

УДК 621.321

Разработка подсистемы оптимизации САПР распределительных трансформаторов

А.И. Тихонов, А.С. Зайцев, А.В. Стулов, И.А. Трофимович
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: ait@dsn.ru, as_zaitsev@mail.ru, alxstl@mail.ru, i.trofimovich@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Развитие технологии производства распределительных трансформаторов, ужесточение требований к энергоэффективности и постоянный рост конкуренции на рынке трансформаторостроения обусловили необходимость разработки быстродействующей подсистемы оптимизации САПР, которая могла бы взаимодействовать с современными математическими моделями и позволяла бы в максимально короткие сроки разрабатывать распределительные трансформаторы с минимальной себестоимостью.

Материалы и методы: Использованы системы программирования Visual Basic for Excel, MATLAB, а также результаты испытаний физических образцов в лаборатории ЗАО «Трансформер» (г. Подольск, Московская область).

Результаты: Проведен анализ математической функции (целевой функции), описывающей модель распределительного трансформатора. Выбран алгоритм минимизации целевой функции. Разработана быстродействующая подсистема оптимизации, удовлетворяющая требованиям производства. Подсистема оптимизации интегрирована в САПР распределительных трансформаторов.

Выводы: Разработанная подсистема оптимизации, опирающаяся на современные математические модели САПР распределительных трансформаторов, адаптирована и апробирована на производимых ЗАО «Трансформер» распределительных трансформаторах ТМГ и ТСЛ 25-2500 кВА, в результате чего удалось существенно сократить сроки проектирования распределительных трансформаторов и снизить их себестоимость.

Ключевые слова: оптимизация целевой функции трансформатора, глобальный экстремум, дискретность аргументов функции, овражность функции, генетический алгоритм, алгоритм Нелдера-Мида, симплекс-метод.

Development of a CAD optimization subsystem of distribution transformers

A.I. Tikhonov, A.S. Zaytsev, A.V. Stulov, I.A. Trofimovich
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: ait@dsn.ru, as_zaitsev@mail.ru, alxstl@mail.ru, i.trofimovich@mail.ru

Abstract

Background: The development of distribution transformer production technology, the toughening energy efficiency requirements and the constantly growing competition on the transformer production market have made it urgent to develop a quick response CAD optimization subsystem that could work with modern mathematical models and could be used to develop distribution transformers in the shortest possible time and at the lowest possible cost.

Materials and methods: The programming systems Visual Basic for Excel, MATLAB and the results of physical sample tests obtained in the test laboratory of ZAO «Transformer», Podolsk, Moscow region.

Results: We have analyzed the mathematical function (objective function), which describes the distribution transformer model and chosen an algorithm of objective function minimization. We have also developed a quick response optimization subsystem that satisfies the production requirements. The optimization subsystem was integrated into the distribution transformer CAD.

Conclusions: The developed optimization subsystem based on modern mathematical models of distribution transformer CAD has been adjusted to and tested on 25–2500 kVa oil sealed and cast coil dry-type transformers produced by ZAO «Transformer», which allowed us to considerably reduce the transformer design time and production costs.

Key words: optimization of transformer objective function, global extremum, discrete function arguments, ravine function, genetic algorithm, Nelder-Mead algorithm, simplex method.

Постоянный рост конкуренции на рынке и провозглашение энергоэффективности и энергосбережения приоритетным направлением технологического развития российской энергетики заставляют производителей распределительных трансформаторов совершенствовать цикл выпуска современной качественной и конкурентоспособной продукции. Для этого необходимо, в частности, гарантировать высокое качество продукции и максимально сокращать

сроки проектирования новых трансформаторов, минимизируя их себестоимость.

Развитие технологии производства распределительных трансформаторов потребовало совершенствования существующих и разработки новых математических моделей. Так, в частности, были разработаны модели для уточненного теплового расчета трансформатора и расчета потерь короткого замыкания, что позволило добиться желаемой точности

тепловых расчетов трансформаторов сухого и масляного герметичного исполнения, учесть эффект вытеснения тока в обмотках из ленты при расчете потерь короткого замыкания [1, 2].

В сложившихся условиях важной задачей является разработка САПР трансформаторов, позволяющей оптимизировать решение с использованием уточненных математических моделей, минимизируя себестоимость проектируемого устройства при минимальных сроках на разработку конструкторской и технологической документации.

К подсистеме оптимизации предъявляются следующие требования:

- взаимодействие с разработанными уточненными математическими моделями;
- учет технологических требований и ограничений производства;
- выполнение требований ГОСТ Р 52719-2007 по предельным отклонениям параметров трансформаторов от нормированных значений;
- учет рекомендаций к качеству продукции на этапе проектирования;
- минимально возможная себестоимость проекта;
- минимальное время выполнения оптимизационных расчетов;
- подсистема должна быть универсальной и способной рассчитывать сухие и масляные трансформаторы класса напряжения до 35 кВ различного исполнения с различными схемами и группами соединения обмоток.

Интерфейс подсистемы оптимизации и среда интерактивного проектирования САПР выполнены в MS Excel. Математический аппарат подсистемы оптимизации реализован в пакете MATLAB. Для взаимодействия пакета MATLAB с MS EXCEL, статистическими и табличными данными, различными подсистемами САПР и пр. задействуется канал связи Excel-link и возможности Visual Basic for Excel.

Решение задачи минимизации себестоимости трансформатора на начальном этапе сводится к математическому описанию объекта (формулировке целевой функции) и осложняется рядом факторов, а именно:

1. Целевая функция трансформатора является многоэкстремальной.
2. Целевая функция трансформатора имеет выраженную овражность по некоторым входным параметрам.
3. Целевая функция трансформатора имеет разрывы из-за дискретности входных данных.

Проблема решения многоэкстремальных задач хорошо изучена и освещена в литературе [3, 5–7]. Универсального метода оптимизации, способного однозначно определять глобальный экстремум таких функций, не существует. Достаточной точности можно достичь

лишь разработкой специализированного под конкретную задачу алгоритма.

Решение задач с дискретностью входных данных (аргументов) функции описано в [3, 4]. В большинстве случаев предлагается приведение дискретных функций к непрерывному виду, однако это не всегда возможно и ведет к искажению результатов и необходимости последующей обработки результатов оптимизационных расчетов.

Одной из наиболее сложных является проблема овражности функции [4]. Оптимизация такого объекта, как трансформатор, сводится к работе именно в условиях овражности исследуемой функции.

Специализированные методы позволяют работать с функциями, решая лишь одну из описанных задач (многоэкстремальность, овражность или дискретность).

Для решения всех поставленных задач предлагается использовать эволюционные алгоритмы [5], коэволюционные алгоритмы [6] и генетические алгоритмы (ГА) [7]. Исследование возможностей данных методов показало хорошие результаты [8], но также были выявлены и недостатки, которые привели к созданию комбинированного алгоритма оптимизации на основе ГА и метода деформируемого многогранника (метода Нелдера-Мида (симплекс-метода)) [8].

Генетические алгоритмы основаны на принципах естественного отбора в живой природе, в них используется эволюционный принцип выживания наиболее приспособленных особей. При описании ГА используются определения, заимствованные из генетики, и основные понятия линейной алгебры.

Аргументы целевой функции называются генами, а весь вектор аргументов – генотипом. Генотип несет в себе наследственную информацию. Значение функции называется фенотипом и может быть как скалярной, так и векторной величиной. Для применения принципов наследственности и изменчивости используются генетические операторы, имитирующие скрещивание, мутации, борьбу за жизнь и др.

Исследования показали [8], что даже при работе с функциями двух переменных при имитации многоэкстремальности, дискретности и овражности требуется создание специфической, адаптированной под конкретную задачу модели ГА (настройка ГА) либо создание самонастраивающихся ГА.

Другим вариантом является объединение достоинств ГА с традиционными методами оптимизации (симплекс-метод, метод градиентного спуска и т.д.).

Ранее [8] были представлены различные варианты ГА, такие как:

1. *Модифицированный генетический алгоритм* (ГАМ). Модификации подверглись такие генетические операторы, как скрещивание, отбор особей в следующее поколение,

стратегия выбора родительских пар. Данные действия можно отнести к процессу настройки алгоритма под конкретную задачу.

2. *Модифицированный ГА с обучением лучшей особи методом Нелдера–Мида* (ГАНМ). Метод Нелдера–Мида (симплекс – метод) является одним из лучших методов при работе с овражными функциями, но он непригоден в многоэкстремальных задачах [3, 4]. Объединение достоинств данного метода с возможностями ГА позволяет решить проблему овражности и многоэкстремальности исследуемых функций.

3. *Параллельный генетический алгоритм* (ПГА). В данном алгоритме заложено несколько параллельно развивающихся эволюционных моделей, что является оптимизацией стратегии минимизации функции. Это избавляет от необходимости настраивать ГА под конкретную задачу и делает его более универсальным. В основе ПГА лежит островная модель ГА с несколькими отдельно развивающимися подпопуляциями.

Тестирование проводилось на следующих функциях:

- трехмерная парабола;
- функция Розенброка (Rosenbrock);

– функция Химмельблау (Himmelblau).

Подробнее о результатах работы алгоритмов рассказано в [8]. Лучшие результаты показали ГАНМ и ПГА. ГАНМ не смог определить минимум функции Химмельблау. ГАНМ выигрывает в скорости работы и в качестве поиска экстремума (особенно при работе с овражными функциями). Повторяемость результатов работы алгоритма в среднем по 20 запускам составила 99,97 %, а разброс значения целевой функции не превысил 0,1 %.

Более универсальным методом поиска экстремума оказался ПГА. Он справился со всеми тестовыми функциями, но показал меньшую скорость работы по сравнению с ГАНМ и ГАМ. Повторяемость результатов работы алгоритма в среднем по 20 запускам составила 99,95 %, а разброс значения целевой функции не превысил 0,15 %.

Следующим шагом стала разработка комбинированного алгоритма оптимизации, в котором сочетались бы достоинства ПГА и ГАНМ. В итоге, была разработана модель параллельного ГА, в одной из подпопуляций которого лучшая особь обучалась алгоритмом Нелдера–Мида. Структура комбинированного алгоритма оптимизации представлена на рис. 1.

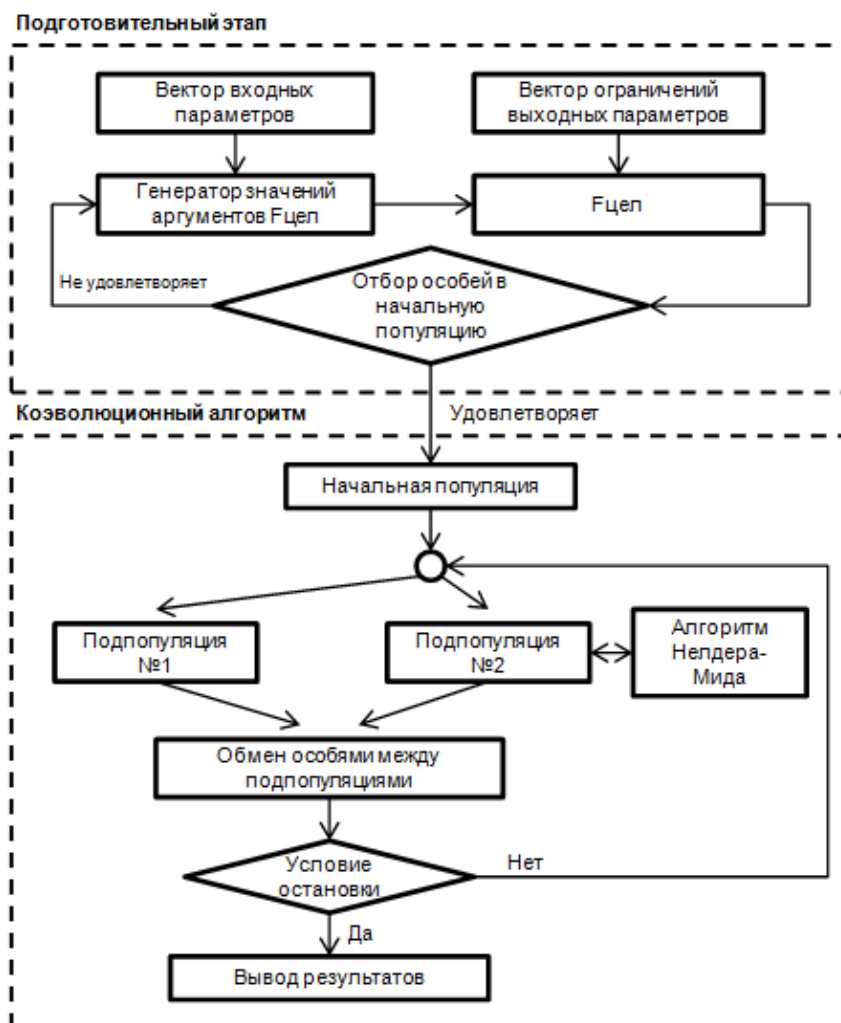


Рис. 1. Структура комбинированного алгоритма

Для тестирования полученной модели был выбран распределительный трансформатор, целевая функция которого имеет на входе двенадцать аргументов: индукция в стержне магнитопровода B_c ; диаметр стержня магнитопровода d ; высота обмотки L ; плотность тока в обмотке высокого напряжения J_H ; плотность тока в обмотке низкого напряжения J_L ; ширина главного канала a_{12} ; высота гофростенки по длинной стороне гофробака L_{gb} ; высота гофростенки по короткой стороне гофробака L_{gm} ; число витков/слоев обмотки низкого напряжения w_2 ; число слоев/галет обмотки высокого напряжения N_{slH} ; количество каналов обмотки низкого напряжения N_{canL} ; количество каналов обмотки высокого напряжения N_{canH} .

Важной частью правильной работы оптимизационных алгоритмов является формирование области допустимых значений исходя из параметрических и критериальных ограничений. Функция ограничений, описывающая область допустимых значений, так же является нелинейной (как и целевая функция).

Нелинейность целевой функции и функции ограничений приводит к необходимости организации этапа отбора особей в начальную популяцию (особь должна принадлежать области допустимых значений). Принцип отбора особей в начальную популяцию на подготовительном этапе описан в [8].

В ходе решения задачи и разработки модели были выявлены некоторые особенности и сделаны следующие выводы:

1. Для формирования симплекса n -мерного пространства деформируемый многогранник должен иметь $(n+1)$ вершину, где n – размерность функции (количество аргументов) [3, 4]. Опытным путем было установлено, что количество вершин многогранника (K) не значительно влияет на качество обработки функции, но существенно усложняет алгоритм и увеличивает время его выполнения. В нашем случае количество вершин (узлов) симплекс-элемента $K = 3$.

2. Метода Нелдера-Мида при $n > 6$ является неэффективным [4]. В нашем случае решалась двенадцатимерная задача и комбинирование ПГА с алгоритмом Нелдера-Мида дало положительный результат, что говорит о целесообразности его применения в таких задачах.

3. Алгоритм Нелдера-Мида, в отличие от ГА, не задействует генератор случайных чисел, который позволяет генерировать значения аргументов внутри области допустимых значений, поэтому необходимо осуществлять контроль получаемых с помощью симплекс-метода значений аргументов на предмет их нахождения в области допустимых значений.

4. Если количество особей в популяции ГА исчисляется сотнями, а число поколений десятками, то количество преобразований симплекс-элемента не превышает 10. Даль-

нейшее увеличение количества преобразований не дает существенного эффекта.

5. Если обучаемая симплекс-методом особь принадлежит локальному минимуму функции, то при завершении работы алгоритма получим окончательное значение лишь для данного минимума.

6. ГА позволяет проанализировать область поиска экстремума функции, выявить аргументы, ведущие к овражности и многоэкстремальности функции, и сузить область поиска для алгоритма Нелдера-Мида, уменьшив, таким образом, размерность функции. Это ускоряет процесс оптимизации и повышает эффективность решения задачи. Таким образом, ГА выступает в роли инструмента для анализа пространства решений задачи.

На рис. 2, 3 показано, что применение комбинированного алгоритма позволяет выйти на оптимальное значение целевой функции на 65 % быстрее.

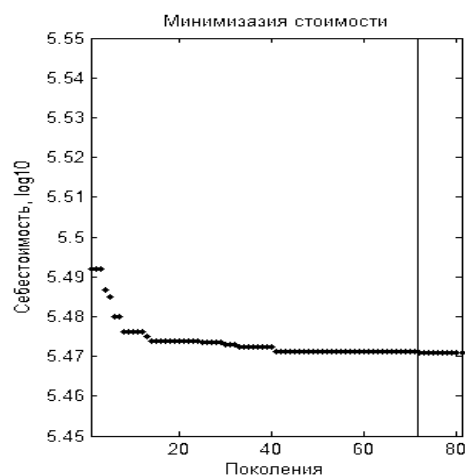


Рис. 2. Процесс минимизации целевой функции распределительного трансформатора ПГА

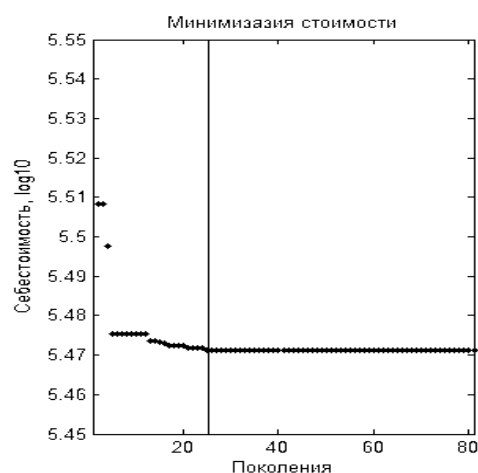


Рис. 3. Процесс минимизации целевой функции распределительного трансформатора комбинированным алгоритмом

Следует иметь ввиду, что выигрыш в 65 % не является постоянным вследствие особенностей работы ГА, однако это позволяет

сделать выводы об эффективности применения комбинированного метода при решении сложных оптимизационных задач.

Разработанная подсистема оптимизации интегрирована в единую САПР распределительных трансформаторов, разрабатываемую на ЗАО «Трансформер». Результаты работы подсистемы оптимизации сравнивались с результатами натурных исследований физических образцов и приемо-сдаточных испытаний трансформаторов в испытательной лаборатории ЗАО «Трансформер».

По результатам работы сделаны выводы о возможности удешевления активной части трансформаторов. В настоящее время в производство запущена опытная партия распределительных трансформаторов ТМГ 25 кВА 10 кВ со сниженной на 10 % себестоимостью. Проект трансформатора получен при помощи рассмотренной выше подсистемы оптимизации.

Список литературы

1. Стулов А.В., Корнев И.А., Тихонов А.И. Параметрическая генерация и расчет электрической схемы замещения тепловых процессов в обмотках из ленты сухих трансформаторов и токоограничивающих реакторов в стационарных режимах // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 6. – С. 47–51.
2. Иванов А.В. Разработка моделей и методики проектирования токоограничивающих реакторов из ленты: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.12, 05.13.18: защищ. 31.05.2011. – Иваново, 2011. – 123 с.
3. Пантелеев А.В. Методы оптимизации в примерах и задачах. – М.: Высш. шк., 2002.
4. Ларичев О.И. Методы поиска локального экстремума овражных функций. – М.: Наука, 1989.
5. Каширина И.Л. Введение в эволюционное моделирование. – Воронеж, 2007.
6. Жукова М.Н. Козволюционный алгоритм решения сложных задач оптимизации. – Красноярск: СибГАУ, 2004.

Тихонов Андрей Ильич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой физики,
e-mail: ait@dsn.ru

Зайцев Алексей Сергеевич,

ЗАО «Трансформер»,
ведущий конструктор,
e-mail: as_zaitsev@mail.ru,

Стулов Алексей Вадимович,

ЗАО «Трансформер»,
зам. директора по производству трансформаторов,
e-mail: alxstl@mail.ru

Трофимович Иван Анатольевич,

ЗАО «Трансформер»,
главный конструктор,
e-mail: i.trofimovich@mail.ru

7. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы. – Астрахань: Астраханский университет, 2007.

8. Зайцев А.С., Тихонов А.И. Генетический алгоритм, как метод поиска экстремума функций различной сложности (Энергия-2013): материалы Междунар. науч.-техн. конф. / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2013.

References

1. Stulov, A.V., Kornev, I.A., Tikhonov, A.I. Parametricheskaya generatsiya i raschet elektricheskoy skhemy zameshcheniya teplovykh protsessov v obmotkakh iz lenty sukhikh transformatorov i tokoogranichivayushchikh reaktorov v statsionarnykh rezhimakh [Parametric Generation and Calculation of Electrical Equivalent Circuit of Heat Transfer Processes in Tape Windings of Dry-Type Transformers and Current-Limiting Reactors in Steady-State Conditions]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 6, pp. 47–51.
2. Ivanov, A.V. *Razrabotka modeley i metodiki proektirovaniya tokoogranichivayushchikh reaktorov iz lenty*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of models and design methods of current limiting tape winding reactors. Cand. tech. sci. diss.]. Ivanovo, 2011. 123 p.
3. Panteleev, A.V. *Metody optimizatsii v primerakh i zadachakh* [Optimization methods in examples and problems]. Moscow, Vysshaya shkola, 2002.
4. Larichev, O.I. *Metody poiska lokal'nogo ekstremuma ovrazhnykh funktsiy* [Methods of finding the local extremum of ravine functions]. Moscow, Nauka, 1989.
5. Kashirina, I.L. *Vvedenie v evolyutsionnoye modelirovaniye* [Introduction to evolutionary modeling]. Voronezh, 2007.
6. Zhukova, M.N. *Koevolyutsionnyy algoritm resheniya slozhnykh zadach optimizatsii* [Coevolutionary algorithm of solving complex optimization problems]. Krasnoyarsk: SibGAU, 2004.
7. Panchenko, T.V. *Geneticheskie algoritmy* [Genetic algorithms]. Astrakhanskiy universitet, 2007.
8. Zaytsev, A.S., Tikhonov, A.I. *Geneticheskiy algoritm, kak metod poiska ekstremuma funktsiy razlichnoy slozhnosti* (Energiya-2013) [Genetic algorithms as a method of finding the extremum of functions of varying complexity (Energy 2013)]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Proceedings of the International Conference on Science and Technology]. Ivanovo, 2013.