

УДК 621.321

Подсистема САПР распределительных трансформаторов для расчета нагрузочных потерь в фольговых обмотках с учетом вытеснения тока

А.В. Стулов, А.И. Тихонов, И.А. Корнев
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация,
ЗАО «Трансформер», Московская обл., г. Подольск, Российская Федерация
E-mail: alxstl@mail.ru, ait@dsn.ru, kornevispu@gmail.com

Авторское резюме

Состояние вопроса: Современные условия производства трансформаторов требуют от инженеров-проектировщиков минимальных затрат времени на проектирование при сохранении высокой точности расчетов. Эти требования возможно удовлетворить за счет использования подсистем САПР распределительных трансформаторов, основанных на уточненных математических моделях. В связи с этим становится актуальной задача разработки и апробации подсистемы САПР распределительных трансформаторов для расчета нагрузочных потерь в фольговых обмотках с учетом вытеснения тока.

Материалы и методы: Используются системы программирования Visual Basic for Excel, MATLAB, библиотека моделирования магнитного поля EMLib, библиотека моделирования электрических схем замещения ECLib, а также результаты испытаний физических образцов в испытательной лаборатории ЗАО «Трансформер» (г. Подольск, Московская область).

Результаты: Разработана и апробирована подсистема САПР распределительных трансформаторов для расчета нагрузочных потерь в фольговых обмотках НН трансформатора с учетом вытеснения тока. Получены эпюры распределения плотности тока по высоте фольговой обмотки НН. Полученные численные результаты с достаточной степенью точности подтверждаются результатами приемосдаточных испытаний.

Выводы: Разработанная подсистема может быть интегрирована в САПР и использоваться при проектировании оптимальных моделей распределительных трансформаторов, а также при разработке серий трансформаторов.

Ключевые слова: комбинированные модели, индуктивность, нагрузочные потери, вытеснение тока, электрические схемы замещения.

The CAD subsystem of distribution transformers for calculation of load losses in foil windings accounting for displacement current

A.V. Stulov, A.I. Tikhonov, I.A. Kornev
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation,
CJSC «Transformer», Moscow region, Podolsk, Russian Federation
E-mail: alxstl@mail.ru, ait@dsn.ru, kornevispu@gmail.com

Abstract

Background: Modern conditions of transformer production should be designed in the minimum time and provide a high accuracy of the calculations. These requirements can be satisfied by the use of CAD subsystems of distribution transformers based on refined mathematical models. Therefore, an urgent task is to develop and test a CAD subsystem of distribution transformers for the calculation of load losses in foil windings with the displacement current taken into account.

Materials and methods: Programming systems Visual Basic for Excel, MATLAB, magnetic field modeling library EMLib, electrical circuits modeling library ECLib, as well as results of physical tests of samples in the testing laboratory of CJSC «Transformer» (Podolsk, Moscow region)

Results: A CAD subsystem of distribution transformers for the calculation of load losses in foil windings of LV transformers has been developed and tested with the displacement current taken into account. Plots of the current density distribution along the height of the foil winding LV have been obtained. The obtained numerical results are confirmed by the results of the acceptance test with a sufficient degree of accuracy.

Conclusions: The developed subsystem can be integrated into CAD and used in the design of optimal models of distribution transformers, as well as in the development of series transformers.

Key words: combined models, inductance, load losses, displacement current, electric circuits.

DOI: 10.17588/2072-2672.2015.2.071-074

Стремление производителей трансформаторного оборудования к снижению затрат на проектирование и производство продукции приводит к необходимости создания высокоэффективных программных средств, обладающих высоким быстродействием и высокой

точностью расчетов. Такие программные средства должны строиться на точных математических моделях, которые учитывают все эффекты и процессы, происходящие в распределительном трансформаторе, в частности эффект вытеснения тока нагрузки в фольговых обмот-

ках. Традиционные методики расчета, основанные на работах [1–7], не позволяют учесть данные эффекты с достаточной для современных расчетов точностью. Разработанные в [8, 9] уточненные математические модели фольговых обмоток позволяют учесть упомянутый эффект, так как реализованы с использованием расчетов магнитного поля.

На основе уточненных моделей разработана подсистема для расчета нагрузочных потерь в фольговых обмотках распределительных трансформаторов с учетом вытеснения тока, состоящая из следующих блоков:

- параметрический генератор, предназначенный для автоматического формирования расчетной модели;
- процессор, основанный на использовании библиотеки ECLib [10] и предназначенный для расчета модели;
- постпроцессор, предназначенный для вывода и обработки результатов расчета.

Принцип работы параметрического генератора аналогичен описанному в [9]. Алгоритм расчета заключается в следующем:

1. С помощью библиотеки моделирования магнитного поля EMLib происходит построение конечно-элементной модели распределительного трансформатора в опыте короткого замыкания (рис. 1). Для учета эффекта вытеснения тока фольговая обмотка низшего напряжения представлена множеством расчетных секций аналогично [1]. Слоевая обмотка высшего напряжения представлена единым массивом с равномерной плотностью тока. В отличие от [1], в модели присутствует сердечник.

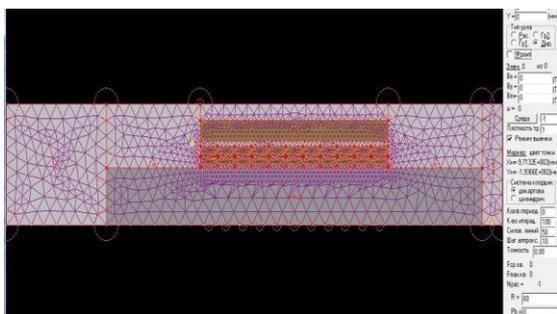


Рис. 1. Конечно-элементная модель трансформатора в опыте короткого замыкания

2. В результате серии расчетов на модели строится матрица собственных и взаимных индуктивностей обмотки [L]. Картина поля представлена на рис. 2.

3. Осуществляется параметрическая генерация электрической схемы замещения обмотки трансформатора, а также расчет матрицы омических сопротивлений секций [R]. Схема замещения обмотки (рис. 3.) состоит из омических сопротивлений секций, собственных и взаимных индуктивностей секций, а также из ветви обмотки высшего на-

пряжения, состоящей из сопротивления, индуктивности и источника ЭДС.

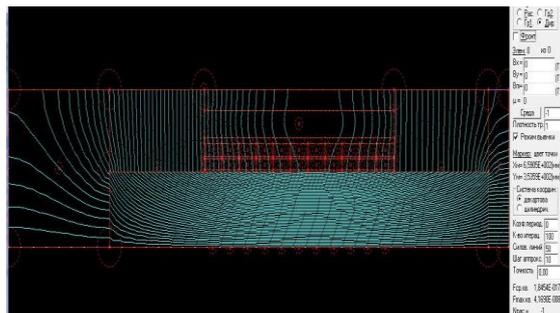


Рис. 2. Картина магнитного поля в конечно-элементной модели трансформатора

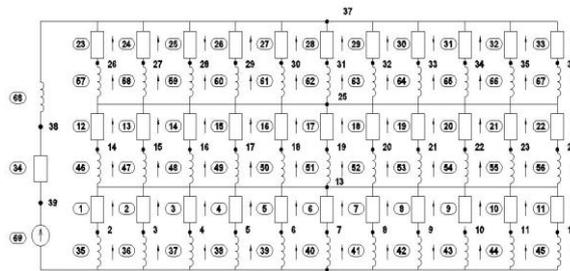


Рис. 3. Электрическая схема замещения трансформатора в опыте короткого замыкания

4. С помощью разработанной авторами библиотеки моделирования электрических цепей ECLib рассчитывается матрица токов [I], протекающих в ветвях схемы замещения. Результат расчета токов в ходе переходного процесса показан на рис. 4. Распределение токов по секциям по высоте фольговой обмотки показано на рис. 5.

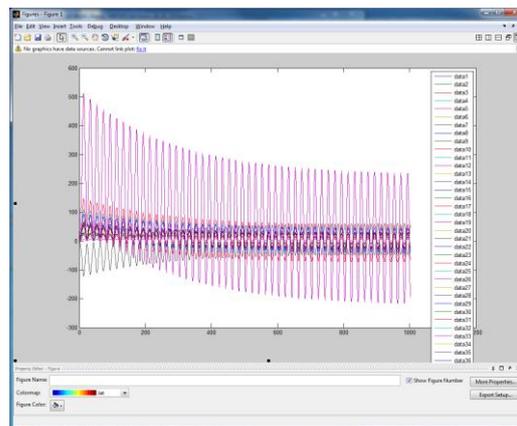


Рис. 4. Переходный процесс изменения тока в первой секции исследуемой обмотки

5. Матрица потерь [P], выделяющихся в секциях обмотки определяется как

$$P = R [I^2]. \quad (1)$$

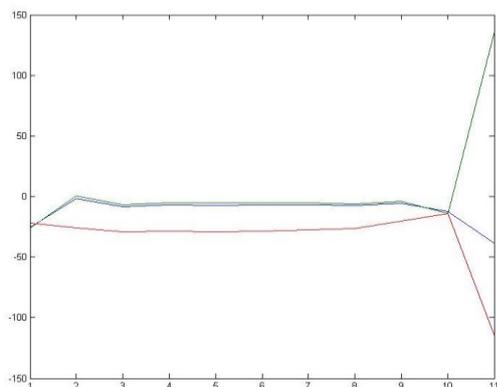


Рис. 5. Распределение токов в секциях фольговой обмотки по высоте в трех концентраторах

В дальнейшем рассчитанные потери являются основой для теплового расчета фольговых обмоток [2, 3]. Применение комбинированных моделей (полевых в комбинации с цепными) впервые было использовано в расчете потерь в токоограничивающем реакторе сухого типа РТСТ [1]. Блок-схема подсистемы приведена на рис. 6.

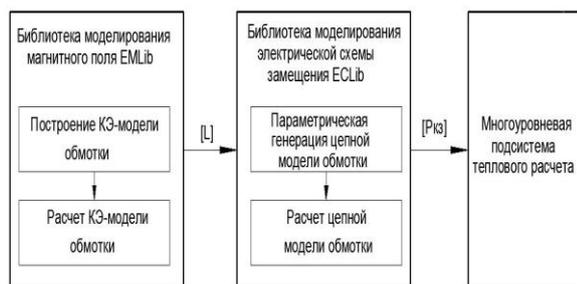


Рис. 6. Блок-схема подсистемы для расчета потерь

Особенности рассматриваемой подсистемы заключаются в следующем:

1. Модель учитывает наличие сердечника из электротехнической стали.
2. При расчете использовались формализованные методы, лежащие в основе библиотеки моделирования электрических цепей ECLib, позволяющей автоматизировать процесс формирования системы дифференциальных уравнений, описывающих электрическую цепь [4].

3. Рассматриваемая подсистема включает в себя параметрический генератор электрической схемы замещения, позволяющий создавать серии типовых цепных моделей.

Апробация системы производилась в рамках ЗАО «Трансформер». Результаты расчета и приемосдаточных испытаний приведены в таблице.

Основные потери в фольговой обмотке определяются как

$$P_{кзн} = I_{изм}^2 R_{изм}, \quad (2)$$

где $I_{изм}$ – ток в обмотке низшего напряжения, измеренный в опыте короткого замыкания;

$R_{изм}$ – сопротивление обмотки постоянному току, измеренное в опыте короткого замыкания; $P_{доб}$ – добавочные потери в обмотке, определяемые как

$$P_{доб} = P_w - P_{кзн}, \quad (3)$$

где P_w – показания ваттметра в опыте короткого замыкания.

Результаты расчета и приемосдаточных испытаний трансформатора

Тип	Нагрузочные потери ОНН, Вт (приведенные к температуре 75 °С)		
	Расчет	Испытания	
		$P_{расч}$	$P_{кзн}$
ТМГ-250/10	412	386	40
ТМГ-400/10	854	807	60
ТМГ-630/10	1114	949	121
ТМГ-1000/10	1496	1329	170
ТМГ-1600/10	2630	2153	494

Примечание: $P_{кзн}$ – основные потери в фольговой обмотке.

Следует отметить, что расчетное значение нагрузочных потерь $P_{расч}$ в фольговой обмотке НН включает в себя как основные потери в обмотке, так и добавочные.

Заключение

Рассмотренная подсистема использует уточненные быстродействующие комбинированные модели фольговых обмоток, основанные на использовании полевых и цепных моделей.

Данная подсистема может быть успешно интегрирована в подсистемы оптимального проектирования САПР распределительных трансформаторов.

Предложенная подсистема расчета нагрузочных потерь в фольговых обмотках может быть эффективно использована в многоуровневой подсистеме тепловых расчетов распределительных трансформаторов [3] для уточненного теплового расчета активной части трансформатора.

Список литературы

1. **Лейтес Л.В.** Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. – М.: Энергия, 1981. – 392 с.
2. **Andrew P.H.** Design of copper sheet and foil wound transformers // ERA distribution conference. – Edinburgh, 1967. – 39. – P. 2.
3. **Beaumont R.** Losses in transformers and reactors // CIGRE. – 1988. – № 12–10.
4. **Dowell P.** Effects of eddy currents in transformer windings // Proceedings of the IEE. – 1966 Aug. – Vol. 113, N 8. – P. 1387–1394.
5. **El-Missiry M.M.** Foil windings in reactors and transformers // Ph.D. Thesis, University of Manchester, 1976.
6. **Gersem H.D., Hameyer K.** A finite element model for folio winding simulation // IEEE Transactiona on Magnetics. – 2001. – Vol. 37-5. – P. 3427–3432.

7. Walker N.J. Studies of foil wound components // A Doctoral Thesis, Loughborough University of Technology, 1979.

8. 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.

9. Разработка уточненных математических моделей для создания подсистем САПР распределительных трансформаторов с обмотками из ленты / А.В. Стулов, А.С. Зайцев, И.А. Трофимович, В.И. Печенкин // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 5. – С. 37–41.

10. Тихонов А.И., Корнев И.А. Библиотека для формирования и исследования моделей электрических цепей в динамических режимах / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. № 2013610691. Заявка № 2012660143, приоритет от 22.11.2012, Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9.01.2013.

References

1. Leytes, L.V. *Elektromagnitnye raschety transformatorov i reaktorov* [Electromagnetic calculations of transformers and reactors]. Moscow, Energiya, 1981. 392 p.

2. Andrew, P.H. Design of copper sheet and foil wound transformers. ERA distribution conference. Edinburgh, 1967, 39, paper 2.

3. Beaumont, R. Losses in transformers and reactors. CIGRE, 1988, № 12–10.

4. Dowell, P. Effects of eddy currents in transformer windings. Proceedings of the IEE, 1966 Aug., vol. 113, no. 8, pp. 1387–1394.

5. El-Missiry, M.M. Foil windings in reactors and transformers. Ph.D. Thesis, University of Manchester, 1976.

6. Gersem, H.D. Hameyer, K. A finite element model for folio winding simulation. IEEE Transactiona on Magnetics, 2001, vol. 37-5, pp. 3427–3432.

7. Walker, N.J. Studies of foil wound components. A Doctoral Thesis, Loughborough University of Technology, 1979.

8. 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.

9. Stulov, A.V., Zaytsev, A.S., Trofimovich, I.A., Pechenkin, V.I. *Razrabotka utochnennykh matematicheskikh modelej dlja sozdaniya podsystem SAPR raspredelitel'nykh transformatorov s obmotkami iz lenty* [Development of refined mathematical models for creating CAD subsystems of distribution transformers with tape windings]. *Vestnik IGEU*, 2014, issue 5, pp. 37–41.

10. Tikhonov, A.I., Kornev, I.A. *Biblioteka dlja formirovaniya i issledovaniya modeley elektricheskikh tsepey v dinamicheskikh rezhimakh* [A library for developing and studying electric circuit models in dynamic modes]. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM*, no. 2013610691 [Certificate of computer program state registration]. Moscow, Federal'naya sluzhba po intellektual'noy sobstvennosti, patentam i tovarnym znakam, 2013.

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

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

Корнев Илья Александрович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант, инженер кафедры физики,
e-mail: kornevispu@gmail.com