

Особенности реализации системы проектирования трансформаторов с магнитопроводом из аморфной стали

И.В. Еремин, А.И. Тихонов, Г.В. Попов
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: ait@dsn.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Популярность распределительных трансформаторов с магнитопроводом из аморфной стали в настоящее время растет, так как они имеют пониженные потери холостого хода. Поэтому актуальной является задача создания системы проектирования таких трансформаторов, позволяющей находить оптимальные решения с использованием современных средств численной математики.

Материалы и методы: В качестве программных компонентов системы проектирования трансформаторов использованы табличный процессор MS Excel и математический пакет MatLab. Система проектирования реализована на основе теории проектирования трансформаторов и методов нелинейного программирования.

Результаты: Создана система проектирования трансформаторов с магнитопроводом из аморфной стали, в основу которой положена непрерывная расчетная модель трансформатора.

Выводы: Разработанная система проектирования может быть использована в учебном процессе и в производстве для решения задач оптимизации силовых трансформаторов с магнитопроводом из аморфной стали.

Ключевые слова: САПР, распределительный трансформатор, аморфная сталь, трансформатор из аморфной стали, потери холостого хода, оптимизация, градиентные методы оптимизации.

Implementation of an amorphous steel transformer design system

I.V. Eremin, A.I. Tikhonov, G.V. Popov
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: ait@dsn.ru

Abstract

Background: Amorphous steel distribution transformers are gaining popularity now as they have low no-load losses. Therefore, an urgent task is to develop a system of transformer design that enables finding the optimal solutions by using modern numerical mathematics tools.

Materials and methods: MS Excel spreadsheet and math package MatLab were used as software components of the transformer design system that was realized on the basis of the theory of transformer design and nonlinear programming methods.

Results: A system for designing amorphous steel transformers has been developed based on the continuous computational model of the transformer.

Conclusions: The developed system can be used in the educational process and production to solve problems of optimization of amorphous steel transformers.

Key words: CAD, distribution transformer, amorphous steel, amorphous steel transformer, no-load losses, optimization, gradient optimization techniques.

Распределительные трансформаторы мощностью 25–630 кВА напряжением 6–10 кВ – наиболее массовая серия производимых и эксплуатируемых трансформаторов в нашей стране и за рубежом. Общее количество распределительных трансформаторов в России составляет более 3 млн штук.

Ежегодное потребление электроэнергии в России находится на уровне 1000 млрд кВт·ч, при этом общие потери электроэнергии в распределительных трансформаторах оцениваются в 75 млрд кВт·ч, примерно 50 % – это потери холостого хода (в магнитопроводах).

Затраты на возмещение потерь холостого хода оцениваются в 260 руб/кВт в год. Таким образом, общая сумма затрат на возмещение только потерь холостого хода в денежном выражении может составить 975 млрд руб. в год [1]. Поэтому, учитывая, что в соответствии с

государственной политикой России в области науки, технологий и техники¹ энерго- и ресурсосбережение признаны приоритетными направлениями развития промышленности, можно утверждать, что проблема снижения потерь холостого хода распределительных трансформаторов является актуальной.

Общемировой тенденцией является использование при производстве распределительных трансформаторов аморфной стали, что позволяет снизить потери холостого хода трансформатора в среднем в 4 раза. Все это показывает, какой ресурс энергосбережения появляется при массовой замене традиционных распре-

¹ Приоритетные направления развития науки, технологий и техники в Российской Федерации. Утв. Президентом РФ 21.05.2006 № Пр-843; Перечень критических технологий Российской Федерации. Утв. Президентом РФ 21.05.2006 № Пр-843.

делительных трансформаторов на трансформаторы с магнитопроводами из аморфной стали (ТМАС). Тем более что ресурс распределительных трансформаторов, эксплуатируемых в настоящее время в РФ, исчерпан более чем на 60 %. Особенно явно преимущества аморфной стали проявляются в трансформаторах первого и второго габаритов [2].

В связи с актуальностью проблемы массового производства ТМАС повышаются требования к уровню проектирования данных устройств. В частности, особые требования предъявляются к выбору наиболее оптимальных технических решений. Без автоматизации этого процесса решить проблему нереально.

Следует отметить существование двух подходов к созданию систем проектирования трансформаторов. Традиционный подход предполагает четкое деление стадии технического проекта на два этапа, отличающихся не только функционально, но и по технологии взаимодействия человека с компьютером:

1) *этап проектного расчета*, в ходе которого определяется конструкция трансформатора. На данном этапе работа ведется обычно в интерактивном режиме, так как основные проектные решения принимаются непосредственно проектировщиком;

2) *этап поверочного расчета*, в ходе которого рассчитываются характеристики спроектированного устройства. Данный этап обычно реализуется в пакетном режиме без непосредственного участия проектировщика.

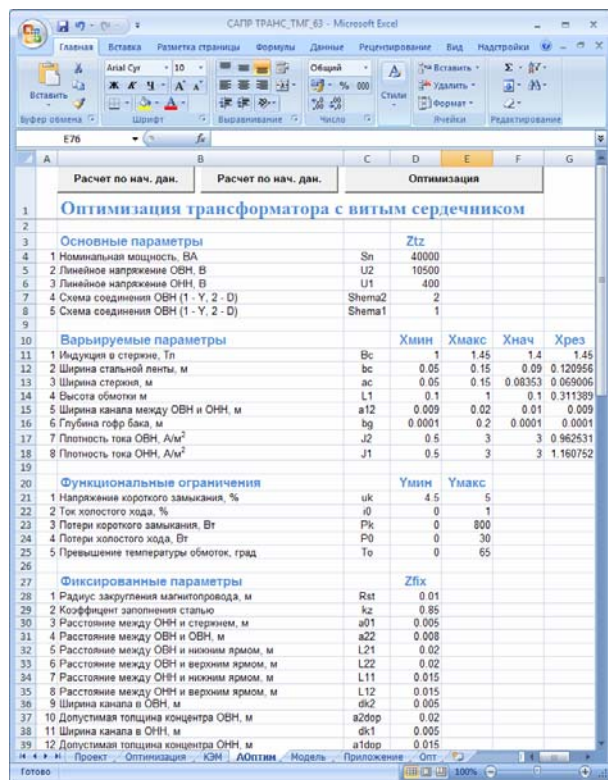


Рис. 1. Внешний вид системы проектирования ТМАС в среде MSExcel

При таком подходе расчетная система выступает в роли инструмента, избавляющего проектировщика от рутины, облегчая процесс принятия решений. Поиск оптимального варианта проекта при этом осуществляется путем циклического приближения к желаемому результату за счет опыта проектировщика. Несмотря на архаичность данного подхода, до сих пор на многих предприятиях России проектирование трансформаторов осуществляется именно таким путем.

Более прогрессивным считается другой подход, основанный на оптимизации трансформатора с использованием современных методов поиска решения. При таком подходе проектный расчет осуществляется в пакетном режиме без участия проектировщика. Процесс принятия проектных решений автоматизирован. Поиск оптимального решения осуществляется также без участия проектировщика. Как правило, найденное решение уточняется в ходе последующего детального расчета с привлечением опыта проектировщика.

Система проектирования ТМАС первого и второго габаритов класса напряжений до 35 кВ была реализована на базе табличного процессора MSExcel (рис. 1) в рамках оптимизационного подхода к созданию САПР.

Расчет начинается с формирования технического задания на проектирование, которое формируется в интерактивном режиме и содержит несколько разделов:

1. *Основные параметры*, включающие в себя номинальную мощность трансформатора, а также номинальные напряжения и схемы соединения обмоток.

2. *Фиксированные параметры*, включающие в себя величины, характеризующие конструкцию трансформатора, выбираемые из справочника или задаваемые по опыту проектировщика. Значения этих величин в ходе расчета не изменяются. К таким параметрам в первую очередь относятся изоляционные расстояния, марки материалов и их характеристики, конструкционные коэффициенты, неизменяемые элементы металлоконструкций и т.п. Здесь же задаются некоторые специфические величины, такие как оптимальная пропорция сечения обмоточного провода, допустимая толщина концентраторов обмоток и т.п.

3. *Варируемые параметры*, к которым относятся восемь величин, являющихся аргументами функции цели процесса оптимизации трансформатора, а именно: индукция в стержне; ширина ленты аморфной стали; ширина стержня; высота обмотки; ширина канала между обмоткой высшего напряжения (ОВН) и обмоткой низшего напряжения (ОНН); глубина гофра на стенках гофробака; плотность тока ОВН и плотность тока ОНН.

4. *Функциональные ограничения*, к которым относятся пять величин, значения которых должны входить в заданный коридор значений

$Y_{\min} \leq Y \leq Y_{\max}$, а именно: напряжение короткого замыкания; ток холостого хода; потери короткого замыкания; потери холостого хода; допустимое превышение температуры обмоток.

Для варьируемых параметров также задается коридор изменений, т. е. параметрические ограничения вида $X_{\min} \leq X \leq X_{\max}$. Кроме того, для них должны быть заданы начальные значения $X_{\text{нач}}$. Вектор начальных значений используется в качестве стартовой точки оптимизации. Начальные значения можно задавать произвольным образом, однако для большего успеха в качестве координат стартовой точки оптимизации желательно выбрать величины, характеризующие наиболее близкий аналог (если такой имеется), или воспользоваться накопленным опытом проектирования.

Традиционно задача оптимизации проектируемого устройства решается с использованием методов нелинейного программирования, таких как метод покоординатного спуска, градиентный метод, методы переменной метрики и др. Для того чтобы воспользоваться накопленным мировым опытом в области методов нелинейного программирования, было решено задействовать математический пакет MatLab, связанный с пакетом MSeExcel посредством интерфейса ExLink. При этом в распоряжении разработчика САПР оказывается библиотека оптимизации MatLab Optimisation Toolbox, в частности функция минимизации нелинейной функции цели с заданными параметрическими и функциональными ограничениями `fmincon`, решающая задачу оптимизации методом переменной метрики [3]. При этом процесс оптимизации обладает квадратичной сходимостью и находит оптимальное решение даже при наличии ярко выраженной оврагообразной топологии функции цели.

Метод переменной метрики обеспечивает поиск только локальных экстремумов. Проверку на глобальный экстремум нужно осуществлять особо. Для этого метод поиска локального экстремума комбинируется со случайным поиском стартовой точки. Блок-схема оптимизационного процесса представлена на рис. 2. Поиск реализован в двух вложенных циклах. Внутренний цикл осуществляет поиск локального экстремума из выбранной стартовой точки. Выбор стартовой точки осуществляется во внешнем цикле. Максимальное количество шагов случайного поиска стартовой точки $N_{\text{сп. max}}$ задается в техническом задании на оптимизацию. Обычно 10–30 шагов достаточно для уверенного нахождения глобального экстремума.

Главной проблемой, возникающей при оптимизации трансформаторов, является проблема дискретности целевой функции, что накладывает ограничения на использование градиентных методов. Для устранения данной проблемы необходимо было разрабатывать особую модель, из которой устраняется дискретность. Непрерывность такой модели дела-

ет ее более грубой по сравнению с традиционно используемой при проектировании трансформаторов дискретной инженерной моделью, так как в ней не учитываются факторы, приводящие к дискретности, в частности: дискретно заданный сортамент проводов; дискретность числа витков, слоев, охлаждающих каналов обмоток трансформатора; дискретность толщины ленты аморфной стали, а следовательно, ширины сердечника магнитопровода и т.п.

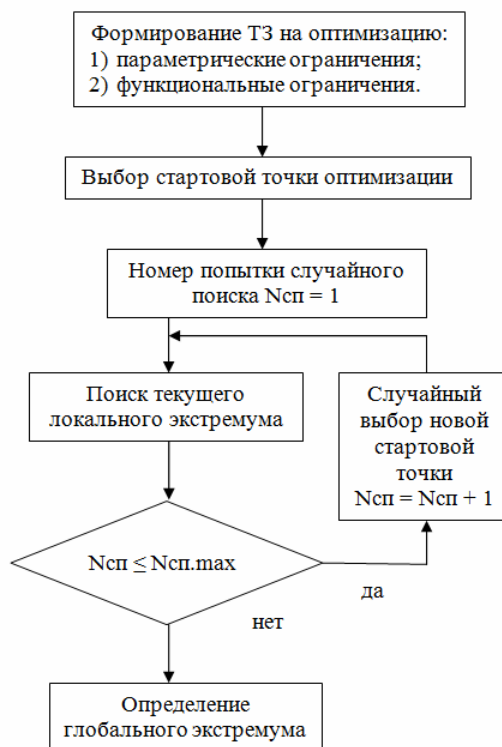


Рис. 2. Блок-схема процесса оптимизации трансформатора

Рассмотрим вариант расчетной модели ТМАС, использованной при его оптимизации.

Главное отличие непрерывной модели ТМАС от подсистемы поверочного расчета состоит в том, что в ней присутствуют некоторые элементы подсистемы проектного расчета, приведенные к требованию непрерывности модели. В частности, перед вызовом подсистемы поверочного расчета осуществляется расчет следующих величин:

- активное сечение стержня

$$S_c = b_c a_c k_z, \quad (1)$$

где b_c – ширина ленты аморфной стали; a_c – ширина стержня; k_z – коэффициент заполнения стальной;

- магнитный поток

$$\Phi = B_c S_c, \quad (2)$$

где B_c – индукция в стержне;

- высота стержня

$$L_c = L + 2L_0, \quad (3)$$

где L – высота обмотки; L_0 – расстояние от обмотки до ярма;

- сечения витков ОНН и ОВН:

$$s_{p1} = \frac{I_1}{J_1}, \quad s_{p2} = \frac{I_2}{J_2}, \quad (4)$$

где I_1, I_2 – фазные токи ОНН и ОВН соответственно; J_1, J_2 – плотности тока ОВН и ОНН соответственно;

- размеры проводника ОНН и диаметр проводника ОВН:

$$b_{p1} = \sqrt{\frac{s_{p1}}{k_{s1} \cdot k_{pp}}}, \quad a_{p1} = b_{p1} \cdot k_{pp}, \quad d_{p2} = \sqrt{\frac{4s_{p2}}{\pi k_{s2}}}, \quad (5)$$

где k_{s1}, k_{s2} – коэффициент уменьшения площади сечения проводников; k_{pp} – коэффициент, определяющий пропорции прямоугольного проводника;

- размеры изолированных проводников:

$$a_{p1iz} = a_{p1} + \delta_{izp1}, \quad b_{p1iz} = b_{p1} + \delta_{izp1}, \quad (6)$$

$$d_{p2iz} = d_{p2} + \delta_{izp2},$$

где $\delta_{izp1}, \delta_{izp2}$ – двусторонняя толщина изоляции проводников;

- коэффициент заполнения ОНН и ОВН:

$$k_{sw1} = \frac{s_{p1}}{b_{p1iz}(a_{p1iz} + \delta_{izs1})}, \quad (7)$$

$$k_{sw2} = \frac{s_{p2}}{b_{p2iz}(a_{p2iz} + \delta_{izs2})},$$

где $\delta_{izs1}, \delta_{izs2}$ – толщина межслоевой изоляции ОНН и ОВН;

- число витков ОНН и ОВН:

$$W_1 = \frac{U_1}{4,44 \cdot f \Phi}, \quad W_2 = \frac{1,05 U_2}{4,44 \cdot f \Phi}, \quad (8)$$

где f – частота сети;

- радиальное сечение ОНН и ОВН:

$$S_{w1} = \frac{W_1 s_{p1}}{k_{sw1}}, \quad S_{w2} = \frac{W_2 s_{p2}}{k_{sw2}}, \quad (9)$$

- радиальный размер ОНН и ОВН:

$$a_1 = \frac{S_{w1}}{L_1} + \delta_{k1} N_{k1}, \quad a_2 = \frac{S_{w2}}{L_2} + \delta_{k2} N_{k2}, \quad (10)$$

где N_{k1}, N_{k2} – число охлаждающих каналов ОНН и ОВН.

После расчета этих величин вызывается процедура поверочного расчета. Данная процедура выполняется в пакетном режиме без участия человека. Методика поверочного расчета подробно описана в [4]. Она включает в себя расчет напряжения и потерь короткого замыкания, тока и потерь холостого хода, электродинамических усилий, возникающих в обмотках при трехфазном коротком замыкании, а также перегревы обмоток в номинальном режиме.

В качестве целевой функции удобно выбрать вес трансформатора G , который косвенно определяет его себестоимость.

Система проектирования была опробована при проектировании столбовых трансформаторов мощностью 40 кВА класса напряжения 10 кВ. Ввиду того, что технология навитки магнитопроводов из ленты аморфной стали в России пока

еще не отработана в достаточной мере, оказалось более выгодным заказывать готовые магнитопроводы в КНР. Это значит, что в качестве дополнительного условия в техническом задании на проектирование ТМАС был задан фиксированный набор типоразмеров магнитопроводов, т. е. из списка варьируемых параметров были исключены ширина ленты аморфной стали, ширина стержня и высота обмотки, которым были присвоены фиксированные значения. К функциональным ограничениям добавилось требование обеспечения минимального расстояния между обмотками высшего напряжения на соседних стержнях в рамках заданного размера окна. В качестве стартовой точки оптимизации были заданы произвольные значения остальных варьируемых параметров. Оптимизационный поиск дал результат, удовлетворяющий всем функциональным ограничениям.

Уточненный расчет ТМАС осуществлялся с использованием библиотеки конечно-элементного моделирования магнитного поля по методике, описанной в [5].

Созданная система проектирования САПР магнитопроводом из аморфной стали может иметь практическое значение как в учебном процессе, так и в производстве.

Список литературы

1. Филиппов А.Е., Соснин В.В. Энергосберегающие трансформаторы с магнитопроводами из аморфных сплавов // Энергоэксперт. – 2012. – № 2. – С. 52–54.
2. Энергосбережение в электроэнергетике и промышленности: VI Междунар. конф. ТРАВЕК. Москва, 17–18 марта 2010 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.travek.elektrozavod.ru/events/10/03/17-18>
3. Кетков Ю.Л., Кетков А.Ю., Шульц М.М. MATLAB 6.x: программирование численных методов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 672 с.
4. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
5. Тихонов А.И., Попов Г.В., Еремин И.В. Особенности методики расчета холостого хода трансформатора с сердечником из аморфной стали // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 4. – С. 32–35.

References

1. Filippov, A.E., Sosnin, V.V. Energoberegayushchie transformatory s magnitoprovodami iz amorfnykh spлавov [Energy-efficient amorphous steel transformers]. *Energoekspert*, 2012, no. 2, pp. 52–54.
2. VI Mezhdunarodnaya konferentsiya TRAVEK «Energoberezhenie v elektroenergetike i promyshlennosti». Moskva, 17–18 marta 2010 g. [Energy efficiency in electrical power engineering and production: the VI-th International conference. TRAVEK. Moscow, March 17–18, 2010 [online reference]]. Available at: <http://www.travek.elektrozavod.ru/events/10/03/17-18>
3. Ketkov, Yu.L., Ketkov, A.Yu., Shul'ts, M.M. MATLAB 6.kh: programmirovaniye chislennykh metodov [MATLAB 6.x: numerical methods programming]. Saint-Petersburg, BHV-Peterburg, 2004. 672 p.
4. Tikhomirov, P.M. Raschet transformatorov [Transformer calculation: university study guide]. Moscow, Energoatomizdat, 1986. 528 p.
5. Tikhonov, A.I., Popov, G.V., Eremin, I.V. Osobennosti metodiki rascheta kholostogo khoda transformatora s serdechnikom iz amorfnoy stali [Techniques of amorphous steel transformer no-load operation calculation]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 4, pp. 32–35.

Еремин Илья Витальевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант,
e-mail: bkmzzzzz@yandex.ru

Тихонов Андрей Ильич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой физики,
e-mail: ait@dsn.ru

Попов Геннадий Васильевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой БЖД,
e-mail: popov@bjd.ispu.ru