

Выводы

1. Предложена эффективная система управления для режима боксования колесных пар подвижного состава, базирующаяся на усовершенствованной схеме широтно-импульсного регулирования тока тяговых электродвигателей постоянного тока.

2. Разработана имитационная модель, позволяющая исследовать электромагнитные и электромеханические процессы при различных режимах работы электропоезда, в том числе и в режиме боксования.

3. Проведенное моделирование подтвердило возможность создания и реализации эффективной антибоксовочной системы для подвижного состава железных дорог постоянного тока, а также основные полученные аналитические соотношения для данной системы.

Перечень ссылок

1. Басов Г. Г. Развитие электричного моторвагонного рухомого складу / Г. Г. Басов, С. І. Яцько. –

Запропонована та досліджена ефективна протибоксовочна система для рухомого складу залізних доріг з тяговими електродвигунами постійного струму. В статті розроблено модель для дослідження перехідних режимів роботи електродвигунів постійного струму послідовного збудження при їх послідовному з'єднанні. Наведено результати моделювання електромеханічних процесів, які виникають в режимі боксування колесних пар рухомого складу залізних доріг.

The effective anti-skidding system for rolling stock of railways with the traction direct-current motors is offered and investigated. In the article the model for the investigation of the transient state of the direct current motor of series excitation for the series connected motors is presented. The results of electromechanical processes modeling happened at skidding of wheel pairs of railway rolling stock are given.

УДК 621.316.93:519.876.5

А. Р. Лучко, Т. В. Попова

Имитационное моделирование электромагнитных процессов в магнитосвязанных электрических цепях

Рассмотрены известные подходы к имитационному моделированию электромагнитных процессов в устройствах, содержащих электрические и магнитные цепи. Разработаны структурные схемы, пользовательские блоки и имитационные модели для расчета магнитосвязанных электрических цепей, с помощью которых рассчитаны электромагнитные процессы в однофазном двухобмоточном трансформаторе и управляемом подмагничиванием реакторе.

Введение

В последние годы значительно возрос научный интерес к моделированию магнитосвязанных электрических систем (силовых трансформаторов, управляемых реакторов и др.) на основе электрических схем их замещения [1–3]. Создание таких моделей предназначено для анализа в магнитосвязанных электрических цепях электромагнитных процессов, возникающих в рабочих и аварийных режимах.

Для достоверного представления магнитосвязанных электрических цепей исследователь стремится

© А. Р. Лучко, Т. В. Попова 2009 р.

Харьків : Алекст+, 2005. – 248 с.

2. Преобразовательные полупроводниковые устройства подвижного состава / Ю. М. Иньков, Н. А. Ротанов, В. П. Феоктистов, О. Г. Чаусов – М. : Транспорт, 1982. – 263 с.
3. Андриенко П. Д. Исследование динамики серийного электродвигателя с различными импульсными схемами регулирования / П. Д. Андриенко, А. О. Каплиенко, С. И. Шило, И. Ю. Немудрый // Электротехника та електроенергетика. – 2007. – № 1. – С. 4–8.
4. Акимов Л. В., Долбня В. Т., Клепиков В. Б., Пирожок А. В. Синтез упрощенных структур двухмассовых электроприводов с нелинейной нагрузкой // Под общей редакцией В. Б. Клепикова. – Харьков : НТУ «ХПИ» ; Запорожье : ЗНТУ, 2002. – 160 с.

Поступила в редакцию 24.11.08 г.

После доработки 18.12.08 г.

в создаваемой модели наиболее полно учесть особенности объекта, что вызывает на практике усложнение модели. Однако, при этом исследователь сталкивается с ограничениями в существующих методах анализа и возможностях вычислительной техники, что, в свою очередь, требует по возможности упростить модель [1].

Удачным компромиссным выходом при выполнении этих требований представляется использование теории цепей, методы расчета которой достаточно хорошо разработаны [4]. Совместное решение урав-

нений для электрической и магнитной цепей позволяет рассчитывать динамические процессы в схемах с разветвленными структурами электрической и магнитной цепей. Кроме этого, уравнения магнитной цепи позволяют учесть поток рассеяния, который является одним из основных факторов, влияющих на электромагнитные процессы в магнитосвязанных электрических системах.

Анализ публикаций

Решение задач расчета электромагнитных процессов в магнитосвязанных электрических цепях возможно на основе прикладных пакетов компьютерного моделирования, которые дают возможность исключить непосредственную запись дифференциальных уравнений или составление детализированных структурных схем [5]. При этом для расчета электромагнитной системы составляются электрические и магнитные цепи в обычном, принятом в электротехнике, виде.

Библиотеки пользовательских блоков таких пакетов, как: VisSim, OrCAD, MBTY, Simulink, NAP и др. [6–8], – имеют большой объем, однако в них отсутствуют пользовательские блоки, позволяющие наглядно моделировать разветвленные магнитосвязанные электрические цепи. Программа NAP широко используется для моделирования магнитосвязанных цепей, но в ней нет возможности и средств визуализации моделей. В работе [2] показано, что моделирование динамических процессов в магнитосвязанных цепях, содержащих большое количество нелинейных элементов (более 50), не может быть выполнено в системе Simulink. Однако, в относительно простых цепях такое моделирование возможно и весьма удобно, что и доказывалось данной публикацией.

Целью работы является на основе одновременного использования теории магнитных и электрических цепей и применения системы Simulink разработать расчетные структурные схемы и пользовательские блоки, которые позволят имитировать электромагнитные процессы в основных элементах электромагнитных устройств: обмотках, участках магнитной системы, каналах рассеяния, а также на основе разработанных блоков создать имитационные модели трансформатора и управляемого реактора и выполнить с помощью них расчет электромагнитных процессов в этих устройствах.

Теоретический анализ связи магнитных цепей с электрическими цепями

Существует два возможных способа представления эквивалентными электрическими схемами замещения магнитосвязанных электрических цепей: во-первых, через источник магнитодвижущей силы (МДС), который в эквивалентной схеме замещения магнитной цепи представляется в виде источника ЭДС (рис. 1, в), и, во-вторых, через источник магнитного потока, который представлен в виде источника тока в схеме замещения (рис. 1, з).

Рассмотрим уравнения характеризующие схемы на рис. 1. Для схем на рис. 1, а, б справедливо следующее уравнение равновесия ЭДС:

$$e(t) = i \cdot R + W \cdot \frac{d\Phi}{dt} = i \cdot R + L \cdot \frac{di}{dt}, \quad (1)$$

Откуда получим

$$\Phi = \frac{1}{W} \cdot \int (e(t) - i \cdot R) dt = \frac{1}{W} \int e_s(t) dt, \quad (2)$$

где $e(t)$ – значение источника ЭДС, i – электрический ток цепи, R – суммарное активное сопротивление цепи источника ЭДС и обмотки, W – число витков обмотки, Φ – магнитный поток, L – индуктивность, $e_s(t) = [e(t) - iR]$ – ЭДС самоиндукции магнитной цепи.

Для схемы на рис. 1, в рассчитаем магнитный поток:

$$\Phi = \frac{F}{R_m} = \frac{i \cdot W}{R_m}, \quad (3)$$

где R_m – магнитное сопротивление.

$$U_m = \Phi \cdot R_m = i \cdot W. \quad (4)$$

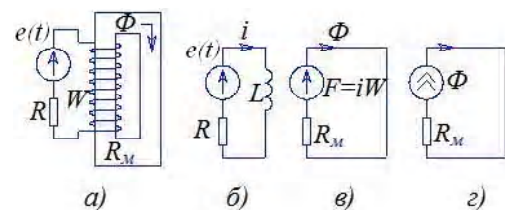


Рис. 1. Магнитоэлектрические схемы и их электрические схемы замещения: а) электрическая цепь с источником ЭДС $e(t)$, активным сопротивлением R и магнитной цепью в виде замкнутого сердечника (с магнитным сопротивлением R_m и обмоткой, число витков которой равно W); б) электрическая цепь, содержащая магнитную цепь, представленную в виде индуктивности L ; в) электрическая схема замещения магнитной цепи с использованием источника магнитодвижущих сил F ; з) электрическая схема замещения магнитной цепи с использованием источника магнитного потока Φ

Имитация магнитосвязанной электрической цепи с помощью источника МДС

Магнитосвязанную электрическую цепь на рис. 1, а, используя уравнения (1) и (3), можно представить в виде структурной расчетной схемы на рис. 2. Электрический ток в цепи источника ЭДС $e(t)$ измеряется измерителем тока ИТ1; измеренное значение тока умножается на количество витков W ; полученное значение $i \cdot W$ определяет величину магнитного напряжения на управляемом источнике напряжения $U1$ в магнитной цепи. Значение протекающего в магнитной цепи магнитного потока, описываемое уравнением (3), контролируется с помощью измерителя тока ИТ2; для вычисления значения потокосцепления вычисленное значение магнитного потока еще раз перемножается на число витков W . Для нахождения ЭДС $e_s(t)$ самоиндукции полученное значение потокосцепления дифференцируется в соответствии с уравнением (1). Та-

ким образом, полученное значение ЭДС $e_s(t)$ вычисляется на управляемом источнике напряжения U_2 (который рассчитывает падение напряжения на магнитной цепи, поступающее в электрическую цепь).

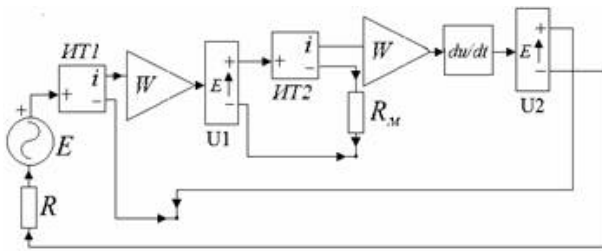


Рис. 2. Структурная схема для расчета магнитосвязанной электрической цепи с помощью источника МДС

Имитация магнитосвязанной электрической схемы с помощью источника магнитного потока

Другой способ представления магнитосвязанной электрической цепи на рис. 1, а, основанный на уравнениях (1), (2) и (4), показан структурной схемой на рис. 3. В данном случае связь электрической и магнитной цепей осуществляется с помощью источника магнитного потока, измеренного блоком ИН1, где в соответствии с уравнением (2) значение напряжения на магнитной цепи интегрируется и делится на число витков W .

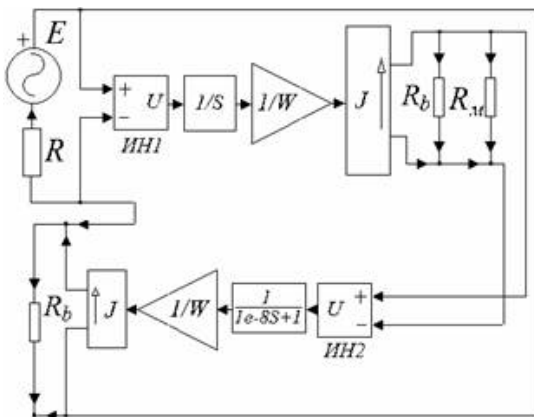


Рис. 3. Структурная схема для расчета магнитосвязанной электрической цепи с помощью источника магнитного потока

Далее полученное значение потока поступает с помощью управляемого источника тока J в магнитную цепь R_m . Параллельно источнику тока также подключен согласующий резистор R_b . Его включение в схему обусловлено тем, что большое число блоков SimPoverSystem выполнено на базе источников тока. При последовательном соединении таких блоков источники тока оказываются включенными последовательно, что недопустимо. Согласующий резистор позволяет включать такие блоки последовательно. Сопротивление резистора R_b должно выбираться дос-

точно большим, что необходимо для обеспечения его минимального влияния на характеристики цепи. Кроме этого, необходимо учесть, что при моделировании немагнитных стержней значения их магнитных сопротивлений достаточно велики, поэтому значение R_b должно быть примерно в 1000 раз больше максимального магнитного сопротивления моделируемой магнитосвязанной цепи.

Значение падения магнитного напряжения, измеренное измерителем напряжения ИН2 на зажимах источника магнитного потока, представляет собой произведение тока i в электрической цепи на число витков W . Затем значение падения магнитного напряжения делится на число витков W ; определенное таким образом значение тока с помощью управляемого источника тока J подается в электрическую цепь.

Незначительным недостатком такой модели является то, что расчетный контур, образованный измерителем магнитного напряжения ИН2 и управляемым источником тока J , является безынерционным (рис. 3). Это связано с тем, что обычно стандартный программный комплекс выполняет расчет таких моделей с использованием итерационных процедур, что несколько снижает скорость расчета. Существование замкнутых безынерционных расчетных контуров препятствует возможности расчета модели в ускоренном режиме (Acceleration mode). Чтобы разорвать безынерционный контур, предлагается включить в линию между измерителем напряжения ИН2 и источником тока J фильтр с малой постоянной времени. При этом следует учесть, что постоянная времени этого фильтра должна выбираться таким образом, чтобы динамические свойства модели изменялись незначительно. Согласно [5] в расчетах значение постоянной времени фильтра выбирается обычно в пределах $(10^{-8}-10^{-6})$ с.

При математическом моделировании магнитосвязанных электрических цепей, содержащих магнитную сталь с крутоизменяющейся кривой намагничивания, предпочтительным является использование структурной расчетной схемы с источником магнитного потока (рис. 3). За счет использования интегрирующих звеньев предложенная схема обладает значительно большей устойчивостью вычислительных процессов по сравнению с структурной расчетной схемой через источник МДС (рис. 2), в котором из-за наличия дифференцирующего звена устойчивость расчетов значительно ниже. Как известно, точность расчетов интегралов от функций, заданных численно, значительно выше, чем точность расчетов производных этих функций. Особенно, эта разность заметна для крутоизменяющихся функций, какой является магнитная характеристика холоднокатаной анизотропной стали. В системе NAP существуют источники ЭДС, управляемые производной. Однако, это не является его преимуществом, так, как показано выше, использование управления по производной резко снижает устойчивость динамической модели. При использовании же источников токов, управляемых интегралом от напряжения, с использованием метода решения дифференциальных уравнений odes (stiff/NDF) с переменным шагом (рис. 4) достигается достаточная скорость вычислений и хорошая сходимость.



Рис. 4. Рекомендуемые параметры при математическом моделировании магнитосвязанных электрических цепей

Пользовательские блоки для имитационной модели

С помощью источника магнитного потока (рис. 3) нами был создан электротехнический блок «обмотка» (рис. 5, а), в котором вход *вх1* и выход *вых1* являются входом и выходом электрической цепи, а вход *вх2* и выход *вых2* – входом и выходом магнитной цепи. Такой блок достаточно точно отражает физическую сущность обмотки как объекта, связывающего электрическую и магнитную цепи. Описывается блок соответствующими параметрами обмотки – сопротивлением обмотки и числом витков (рис. 5, б).

Чаще всего участки магнитной цепи характеризуются геометрическими размерами: длиной участка *L* и площадью поперечного сечения *S*. Создадим пользовательские электротехнические блоки участков магнитной цепи двух типов: в виде линейного – для воздуха и нелинейного – для электротехнической стали. Электротехнический блок, моделирующий участок магнитной цепи, представляет собой САД-модель, на вход которой поступает через участок магнитной цепи сигнал, пропорциональный магнитному потоку, а выходной сигнал модели пропорционален магнитному напряжению на участке магнитной цепи.

Возможно также создание блока, где входным сигналом будет магнитное напряжение на участке магнитной цепи, а выходным – протекающий магнитный поток через участок магнитной цепи. Однако, как отмечено выше, из-за наличия дифференцирующего звена использование таких блоков в магнитных цепях с крутой кривой намагничивания приводит к снижению сходимости результатов расчета математической модели и, как следствие, к значительному увеличению времени обработки данных. Поэтому использование такого блока нецелесообразно.

На рис. 6, а представлена структура блока воздушного участка магнитной цепи, который реализует закон Ома для участка магнитной цепи. Магнитный поток через этот участок измеряется измерителем тока ИТ. Затем сигнал, соответствующий магнитному потоку

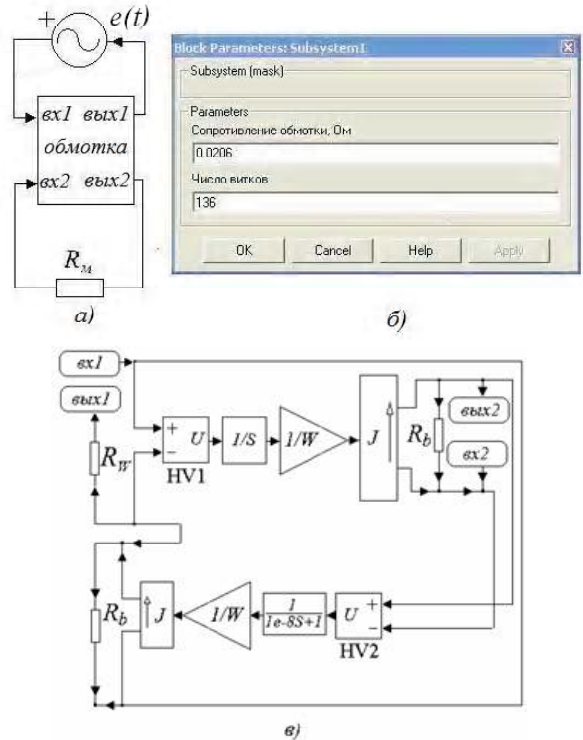


Рис. 5. Блок связи электрической и магнитной цепей: а) графическое представление блока «обмотка»; б) описание параметров блока; в) структура блока

ку Φ , проходит через фильтр (с малой постоянной времени) и после этого умножается на значение магнитного сопротивления участка R_m в соответствии с уравнением (5). Полученный в результате сигнал, соответствующий магнитному напряжению U_m на участке, подается на управляемый источник напряжения E . Таким образом реализуется пропорциональная зависимость между магнитным потоком и магнитным напряжением на участке магнитной цепи:

$$U_m = \Phi \cdot R_m(\Phi) = H\left(\frac{\Phi}{S}\right) \cdot L. \tag{6}$$

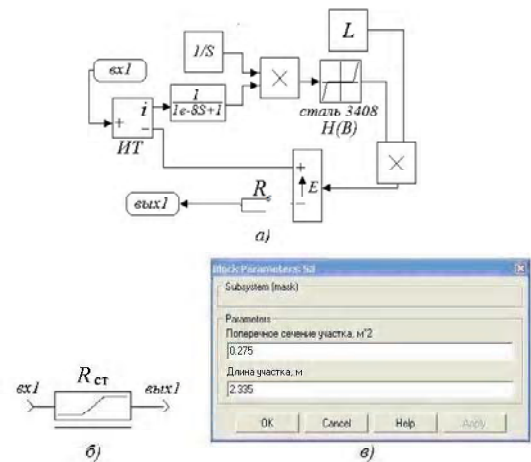


Рис. 7. Блок моделирования нелинейного магнитного сопротивления: а) внутренняя структура блока; б) графическое представление блока; в) описание параметров блока

Имитационная модель трансформатора

Покажем подход к построению имитационной модели трансформатора (на примере бронестержневого двухобмоточного трансформатора ОМТ-1000/35, показанного на рис. 8, а). Магнитный поток Φ_{W2} обмотки W_2 низкого напряжения, равный первообразной ЭДС $e_s(t)$ самоиндукции на обмотке, проходит через нелинейный магнитный участок (стержень из шихтованной электротехнической стали) и, частично, по воздушному участку между обмоткой и стержнем. Составляющей магнитного потока, проходящей в канале между обмоткой W_2 и стержнем, пренебрегаем в виду ее малости (хотя учет ее возможен схемой на рис. 8, б путем включения параллельно магнитному сопротивлению стержня $R_{ст}$ магнитного сопротивления канала, образованного между стержнем и обмоткой R_{01}).

Магнитное сопротивление стержня $R_{ст}$ определяется через его длину и активное сечение. Магнитный поток Φ_{W1} обмотки W_1 высокого напряжения, равный первообразной ЭДС $e_s(t)$ самоиндукции на обмотке, проходит по стержню магнитной системы трансформатора и по приведенному каналу, образованному между обмоткой и стержнем (эффективному сечению обмотки W_1 на рис. 8, а). Длина пути потока по воздуху принимается равной длине силовой линии (и с достаточной на практике точностью может быть принята равной высоте окна). Сечение потока и длина силовой линии части потока, проходящего по воздуху, определяют собой значения магнитного сопротивления R_0 и напряжения короткого замыкания трансформатора в электрической схеме замещения магнитной системы трансформатора.

Анализ структуры электротехнического блока трансформатора «ОМТ-1000/35» (рис. 8, в) показывает наличие в этом блоке элементов электрической схемы замещения магнитной системы (из рис. 8, б). В окончательном виде электрическая схема подключения трансформатора «ОМТ-1000/35» может быть представлена в виде, показанном на рис. 8, г.

Результаты расчета тока I обмотки W_1 и магнитной индукции в стали магнитной системы B при включении трансформатора на холостом ходу представлены на рис. 9.

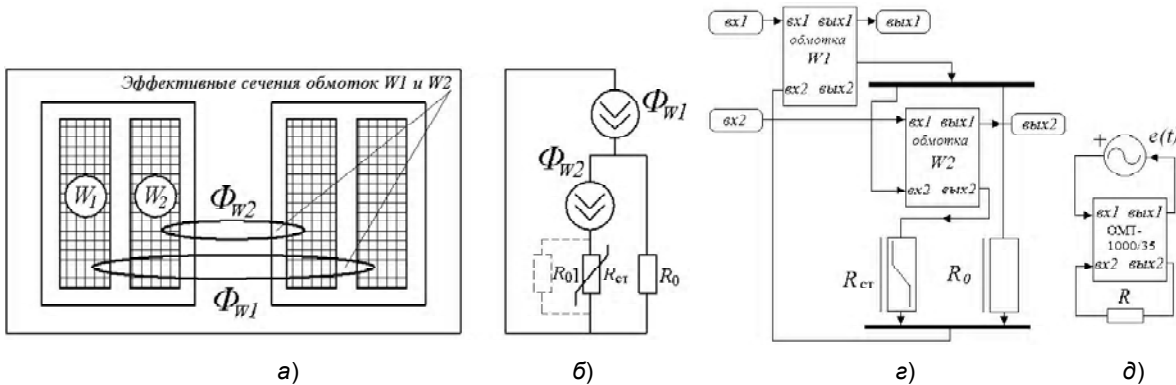


Рис. 8. Имитационное моделирование бронестержневого трансформатора ОМТ-1000/35: а) магнитная система трансформатора; б) электрическая схема замещения магнитной системы трансформатора; в) структура электротехнического блока «ОМТ-1000/35»; г) электрическая схема включения трансформатора ОМТ-1000/35

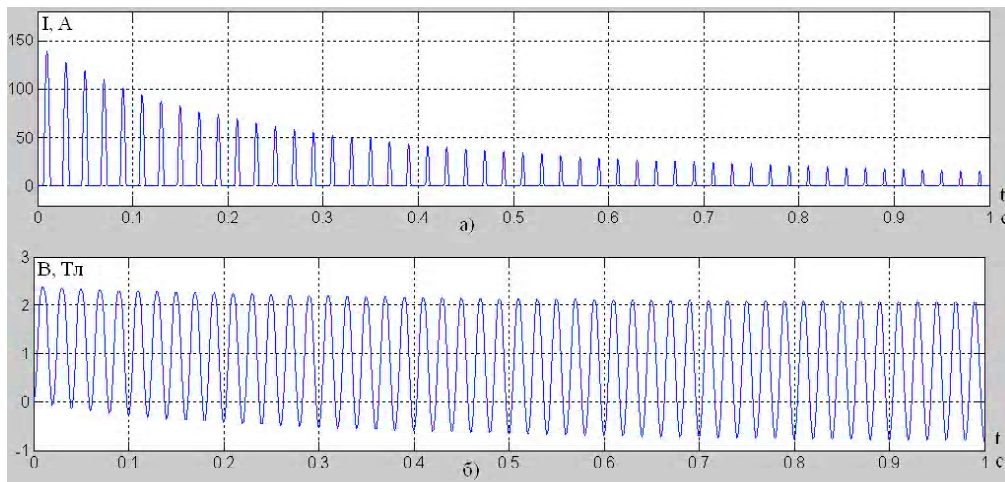


Рис. 9. Расчетные значения тока обмотки W_1 (а) и магнитной индукции в стали (б) при включении трансформатора на холостом ходу, полученные с помощью имитационного моделирования из схем на рис. 8

Имитационная модель управляемого подмагничиванием реактора

Имитационное моделирование управляемых реакторов рассмотрим на примере реактора с сетевой обмоткой, намотанной на оба стержня управления. Сечение стержневой зоны реактора показано на рис. 10. Для моделирования представим обмотки реактора токовыми слоями бесконечно малой толщины (согласно рис. 9). Стержневая зона расположена между плоскостями с бесконечно большой магнитной проводимостью. Расстояние между плоскостями определяется окном магнитной системы. Площади между токовыми слоями сетевой обмотки и обмоток управления S_5 (рис.9), между токовыми слоями обмоток управления и стержнями магнитной системы S_3, S_4 , площади эффективных сечений стержней S_1, S_2 и высота окна магнитной системы определяют значения магнитных сопротивлений.

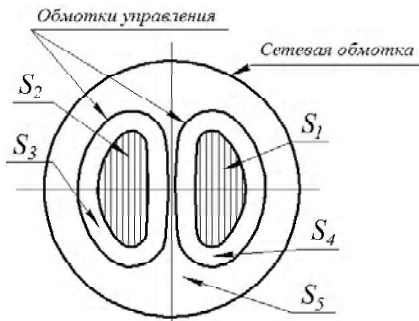


Рис. 10. Сечение стержневой зоны реактора

Структура электротехнического пользовательского блока реактора приведена на рис. 10, и похожа по своему виду на электрическую схему замещения магнитной системы управляемого подмагничиванием реактора.

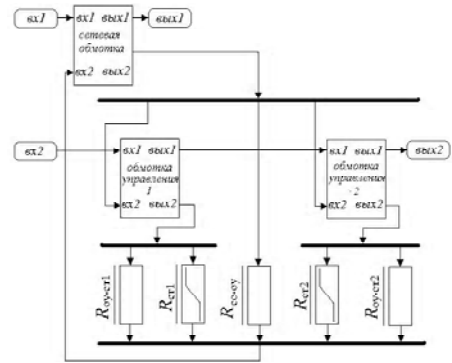


Рис. 11. Структура электротехнического пользовательского блока реактора РОДУ-60000/500

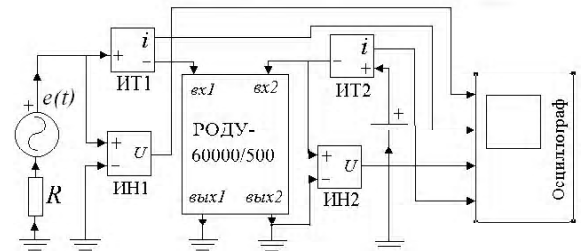


Рис. 12. Электрическая схема подключения управляемого реактора РОДУ-60000/500

Электрическая схема подключения управляемого реактора представлена на рис. 12. Переменное напряжение подается на сетевую обмотку, а напряжение управления – от источника постоянного напряжения на обмотку управления. Результаты расчета представлены на рис. 13, где I_c, U_c, I_y, U_y – ток и напряжение сетевой обмотки, ток и напряжение обмотки управления соответственно.

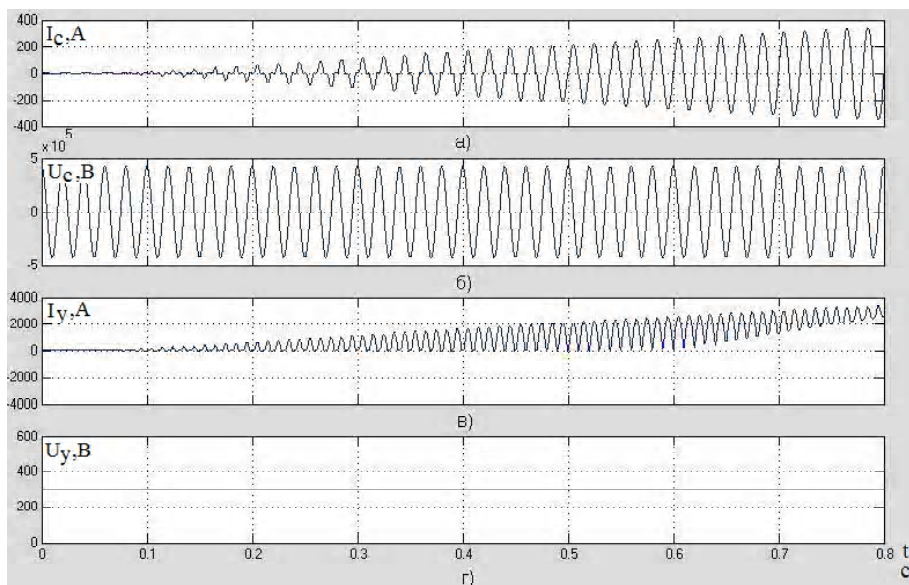


Рис. 13. Осциллограммы токов и напряжений, полученные в результате расчета электрической схемы на рис. 11: а) ток в сетевой обмотке реактора; б) напряжение на сетевой обмотке реактора; в) ток в обмотке управления реактора; г) напряжение обмотки управления реактора

Результаты полученных расчетов совпадают (с отклонением менее $\pm 0,5\%$) с данными расчета, полученными по программе ВЭИ NRAST [1] и результатами непосредственного решения системы дифференциальных уравнений, записанных для электрической и магнитной цепей трансформатора или реактора. Однако, в отличие от программы ВЭИ NRAST, моделирование с помощью разработанных пользовательских блоков позволяет исследовать режимные характеристики энергосистемы с включенным управляемым реактором (в том числе – при учете особенностей его системы управления).

Выводы

1. Разработаны пользовательские блоки, которые позволяют моделировать динамические процессы в магнитосвязанных электрических цепях любой конфигурации, трансформаторах и автотрансформаторах, управляемых и неуправляемых реакторах и др.

2. Показано, что имитация связи электрической и магнитной цепи с помощью источника тока, управляемого интегралом от напряжения на магнитном сопротивлении, при моделировании элементов с крутой магнитной характеристикой, дает лучшую сходимость по сравнению с использованием источников напряжения, управляемых производной магнитного потока.

3. Использование фильтра с малой постоянной времени при моделировании связи электрической и магнитной цепи с помощью источника тока позволяет исключить безынерционный расчетный контур, образованный двумя источниками тока. Это, в свою очередь, позволяет перейти от решения системы нелинейных уравнений к простому интегрированию, и, как следствие, упростить процедуры и повысить быстродействие расчета.

4. Результаты моделирования подтверждают достоверность разработанных имитационных компьютерных моделей двухобмоточного трансформатора и управляемого реактора, а также пользовательских блоков и расчетных структурных схем, применяющихся в этих имитационных моделях.

Перечень ссылок

1. Евдокунин Г. А. Методы расчета на ЭВМ электромагнитных переходных процессов в ферромагнитных устройствах с произвольной структурой магнитной и электрической цепей / Г. А. Евдокунин, Е. В. Коршунов, Э. А. Сепинг, Я. Я. Ярвик // Электротехника. – 1991. – № 2. – С. 56–59.
2. Тиховод С. М. Системы компьютерного моделирования динамических процессов в нелинейных магнитоэлектрических цепях / Сергей Тиховод // Техническая электродинамика. – 2008. – № 3. – С. 16–23.
3. Дмитриев М. В. Моделирование переходных процессов в электрической сети, содержащей трансформаторы, при учете конфигурации их магнитной системы [Электронный ресурс] / М. В. Дмитриев, Г. А. Евдокунин. – 308 kb. – Систем. требования: Pentium ; 32 Mb RAM ; Windows 95, 98, 2000, XP ; MS Word 97-2000. – Режим доступа : <http://www.zeu.ru>.
4. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники : Электрические цепи : Учебник для электротехн., энерг., приборостроит. спец. вузов / Л. А. Бессонов. – 8-е изд. – М. : Высшая школа, 1984. – 559 с. ил. (в пер.) – 35000 экз.
5. Лучко А. Р. Принципы математического моделирования динамических процессов в управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторах в SimPoverSystem (Matlab) / А. Р. Лучко, М. Ебадиан // Электричество. – 2008. – № 3. – С. 70–75. – ISSN 0013-5380.
6. Дьяконов В. П. MATLAB 6/6.1/6.5+Simulink 4/5. Основы применения – М. : СОЛОН-Пресс, 2004. – 768 с. – ISBN 5-93455-177-9.
7. Разевиг В. Д. Система проектирования OrCAD 9.2 / В. Д. Разевиг. – М. : Солон-Р, 2001. – 519 с. – ISBN 5-93455-037-3.
8. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MatLab 6.0 : Учебное пособие / С. Г. Герман-Галкин. – СПб. : КОРОНА принт, 2001. – 320 с. ил. 3000 экз. – ISBN 978-5-79-31-0471-5.

Поступила в редакцию 19.05.08 г.

После доработки 19.11.08 г.

Розглянуто відомі підходи до імітаційного моделювання електромагнітних процесів у пристроях що складаються із електричних та магнітних кіл. Розроблені структурні схеми, блоки елементів кіл та імітаційні моделі для розрахунку магнітозв'язаних електричних кіл, за допомогою яких розраховані електромагнітні процеси в однофазному двобмотковому трансформаторі та керованому підмагнічуванням реакторі.

The method of mathematical modeling of dynamic modes in devices with complex structure of electric and magnetic circuits connection such as the controlled magnetic shunting reactors is offered. The structure of the developed user blocks for the magnetization circuit sections and the block of communication magnetic and electric circuits is submitted. For the demonstration of the method the mathematical models of two-winding transformer and controlled reactor are presented.