekomendatsii inzheneru po raschetu drosseley i transformatorov [The simplest recommendations for an engineer on calculating chokes and transformers]. *Izvestiya SPbGETU «LETI»*, 2018, no. 9, pp. 64–68.

8. Maxwell, J.C. A Treatise on Electricity and Magnetism. Art. 701. To find M by Elliptic Integrals, 1954, vol. 2, pp. 338–340.

9. Grover, F.W. Inductance Calculations: Working Formulas and Tables, 1946 and 1973. Dover Phoenix Edition 2004. ISBN: 0 486 49577 9.2009 reprint ISBN13: 9780486474403. Available at: https://coil32.net/ru/loop. html

10. Paul, C.R. Inductance: Loop and Partial. New-York: Wily, 2011. 379 p. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/induktivnost-pryamougolnyh-konturov/viewer

11. Stulov, A.V., Tikhonov, A.I., Kornev, I.A. *Razrabotka mnogourovnevoy podsistemy teplovykh raschetov SAPR aktivnoy chasti raspredelitel'nykh transformatorov* [Development of a multi-level subsystem for thermal calculations of the CAD system for the active part of distribution transformers]. Ivanovo, 2014. 96 p.

12. Chernykh, I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow: DMK Press; Saint-Petersburg: Piter, 2008. 288 p.

13. Tikhonov, A.I., Stulov, A.V., Dryazgov, D.E. Razrabotka avtonomnoy biblioteki modelirovaniya elektricheskikh tsepey dlya sozdaniya virtual'nykh laboratoriy chislennogo issledovaniya modeley elektricheskikh mashin [Development of an autonomous library for modeling electrical circuits to create virtual laboratories for numerical study of electrical machine models]. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 1, pp. 34–39.

14. Mikheev, M.A., Mikheeva, I.M. *Osnovy teploperedachi* [Fundamentals of heat transfer]. Moscow: Energiya, 1977. 344 p.

15. Bukhmirov, V.V. *Raschet koeffitsienta konvektivnoy teplootdachi (osnovnye kriterial'nye uravneniya)* [Calculation of the convective heat transfer coefficient (main criterial equations)]. Ivanovo, 2007. 40 p.

16. Spreadsheet Link (for Microsoft Excel) // Math-Works. Available at: https://www.mathworks. com/products/spreadsheet-link.html

17. Tikhonov, A.I., Stulov, A.V., Snit'ko, I.S., Podobnyy, A.V. *Sozdanie tsifrovykh dvoynikov silovykh transformatorov na osnove imitatsionnykh modeley i ikh ispol'zovanie v SAPR* [Creation of digital twins of power transformers based on simulation models and their use in CAD]. Ivanovo, 2023. 124 p.