

засобів. Причому збільшення кількості вимикачів неминуче призводить до збільшення кількості технічних засобів, які необхідні для вирішення завдання. З наведеного робимо висновок, що в першому випадку для вирішення цього завдання достатньо обладнання, яке встановлене на підстанціях.

Отже, перша перевага запропонованого способу полягає в тому, що сумарна вартість встановлюваного устаткування менша. Інші переваги з'являються завдяки тому, що для кожного типу вимикачів проектують, а потім виготовляють та експлуатують власну систему сигналізації. Ці системи конструктивно відрізняються одна від іншої. Все це потребує істотних затрат матеріальних ресурсів. Для першого способу вказані витрати виявляються зайвими, що забезпечує економію як матеріальних ресурсів, так і часу, необхідного для організації контролю роботи високовольтних вимикачів.

1. Абдурахманов А.М., Мисриханов М.Ш., Неклепаев Б.Н., Шутков А.В. Еще раз о составляющих модели отказа выключателя // Электрические станции. – 2005. – № 4. – С. 41–48. 2. Владимировский Б.М., Горстко А.Б., Ерусалимский Я.М. Математика. Общий курс. – СПб.: Лань, 2002. – 960 с. 3. Стогний Б.С., Гримуд Г.И., Мольков А.Н., Сопель М.Ф., Павловский В.В. Некоторые тенденции развития АСУ технологическими процессами на подстанциях энергосистем // Техническая электродинамика. – 2003. – № 5. – С.44–49. 4. Стогний Б.С., Кириленко О.В., Яндутьский О.С. Проблемы та шляхи підвищення ефективності систем інформаційного забезпечення а електроенергетиці // Техническая электродинамика. – 2001. – № 1. – С. 3–10. 5. Стогний Б.С., Сопель М.Ф. Информационно-диагностический комплекс "Регіна" // Новини енергетики. – 2000. – № 10. – С. 44–47. 6. Кириленко А.В., Левитский В.Г. Основы автоматизации процессов расчета электротехнических схем. – К.: Наук. думка, 2004. – 242 с. 7. Кириленко А.В., Левитский В.Г., Яндутьский А.С. Интеллектуальная программная среда решения задач диспетчерского управления в электроэнергетике // Техн. электродинамика. – НАН України, Темат. вип., ч. 1. – К., 1999. – С. 17–21.

УДК 621.3.01:519.875.5

С.М. Тиховод

Запорожский национальный технический университет

## КОМПЛЕКС КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В НЕЛИНЕЙНЫХ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

© Тиховод С.М., 2009

**Розроблено програмний комплекс Colo для комп'ютерного моделювання динамічних процесів у нелінійних магнітоелектричних схемах заміщення електротехнічних пристроїв, що містять котушки індуктивності і трансформатори.**

**Program complex Colo for computer modeling dynamic processes in nonlinear magnetoelectric equivalent circuits of the electrotechnical devices containing the coils of inductance and transformers is developed.**

**Постановка проблеми.** В настоящее время этап моделирования является обязательным при разработке большинства электротехнических устройств. Если устройство содержит катушки индуктивности со стальными магнитопроводами или трансформаторы, то часто возникает необходимость исследования динамических электромагнитных процессов в магнитной системе и связанной с ней электрической цепи. Моделирование динамических электромагнитных полей в трансформаторах, включенных в сложные электротехнические устройства, пока не представляется возможным. Поэтому динамические процессы в электромагнитных устройствах моделируют методами магнито-

электрических цепей [1–4]. Для этого широко используют ряд готовых программных комплексов. Наиболее известными из них является NAR, PSpice, OrCad, Simulink. Однако, усложнение конструкций трансформаторов и схем, в которые они включаются, большая детализация конструктивных особенностей в моделях данных изделий, учет нелинейности и возросшие требования к точности моделирования динамических процессов, привели к тому, что указанные системы моделирования не могут выполнять сложные задачи или стали работать на пределе своих возможностей. Поэтому разработка усовершенствованной компьютерной системы моделирования динамических процессов во взаимозависимых нелинейных электрических и магнитных цепях является актуальной задачей.

Рассмотрим три известных метода построения магнитоэлектрических схем замещения.

**Метод, использующий явный магнитный поток.** Рассмотрим участок магнитопровода, на котором имеется катушка с током (рис. 1, а).

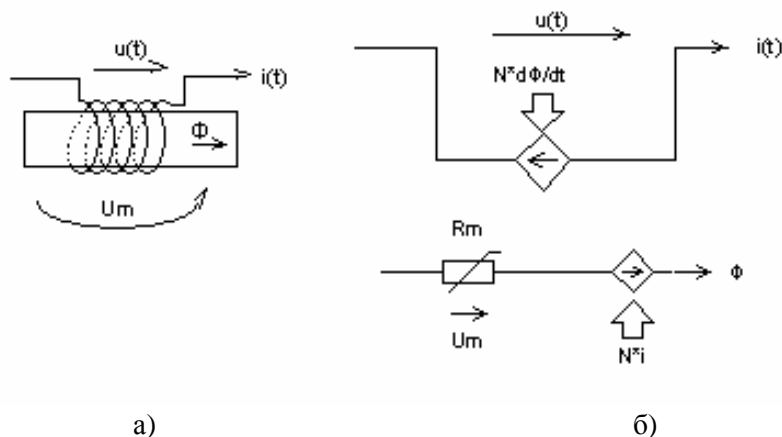


Рис. 1. Участок магнитопровода (а) и его магнитоэлектрическая схема замещения (б)

Ток, протекающий по катушке, создает согласно закону Ампера в магнитной ветви магнитодвижущую силу (МДС), равную  $Ni$ , где  $N$  – число витков катушки,  $i$  – сила тока в катушке. Магнитный поток, пересекающий витки катушки, создает в катушке ЭДС индукции, равную  $N \cdot d\Phi/dt$ . Таким образом, электрические и магнитные ветви связаны между собой, что учитывается введением в схему замещения управляемых источников напряжения. Если магнитная ветвь линейна, то участок магнитопровода имеет магнитное сопротивление

$$R = \frac{l}{S \mu_0 \mu}, \quad (1)$$

где  $l$  – длина магнитной ветви,  $S$  – площадь поперечного сечения магнитной ветви,  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость материала магнитопровода. Если магнитная ветвь нелинейная, то магнитный поток  $\Phi$  зависит от магнитного напряжения  $U_m$  согласно кривой намагничивания стали. В некоторой рабочей точке  $(\Phi_1, U_{m1})$  нелинейную зависимость можно аппроксимировать прямой линией, касательной к вебер-амперной характеристике. Полученную прямую представим как нагрузочную характеристику активного линейного двухполюсника, имеющего эквивалентное сопротивление  $R_n$  и МДС  $E_n$ :

$$R_n = \left. \frac{dU_m}{d\Phi} \right|_{U_m = U_{m1}}; E_n = U_{m1} - \Phi_1 R_n. \quad (2)$$

Индекс “n” означает, что эти величины должны вычисляться для каждого произвольного n-го шага интегрирования. Магнитное сопротивление  $R_n$  схемы замещения можно легко вычислить, имея кривую намагничивания стали  $B(H)$  как:

$$R_n = \frac{l}{S} \frac{dH}{dB}. \quad (3)$$

Следовательно, нелинейное сопротивление  $R_m$  заменяется на последовательно включенные источник напряжения  $E_m$  и резистивный элемент  $R_d$ .

Магнитные потоки рассеяния учитывают включением линейных резистивных элементов в магнитную цепь. Значения линейных магнитных сопротивлений рассчитывают методами теории поля с помощью специализированных программных комплексов.

Таким образом, трансформатор, или другое электромагнитное устройство, включенное в электрическую цепь, можно представить единой схемой замещения. В такой схеме замещения имеются как ветви, по которым протекает электрический ток (электрические ветви), так и ветви, по которым протекает магнитный поток (магнитные ветви). Пример такого представления изложен в работе [1]. Поскольку электрические токи и магнитные потоки с точки зрения теории цепей равноценны, то токи и магнитные потоки в дальнейшем будут обозначаться символом “ $i$ ” (обобщенный ток) с индексом, определяющим номер ветви в схеме. Расчет переходных процессов в такой гибридной цепи может быть проведен как в обычной нелинейной электрической цепи с помощью законов Кирхгофа.

**Метод, использующий производную магнитного потока и дифференциальные магнитные сопротивления.** Недостатком метода 1 является то, что необходимо использовать в схеме замещения управляемые источники ЭДС, управляемые производной тока. Для этого используют дополнительные дифференцирующие цепочки, которые усложняют схему.

Для катушки с замкнутым ферромагнитным сердечником запишем согласно второму закону Кирхгофа для контура магнитопровода:

$$N \cdot i = U_m \quad (4)$$

Продифференцируем выражение (4):

$$N \frac{di}{dt} = \frac{dU_m}{dt} = \frac{dU_m}{d\Phi} \cdot \frac{d\Phi}{dt} = R_m^d \frac{d\Phi}{dt} \quad (5)$$

Выражение (5) можно интерпретировать так: в магнитной ветви с магнитным сопротивлением  $R_m^d$  и МДС  $N \frac{di}{dt}$  протекает производная магнитного потока  $\frac{d\Phi}{dt}$  (рис. 2). Обычно в электрической цепи присутствует некоторая индуктивность  $L$ . В таком случае отпадает необходимость в источнике, управляемом производной тока, так как можно использовать источник напряжения, управляемый напряжением на индуктивности  $L$ .

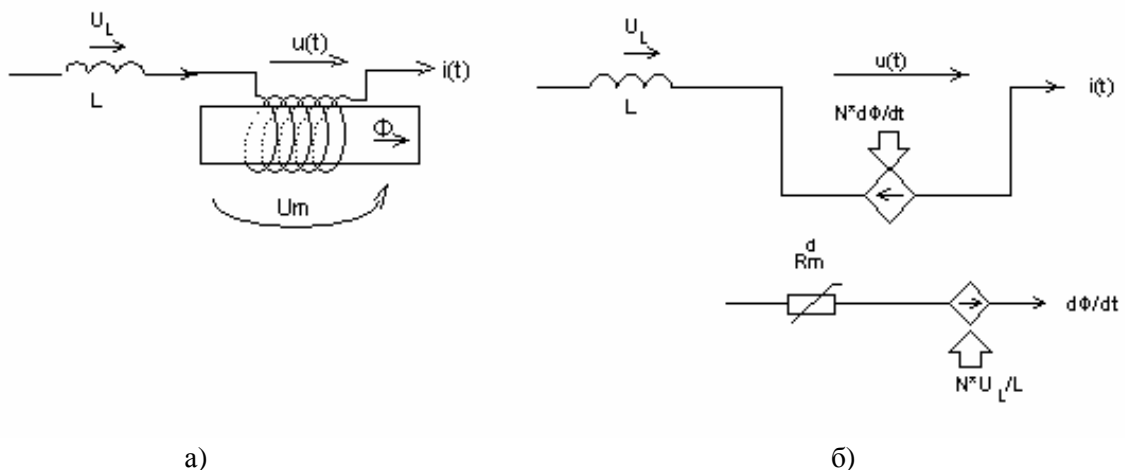


Рис. 2. Участок магнитопровода (а) и его магнитоэлектрическая схема замещения (б) с производными магнитного потока

**Метод, использующий производную магнитного потока и “магнитные” конденсаторы.** В работе [2] предложено использовать понятие магнитного тока смещения  $i^m = d\Phi / dt$  по аналогии

с электрическим током смещения плотностью  $dD/dt$ . Подобно электрическому току смещения, протекающему через емкостной элемент, магнитный ток смещения должен протекать через магнитный емкостной элемент  $C_m$ . Рассмотрим взаимодействующие электрическую и магнитную ветви магнитоэлектрической схемы замещения. Пусть как на рис. 2 в магнитной ветви с включенным конденсатором  $C_m$  протекает производная магнитного потока (см. рис. 3).

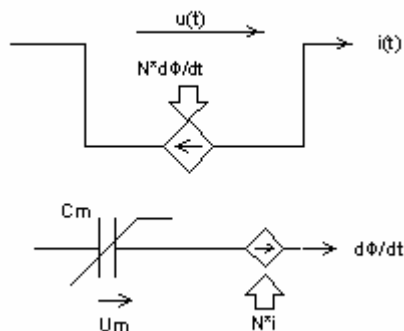


Рис. 3. Магнитоэлектрическая схема замещения с магнитным конденсатором

Тогда напряжение на магнитном конденсаторе, умноженное на емкость, равно:

$$u_m C_m = \int \frac{d\Phi}{dt} dt = \Phi. \quad (6)$$

Отсюда  $u_m = \Phi/C_m$ . Следовательно, емкость магнитного конденсатора равна обратной величине магнитного сопротивления  $C_m = 1/R_m$ .

В магнитную ветвь можно также вставлять резистивный элемент, который характеризует потери в стали [2]. Таким образом, получена компактная схема замещения, имеющая среди рассмотренных схем минимальное количество элементов.

**Программный комплекс Solo.** Для моделирования динамических процессов в магнитоэлектрических цепях в системе Matlab разработан программный комплекс Solo. Для ввода исходных данных вычерчивается схема магнитоэлектрической цепи, проставляются положительные направления токов, нумеруются все ветви и узлы. После этого в виде таблицы задаются все ветви (от узла №, к узлу №) с указанием их типа и значений элементов. Согласно введенным данным в программном комплексе автоматически строится дерево цепи и составляются уравнения согласно законам Кирхгофа в мгновенной форме [2]. В качестве переменных состояния выбираются токи индуктивностей, попавших в связи, и напряжения конденсаторов, попавших в дерево. При использовании метода 3 к переменным состояния относят также и магнитные потоки вместо напряжений на магнитных конденсаторах. К данным уравнениям присоединяются уравнения, определяющие управляемые источники напряжения и тока с указанием номеров управляющих ветвей, типа управления (управление током или напряжением) и коэффициентов управления. К системе уравнений присоединяются также уравнения численного метода, определяющие значения переменных состояния данного шага интегрирования по известным значениям переменных состояния нескольких предыдущих шагов. Одним из лучших численных методов интегрирования систем дифференциальных уравнений для задач указанного типа признан метод Гира. Поскольку кривая намагничивания электротехнической стали нелинейная, то эта характеристика вводится по точкам в виде массива. Для использования в программе значений в промежуточных точках применяется сплайн-интерполяция. На каждом шаге интегрирования по вычисленным значениям переменных состояния вычисляются значения зависимых переменных. Так как часть зависимых переменных токи и напряжения нелинейных элементов, то эти вычисления производятся с помощью итерационного цикла. Итерации заканчиваются, когда значения на смежных циклах отличаются меньше, чем заданная точность вычислений.

В программном комплексе предусмотрена возможность анализа магнитоэлектрических цепей всеми тремя методами. С точки зрения быстродействия, устойчивости и точности лучшим методом признан второй метод из рассмотренных в данной статье. С помощью этого метода успешно выполнялись расчеты динамических процессов в магнитоэлектрических цепях, содержащих до трехсот элементов.

Программный комплекс разработан по заказу Всеукраинского института трансформаторостроения (ВИТ). По желанию заказчика в комплекс введена поддержка дополнительных нелинейных элементов – диодов и тиристоров [4], а также управляемых источников напряжения и тока с коэффициентом управления, который является функцией любых напряжений и токов.

**Выводы.** Разработанный программный комплекс Solo позволяет выполнять моделирование динамических электромагнитных процессов в сложных электротехнических устройствах с помощью использования различных магнитоэлектрических схем замещения.

Лучшей магнитоэлектрической схемой замещения признана схема, использующая производную магнитного потока и дифференциальные магнитные сопротивления.

1. Тиховод С. М. Система компьютерного моделирования динамических процессов в нелинейных магнитоэлектрических цепях // *Технічна електродинаміка*. – 2008. – № 3. – С. 16–23. 2. Шакиров М.А. Магнитоэлектрические схемы замещения катушек индуктивности и трансформаторов // *Электричество*. – 2003. – № 11. – С. 34–45. 3. Шакиров М.А. Анализ неравномерности распределения магнитных нагрузок и потерь в трансформаторах на основе магнитоэлектрических схем замещения // *Электричество*. – 2005. – № 11. – С. 15–27. 4. Тиховод С.М., Афанасьева И.О., Корнус Т.М. Разработка компьютерной программы моделирования магнитоэлектрических цепей, содержащих тиристоры // *Технічна електродинаміка*. – 2009. – № 3.

УДК 621.316

І.П. Чайка

Вінницький національний технічний університет

## МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ РІЗНИХ ФАКТОРІВ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

© Чайка І.П., 2009

**Подано аналіз причин низької енергоефективності компенсації реактивної потужності (КРП) в електричних мережах за сучасних умов, результати дослідження впливу різних факторів на рівень компенсації і шляхи його підвищення.**

**The analysis of reasons reactive power compensation (CRP) low power efficiency in electric networks at modern time, results of research of different factors influencing on the compensation level and ways of its increase is given in article.**

**Постановка проблеми.** За останні роки з впровадженням ринкових відносин сформувалась невідповідність цін на реактивну енергію та засоби компенсації. Ціни на електроенергію контролюються державою (НКРЕ) і підвищуються повільніше, ніж ціни на засоби компенсації. У результаті склалася парадоксальна ситуація: найбільш ефективна енергозберігаюча технологія – компенсація реактивної потужності – при розрахунках, в кращому випадку, виявляється малоефективною, в гіршому – економічно недоцільною.