

УДК 621.321

## Параметрическая генерация и расчет электрической схемы замещения тепловых процессов в обмотках из ленты сухих трансформаторов и токоограничивающих реакторов в стационарных режимах

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

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** В настоящее время актуальной является задача разработки специализированных приложений для расчета сложного теплообмена в твердых телах. Одним из направлений моделирования тепловых процессов является использование электрических схем замещения. Теоретической основой данного метода моделирования является изоморфизм уравнений, описывающих тепловые процессы и электрические цепи. Необходима разработка приложения для расчета тепловых процессов на основе цепных моделей, которая способна быть интегрирована в системы оптимизации.

**Материалы и методы:** Использованы системы программирования Visual Basic for Excel, MATLAB. Для верификации полученных результатов использованы средства Solidworks: Flow simulation 2012 и результаты испытаний физических моделей в испытательной лаборатории ЗАО «Трансформер» (г. Подольск, Московская область).

**Результаты:** Разработана система, позволяющая формировать программным образом и решать систему уравнений, описывающую электрическую схему замещения тепловой цепи фольговых обмоток трансформаторов или токоограничивающих реакторов, с использованием функционала библиотеки моделирования электрических цепей ECLib. Дан сравнительный анализ результатов численного расчета с результатами расчета цепной модели в среде Simulink, полевой модели в среде Flow simulation и результатами натурных испытаний.

**Выводы:** Использование библиотеки моделирования электрических цепей Eclib позволяет снизить трудоемкость вычислений путем автоматизации процессов построения схемы замещения. Расхождение в результатах, полученных с помощью электрической схемы замещения и полевых методов, не превышает 8 %.

**Ключевые слова:** параметрический генератор, сложный теплообмен, электрическая схема замещения, коэффициент теплоотдачи.

## 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

A.V. Stulov, I.A. Kornev, A.I. Tikhonov  
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: alxstl@mail.ru, ait@dsn.ru

### Abstract

**Background:** At present it is urgent to develop specialized applications for calculating complex heat exchange in solid objects. One of the directions of heat processes simulation is using equivalent circuits. The theoretical basis of such simulation is the isomorphism of equations describing heat processes and electrical circuits. It is necessary to develop applications for calculating heat processes based on chain models capable of being integrated into optimization systems.

**Materials and methods:** The study was conducted in the programming systems Visual Basic for Excel, MATLAB. The results were verified by implementing Solidworks: Flow Simulation 2012 and testing the physical models in the testing laboratory of ZAO «Transformer», Podolsk, Moscow region.

**Results:** We have developed a system allowing us to form by programming and solve the equation system describing electrical equivalent circuit of heat circuits of foil winding transformers or current-limiting reactors. The system uses the functionality of the electrical circuit modeling library ECLib. The paper also compares the results of numerical calculations and calculations of the chain model in the Simulink environment, field model in the Flow simulation environment and actual testing results.

**Conclusions:** The electrical circuit simulation library Eclib allows reducing the calculation labour content by automating equivalent circuit design. The discrepancy of the results obtained by applying equivalent electrical circuits and field methods does not exceed 8%.

**Key words:** parametric generator, complex heat transfer, equivalent electrical circuit, heat-exchange coefficient.

В условиях рыночной экономики и жесткой конкуренции на рынке электротехнического оборудования актуальным является расчет оптимальных моделей трансформаторов и то-

коограничивающих реакторов. В связи с этим растет потребность в быстродействующих и точных математических моделях физических процессов в данных устройствах. В частности,

в [1, 2] для расчета тепловых режимов обмоток трансформаторов и токоограничивающих реакторов была использована уточненная быстроедействующая модель, основанная на использовании разветвленной электрической схемы замещения тепловой цепи обмотки из ленты силового трансформатора или токоограничивающего реактора. Для создания и расчета данной модели был использован имитационный пакет Simulink. Главным недостатком этой модели является сложность автоматизации процесса построения в среде Simulink разветвленной электрической цепи. Выход может быть найден в использовании математической библиотеки ECLib [3, 4], ориентированной на решение задач автоматизированного построения и имитации работы электрических схем.

Функционал библиотеки ECLib состоит в построении и численном решении комбинированной системы алгебраических и обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих статические и динамические процессы в электрической цепи. При построении системы уравнений используется метод переменных состояния [5]. В качестве исходных данных для построения системы уравнений используется матрица соединений электрической цепи  $\mathbf{A}$ , а также вектор типов  $\mathbf{T}$  и матрица номиналов  $\mathbf{N}$  элементов цепи. Данные матрицы должны быть сформированы в базовом приложении, в которое внедряется библиотека ECLib и которое вызывает ее функции для решения конкретных прикладных задач.

В электрическую цепь могут быть включены пять базовых типов элементов: источник ЭДС, емкость, сопротивление, электрическая индуктивность и источник тока. Кроме того, библиотека позволяет использовать элементы типа взаимная индуктивность и взаимная емкость, а также нелинейные элементы, аналогичные базовым элементам, но заданные своей характеристикой, отражающей тип нелинейности. В частности, идеализированный диод, необходимый для построения схемы замещения тепловой цепи обмотки трансформатора, представляет собой нелинейное сопротивление, характеризующееся двумя значениями номинала  $R_{пр} \ll R_{обр}$ , в зависимости от направления тока в нем.

Элементы нумеруются в произвольном порядке, их номиналы записываются в диагональные элементы матрицы  $\mathbf{N}$  (матрица  $\mathbf{N}$  имеет размерность  $p \times p$ , где  $p$  – количество элементов электрической цепи). При наличии взаимных индуктивностей или взаимных емкостей соответствующие ненулевые значения присваиваются и недиагональным элементам матрицы  $\mathbf{N}$ .

Матрица соединений  $\mathbf{A}$  имеет размерность  $p \times q$ , где  $q$  – количество узлов электрической цепи, точнее, ее графа. Каждая  $i$ -я ко-

лонка матрицы  $\mathbf{A}$  имеет ненулевые элементы только в строках, соответствующих узлам, ограничивающим  $i$ -й элемент электрической цепи (узлы электрической цепи нумеруются в произвольном порядке). При этом  $A_{ij} = +1$  и  $A_{jk} = -1$ , где  $j$  – номер узла, к которому присоединено начало  $i$ -го элемента, а  $k$  – номер узла, к которому присоединен его конец (направление может выбираться произвольным образом).

Библиотека ECLib осуществляет анализ матрицы соединений, включающий в себя:

1) перестройку матриц по принадлежности элементов к автономным цепям (автономные цепи могут быть связаны между собой взаимными индуктивностями и взаимными емкостями).

2) перестановку столбцов в соответствии с номиналами (ЭДС и емкости идут в порядке убывания номиналов, сопротивления, индуктивности и источники тока – в порядке возрастания);

3) сортировку столбцов по типам элементов (сначала идут столбцы, соответствующие источникам ЭДС, затем столбцы, соответствующие емкостям, сопротивлениям, индуктивностям, в конце идут столбцы, соответствующие источникам тока; это упрощает процесс формирования дерева графа);

4) формирование дерева графа электрической схемы (в дерево входят все источники напряжения и, по возможности, все емкости; могут входить сопротивления, желательно не включать индуктивности).

По результатам анализа матрицы соединений строится система уравнений по методу переменных состояния, которая распадается на четыре подсистемы:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{i} = \mathbf{L}^{-1} \mathbf{U}_L; \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \mathbf{u} = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{I}_C; \quad (2)$$

$$\mathbf{i} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{U}_R; \quad (3)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{G}^{-1} \mathbf{I}_G, \quad (4)$$

где  $\mathbf{i}$  – вектор неизвестных токов в z-ветвях;  $\mathbf{u}$  – вектор неизвестных напряжений в u-ветвях;  $\mathbf{L}$  – матрица индуктивностей;  $\mathbf{C}$  – матрица емкостей;  $\mathbf{U}_L$ ,  $\mathbf{I}_C$ ,  $\mathbf{U}_R$ ,  $\mathbf{I}_G$  – векторы правых частей.

Результаты решения визуализируются в виде графиков изменения искомых величин во времени. Библиотека может быть использована для решения в среде MatLab проектных и исследовательских задач.

Системы уравнений (1) и (2) решаются путем интегрирования по времени методом Эйлера или Рунге-Кутты. Системы (3) и (4) решаются в одну итерацию. Так как предполагается использование библиотеки ECLib в подсистеме оптимизации трансформатора или токоограничивающего реактора, то наибольший интерес представляет расчет теплового состояния обмоток в установившемся режиме.

В электрической схеме замещения тепловой цепи присутствуют только источники тока и сопротивления. Это значит, что задача сводится к формированию и решению системы уравнений (4).

Базовое приложение, используемое при моделировании тепловых процессов в фольговых обмотках с использованием электрических схем замещения, было создано в среде Excel и состоит из трех основных блоков:

1) *препроцессор*, включающий в себя:

- подсистему расчета параметров схемы замещения (сопротивлений и источников тока, а при расчете переходных режимов еще и электроемкостей);

- параметрический генератор матриц исходных данных;

2) *процессор*, реализованный средствами библиотеки ECLib, осуществляющий формирование и решение системы уравнений электрической цепи;

3) *постпроцессор*, представляющий собой подсистему вывода результатов расчета в графическом и табличном виде.

Подсистема расчета параметров схемы замещения состоит из следующих блоков:

1. *Ввод исходных данных.*

Здесь вводятся данные, характеризующие геометрию модели, которые рассчитываются в подсистеме предварительного расчета:

- внутренний диаметр и высота обмотки;
- количество концентров обмотки;
- число витков в концентрах;
- толщина ленты обмотки и межслоевой изоляции;

- ширина охлаждающего канала между концентриками;

- количество расчетных секций по высоте обмотки (задается проектировщиком исходя из требуемой точности и количества расчетных точек, в которых определяется температура);

- величина и распределение по расчетным секциям теплопотерь [6].

2. *Справочные данные.*

Здесь приводятся характеристики материалов и необходимые константы:

- коэффициенты теплопроводности материалов и хладагента;
- удельные теплоемкости материалов и хладагента;

- кинематическая вязкость и коэффициент объемного расширения хладагента;

- степень черноты поверхностей концентров и др.

3. *Расчет характеристик тепловыделения.*

Здесь рассчитываются геометрические величины модели и плотности тепловыделения:

- объемы концентров;
- объемная плотность тепловыделения;

- номиналы источников тепловыделений в каждой расчетной секции  $J$ ;

- внешние и внутренние поверхности охлаждения концентров.

4. *Расчет тепловых сопротивлений (рис. 1):*

- сопротивления теплопроводности концентров обмоток (для учета анизотропии вводятся два типа сопротивлений: в осевом направлении  $R_z$  и радиальном  $R_r$ );

- сопротивление теплопроводности воздуха  $R_k$ ;

- тепловые сопротивления воздуха вдоль канала с учетом конвекции  $VR_k$  (данное сопротивление выполняется в виде диода, обеспечивая тем самым однонаправленный конвективный поток вдоль канала);

- сопротивления теплоотдачи с поверхностей концентров с учетом конвекции и излучения  $R_{\alpha}$ ;

- тепловое сопротивление бортовой изоляции  $R_{is}$ .

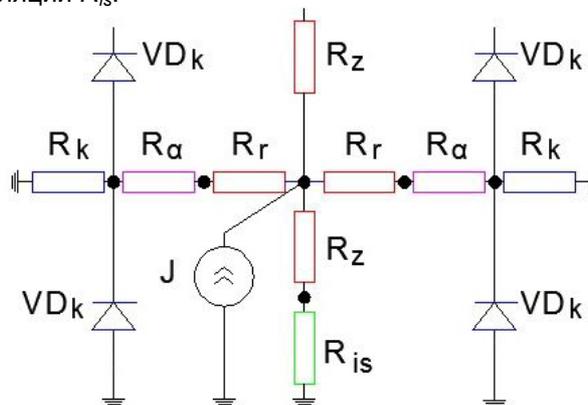


Рис. 1. Структура секции схемы замещения обмотки сухого трансформатора с одним концентром

Расчетные формулы для определения величин тепловых сопротивлений приведены в [1].

*Параметрический генератор матрицы соединений* представляет собой программный код во встроенной в Excel системе программирования Visual Basic for Excel, который по рассчитанным параметрам электрической схемы замещения тепловой цепи автоматически формирует матрицы **A**, **T** и **N**.

Алгоритм параметрической генерации состоит в последовательной нумерации элементов и узлов схемы замещения. Первыми нумеруются сопротивления схемы замещения, вторыми – источники тока, третьими – источники ЭДС.

Для хранения номеров элементов и узлов схемы замещения созданы два вектора-строки:

1)  $P_{vet}$  – вектор-строка номеров элементов (ветвей) схемы замещения;

2)  $Q_{uzl}$  – вектор-строка номеров узлов схемы замещения.

В зависимости от количества концентров  $n$  и количества расчетных секций  $m$ , номера  $N$  ветвей схемы замещения определяются с помощью формул арифметической прогрессии:

$$N_{(R1)} = 3n + 4i + j (6n + 3);$$

$$N_{(R2)} = 7n + 2i + j (6n + 3);$$

$$N_{(R\alpha)} = 3n + 4i + j (6n + 3) - 1;$$

$$N_{(Rk)} = 4n + 2i + j (3n + 2),$$

где  $i \in [1, n]$ ;  $j \in [1, m]$ .

Аналогично с помощью формул арифметической прогрессии определяются номера узлов схемы замещения.

Результатом параметрической генерации цепной модели тепловых процессов в фольговых обмотках является таблица, представленная на рис. 2.

Рис. 2. Фрагмент матрицы соединений в среде Excel

В процессоре библиотеки происходит формирование и решение системы уравнений (4), а также расчет вектора искомых значений потенциалов схемы замещения, которые соответствуют превышениям температуры в узлах тепловой цепи.

Постпроцессор выводит кривую распределения температуры в рассматриваемых плоскостях, а также в табличном виде представляет значения температур в узлах схемы замещения. В частности, на рис. 3 приведена кривая распределения температуры на поверхности обмотки НН трансформатора ТСЛ-630/0,4, полученная с помощью библиотеки ECLib.

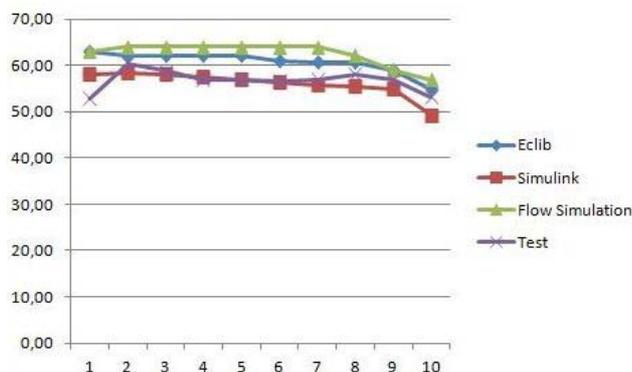


Рис. 3. Кривая распределения температуры на поверхности обмотки НН трансформатора ТСЛ-630/0,4

Аналогичные результаты были получены путем прямого построения электрической схемы замещения в подсистеме Simulink [1] (рис. 3).

Для верификации полученных результатов была решена задача теплового расчета обмотки НН трансформатора типа ТСЛ в полевой постановке средствами пакета Flow Simulation (рис. 4) и проведены испытания физической модели в испытательной лаборатории ЗАО «Трансформер» (рис. 5). Для сравнения кривые распределения температуры на поверхности обмотки НН, полученные в этих экспериментах, приведены на рис. 3.

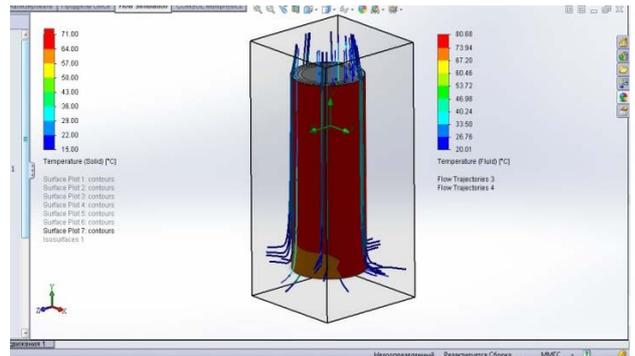


Рис. 4. Результаты решения задачи теплового расчета обмотки из ленты в полевой постановке средствами Solidworks: Flow simulation 2012

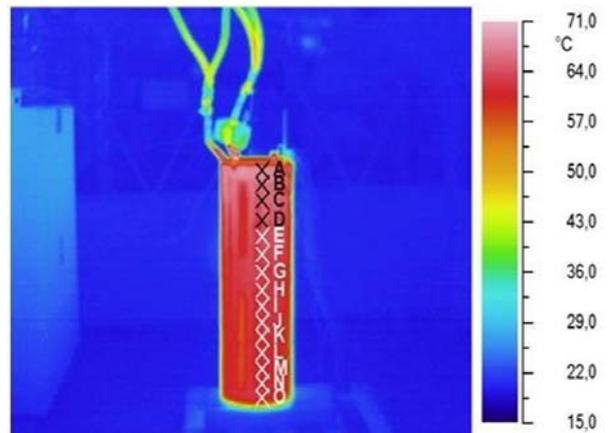


Рис. 5. Термограмма теплового состояния обмотки НН ТСЛ-630/0,4 (испытания физической модели в испытательной лаборатории ЗАО «Трансформер», г. Подольск)

### Заключение

Моделирование теплового состояния обмоток из ленты с помощью электрических схем замещения дает удовлетворительные результаты.

Прямое построение электрических схем замещения в подсистеме Simulink является процессом трудоемким и не может применяться в системах оптимизации.

Библиотека моделирования электрических цепей Eclib решает задачи снижения тру-

доемкости вычислений путем автоматизации процессов построения схемы замещения и успешно может применяться в подсистемах оптимизации.

Расхождение в результатах, полученных разными методами (рис. 3), не превышает 15 %. Расхождение результатов, полученных с использованием библиотеки ECLib и пакета Flow Simulation, не превышает 8 %. Расхождение с результатами эксперимента может быть объяснено неточностью постановки эксперимента.

#### Список литературы

1. Стулов А.В., Тихонов А.И. Тепловой расчет обмоток сухих трансформаторов и токоограничивающих реакторов с использованием электрических схем замещения // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 6. – С. 40–43.
2. Стулов А.В., Тихонов А.И. Исследование тепловой модели обмоток силовых трансформаторов на основе электрической схемы замещения // Состояние и перспективы развития электротехнологии: сб. ст. XVII Междунар. науч.-техн. конф. (Бенардосовские чтения). – Иваново, 2013. – С. 172–175.
3. Корнев И.А., Тихонов А.И. Разработка библиотеки моделирования электрических цепей: материалы регион. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых «Энергия - 2012». Т. 2 / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2012. – С. 192–196.
4. Тихонов А.И., Корнев И.А. Свидетельство на программный продукт «Библиотека численного моделирования электрических цепей». Заявка № 2012660143, приоритет от 22.11.2012, Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9.01.2013.
5. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – Т. 1. – 536 с.

Стулов Алексей Вадимович,  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант,  
e-mail: alxstl@mail.ru

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

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

6. Тихонов А.И., Иванов А.В. Проектирование и производство токоограничивающих реакторов из алюминиевой ленты / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2010. – 116 с.

#### References

1. Stulov, A.V., Tikhonov, A.I. Teplovoj raschet obmotok sukhikh transformatorov i tokoogranichivayushchikh reaktorov s ispol'zovaniem elektricheskikh skhem zameshcheniya [Winding heat design of dry-type transformers and current-limiting reactors based on equivalent electrical circuits]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 6, pp. 40–43.
2. Stulov, A.V., Tikhonov, A.I. Issledovanie teplovoj modeli obmotok silovykh transformatorov na osnove elektricheskoy skhemy zameshcheniya [Study of heat model of power transformer windings based on equivalent electrical circuits]. *Sbornik statey XVII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektrotekhnologii» (Benardosovskie chteniya)* [Collected works of the XVIIth international scientific and technical conference «Status and development prospects of electrical technologies»]. Ivanovo, 2013, pp. 172–175.
3. Kornev, I.A., Tikhonov, A.I. Razrabotka biblioteki modelirovaniya elektricheskikh tsepey [Developing an electrical circuit simulation library]. *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. 2, pp. 192–196.
4. Tikhonov, A.I., Kornev, I.A. *Svidetel'stvo na programmnyy produkt «Biblioteka chislennogo modelirovaniya elektricheskikh tsepey»* [Software product certificate “Library of numerical modeling of electrical circuits”, no. 2012660143, 2012.
5. Neyman, L.R., Demirchan, K.S. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theory of electrical engineering]. Leningrad, Energoatomizdat, Leningradskoe otdelenie, 1981, vol. 1. 536 p.
6. Tikhonov, A.I., Ivanov, A.V. *Proektirovanie i proizvodstvo tokoogranichivayushchikh reaktorov iz alyuminievoy lenty* [Design and production of current-limiting aluminium tape reactors]. Ivanovo, 2010. 116 p.