

УДК 621.321

Особенности методики расчета холостого хода трансформатора с сердечником из аморфной стали

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

Авторское резюме

Состояние вопроса: В связи с мировыми тенденциями, направленными на повышение эффективности использования энергоресурсов, актуальной становится проблема расчета силовых трансформаторов с сердечником из аморфной стали. В настоящее время не существует апробированных инженерных методик расчета данных трансформаторов. В подобных случаях используются универсальные методики, построенные на основе конечно-элементных моделей физических полей.

Материалы и методы: Для расчета магнитного поля в трансформаторе использован метод конечных элементов. В качестве математического процессора для организации численного эксперимента использован пакет MSExcel.

Результаты: Разработана методика расчета холостого хода трансформатора с сердечником из аморфной стали, основанная на использовании результатов конечно-элементного моделирования магнитного поля с использованием библиотеки EMLib. Предложены решения для учета технологического зазора в витом сердечнике. Разработаны алгоритмы уточненного расчета тока и потерь холостого хода.

Выводы: Разработанная методика может использоваться в составе подсистемы поверочных расчетов трансформатора с сердечником витой конструкции из аморфной стали, а также в составе подсистемы предпроектных исследований. Данная методика позволяет повысить точность расчетов по сравнению с традиционными методами, основанными на теории магнитных цепей.

Ключевые слова: САПР, трансформатор, аморфная сталь, конечно-элементная модель, магнитное поле, холостой ход трансформатора.

Calculation method of idling transformer with an amorphous steel core

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

Abstract

Background: In view of the global trends, aimed at improving the efficiency of energy use, it is becoming urgent to solve the problem of calculating power transformers with an amorphous steel core. At present there are no proven engineering techniques for calculating these transformers. Therefore, universal methods based on finite element models of physical fields are used for such purposes.

Materials and methods: The finite element method is used for calculating the magnetic field in the transformers. The MSExcel package is employed as a mathematical processor for organizing numerical experiments.

Results: The authors have developed a method of calculating a no-load transformer with an amorphous steel core, based on the results of finite element modeling of magnetic field with the use of the EMLib library. Solutions to the problem of taking into account the working gap in tape-wound core have been suggested. The algorithms of improved calculation of current and no-load losses have been developed.

Conclusions: The method developed can be used as part of the subsystem of checking calculations of a transformer with an amorphous steel wound core, and as part of the subsystem of pre-project studies. This method allows improving the calculation accuracy compared to the traditional methods based on the magnetic circuit theory.

Key words: CAD, transformer, amorphous steel, amorphous steel transformer, finite element model, magnetic field, no-load of transformer.

В настоящее время значительными темпами развивается одно из направлений трансформаторостроения, связанное с использованием аморфной стали для изготовления сердечников, что позволяет снизить потери холостого хода трансформатора в среднем в 4 раза. Особую актуальность данная проблема приобретает в связи с реализацией государственной программы энергосбережения, в соответствии с которой ведущим отраслевым энергосистемам при закупке силовых и распределительных

трансформаторов рекомендуется учитывать стоимость потерь в оборудовании за весь срок его службы. Так как в целом от потерь в магнитопроводах трансформаторов теряется до 4 % производимой в стране электроэнергии, то их изготовление из аморфных сплавов является одним из наиболее перспективных путей сни-

жения затрат на эксплуатацию силовых трансформаторов, особенно распределительных¹.

Долгое время внедрение аморфных сталей в трансформаторостроении сдерживалось высокой себестоимостью готовой продукции. После того, как китайские производители освоили технологию изготовления аморфной стали, ее стоимость понизилась и стала сравнимой со стоимостью электротехнической стали. В настоящее время российские производители успешно осваивают производство силовых трансформаторов (как правило, до третьего габарита включительно) с сердечниками из аморфной стали.

Ввиду того, что аморфная сталь имеет толщину порядка 25 мкм, использование традиционных технологий изготовления магнитопровода становится нецелесообразным. Наиболее технологичной сегодня считается витая стержневая или бронестержневая конструкция с одним стыком с прямоугольным сечением стержней. Такая конструкция требует изменения методики проектирования трансформатора, в первую очередь при расчете параметров холостого хода и электродинамических усилий.

Ниже предлагается методика расчета потерь и тока холостого хода в трансформаторах с сердечником витой конструкции из аморфной стали с использованием результатов численного расчета магнитного поля методом конечных элементов.

Для расчета магнитного поля используется библиотека конечно-элементного моделирования EMLib, разработанная в ИГЭУ [1, 2]. Данная библиотека представляет собой DLL, интегрируемую в базовую систему программирования, в которую она поставляет функции, позволяющие сгенерировать и исследовать по заданной программе конечно-элементную модель трансформатора, а также визуальное интерфейсное окно со средствами управления для анализа результатов расчета. Метод организации численного эксперимента с использованием данной библиотеки описан в [3].

В качестве интегрированной среды для создания системы проектирования силовых трансформаторов с сердечником из аморфной стали [4, 5] был использован табличный процессор MSExcel. По результатам проектного расчета с помощью параметрического генератора автоматически строится конечно-элементная модель трансформатора. Данный генератор представляет собой программный код, реализованный в форме макроса во встроенной системе программирования Visual Basic for Excel, обращающийся к функциям библиоте-

ки EMLib для формирования объектов полевой модели в соответствии с заданным алгоритмом. На вход генератора подаются размеры магнитной системы устройства, полученные в ходе проектного расчета. На выходе формируется готовая конечно-элементная модель. Параметрический генератор позволяет создавать серии полевых моделей для класса типовых устройств без дополнительного программирования. В качестве примера на рис. 1 представлен вариант конечно-элементной модели трансформатора бронестержневой конструкции мощностью 63 кВА.

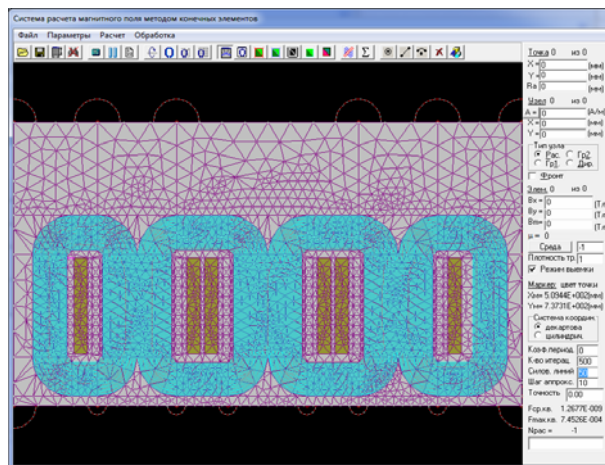


Рис. 1. Визуальное окно библиотеки конечно-элементного моделирования магнитного поля EMLib с конечно-элементной моделью бронестержневого трансформатора

Методика расчета тока и потерь холостого хода на основе численного расчета магнитного поля методом конечных элементов реализуется в ходе следующего алгоритма:

1. Рассчитывается приблизительное значение тока холостого хода трансформатора [6], %:

$$i_0 = \frac{q m k_q^B k_q^H + q_3 b_c a_c k_3}{10 P_H}, \quad (1)$$

где q – удельная намагничивающая мощность, ВА/кг; m – масса стали в магнитопроводе, кг; $k_q^B = 1,15$ – коэффициент увеличения намагничивающей мощности за счет действия остаточных механических напряжений в ленте; $k_q^H = 1,5$ – коэффициент увеличения намагничивающей мощности за счет искажения формы кривой магнитной индукции; q_3 – удельная намагничивающая мощность, ВА/м²; b_c – ширина ленты аморфной стали, м; a_c – ширина стержня магнитопровода, м; k_3 – коэффициент заполнения стали.

2. Рассчитываются мгновенные значения тока холостого хода в фазах обмотки высшего напряжения (ВН). В целях получения симметричной картины магнитного поля рационально в фазе В обмотки ВН, расположенной на среднем стержне, задать амплитудное значение тока холостого хода

¹ VI Международная конференция ТРАВЭК «Энергосбережение в электроэнергетике и промышленности». Москва, 17–18 марта 2010 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.travek.elektrozavod.ru/events/10/03/17-18>

$$i_{Bm} = \sqrt{2} \cdot I \cdot \frac{i_0}{100\%}, \quad (2)$$

а в фазах А и С

$$i_{Am} = i_{Cm} = -\frac{i_{Bm}}{2}, \quad (3)$$

где I – действующее значение номинального тока обмотки ВН.

3. С помощью параметрического генератора строится конечно-элементная модель трансформатора (рис. 1).

4. Осуществляется учет наличия стыка при изготовлении магнитной системы в конечно-элементной модели трансформатора путем использования расчетной кривой намагничивания аморфной стали, получаемой посредством корректировки исходной табличной кривой по алгоритму рис. 2.

В соответствии с законом полного тока для магнитной цепи трансформатора можно записать

$$HL + H_\delta \delta = iw, \quad (4)$$

где H – напряженность магнитного поля в стали магнитопровода; L – длина средней силовой линии магнитопровода; H_δ – напряженность магнитного поля в технологическом зазоре; δ – расчетная величина зазора; i – ток в обмотке; w – число витков в обмотке.

Принимая допущение, что индукция B на всех участках магнитной системы одинакова, получаем

$$HL + \frac{B}{\mu_0} \delta = HL + \mu H \delta = H(L + \mu \delta) = iw, \quad (5)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; $\mu = \mu(H)$ – относительная магнитная проницаемость стали.

Из (5) следует:

$$H = \frac{iw}{L + \mu \delta} = \frac{iw}{L} \frac{1}{1 + \mu \frac{\delta}{L}} = H' \frac{1}{1 + \mu \delta'}, \quad (6)$$

$$H' = H(1 + \mu \delta') = K(\mu)H, \quad (7)$$

где $H' = \frac{iw}{L}$ – расчетная напряженность магнитного поля в сердечнике с технологическим

зазором; $\delta' = \frac{\delta}{L}$ – относительная величина зазора;

$K(\mu)$ – расчетный коэффициент, учитывающий наличие технологического зазора.

Таким образом, для учета технологического зазора считаем, что магнитопровод выполняется без зазора из стали с кривой намагничивания $B(H')$. Это значит, что для каждого i -го табличного значения индукции B_i реальной кривой намагничивания аморфной стали табличное значение H_i необходимо, в соответствии с (7), умножить на расчетный коэффициент $K_i(\mu)$, который, в свою очередь, зависит от магнитной проницаемости стали μ_i .

Ввиду нелинейности коэффициента $K(\mu)$, расчет кривой $B(H')$ по заданной табличной кривой $B(H)$ для каждой i -й точки требует цик-

лических операций по уточнению значений μ (рис. 2).

Величина расчетного зазора δ зависит от геометрических размеров магнитной системы, качества ленты аморфной стали и технологии изготовления магнитопровода. В связи с этим величина δ может быть определена только экспериментально в процессе сравнения расчетных данных с результатами испытаний серии трансформаторов.

На рис. 3 приведены исходная и расчетная кривые намагничивания аморфной стали для трансформатора ТМГ63 – 10,5/0,4.

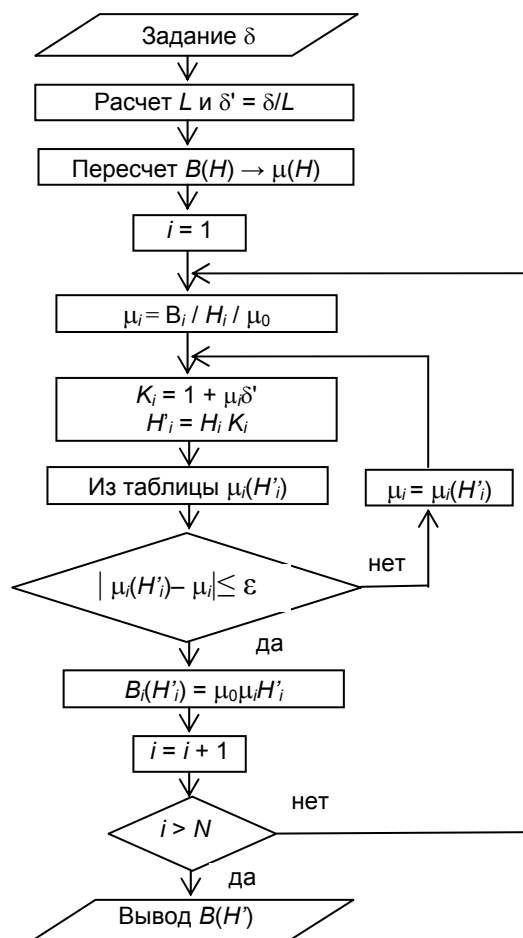


Рис. 2. Алгоритм расчета кривой намагничивания $B = f(H')$

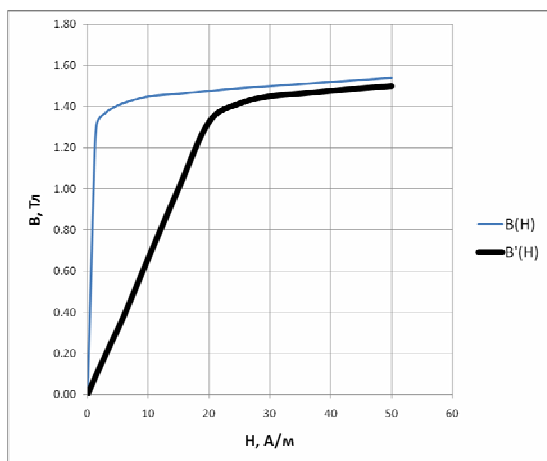


Рис. 3. Исходная $B(H)$ и расчетная $B'(H)$ кривые намагничивания аморфной стали

5. Варьируя токи в фазах обмотки ВН от нуля до значений, превышающих значения, полученные по (2) и (3) в 1,5–2 раза, производится серия расчетов магнитного поля трансформатора. При этом в каждом из расчетов фиксируется амплитудная величина индукции B_m в центре среднего стержня (фаза В). В результате получаем зависимость $B_m(i_{Bm})$, по которой строится зависимость $E'(i_0)$ (рис. 4), где E' – действующее значение ЭДС обмотки ВН, рассчитываемое по формуле

$$E' = 4,44 f w B_m b_c a_c k_3; \quad (8)$$

i_0 – ток намагничивания, %:

$$i_0 = \frac{i_{Bm} \cdot 100\%}{\sqrt{2} \cdot I}. \quad (9)$$

Здесь f – частота сети, Гц; w – число витков обмотки ВН; I – действующее значение номинального тока обмотки ВН.

На рис. 4 приведены две кривые намагничивания трансформатора.

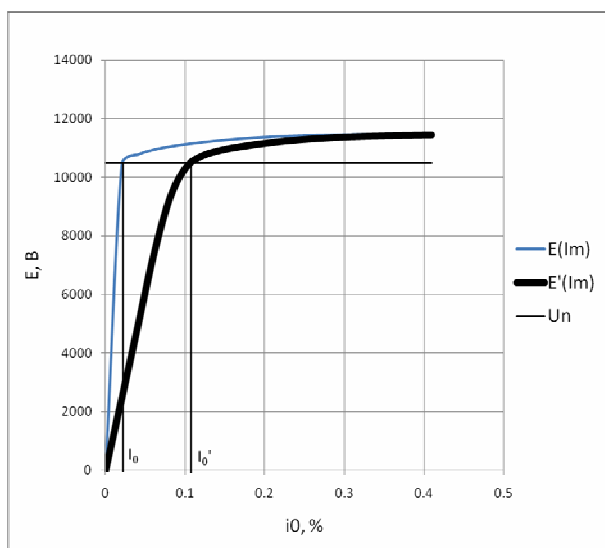


Рис. 4. Кривые намагничивания трансформатора: $E(lm)$ – без технологического зазора; $E'(lm)$ – при наличии технологического зазора

6. Ток холостого хода определяется по рис. 4 из условия приближительного равенства ЭДС обмотки ВН и напряжения сети U_n . Ток холостого хода $i_0' = 0,11\%$, определенный по кривой, учитывающей наличие технологического зазора, в 5,5 раза больше величины тока $i_0 = 0,02\%$, найденного из допущения об отсутствии зазора.

Если ток холостого хода, найденный по приведенной методике, не совпадает с результатами испытаний трансформатора, то это означает, что нужно варьировать величину расчетного зазора δ . Для этого может потребоваться несколько уточняющих итераций. Однако после ее уточнения полученное значение можно использовать при проектировании серии трансформаторов данного класса без экспериментального подтверждения.

7. Для расчета потерь холостого хода можно воспользоваться приближенной формулой

$$P_0 = p m k_p^e k_p^u + p_3 b_c a_c k_3, \quad (10)$$

где p – удельные потери в стали при магнитной индукции B_m , Вт/кг; $k_p^e = 1,055$ – коэффициент увеличения потерь за счет действия остаточных механических напряжений в ленте; $k_p^u = 1,33$ – коэффициент увеличения потерь за счет искажения формы кривой магнитной индукции; p_3 – удельные потери в стали в зоне стыка, Вт/м²; остальные обозначения – см. в (1).

8. В целях уточнения расчета потерь холостого хода выполняются три расчета магнитного поля. При этом в каждом из расчетов ток в одной из обмоток ВН задается равным амплитудному значению тока холостого хода i_m , а в двух других фазах – равным половине амплитуды тока холостого хода с обратным знаком, т. е. $-i_m/2$. В каждом k -м треугольнике, заполненном сталью (рис. 1), фиксируется полученная в ходе конечно-элементного расчета величина магнитной индукции B_k . Из трех полученных таким образом значений B_k выбирается максимальное для k -го стального элемента значение B_{mk} . По заданной кривой удельных потерь в стали $p = f(B)$ определяется величина $p_k(B_{mk})$. Потери холостого хода рассчитываются по формуле

$$P_0 = \gamma b_c k_p^e k_p^u k_3 \sum_{k=1}^{N_s} p_k(B_{mk}) S_k, \quad (11)$$

где γ – удельный вес аморфной стали; N_s – количество треугольных элементов конечно-элементной модели, заполненной сталью; S_k – площадь k -го элемента.

Разработанная методика может использоваться в составе автоматизированной подсистемы поверочных расчетов трансформатора с сердечником витой конструкции из аморфной стали, а также в составе подсистемы предпроектных исследований трансформаторов. Данная методика позволяет повысить точность расчетов по

сравнению с традиционными методиками, основанными на теории магнитных цепей.

Список литературы

1. **Тихонов А.И.** Программа для ЭВМ: Библиотека полевого моделирования. Фрагменты исходного текста программы. № 2006610323. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2006.

2. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ «Платформонезависимая библиотека конечно-элементного моделирования магнитного поля» № 2011614852 от 22.06.2011 / А.И. Тихонов, Л.Н. Булатов. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2011.

3. **Тихонов А.И., Казаков Ю.Б.** Программирование численного эксперимента с использованием конечно-элементной модели магнитного поля в объектах электро-механики / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2008. – 80 с.

4. **Еремин И.В., Попов Г.В., Тихонов А.И.** К вопросу о проектировании распределительных трансформаторов из аморфной стали // Новые технологии в промышленности, науке и образовании: мат-лы II Всерос. науч.-практич. конф. / под ред. И.П. Белова. – Оренбург: Изд-во ООО «Золотой кардинал», 2011. – С. 111–112.

5. **Исламов С.В., Еремин И.В., Тихонов А.И.** Особенности проектирования трансформаторов с сердечником из аморфной стали: мат-лы регион. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия – 2012». Т. 4 / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2012. – С. 75–78.

6. **Тихонов А.И., Лапин А.Н.** Проектирование силовых трансформаторов: учеб. пособие / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2012. – 132 с.

References

1. Tikhonov, A.I. *Programma dlya EVM: Biblioteka polevogo modelirovaniya. Fragmenty iskhodnogo teksta pro-*

grammy № 2006610323 [Computer Program: a Library of Field Modeling. Fragments of the Program Source Code No 2006610323]. Moscow, Federal'naya sluzhba po intellektual'noy sobstvennosti, patentam i tovarnym znakam, 2006.

2. Tikhonov, A.I., Bulatov, L.N. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM «Platformonezavisimaya biblioteka konechno-elementnogo modelirovaniya magnitnogo polya»* № 2011614852 [Certificate of State Registration of Computer Program «Platform-Independent Library of Magnetic Field Finite Element Modeling» No 2011614852]. Moscow, Federal'naya sluzhba po intellektual'noy sobstvennosti, patentam i tovarnym znakam, 2011.

3. Tikhonov, A.I., Kazakov, Yu.B. *Programmirovaniye chislennogo eksperimenta s ispol'zovaniem konechno-elementnoy modeli magnitnogo polya v ob'ekтах elektromekhaniki* [Numerical Experiment Programming Using the Magnetic Field Finite Element Model in Electromechanic Objects]. Ivanovo, 2008. 80 p.

4. Eremin, I.V., Popov, G.V., Tikhonov, A.I. K voprosu o proektirovanii raspredelitel'nykh transformatorov iz amorfnoy stali [Amorphous Steel Distribution Transformers]. *Materialy II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Novye tekhnologii v promyshlennosti, nauke i obrazovanii»* [Proceedings of the IInd All-Russian Theoretical and Practical Conference «New Technologies in Manufacturing, Science and Education»]. Orenburg, Izdatel'stvo ООО «Zolotoy kardinal», 2011, pp. 111–112.

5. Islamov, S.V., Eremin, I.V., Tikhonov, A.I. Osobennosti proektirovaniya transformatorov s serdechnikom iz amorfnoy stali [Designing Amorphous Steel Core Transformers]. *Materialy regional'noy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Energiya – 2012»* [Proceedings of the Regional Scientific and Technical Conference of Students, Post-Graduate Students and Young Scientists «Energy-2012»]. Ivanovo, 2012, vol. 4, pp. 75–78.

6. Tikhonov, A.I., Lapin, A.N. *Proektirovaniye silovykh transformatorov* [Designing of Power Transformers: Study Guide]. Ivanovo, 2012. 132 p.

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 безопасности жизнедеятельности,
e-mail: popov@bjd.ispu.ru

Еремин Илья Витальевич,

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