

УДК 621.316.433

## Система автоматизированного проектирования токоограничивающего реактора из алюминиевой ленты

А.И. Тихонов, Г.В. Попов, доктора техн. наук, А.В. Иванов, асп.

Рассмотрена структура и принципы построения математического обеспечения САПР реактора из алюминиевой ленты, в том числе главный принцип построения – компонентная интеграция модулей. Получено удовлетворительное совпадение результатов поверочных расчетов с экспериментом.

*Ключевые слова:* САПР, токоограничивающие реакторы, обмотки из алюминиевой ленты, математическое моделирование.

## Computer-Aided Design System of Current Limiting Reactor from Aluminium Ribbon

A.I. Tikhonov, Doctor of Engineering, G.V. Popov, Doctor of Engineering, A.V. Ivanov, Post Graduate Student

The structure and the principles of software modelling of the CAD reactor from aluminium ribbon are considered. The major principle of construction is the componental integration of modules. The satisfying coincidence of testing calculations results with the experiment is received.

*Key words:* CAD, current limiting reactor, lapping of an aluminium ribbon, mathematical modelling.

В аварийных режимах токи короткого замыкания (КЗ), как правило, достигают высоких значений, при которых процесс отключения электрических установок связан со значительными трудностями. Токи КЗ вызывают электродинамические усилия и термические перегревы, приводящие к повреждениям оборудования. Для его защиты в целях ограничения тока применяется *токоограничивающий реактор*. Второй функцией реактора является поддержание в момент КЗ необходимого уровня напряжения для неповрежденных электроустановок.

Благодаря линейным вольт-амперным характеристикам и простой конструкции наибольшее распространение получили сухие реакторы без стали. Наиболее распространенными типами реакторов в отечественной промышленности являются бетонные реакторы и реакторы сборной конструкции. Они изготавливаются из кабельного проводника. Их недостатком является низкая динамическая стойкость. В настоящее время широкое применение получил проводник из алюминиевой ленты, обладающий большей динамической стойкостью и более технологичный с точки зрения изготовления обмоток.

Как отмечалось в [1, 2], главная проблема при расчете реакторов из алюминиевой ленты (РАЛ) состоит в учете явно выраженного эффекта вытеснения тока, приводящего к росту добавочных потерь и перегреву обмоток по торцам (рис. 1). Для расчета РАЛ здесь использована методика, основанная на построении электрической схемы замещения обмотки, разбитой на индуктивно связанные расчетные секции. Матрица индуктивностей формируется с помощью конечно-элементной модели магнитного поля. Это позволяет рассчитать распределение тока  $I_c$  по секциям с номерами  $n_c$  по высоте ленты в разных концентраторах обмотки (рис. 2).

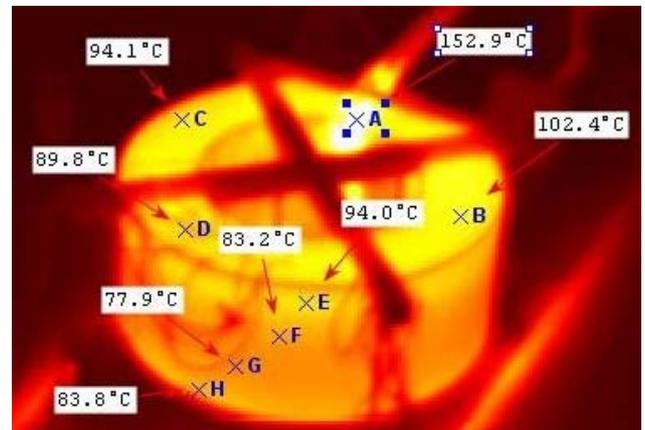


Рис. 1. Картина нагрева обмотки реактора, полученная с помощью тепловизора

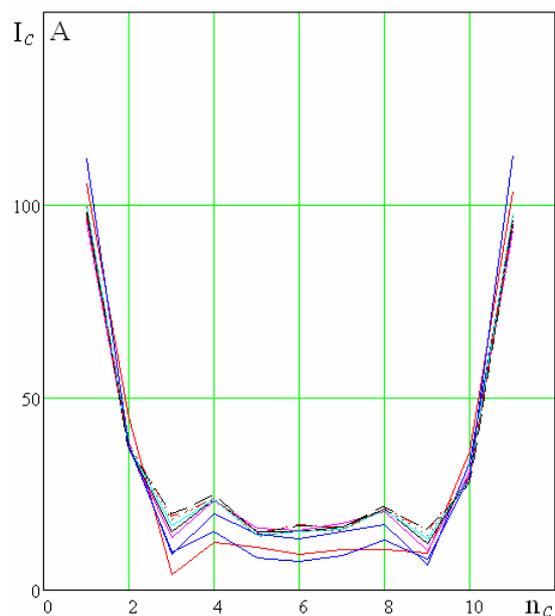


Рис. 2. Распределение тока по секциям по высоте ленты в разных концентраторах обмотки

Данная методика была положена в основу математического обеспечения САПР РАЛ. Структурная схема расчетной подсистемы представлена на рис. 3.

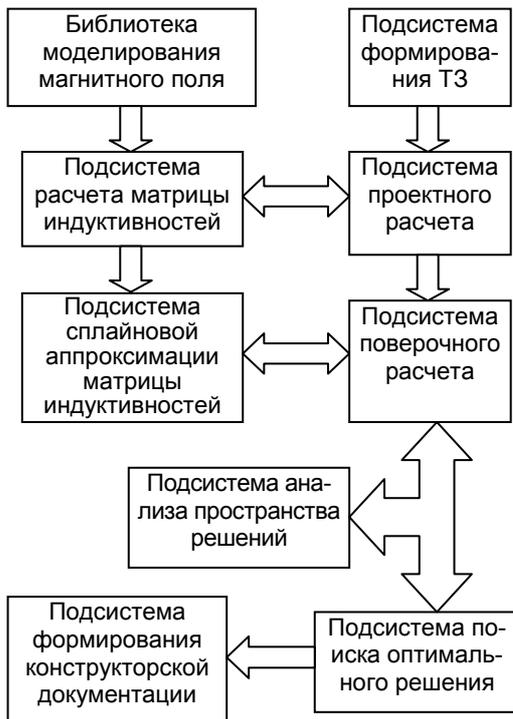


Рис. 3. Структура САПР РАЛ

Управление в САПР РАЛ реализовано на базе системы Excel пакета MS Office.

В подсистеме проектного расчета заложен алгоритм, позволяющий рассчитать на основе приближенных формул (или задать на основе аналогов) размеры реактора, сечение ленты, количество охлаждающих каналов, осуществить первичную раскладку витков.

Подсистемы, требующие более сложных математических функций, реализованы в среде математического процессора MatLab, связанного с управляющей программой посредством интерфейса ExcelLink.

Подсистема поверочного расчета помимо информации о конструкции реактора использует результаты расчета магнитного поля. Так как данная подсистема вызывается многократно в процессе оптимизации, то для расчета магнитного поля нерационально использовать библиотеку конечно-элементного моделирования, как это предлагалось в [1, 2]. Поэтому в САПР РАЛ реализованы две дополнительные подсистемы, с помощью которых формируются зависимости  $\vec{B}_{ij}(I_j, R_i, R_j, X_{ij})$  и  $L_{ij}(R_i, R_j, X_{ij})$ , где  $\vec{B}_{ij}$  – индукция магнитного поля, созданного током  $I_j$   $j$ -го контура радиусом  $R_j$  в точках расположения  $i$ -го контура радиусом  $R_i$ ;  $X_{ij}$  – расстояние между центрами контуров;  $L_{ij}$  – взаимная индуктивность двух соосных контуров. Так как аналитические формулы дают лишь приближенный результат, то для формирования данных зависимостей использо-

вана библиотека конечно-элементного моделирования магнитного поля [3].

Эти зависимости строятся в ходе серии численных расчетов магнитного поля по методике, описанной в [1, 2]. При этом варьируются радиусы магнитосвязанных контуров и расстояния между ними. Результаты численного эксперимента аппроксимируются многомерными сплайнами, поставляемыми математическим пакетом MatLab (рис. 4).

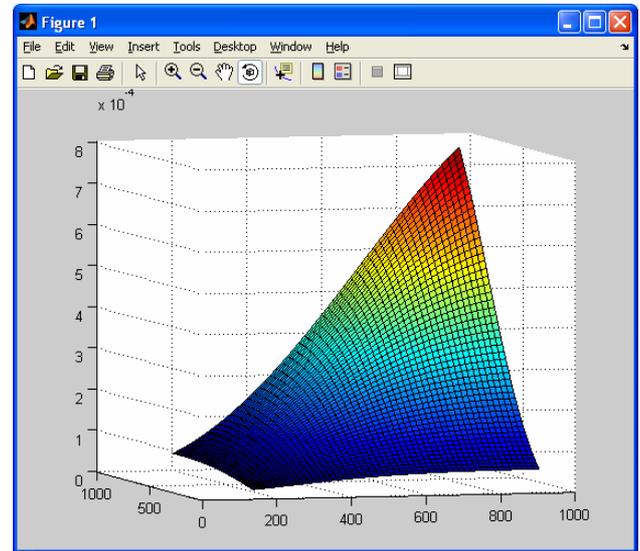


Рис. 4. Визуализация в среде MatLab зависимости  $L(R_1, R_2, X)$  при  $X = \text{const}$

Для расчета индуктивности реактора в соответствии с методикой, изложенной в [1, 2], каждая катушка реактора разбивается на расчетные секции. Строится схема замещения, которая рассчитывается методом контурных токов. Система уравнений имеет вид

$$[i] = [Z]^{-1} \cdot [\dot{U}], \quad (1)$$

где  $[Z]$  – квадратная матрица полных сопротивлений, элементы которой рассчитываются с использованием зависимости  $L_{ij}(R_i, R_j, X_{ij})$  для известных размеров реактора;  $[i]$  – вектор контурных токов;  $[\dot{U}]$  – вектор напряжений.

Индуктивность обмотки реактора рассчитывается из условия

$$L = \frac{\text{Im}(\dot{U} / i)}{2\pi f}, \quad (2)$$

где  $i$  – ток обмотки, рассчитанный после решения системы уравнений (1);  $\dot{U}$  – приложенное расчетное напряжение;  $f$  – частота сети.

Полученное значение индуктивности обмотки реактора учитывает неравномерность распределения плотности тока по высоте ленты (рис. 2). Полученные при решении системы уравнений (1) значения токов в расчетных секциях используются в уточненном расчете механических усилий и

в тепловом расчете реактора с учетом неравномерности распределения тепловыделений.

Расчет механических усилий, действующих на каждый элемент  $dl_i$   $i$ -й расчетной секции, осуществляется по формуле

$$d\vec{F}_i = I_i \left[ dl_i \times \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \vec{B}_j \right], \quad (3)$$

где  $\vec{B}_j$  – индукция магнитного поля, созданного током  $j$ -го контура в точках расположения  $i$ -го контура. Значение тока  $j$ -го контура определяется при решении системы уравнений (1) с учетом эффекта вытеснения (определяется по сплайнам  $\vec{B}_{ij}(I_j, R_j, X_{ij})$ );  $N$  – количество контуров.

Тепловой расчет осуществляется двумя способами. При работе подсистемы оптимизации используется инженерная методика теплового расчета сухих трансформаторов, изложенная в РД16 472-88 и переработанная для теплового расчета РАЛ. Данная методика позволяет рассчитывать среднее превышение температуры концентров и превышение температуры наиболее нагретых точек концентров над температурой окружающей среды.

Оптимизация конструкции реактора осуществляется в двух вложенных циклах, организованных средствами MatLab. Внутренний цикл осуществляет направленный поиск оптимального решения из заданной стартовой точки с использованием квазиградиентного метода Дэвидона-Флетчера-Пауэлла. Во внешнем цикле, служащем для поиска глобального экстремума целевой функции, реализуется случайный поиск стартовых точек для направленного поиска во внутреннем цикле.

В качестве функции цели процесса оптимизации используется вес обмотки спроектированного реактора. Поиск осуществляется при следующих функциональных ограничениях:

$$0,99L_H \leq L \leq 1,01L_H,$$

$$t_{\max} \leq [t], \quad (4)$$

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma].$$

Здесь  $L_H$  – заданная по техническому заданию величина индуктивности обмотки реактора;  $t_{\max}, \sigma_{\max}$  – полученные подсистемой поверочного расчета максимальные значения температуры и механических напряжений;  $[t], [\sigma]$  – допустимые значения температуры и механических напряжений.

В качестве варьируемых параметров используются: число витков обмотки, толщина алюминиевой ленты, осевая длина обмотки реактора,

внутренний диаметр обмотки, количество концентров, ширина канала между концентриями.

После оптимизации выполняется уточненный тепловой расчет. Для этого может быть использована любая система моделирования теплового поля, например ANSYS или Cosmos (рис. 5).

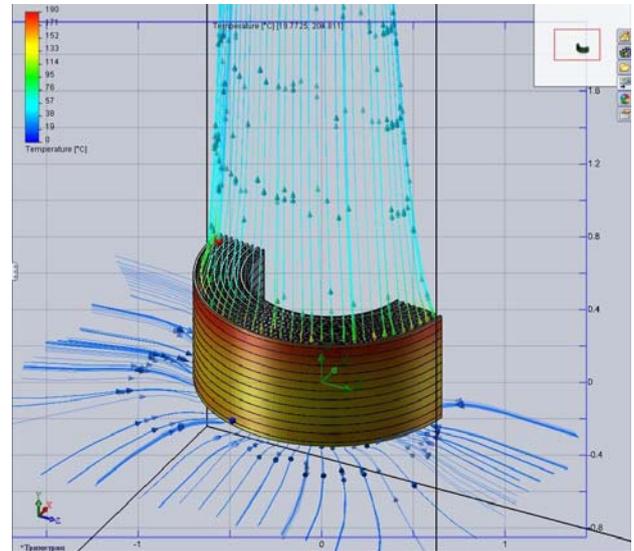


Рис. 5. Результаты уточненного теплового расчета обмотки реактора

Подготовка конструкторской документации осуществляется с использованием пакета MS Office. Для разработки комплекта чертежей также может быть использована одна из известных систем конструирования, например SolidWorks, AutoCad или Компас.

Предлагаемая система проектирования была использована при проектировании опытных образцов токоограничивающих РАЛ. Точность поверочных расчетов была оценена при испытании опытного образца реактора (рис. 1). Получено удовлетворительное для технических задач совпадение результатов, что свидетельствует об адекватности разработанного математического обеспечения.

#### Список литературы

1. Тихонов А.И., Иванов А.В. Использование библиотеки моделирования магнитного поля при расчете реактора из алюминиевой ленты // Вестник ИГЭУ. – 2009. – Вып. 3. – С. 25–28.
2. Тихонов А.И., Иванов А.В. Расчет и производство токоограничивающих реакторов из алюминиевой ленты / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2010.
3. Тихонов А.И., Казаков Ю.Б. Программирование численного эксперимента с использованием конечно-элементной модели магнитного поля в объектах электромеханики / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008.

*Тихонов Андрей Ильич,*  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, доцент кафедры физики,  
телефон (4932) 26-99-27,  
e-mail: admin@fizika.ispu.ru

*Попов Геннадий Васильевич,*  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности,  
телефон (4932) 26-99-39,  
e-mail: popov@bid.ispu.ru

*Иванов Александр Валерьевич,*  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант кафедры безопасности жизнедеятельности,  
телефон (4932) 26-99-39,  
e-mail: e-mail: bid@ispu.ru