



ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Коровкин Н.В., Сахно Л.И., Парамонов Е.Д., Сахно О.И.

Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия
lsahno2010@yandex.ru

Резюме: Рассмотрено решение задачи многокритериальной оптимизации конструкции высоковольтного испытательного трансформатора с помощью алгоритма NSGA-II. В качестве критериев оптимизации приняты масса активных материалов, потери и отношение емкости между первым и вторым слоем вторичной обмотки к емкости между предпоследним и последним слоями вторичной обмотки. Изложена методика расчета конструкции трансформатора, которая используется при оптимизации. Приведен пример оптимизации конструкции высоковольтного испытательного трансформатора. Показано, что применение алгоритма NSGA-II позволило существенно сократить массу активных материалов и потери в трансформаторе по сравнению с базовым вариантом, рассчитанным по традиционной методике.

Ключевые слова: Высоковольтный испытательный трансформатор; методы многокритериальной оптимизации; NSGA-II; генетический алгоритм; электромагнитный расчет трансформатора.

Для цитирования: Коровкин Н.В., Сахно Л.И., Парамонов Е.Д., Сахно О.И. Оптимизация конструкции высоковольтного испытательного трансформатора // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 69-81. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-69-81.

OPTIMIZATION OF HIGH-VOLTAGE TEST TRANSFORMER DESIGN

Korovkin N.V., Sakhno L.I., Paramonov E.D., Sakhno O.I.

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University , St. Petersburg, Russia
lsahno2010@yandex.ru

Abstract: The paper considers the solution to the problem of multicriterial optimization of the high-voltage test transformer design using the NSGA-II algorithm. The optimization criteria are the mass of active materials, losses, and the ratio of the capacitance between the first and second layers of the secondary winding to the capacitance between the penultimate and last layers of the secondary winding. The calculation method for the transformer design used in the optimization is presented. An example of optimization of the high-voltage test transformer design is given. It is shown that the use of the NSGA-II algorithm made it possible to significantly reduce the mass of active materials and losses in the transformer compared to the basic version calculated using the traditional method.

Keywords: High voltage test transformer; leakage inductance; numerical methods; optimization methods; magnetostatic field; plane-parallel field.

For citation: Korovkin N.V., Sakhno L.I., Paramonov E.D., Sakhno O.I. Optimization of high-voltage test transformer design. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (3):69-81. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-69-81.

Введение (Introduction)

Трансформатор - один из наиболее востребованных видов электротехнического оборудования. Конструкция трансформатора существенно зависит от его типа, который характеризуется назначением, числом фаз, частотой, мощностью, классом напряжения,

числом обмоток, видом регулирования напряжения и видом охлаждения. Поиск оптимальной конструкции трансформатора является важнейшей задачей при проектировании трансформатора любого типа, поскольку обеспечивает его конкурентоспособность.

Главным критерием оптимальности конструкции трансформатора любого типа является его масса, определяемая в основном массой активных материалов – стали магнитопровода и меди обмоток и существенно влияет на его стоимость, так как расходы на активные материалы самые существенные при производстве трансформатора. Кроме минимизации массы активных материалов, при проектировании трансформатора необходимо обеспечить и другие технико-экономические характеристики, которые зависят от типа трансформатора. Например, для силовых трансформаторов необходимо обеспечить минимизацию стоимости трансформации электроэнергии в течение срока службы, для сварочных трансформаторов контактной сварки – минимальную индуктивность рассеяния, для измерительных трансформаторов тока – минимальный ток намагничивания в широких пределах изменения измеряемых токов. Необходимость обеспечения разнообразных технико-экономических характеристик делает задачу поиска оптимальной конструкции уникальной для каждого типа трансформатора, что в свою очередь требует от конструктора-разработчика большого опыта в области проектирования трансформатора именно этого типа.

Традиционно поиск оптимальной конструкции трансформатора любого типа состоит в электромагнитном, тепловом и механическом расчете 3-4 вариантов конструкции по известным методикам расчета, причем основные геометрические параметры и электромагнитные характеристики первого варианта выбираются близкими к соответствующим параметрам трансформатора-прототипа. Эти варианты отличаются основными размерами, массами активных материалов, стоимостью, параметрами холостого хода и короткого замыкания. Трудность поиска оптимального варианта традиционным способом определяется сложными зависимостями технико-экономических показателей трансформатора от его конструктивных параметров. Изменение одного конструктивного параметра, как правило, приводит к цепочке изменений других параметров, причем эти изменения могут оказывать противоположное влияние на технико-экономические показатели. Даже имея компьютерные программы, которые автоматизируют расчет трансформатора по имеющимся методикам, поиск оптимальной конструкции таким способом требует значительного времени, так как необходим анализ рассчитанных вариантов конструкций и выбор исходных данных для следующего варианта. Наиболее трудоемким процесс поиска оптимальной конструкции является в случае, когда конструкция нового трансформатора существенно отличается от прототипа. В этом случае расчет 3-4 и даже более вариантов может не дать оптимальной конструкции.

Литературный обзор (Literature Review)

Использование многоцелевой оптимизации в задачах электроэнергетики, к которым относится оптимизация высоковольтного испытательного трансформатора, – одна из важнейших современных тенденций ее развития. Так эти методы успешно используются для получения оптимальных конструкций турбо и гидрогенераторов [1,2], получения наилучших режимов работы энергосистем [3,4], сложных задачах формирования оптимальной перспективной структуры энергосистем [5].

В настоящее время для оптимизации конструкций трансформаторов разных типов используются методы многоцелевой оптимизации, в основе которых лежат модели биологических и физических процессов. В [6] исследуются новые эвристические методы (алгоритм оптимизации «Светлячок» (FA), алгоритм арифметической оптимизации (AOA), алгоритм оптимизации «Серый волк» (GWO) и алгоритм оптимизации «Искусственные отряды горилл» (GTO)), которые применены к оптимизации конструкции распределительного трансформатора мощностью 1000 кВА. Показано, что применение этих методов позволило снизить потери мощности на 3,5%, а массу трансформатора на 8,3%. В [7] успешно используется генетический алгоритм для нахождения оптимальной конструкции трансформатора повышенной частоты 10 кГц, мощностью 20 кВт. К наиболее популярным методам многоцелевой оптимизации конструкций трансформаторов относится генетический алгоритм недоминантной сортировки второго поколения (далее NSGA-II). В [8] алгоритм NSGA-II применен к трансформатору с частотой 20 кГц и мощностью 3,52 кВт, в [9] к трехфазному промышленного трансформатору. При этом расчет электромагнитных параметров трансформаторов проводится с помощью МКЭ. В [10] даны результаты моделирования NSGA-II на ряде тестовых задач, где показана высокая производительность этого метода. В [11] дан улучшенный метод NSGA-II, который применен к тяговому трансформатору. Задачи, решенные в перечисленных работах, отличаются критериями оптимизации и переменными, однако, несмотря на эти отличия, все они показывают высокую эффективность метода NSGA-II. Большинство из них [6-9,10]

подтверждены результатами экспериментальных исследований, которые показывают улучшение параметров оптимизации в пределах 10%. В связи с этим в настоящей статье для оптимизации конструкции высоковольтного испытательного трансформатора выбран метод NSGA-II, который позволит существенно сократить трудоемкость поиска оптимальной конструкции и расширить область изменения конструктивных параметров по сравнению с традиционным подходом.

Для успешного использования метода NSGA-II прежде всего необходимы надежные методы расчета основных электромагнитных параметров трансформатора, определяющих его конструкцию – индукцию магнитного поля в магнитопроводе, потери в обмотках и магнитопроводе, индуктивность рассеяния, пробивное напряжение. Методика расчета этих параметров разработана в тридцатых годах прошлого века и до сих пор широко используется для расчета силовых трансформаторов [12,13]. Эти методики основаны на допущениях о равномерном распределении магнитной индукции по магнитопроводу и спрямлении линий магнитного поля рассеяния. В тоже время интенсивно развиваются численные методы расчета магнитных полей, которые позволяют учесть неравномерность распределения магнитного поля по сечению магнитопровода и реальные свойства электротехнической стали при холостом ходе [14-16], а также влияние нагрузки трансформатора на магнитное поле в магнитопроводе [17,18]. Большая группа работ посвящена совершенствованию методов расчета индуктивностей рассеяния с использованием 3D-моделирования, например [20]. Подробный обзор аналитических и численных методов расчета индуктивностей рассеяния дан в [21], где показано, что аналитические методы расчета существенно отличаются для силовых, высокочастотных и планарных трансформаторов. Там же получена формула для расчета индуктивности рассеяния высоковольтного испытательного трансформатора, который рассматривается в настоящей статье.

На основе проведенного анализа выбраны методы расчета, которые используются в методике многокритериальной оптимизации высоковольтного испытательного трансформатора.

Целью статьи является разработка и апробация методики многокритериальной оптимизации высоковольтного испытательного трансформатора при стандартном техническом задании на проект [12] трансформатора с использованием алгоритма NSGA-II и оценка качества полученных с помощью этой методики конструкций трансформатора.

Практическая ценность работы состоит в экономии активных материалов трансформатора, уменьшении потерь в нем, сокращении времени проектирования и снижении требований к опыту конструктора.

Материалы и методы (Materials and methods)

Методика оптимизации. Многокритериальная оптимизация предполагает выбор несколько конфликтующих между собой критериев оптимальности (целевых функций) $F_1(\mathbf{x})$, $F_2(\mathbf{x})$, $\dots$. Каждый критерий определяется конструктивными переменными, которые составляют вектор переменных $\mathbf{X}$. Поиск оптимального решения необходимо выполнять при определенных ограничениях на максимальные и минимальные значения конструктивных переменных: $\forall_{k=1, N} : x_k \in \mathbf{X}; \quad \underline{x}_k \leq x_k \leq \overline{x}_k$, а также при возможных ограничениях на электромагнитные характеристики трансформатора. Математическая формулировка задачи с использованием введенных переменных для двух целевых функций имеет вид:

$$\begin{aligned} F_1(\mathbf{x}) &\xrightarrow{\mathbf{x}} \min, \\ F_2(\mathbf{x}) &\xrightarrow{\mathbf{x}} \min, \\ \underline{\mathbf{x}} &\leq \mathbf{x} \leq \overline{\mathbf{x}}, \\ G_n(\mathbf{x}) &\leq 0, \quad n = \overline{1, M}. \end{aligned}$$

В основе генетического алгоритма лежит формирование нескольких поколений популяций. Популяция состоит из особей, представляющих собой конструкции трансформатора. Каждая особь обладает набором геометрических изменяемых параметров (набор генов). В каждом поколении происходит мутация генов отдельных особей и их размножение, в результате чего формируются следующие поколения. Для расчета каждой конструкции (особи) используется как традиционная методика расчета трансформатора, так и численные методы расчета магнитостатического и электростатического полей. Для того, чтобы исключить тепловой расчет трансформатора из прототипа задаемся амплитудой рабочей индукции B_m , плотностью тока в первичной обмотке J_1 и плотностью тока вторичной

обмотки J_2 . Количество особей в популяции и количество поколений задаются перед началом оптимизации.

Для оптимизации выбраны три критерия: масса активных материалов, потери, отношение емкости C_1 между первым и вторым слоем вторичной обмотки к емкости C_{m2} между предпоследним и последним слоями вторичной обмотки. Этот критерий необходим для выравнивания напряжения между отдельными частями обмотки при срезах напряжения.

Изменяемые конструктивные параметры, составляющие вектор x : количества витков и слоев первичной обмотки, количество слоев вторичной обмотки, угол α сечения вторичной обмотки (рис. 1). Ограничения на изменяемые параметры:

$$60 < w_1 < 160; \quad \frac{C_{m2}}{C_1} < 1,2; \quad 15^\circ < \alpha < 25^\circ. \quad (1)$$

Функциональное ограничение - отсутствие резонанса в трансформаторе:

$$\frac{1}{\omega^2 L_{12} C_H} - 1 < 0,01, \quad (2)$$

где L_{12} - индуктивность рассеяния, приведенная к вторичной обмотке, C_H - емкость нагрузки. $\omega = 2\pi f$.

Межслоевая изоляция и расстояние от последнего слоя высоковольтной обмотки до магнитопровода принимаются равными соответствующим параметром прототипа и задаются в процедуре оптимизации как постоянные величины. Также из прототипа задается расстояние от стержня магнитопровода до каркаса, на который наматываются обмотки.

Результатом решения сформулированной многокритериальной задачи оптимизации конструкции высоковольтного испытательного трансформатора является множество Парето, включающее в себя все конструктивные параметры, при которых значение каждого критерия не может быть уменьшено без увеличения других критериев.

Объект исследования. Высоковольтный испытательный трансформатор, оптимизация конструкции которого рассматривается в данной статье, входит в состав передвижной установки, поэтому для него особенно актуальна минимизация массы и габаритов. Этот трансформатор предназначен для испытания кратковременным повышенным напряжением промышленной частоты электротехнического оборудования (трансформаторы тока и напряжения, силовые трансформаторы, разъединители и другие). Он помещен в корпус, заполненный элегазом. В статье рассматривается трансформатор со стержневым витым магнитопроводом и цилиндрическими многослойными обмотками. Первичная обмотка может иметь несколько последовательно соединенных секций для регулирования вторичного напряжения. Осовое сечение вторичной обмотки имеет трапециевидную форму, которая позволяет обеспечить приблизительное равенство емкостей между слоями вторичной обмотки (рис.1).

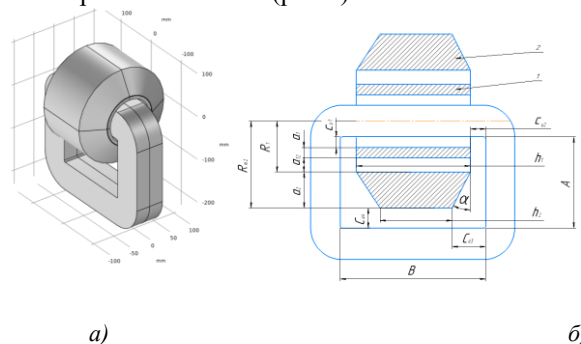


Рис.1. Конструкция высоковольтного испытательного трансформатора. а) общий вид, б) осевое сечение

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Между обмотками высшего и низшего напряжения располагают разрезной проводящий металлический экран, соединенный с сердечником, чтобы импульсы напряжения с обмотки высокого напряжения не передавались в обмотку низкого напряжения. Также, как и в силовых высоковольтных трансформаторах, в проектируемом трансформаторе необходимо обеспечить отсутствие перегрева обмоток и их изоляции, а также напряженность электростатического поля вблизи высоковольтных частей должна быть меньше пробивной напряженности изоляции. Электродинамические силы при коротких замыканиях на стороне высокого напряжения из-за малых токов не вызывают

опасности механических повреждений обмоток и не рассчитываются. Среди специфических требований, предъявляемых к высоковольтным испытательным трансформаторам, следует отметить синусоидальность формы вторичного напряжения, определяемую международными нормами и стандартами, и отсутствие резонанса в контуре высокого напряжения, состоящем из индуктивности рассеяния трансформатора, емкости трансформатора и емкости объекта испытаний. Перечисленные особенности должны быть учтены при оптимизации конструкции трансформатора.

Постановка задачи. Основные электромагнитные параметры проектируемого высоковольтного испытательного трансформатора (задание на проект) даны в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Электромагнитные параметры проектируемого трансформатора и прототипа

Electromagnetic parameters of the designed transformer and prototype

Наименование параметра	Значение параметра проектируемого трансформатора	Значение параметра прототипа
Первичное напряжение U_1 , В	220	220
Вторичное напряжение U_2 , кВ	50/100	100
Частота, Гц	50	50
Установившийся ток КЗ, А, не менее	1,4	1,4
Напряжение КЗ, не более %	5	5
Максимальная емкость объекта испытаний, нФ	15	15
Испытательная мощность, кВА:		
- длительный режим	2,6	4,1
- повторно-кратковременный режим	5	7,8
Мощность нагрузки, кВА	5	-
Габаритные размеры, мм	-	350x350x620
Масса, кг	-	42

В качестве прототипа выбран трансформатор ИОГ-100/7,5, выпускаемый ОАО «Владимирский завод «Электроприбор». В этом трансформаторе используется стержневая конструкция трансформатора. На каждом стержне магнитопровода расположены половина первичной и половина вторичной обмотки [21]. Основные электромагнитные характеристики этого трансформатора, приведены в таблице 1.

Информация о массе активных материалов этого трансформатора в литературе отсутствует. Для сокращения времени поиска оптимальной конструкции сделано предположение, что тепловой режим проектируемого трансформатора не будет отличаться от теплового режима прототипа, если плотности тока в обмотках и рабочую индукцию в сечении магнитопровода проектируемого трансформатора принять равными соответствующим параметрам прототипа. Несмотря на разницу в конструкциях проектируемого трансформатора и прототипа, такое предположение можно считать обоснованным, поскольку мощность прототипа в 1,5 раза больше проектируемого трансформатора. Межсоевая изоляция и расстояние от высоковольтного вывода вторичной обмотки до магнитопровода выбираются равными соответствующим параметрам трансформатора - прототипа. После получения оптимальной конструкции следует провести теоретическую и экспериментальную проверку теплового режима проектируемого трансформатора.

Методика расчета конструкции трансформатора и критериев оптимизации

Покажем, что если задаться рабочей индукцией и плотностями токов в обмотках, а также размерами изоляционных промежутков, то геометрия трансформатора будет полностью определяться количествами витков W_1 и слоев m_1 первичной обмотки, количеством слоев вторичной обмотки m_2 и углом α сечения вторичной обмотки (рис.1).

Количество витков первичной обмотки W_1 определяет сечение стержня магнитопровода [12,13]:

$$s = \frac{U_1}{4,44 f W_1 B_m}, \quad (3)$$

где f - частота, B_m - амплитуда рабочей индукции.

Листовая сталь для намотки магнитопровода выбирается в соответствии с ГОСТ 21427.1.83.

Сечение проводов первичной S_1 и вторичной S_2 обмоток определяется по формулам:

$$S_1 = \frac{I_1}{J_1}, \quad S_2 = \frac{I_2}{J_2}, \quad (4)$$

где I_1, I_2 - номинальные токи первичной и вторичной обмоток, J_1, J_2 - плотности тока в первичной и вторичной обмотках прототипа.

и выбираются согласно ГОСТ 31947-2012, ГОСТ 22301-77. Обозначения размеров проводов прямоугольного сечения первичной обмотки показаны на рисунке 2а, вторичной обмотки из проводов кругового сечения на рисунке 2б.

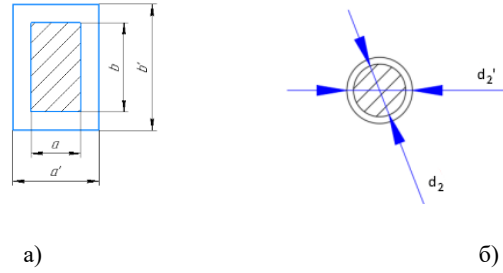


Рис.2. Поперечные сечения первичной (а) и вторичной (б) обмоток

Высота первичной обмотки

$$h_1 = b' \cdot n_1, \quad (5)$$

где $n_1 = \frac{w_1}{m_1}$ - количество витков в слое, m_1 - количество слоев первичной обмотки.

Радиальный размер первичной обмотки:

$$a_1 = a' \cdot m_1 + c' \cdot (m_1 - 1). \quad (6)$$

c' - толщина межслойной изоляции первичной обмотки

Количество витков вторичной обмотки $w_2 = \frac{w_1}{k}$, где $k = \frac{U_1}{U_2}$ - коэффициент трансформации. Радиальный размер вторичной обмотки:

$$a_2 = d_2' \cdot m_2 + c'' \cdot (m_2 - 1), \quad (7)$$

m_2 - количество слоев вторичной обмотки, d_2' - диаметр провода, c'' - толщина межслойной изоляции вторичной обмотки.

Одно из оснований трапеции, которое представляет осевое сечение вторичной обмотки, равно высоте первичной обмотки, другое определяется формулой:

$$h_2 = h_1 - 2a_2 \cdot \tan \alpha \quad (8)$$

После определения размеров обмоток определяются размеры окна магнитопровода, которые необходимы для изготовления оправки для намотки стальной ленты магнитопровода (рис. 1):

$$A = c_{H1} + a_1 + a_{12} + a_2 + c_{H4}, \quad (9)$$

$$B = h_1 + 2c_{H2}. \quad (10)$$

Таким образом, все геометрические параметры трансформатора определены. Далее определяются объемы, занятые медью V_M и сталью V_{CT} , и первый критерий оптимизации - массу:

$$m = m_M + m_{CT} = \rho_M V_M + \rho_{CT} V_{CT}, \quad (11)$$

где m_M - масса меди, m_{CT} - масса стали, ρ_M - плотность меди, ρ_{CT} - плотность стали.

Следующий критерий оптимизации - потери в обмотках. Они складываются из потерь в обмотках:

$$P_1 = I_1^2 r_1, \quad P_2 = I_2^2 r_2, \quad (12)$$

где $r_1 = \frac{w_1 l_1}{\gamma S_1}$ - активное сопротивление первичной обмотки, l_1 - длина провода первичной

обмотки, γ - удельная электрическая проводимость провода, $r_2 = \frac{w_2 l_2}{\gamma S_2}$ - активное

сопротивление вторичной обмотки, l_2 - длина провода вторичной обмотки.

И потерь в магнитопроводе:

$$P_{\text{СТАЛЬ}} = p \cdot m_{\text{СТАЛЬ}}, \quad (13)$$

где p - удельные потери в стали, которые определяются по ГОСТ 21427.1-83, $m_{\text{СТАЛЬ}}$ - масса стали.

Для расчета третьего критерия - отношение емкости C_1 между первым и вторым слоем вторичной обмотки к емкости C_{m_2} между предпоследним и последним слоями вторичной обмотки получена формула:

$$\frac{C_{m_2}}{C_1} = \frac{h_2 \ln \frac{R_2}{R_1}}{h_1 \ln \frac{R_{m_2}}{R_{m_2-1}}}, \quad (14)$$

где R_1, R_2 - радиусы первого и второго слоев, R_{m_2-1}, R_{m_2} - радиусы предпоследнего и последнего слоев (рис. 1).

Для проверки функционального ограничения (2) необходимо найти индуктивность рассеяния трансформатора [20]:

$$L_{12} = \mu_0 \pi D w_1^2 \left(a_{12} + \frac{a_1}{3} + \frac{4}{(h_1 + h_2)^2} \left(\frac{h_1^2 a_2}{3} + \frac{h_1 a_2^2 \operatorname{tg} \alpha}{2} + \frac{a_2^3 \operatorname{tg}^2 \alpha}{5} \right) \right) / l, \quad (15)$$

где D - средний диаметр обмоток.

После расчета конструкции трансформатора необходимо проверить распределение первичного тока между параллельно соединенными секциями и рабочую индукцию в магнитопроводе, которая может быть больше принятой из прототипа, так как у трансформатора емкостная нагрузка. Методика расчета подробно изложена в [17,18]. При превышении плотности тока по сравнению с первоначально выбранным находится новое сечение по (4), при превышении индукции также необходимо найти новое сечение по (3) и повторить весь расчет конструкции трансформатора. Блок-схема алгоритма NSGA-II оптимизации трансформатора показана на рисунке 3.

После нахождения множества Парето выбираются ряд конструкций для изготовления, для которых выполняется 3D расчет магнитостатического и электростатического полей и уточнение индуктивности рассеяния, межслойных емкостей и напряженности электрического поля вблизи высоковольтной части вторичной обмотки, на основе которых выбирается окончательный вариант.

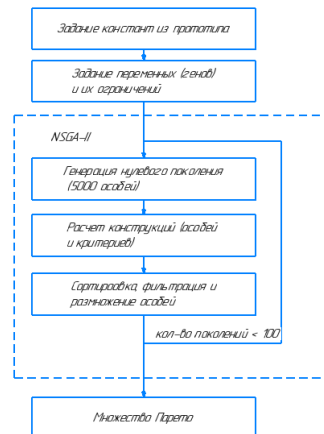


Рис.3. Блок-схема генетического алгоритма

Fig.3. Block diagram of the genetic algorithm

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Результаты (Results)

Из таблица 1 для трансформатора-прототипа ИОГ-100/7,5 принимаем следующие основные электромагнитные характеристики проектируемого трансформатора: амплитуда рабочей индукции $B_m = 1,24$ Тл, плотность длительного тока в первичной обмотке $3,75$ А/мм², плотность длительного тока вторичной обмотки $1,6$ А/мм². Принимая во внимание указанные параметры первичную обмотку выполняем из проводов прямоугольного сечения ПСД- 1,4х2,8 (ГОСТ 22301-77), вторичной – кругового диаметр ПТВ -2-0,14 (ГОСТ 31947-2012). Первичная обмотка наматывается на специальный каркас, выполненной в виде цилиндра. Расстояния от стержня магнитопровода до каркаса 1 мм, толщина каркаса 3 мм ($c_{III} = 4$ мм на рис.1), расстояние от последнего слоя высоковольтной обмотки до магнитопровода $c_{III} = 25$ мм. Межслоевая изоляция выполнена из ленты ЭЛИЗТЕРМ-155-ТПл (31913-2011).

Первоначально был рассчитан базовый вариант конструкции трансформатора по стандартной методике по данным таблицы 1 с учетом конструкции трансформатора-прототипа. В этой конструкции количество витков первичной обмотки 148 , вторичной - 63000 , количество слоев первичной обмотки 3 , вторичной 98 , $\alpha = 20^\circ$. По результатам расчета получено: масса меди составляет $7,3$ кг, масса стали $22,5$ кг, суммарная масса активных материалов $29,6$ кг.

При оптимизации конструкции с использованием алгоритма NSGA-II принято:

- число поколений 100 ,
- число особей (конструкций) в поколении 5000 ,
- точность расчета $1 \cdot 10^{-6}$,
- разброс особей (рассеяние) изменялось от $0,6$ до $0,8$

Результаты оптимизации приведены на рис. 4, где в трехкритериальном пространстве приведены Парето-множества, полученные в результате оптимизации конструкции трансформатора. Точка, соответствующая базовому трансформатору, выделена на рисунке красным цветом. Парето-множество показывает, в частности, множество конструкций трансформатора, лучших базового по выбранным критериям.

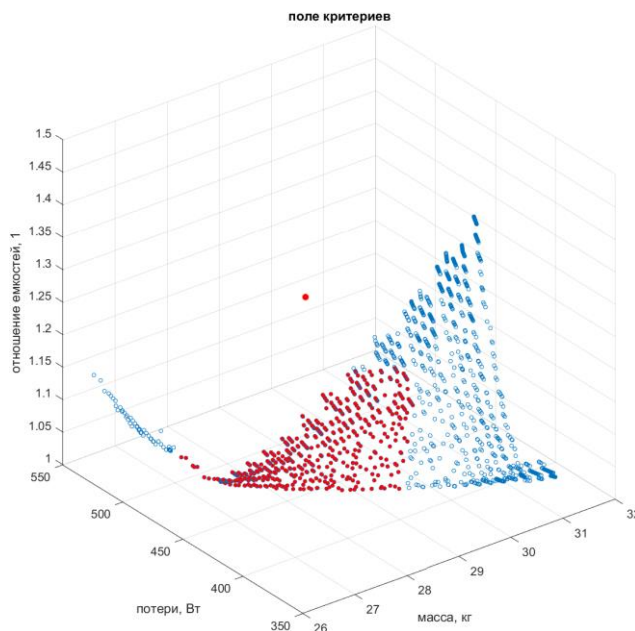


Рис.4. Множество Парето конструкций и точка, соответствующая базовому трансформатору

Fig. 4. Pareto set of constructions and the point corresponding to the prototype transformer

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

В таблице 3 приведены варьируемые параметры и функции цели для трех трансформаторов, которые превосходят базовый по массе. Второй и третий варианты превосходят базовый и по потерям. Критерий $\frac{C_{m2}}{C_1} < 1,2$ согласно (1). В таблице 4 даны геометрические параметры этих трансформаторов, которые объясняют результаты, полученные в таблице 3.

Таблица 3

Table 3

Варьируемые параметры и функции цели рассчитанных конструкций трансформаторов
Variable parameters and functions of the purpose of the calculated transformer designs

#	Варьируемые параметры				Функции цели		
Номер варианта	Число слоев первичной обмотки, m_1	Угол α°	Число витков первичной обмотки, w_1	Число слоев вторичной обмотки	Масса активных материалов, кг	Потери, Вт	Отношение емкостей C_{m_2}/C_1
1	4	17	132	110	26,33	510	1,17
2	5	15,6	149	142	26,79	480	1,17
3	5	17	160	144	26,73	460	1,17
Базовый вариант	3	30	148	90	29,8	490	1,04

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Таблица 4

Table 4

Геометрические параметры рассчитанных конструкций трансформаторов

Geometric parameters of the calculated transformer designs

№ варианта	Высота h_1 первичной обмотки, мм	Ширина a_1 первичной обмотки, мм	Высота h_2 вторичной обмотки, мм	Ширина a_2 вторичной обмотки, мм
1	117,70	9,29	77,56	60,91
2	107,32	11,19	63,76	78,27
3	114,24	11,19	67,06	79,26
4	172	7,4	117	50

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Все трансформаторы в таблице 3 имеют массу трансформатора меньше, чем масса базового трансформатора. Уменьшение массы варианта 3 достигнуто за счет увеличения количества витков и слоев первичной обмотки. Увеличение количества витков приводит к уменьшению сечения магнитопровода, а увеличение слоев приводит к уменьшению высоты первичной обмотки (так как уменьшилось количество проводов в одном слое) и, соответственно, один из размеров окна уменьшился приблизительно на 50%. По сравнению с общей шириной окна радиальной размер первичной обмотки увеличился незначительно с 7,4 мм для базового до 11,2 мм в третьем варианте. В результате сократилась средняя длина магнитопровода, что также привело к уменьшению массы магнитопровода. Поэтому общая масса первого варианта по сравнению с базовым уменьшилась на 11,4%. На рис.5 показаны половины осевых сечений базового трансформатора и варианта 3 из таблицы 4. Эти половины разделены осевой линией. В практике проектирования основные геометрические размеры трансформатора принято характеризовать коэффициентом:

$$\beta = \frac{\pi D}{h}, \quad (17)$$

где D - средний диаметр обмоток, h - высота трансформатора.

Для базового трансформатора $\beta = 0,93$, для рассчитанного с использованием алгоритма NSGA-II $\beta = 1,48$. Эти коэффициенты отличаются почти на 60%. Таким образом, конструкция трансформатора, полученная с помощью предлагаемого подхода, существенно отличается от базового.



Рис.5. Сечение базовой (справа) и оптимальной (слева) конструкций Fig.5. Section of the basic (right) and best (left) designs

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Заключение (Conclusions)

1. Оптимизация конструкции высоковольтного испытательного трансформатора с использованием алгоритма NSGA-II позволила сократить массу трансформатора на 11%, при этом потери уменьшены на 4%, отношение емкостей C_{m_2}/C_1 не превышает 1,2.

2. Разработанная методика может быть адаптирована для любого типа трансформатора при изменении критериев оптимальности на критерии, соответствующие этому типу трансформатора и внесении дополнений в методику его расчета.

3. Применение алгоритма NSGA-II существенно снижает требования к опыту конструктора, проектирующего трансформатор определенного типа, так как оптимальные размеры трансформатора получаются автоматически, а не в результате многократного расчета, анализа и изменения вариантов конструкций, обеспечивающих достижение критериев оптимальности.

Литература

1. Коровкин Н.В., Марков М.А. Оптимизация параметров турбогенератора твв-360 по векторному критерию. Известия Российской академии наук. Энергетика. 2020. № 4. С. 49-54.
2. Коровкин Н.В., Гулай С.Л., Верховцев Д.А. Оптимизация параметров гидрогенератора. Известия Российской академии наук. Энергетика. 2019. № 4. С. 42-50
3. Ковбаса В.Д., Коровкин Н.В. Минимизация отклонений напряжений узлов и потерь в энергосистеме на основе многокритериальной оптимизации. Изв. НТЦ Единой энергетической системы. 2023. № 2 (89). С. 31-38.
4. Ahmed M.K., Osman M.H., Korovkin N.V. Multiobjective optimization of power flow distribution in eps with res under minimum number of transformer's on-load tap changing. Elektrichestvo. 2022. № 5. С. 10-20
5. Беляев Н.А., Гурьева А.Ю., Коровкин Н.В., Олейник Н.А. Формирование рациональной перспективной структуры ЕЭС России на основе мультикритериальной оптимизации. Изв. НТЦ Единой энергетической системы. 2024. № 1 (90). С. 5-19.
6. M. H. Hashemi, U. Kiliç and S. Dikmen, "Applications of Novel Heuristic Algorithms in Design Optimization of Energy-Efficient Distribution Transformer," in IEEE Access, vol. 11, pp. 15968-15980, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3245327.
7. O. Olowu, H. Jafari, M. Moghaddami and A. I. Sarwat, "Multiphysics and Multiobjective Design Optimization of High-Frequency Transformers for Solid-State Transformer Applications," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 57, no. 1, pp. 1014-1023, Jan.-Feb. 2021, doi: 10.1109/TIA.2020.3035129.
8. K. Zhang, W. Chen, X. Cao, Z. Song, G. Qiao and L. Sun, "Optimization Design of High-Power High-Frequency Transformer Based on Multi-Objective Genetic Algorithm," 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), Shenzhen, China, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/PEAC.2018.8590371
9. S. Mohammed and R. A. Vural, "NSGA-II+FEM Based Loss Optimization of Three-Phase Transformer," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 9, pp. 7417-7425, Sept. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2881935.
10. K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," in IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, April 2002, doi: 10.1109/4235.996017

11. Ding, C. Yang and B. Xiong, "Multi-Objective Optimal Design of Traction Transformer Using Improved NSGA-II," 2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Gyeongju, Korea, Republic of, 2021, pp. 1470-1474, doi: 10.23919/ICEMS52562.2021.9634516.
12. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов. Учебное пособие для вузов. М: Энергия. 1974, 544 с.
13. Г.Н. Петров. Электрические машины. Часть первая. Введение. Трансформаторы. М: Энергия. 1974, 240 с.
14. Калинин Е.В. Моделирование потерь в шихтованных сердечниках силовых трансформаторов//Интеллектуальная электротехника.-2020-№1(9).-С.52-68.
15. Wang K. et al. Fast Calculation Method of Magnetic field in Transformer Core Based on Magnetic Circuit Modeling //Annual Conference of China Electrotechnical Society. – Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. – С. 604-616.
16. L. Lu, Y. Che, X. Wu, G. Li, Z. Yang and L. Zhu, "Magnetic Field Calculation of Distribution Transformer with Finite Element Method," 2021 IEEE International Conference on Emergency Science and Information Technology (ICESIT), Chongqing, China, 2021, pp. 585-588, doi: 10.1109/ICESIT53460.2021.9696770.
17. Sakhno L. I. et al. Transformer under load condition: comparison of FEA and equivalent circuit analysis //Тезисы доклада на XXV международном симпозиуме « Электромагнитные явления в нелинейных цепях » 2018. – Т. 26. – С. 18-28.
18. L. Sakhno O. Sakhno, E. Kharlamova Calculation and Measurement of the Magnetic Flux in the Magnetic Core of Welding Transformers International Journal of Applied Engineering Research (IJAER), 2016, vol.11, No.22, pp. 11055-11059
19. P. Zhihua et al., "Three-dimensional Leakage Magnetic Field Simulation and Short-circuit Impedance Calculation of Large Yoke Transformer," 2021 International Conference on Intelligent Computing, Automation and Systems (ICICAS), Chongqing, China, 2021, pp. 479-482, doi: 10.1109/ICICAS53977.2021.00105.
20. Сахно Л.И., Парамонов Е.Д., Сахно О.И., Кочеткова Е.Ю., Миневич Т.Г. Выбор аналитического метода расчета индуктивности рассеяния при оптимизации конструкции высоковольтного испытательного трансформатора. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2024;26(6):81-93. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-6-81-93>
21. Усачев А.Е. Испытательные и электрофизические установки высокого напряжения: получение высоких напряжений: учеб. пособие / А.Е. Усачев. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2014. – 103 с.

Авторы публикации

Коровкин Николай Владимирович – д-р техн. наук, профессор Высшей школы высоковольтной энергетики Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия, nikolay.korovkin@gmail.com.

Сахно Людмила Ивановна – д-р техн. наук, профессор Высшей школы высоковольтной энергетики Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия, lsahno2010@yandex.ru.

Парамонов Евгений Дмитриевич – инженер-конструктор ООО «Марс-энерго СК», г. Санкт-Петербург, Россия, paramon.j.e.k@gmail.com.

Сахно Ольга Ивановна – канд.техн.наук, доцент кафедры «Высшая математика» Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия, olga.sakhnoj@yandex.ru.

References

1. Korovkin N.V., Markov M.A. Optimizaciya parametrov turbogenerators tvv-360 po vektornomu kriteriyu. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika*. 2020. № 4. S. 49-54.
2. Korovkin N.V., Gulaj S.L., Verhovcev D.A. Optimizaciya parametrov gidrogenerators. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika*. 2019. № 4. S. 42-50
3. Kovbasa V.D., Korovkin N.V. Minimizaciya otklonenij napryazhenij uzlov i poter' v energosisteme na osnove mnogokriterial'noj optimizacii. *Izv. NTC Edinoj energeticheskoj sistemy*. 2023. № 2 (89). S. 31-38.

4. Ahmed M.K., Osman M.H., Korovkin N.V. Multiobjective optimization of power flow distribution in eps with res under minimum number of transformer's on-load tap changing. *Elektrichestvo*. 2022. № 5. С. 10-20
5. Belyaev N.A., Gur'eva A.Yu., Korovkin N.V., Olejnik N.A. Formirovanie racional'noj perspektivnoj struktury EES Rossii na osnove mul'tikriterial'noj optimizacii. *Izv. NTC Edinoj energeticheskoy sistemy*. 2024. № 1 (90). С. 5-19.]
6. M. H. Hashemi, U. Kiliç and S. Dikmen, "Applications of Novel Heuristic Algorithms in Design Optimization of Energy-Efficient Distribution Transformer," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 15968-15980, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3245327.
7. O. Olowu, H. Jafari, M. Moghaddami and A. I. Sarwat, "Multiphysics and Multiobjective Design Optimization of High-Frequency Transformers for Solid-State Transformer Applications," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57, no. 1, pp. 1014-1023, Jan.-Feb. 2021, doi: 10.1109/TIA.2020.3035129.
8. K. Zhang, W. Chen, X. Cao, Z. Song, G. Qiao and L. Sun, "Optimization Design of High-Power High-Frequency Transformer Based on Multi-Objective Genetic Algorithm," *2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*, Shenzhen, China, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/PEAC.2018.8590371
9. S. Mohammed and R. A. Vural, "NSGA-II+FEM Based Loss Optimization of Three-Phase Transformer," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 9, pp. 7417-7425, Sept. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2881935.
10. K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," in *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, April 2002, doi: 10.1109/4235.996017
11. Ding, C. Yang and B. Xiong, "Multi-Objective Optimal Design of Traction Transformer Using Improved NSGA-II," *2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Gyeongju, Korea, Republic of, 2021, pp. 1470-1474, doi: 10.23919/ICEMS52562.2021.9634516.
12. Tihomirov P. M. Raschet transformatorov. Uchebnoe posobie dlya vuzov. M: Energiya. 1974, 544 s.
13. G.N. Petrov. Elektricheskie mashiny. Chast' pervaya. Vvedenie. Transformatory. M: Energiya. 1974, 240 s.
14. Kalinin E.V. Modelirovanie poter' v shihtovannyh serdechnikah silovyh transformatorov//*Intellektual'naya elektrotehnika*.-2020.-№1(9).-S.52-68.
15. Wang K. et al. Fast Calculation Method of Magnetic field in Transformer Core Based on Magnetic Circuit Modeling //*Annual Conference of China Electrotechnical Society*. – Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. – С. 604-616.
16. L. Lu, Y. Che, X. Wu, G. Li, Z. Yang and L. Zhu, "Magnetic Field Calculation of Distribution Transformer with Finite Element Method," *2021 IEEE International Conference on Emergency Science and Information Technology (ICESIT)*, Chongqing, China, 2021, pp. 585-588, doi: 10.1109/ICESIT53460.2021.9696770.
17. Sakhno L. I. et al. Transformer under load condition: comparison of FEA and equivalent circuit analysis //Тезисы доклада на XXV международном симпозиуме « Электромагнитные явления в нелинейных цепях » 2018. – Т. 26. – С. 18-28.
18. L. Sakhno O. Sakhno, E. Kharlamova Calculation and Measurement of the Magnetic Flux in the Magnetic Core of Welding Transformers *International Journal of Applied Engineering Research (IJAER)*, 2016, vol.11, No.22, pp. 11055-11059
19. P. Zhihua et al., "Three-dimensional Leakage Magnetic Field Simulation and Short-circuit Impedance Calculation of Large Yoke Transformer," *2021 International Conference on Intelligent Computing, Automation and Systems (ICICAS)*, Chongqing, China, 2021, pp. 479-482, doi: 10.1109/ICICAS53977.2021.00105.
20. Sahno L.I., Paramonov E.D., Sahno O.I., Kochetkova E.Yu., Minevich T.G. Vybor analiticheskogo metoda rascheta induktivnosti rasseyaniya pri optimizacii konstrukcii vysokovol'nogo ispytatel'nogo transformatora. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2024;26(6):81-93. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-6-81-93>
21. Usachev A.E. Ispytatel'nye i elektrofizicheskie ustanovki vysokogo napryazheniya: poluchenie vysokih napryazhenij: ucheb. posobie / A.E. Usachev. – Kazan': Kazan. gos. energ. un-t, 2014. – 103 s.

Authors of the publication

Nikolay V. Korovkin - Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University St. Petersburg, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-1173-8727>, nikolay.korovkin@gmail.com.

© Коровкин Н.В., Сахно Л.И., Парамонов Е.Д., Сахно О.И.

Liudmila I. Sakhno - Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University St. Petersburg, Russia,
ORCID:<http://orcid.org/0000-0002-7204-5449>, lsakhno2010@yandex.ru.

Evgenii D. Paramonov- design engineer, LLS “Mars-energo SK”, Russia, paramon.j.e.k@gmail.com.

Olga I. Sakhno- Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University St. Petersburg, Russia,
ORCID:<http://orcid.org/0000-0002-8879-986x>, olga.sakhnoj@yandex.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Получено 28.02.2025 г.

Отредактировано 20.03.2025 г.

Принято 24.04.2025 г.