

УДК 621.3.01:519.876.5

С.М. ТИХОВОД, канд. техн. наук, И.О. АФАНАСЬЕВА, Т.М. КОРНУС (Запорожский нац. техн. ун-т)

Разработка компьютерной программы моделирования магнитоэлектрических цепей, содержащих тиристоры

Разработана система Colo компьютерного моделирования электромагнитных процессов в сложных нелинейных магнитоэлектрических цепях. В систему Colo введена поддержка моделирования силовых тиристоров.

Розроблено систему Colo комп'ютерного моделювання електромагнітних процесів в складних нелінійних магнітоелектричних колах. У систему Colo введено підтримку моделювання силових тиристорів.

Компьютерным моделированием электромагнитных процессов в электрических и электронных устройствах в настоящее время занимаются практически все разработчики электро- и радиотехнических устройств. Для этих целей существует множество программных продуктов различных фирм: PSpice, Micro-Cap, ElectronicsWorkBench, OrCAD, Simulink, NAP и др. Для моделирования электрических процессов в устройствах силовой электроники необходима поддержка моделирования тиристоров, и большинство указанных комплексов ее имеют. В системах моделирования Micro-Cap, ElectronicsWorkBench, OrCAD и некоторых других используется вычислительное ядро системы PSpice. В этой системе модели тиристоров содержатся в библиотеке thyrist.lib [3]. Рассмотрение этой библиотеки показывает, что модели тиристоров, как правило, составлены как подсхемы, содержащие два биполярных транзистора. Система PSpice имеет обширную библиотеку моделей транзисторов, построенных на основе представлений Эберса-Молла или Гумеля-Пуна [4]. В схемную модель транзистора входит до 13 линейных и нелинейных элементов, поэтому применение указанных комплексов для моделирования электромагнитных процессов в устройствах силовой электроники, содержащих значительное число (более шести) тиристоров, встречает ряд трудностей, в частности, трудность сходимости вычислительного процесса [2]. Система Simulink также поддерживает моделирование тиристоров [3]. В библиотеке SimPower System имеется две модели тиристора: Thyristor

(упрощенная модель) и Detailed Thyristor (уточненная модель) [9]. В первой игнорируется ряд важных параметров тиристора, и она не всегда может быть применена, вторая также не учитывает некоторые важные параметры тиристора, как, например, ток включения. При использовании системы Simulink для моделирования магнитоэлектрических цепей возникают ситуации расходимости вычислительного процесса, если схема содержит так называемые "алгебраические петли", которые возникают при использовании в цепи нескольких управляемых источников напряжения или тока, включенных так, что образуются обратные связи. При моделировании магнитоэлектрических цепей такие ситуации являются характерными. В работе [6] изложены принципы функционирования программного комплекса Colo, предназначенного для моделирования динамических процессов в сложных нелинейных магнитоэлектрических цепях, содержащих также и "алгебраические петли". Целью данной работы является разработка компромиссного аппарата поддержки моделирования силовых тиристоров в программном комплексе Colo. Компромиссность заключается в том, чтобы схемная модель была простой, но учитывался бы ряд практически важных параметров, влияющих на точность моделирования. С такой поддержкой разработанный программный комплекс может позволить моделирование электрических процессов в тиристорных устройствах силовой электроники, содержащих также и нелинейные электромагнитные элементы. Поэтому такое усовершенствование

программного комплекса Solo является актуальной работой.

Логическая модель тиристора. Будем рассматривать тиристор как резистивный элемент электрической цепи, который может изменять свое сопротивление R_T в зависимости от ряда условий. Поскольку такое представление не соответствует физике процессов в полупроводниковых структурах, необходимо сделать так, чтобы модель при этом сохранила логику работы тиристора и внешние характеристики с точностью, достаточной для практики, и соответствующие реальному прибору. Состояние тиристора в произвольный момент времени охарактеризуем параметром *Flag*, который может принимать целые значения от нуля до пяти.

Таким образом, тиристор представим как нелинейный резистивный элемент, который может изменять свое сопротивление как скачком, так и непрерывно согласно определенной логике. Электрические процессы, происходящие в тиристорной цепи, описываются системой дифференциально-алгебраических уравнений, составленных по законам Кирхгофа. Пример составления таких уравнений вручную приведен в работе [7]. В этой же работе при разработке частной модели тиристорного выпрямителя испытана предложенная модель тиристора, которая внедрена теперь в универсальную модель анализа динамических процессов в сложных нелинейных магнитоэлектрических цепях Solo [6]. Система дифференциально-алгебраических уравнений, составленная с помощью программы по законам Кирхгофа, интегрируется численными методами, и вычисления производятся при дискретном изменении времени с шагом h . На каждом шаге интегрирования производится оценка состояния всех тиристорov. При изменении состояния какого-нибудь тиристора его сопротивление вычисляется согласно предложенному алгоритму, и, соответственно, корректируются измененные параметры системы уравнений.

Опишем подробно логику работы тиристора в различных состояниях и условия его перехода из одного состояния в другое, так как это не было изложено в работе [7].

Состояние *Flag* = 0. Пусть тиристор находится в закрытом удерживаемом состоянии ($R_T = R_{off}$). На каждом шаге интегрирования выполняется проверка значения параметра *Flag* каждого тиристора. Если хотя бы один тиристор имеет значение параметра *Flag*=0, то управление передается подпрограмме *Fl_0*, блок-схема которой показана на рис. 1. При отрицательном токе I_T состояние тиристора не изменяется. При положительном токе производится проверка наличия импульса на управляющем электроде (рис. 1, блок 2). Если в данный момент времени положительное напряжение на управляющем электроде тиристора имеется ($impr > 0$), то тиристор переходит в открытое удерживаемое состояние (*Flag* = 1), и его сопротив-

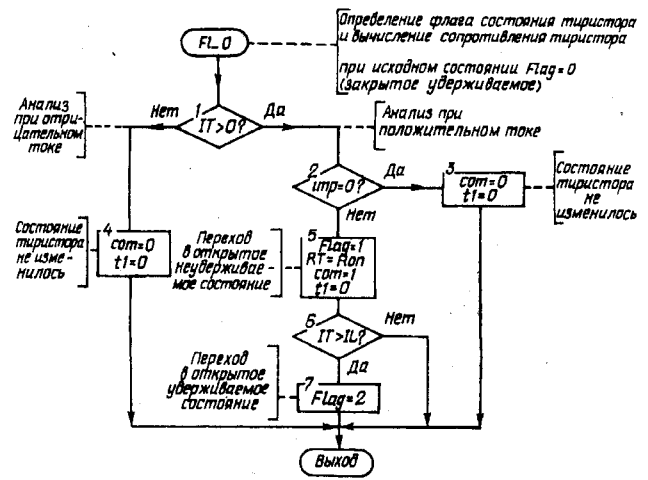


Рис. 1

ление изменяет значение на R_{on} . Мгновенное изменение любого параметра цепи рассматривается как коммутация, о чем сигнализирует датчик *com*, которому присваивается значение, равное единице. Сигнал коммутации означает, что многошаговый численный метод не может использовать решения, полученные на предыдущих шагах интегрирования. Если значение тока тиристора превышает значение тока включения I_L , то тиристор переходит в открытое удерживаемое состояние (рис. 1, блок 7) с параметром *Flag* = 2.

Состояние *Flag* = 1. Если какой-то тиристор имеет параметр *Flag* = 1, то управление передается подпрограмме *Fl_1*, блок-схема которой показана на рис. 2. Вначале проверяется знак тока I_T , протекающего через тиристор (рис. 2, блок 1). При отрицательном токе анализируется наличие спада тока (рис. 2, блок 2).

Если спада тока нет, то тиристор переходит в закрытое удерживаемое состояние (рис. 2, блок 4). Если спад тока есть, то анализируется скорость спада (рис. 2, блок 5). При малой скорости спада тиристор переходит в закрытое удерживаемое состояние (рис. 2, блок 6). При превышении скорости спада критического значения тиристор сохраняет свое проводящее состояние при отрицательном напряжении в течение времени обратного восстановления заряда [8]. Зависимость заряда обратного восстановления Q_{rr} и времени обратного восстановления t_{rr} от производной тока тиристора dI_T/dt для различных марок тиристорov дана в [8]. Согласно этому вычисляется максимальное значение тока обратного восстановления заряда I_{rrm} и время t_{rr} (рис. 2, блок 9), в течение которого ток тиристора не подчиняется закону Ома. Однако до достижения током обратного восстановления заряда значения I_{rrm} скорость спада тока сохраняет значение, которое было при прямом токе [3]. Поэтому пока $|I_T| < I_{rrm}$ будем считать тиристор, находящимся в открытом состоянии при отрицательном напряжении на нем ($U_{ak} < 0$) с параметром состояния *Flag* = 3. После достижения $|I_T| = I_{rrm}$ наступает

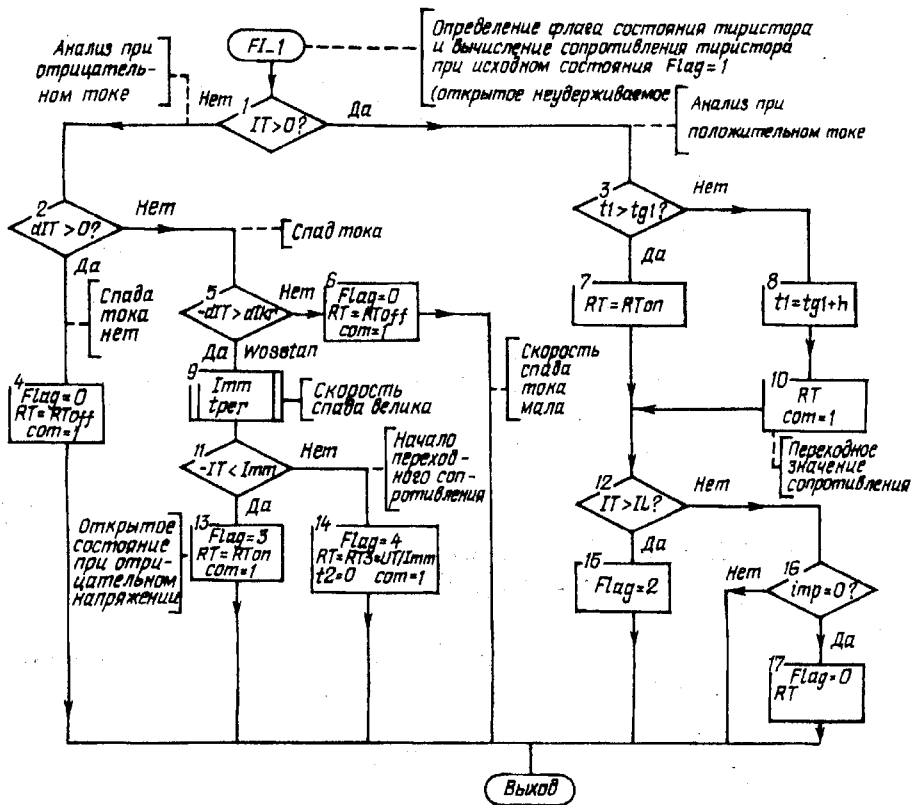


Рис. 2

переходное состояние $Flag=4$, в течение которого тиристор восстанавливает свои запирающие свойства. Сопротивление тиристора в начале этого состояния R_{T3} получим из закона Ома как отношение мгновенного напряжения на тиристоре к току I_{trm} (рис. 2, блок 14).

Если проверка знака тока тиристора (рис. 2, блок 1) показывает, что значение тока положительно, то тиристор переходит в открытое состояние, причем это происходит не мгновенно, а в течение времени включения тиристора t_{g1} . Будем при этом считать, что сопротивление тиристора изменяется по экспоненциальному закону от R_{off} до R_{on}

$$R_T(t_1) = A \cdot e^{at_1}, \quad (1)$$

где $t_1 = t - t_c$ — время, отсчитываемое от момента коммутации t_c . При $t_1 = 0$ имеем $R_T = R_{off}$, а при $t - t_c = t_{g1}$ получаем $R_T = R_{on}$.

Следовательно, при $t_1 = 0$ имеем $R_T(t_1) = R_{off}$; при $t_1 = t_{g1}$ получаем $R_T = R_{on} = R_{off} \cdot e^{at_{g1}}$, откуда $R_{off}/R_{on} = e^{-at_{g1}}$.

В результате закон изменения сопротивления тиристора при его открытии имеет вид

$$R_T(t_1) = R_{off} \exp \left[(t_1 / t_{g1}) \ln(R_{off} / R_{on}) \right]. \quad (2)$$

При открытии тиристора ведется учет текущего времени открытия t_1 . Это время на каждом шаге

интегрирования увеличивается на величину шага интегрирования h (рис. 2, блок 9). Пока время t_1 не достигло значения t_{g1} , сопротивление тиристора R_T на каждом шаге интегрирования вычисляется по формуле (2). После достижения времени t_1 значения t_{g1} сопротивление тиристора $R_T = R_{on}$.

Состояние $Flag=2$. Если какой-то тиристор имеет значение параметра $Flag=2$ (состояние открытое удерживаемое), то управление передается подпрограмме Fl_2 , блок-схема которой показана на рис. 3. Вначале проверяется знак тока I_T , протекающего через тиристор (рис. 3, блок 1). При отрицательном значении тока анализ выполняется аналогично тому, который выполняется при рассмотрении аналогичного состояния при $Flag=1$. При положительном значении тока тиристора I_T выполняется его сравнение со значением тока удержания I_H . Если $I_T > I_H$, то выполняется проверка окончания текущего времени t_1 включения тиристора (рис. 3, блок 3). При достижении t_1 значения времени включения тиристор переходит в открытое состояние; в противном случае вычисляется текущее значение переходного сопротивления R_T согласно выражению (2). Если $I_T < I_H$, то при наличии импульса на управляющем электроде тиристор переходит в состояние с $Flag=4$, а при его отсутствии тиристор закрывается (рис. 3, блок 4).

Состояние $Flag=3$. Управление передается подпрограмме Fl_3 , блок-схема которой показана на рис. 4. Открытое состояние тиристора при отрицательном напряжении U_{ak} продолжается до

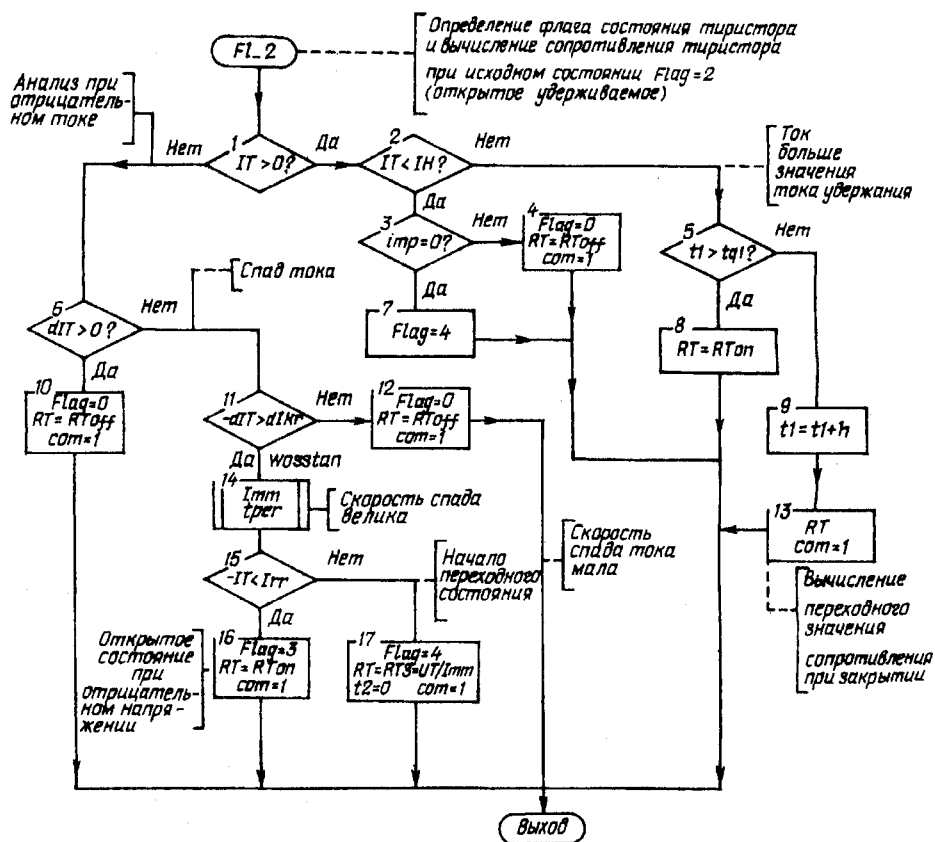


Рис. 3

тех пор, пока ток тиристора по модулю не достигнет значения I_{trr} , после чего тиристор переходит в состояние $Flag=4$. В этом случае сопротивление тиристора в начале этого состояния R_{T3} получим из закона Ома как отношение мгновенного напряжения на тиристоре к току I_{trr} (рис. 4, блок 3).

Состояние $Flag=4$. Управление передается подпрограмме Fl_4 , блок-схема которой показана на рис. 5. Текущее время в этом состоянии оценивается параметром t_2 , который изменяется от нуля до значения t_{per} около $(1,5-2)t_{rr}$ [8]. В течение этого периода тиристор восстанавливает запортое состояние, а сопротивление тиристора меняется от R_{T3} до R_{off} . Аппроксимируем изменение сопротивления тиристора в течение переходного режима экспонентой

$$R_T(t) = B e^{bt_2}, \quad (3)$$

где $t_2 = t - t_c$ — время переходного состояния; t_c — момент начала закрытия тиристора.

При $t_2 = 0$ $R_T = R_{T3}$, при $t_2 = t_{per}$ получаем $R_T = R_{off}$. Отсюда следует зависимость сопротивления тиристора от времени при его закрытии

$$R_T(t_2) = R_{T3} \exp \left[(t_2 / t_{per}) \ln(R_{off} / R_{T3}) \right], \quad (4)$$

где $t_{per} = 1.5t_{rr}$.

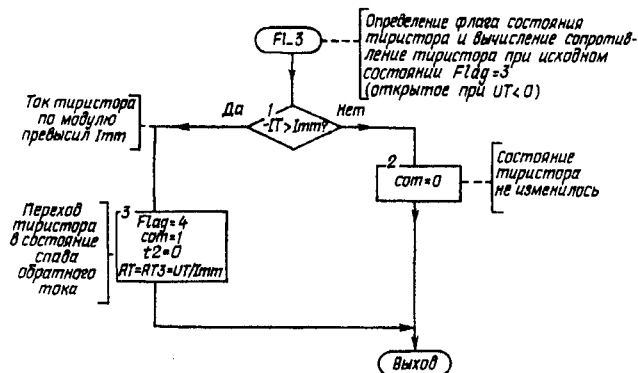


Рис. 4

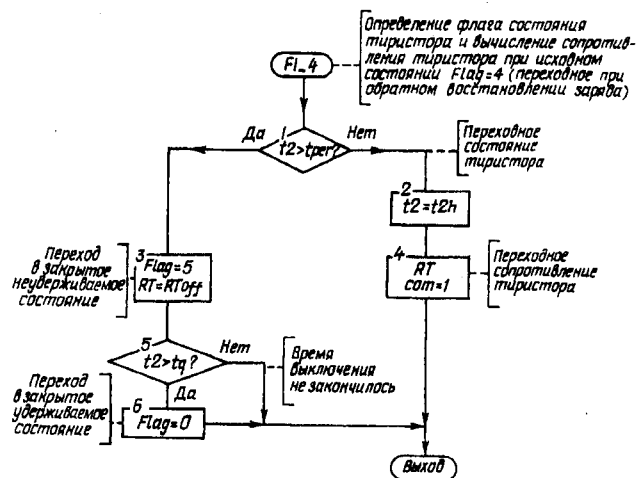


Рис. 5

Состояние $Flag=5$ (закрытое неудерживаемое). Управление передается подпрограмме Fl_5 , блок-схема которой показана на рис. 6. Тиристор имеет сопротивление закрытого состояния, но при подаче положительного напряжения $U_{ak} > 0$ тиристор может открыться и без подачи управляющего импульса. В этом состоянии тиристор находится в течение времени восстановления запирающих свойств t_q . Тиристор перейдет в закрытое удерживаемое состояние с параметром $Flag=0$, если за это время напряжение U_{ak} не станет положительным. В противном случае тиристор откроется и перейдет в состояние с $Flag=2$.

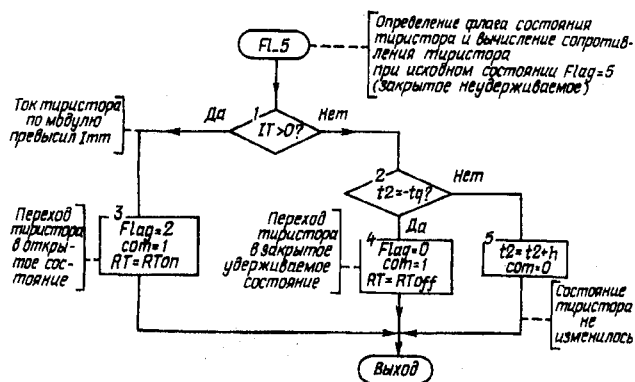


Рис. 6

Поскольку в исследуемой цепи тиристорov несколько, то параметр состояния $Flag$ представим вектором, число элементов которого равно числу тиристорov K_{vs} . Точно также значения сопротивлений всех тиристорov в текущий момент времени содержатся в векторе R_T .

Исходя из изложенного, разработан алгоритм и подпрограмма $FlagS$ оценки состояния всех тиристорov схемы на каждом текущем шаге интегрирования. Подпрограмма $FlagS0$ выполняет анализ состояния и, используя подпрограммы Fl_0 — Fl_5 , вычисляет сопротивление одного тиристора для произвольного момента времени.

При вводе данных цепи для расчета с помощью программы $Colo$ тиристоры идентифицируются порядковым номером. Этот номер задается по правилам нумерации тиристорov в устройствах преобразовательной техники. В программе порядок нумерации используется для того, чтобы на конкретные тиристоры посылать управляющие импульсы в соответствии с алгоритмом управления преобразовательного устройства. Алгоритмы управления различных преобразовательных устройств различны и определяются логикой работы соответствующего устройства. Для каждого уникального алгоритма управления должна быть разработана соответствующая подпрограмма, осуществляющая логику подачи управляющих импульсов. При необходимости программный комплекс $Colo$ может быть дополнен подпрограммами, реализующими любой алгоритм управления тиристорами.

В подпрограмме $urimp_d1$, входящей в комплекс $Colo-15$, реализован алгоритм подачи стандартных импульсов управления мостом Ларионова. Импульсы управления синхронизированы с трехфазным источником ЭДС. Будем считать, что преобразователь включается в момент времени $t=0$, и с этого момента отсчитываются фазные ЭДС трансформатора

$$e_A(t) = E_m \sin(\omega t);$$

$$e_B(t) = E_m \sin(\omega t - \pi/3);$$

$$e_C(t) = E_m \sin(\omega t + \pi/3).$$

С момента $t=0$ отсчитывается время подачи управляющих импульсов на тиристоры. В программе принято, что наличие управляющего импульса на управляющем электроде тиристора в текущий момент времени характеризуется параметром $imp(k)$, где k — номер тиристора: $imp(k) = 1$ — импульс есть; $imp(k) = 0$ — импульса нет. Считаем, что в начальный момент времени все тиристоры находятся в закрытом состоянии, подается система трехфазных ЭДС в соответствии с (5), а на управляющие электроды начинают подаваться управляющие импульсы в соответствии с заданным алгоритмом. Ширина управляющих импульсов задается параметром $dimp_grd$ в электрических градусах. Параметр γ , названный нами абсолютным углом управления тиристора, задает промежуток между моментом пересечения синусоидальной ЭДС с осью абсцисс ωt и передним фронтом управляющего импульса.

Ток включения I_L , ток удержания I_H , время включения t_{g1} , время выключения t_q , критическая скорость убывания тока P_{kr} , сопротивление закрытого тиристора R_{off} , сопротивление открытого тиристора R_{on} являются классификационными параметрами тиристора.

Таким образом, предложенная и реализованная в виде программы логическая модель тиристора отличается простотой схемного моделирования в виде резистивного нелинейного двухполюсника, что позволяет выполнять моделирование сложных тиристорных устройств. В ней учтен ток включения тиристора, не учитываемый в системе $SimPower System$.

Модифицированный программный комплекс $Colo$ позволяет проводить моделирование динамических процессов в нелинейных магнитоэлектрических цепях, содержащих также тиристоры и диоды.

1. Абрамович М.И. и др. Диоды и тиристоры в преобразовательных установках. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 432 с.
 2. Болотовский Ю.Б., Таназлы Г.И. OrCAD Моделирование. "Поваренная" книга. — М.: Солон-Пресс, 2005. — 199 с.

3. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. — С-Пб.: КОРОНА принт, 2001. — 320 с.

4. Новиков А.А., Амелина М.А. Конспект лекций по курсу "Математическое моделирование в электронике". — Смоленск.: Филиал МЭИ, 2006. — 74 с.

5. Ортега Дж., Пулл У. Введение в численные методы решения дифференциальных уравнений. — М.: Наука, 1986. — 288 с.

6. Тиховод С. М. Разработка системы компьютерного моделирования динамических процессов во взаимосвязанных

нелинейных электрических и магнитных цепях // Техн. электродинамика. — 2008. — №3. — С. 16—23.

7. Тиховод С.М., Корнус Т.М. Программа для компьютерного моделирования электрических процессов в тиристорных цепях // Электротехника та електроенергетика. — 2002. — № 1.

8. Чебовский О.Г., Моисеев Л.Г., Недошивин Р.П. Силовые полупроводниковые приборы. Справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 400 с.

9. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств и систем в Simulink. Power Electronics — элементы силовой электроники. http://matlab.exponenta.ru/simpower/book1/1_6.php

Надійшла 09.06.2008

УДК 621.314

В.С.БОЙКО, докт.техн.наук, Е.А.КУДРЯ, канд.техн.наук, А.А.ШУЛЯК (Нац. техн. ун-т України, "КПИ", Киев)

Расчет углов регулирования и коммутации в компенсационной преобразовательной системе с регулируемым коммутирующим устройством

Представлены результаты исследования электромагнитного процесса в преобразовательной системе компенсационного типа, коммутирующее звено которой содержит трехфазную конденсаторную батарею и силовые ключи, сочетающие функции устройства перезаряда конденсаторов и управления технологическим процессом в нагрузке. Рассмотрена особенность составления коммутационных соотношений, используемых для расчета углов регулирования и коммутации силовых вентилялей, соответственно различным режимам работы нагрузки.

Представлено результати досліджень електромагнітного процесу в перетворювальній системі компенсаційного типу, комутаційна ланка якої містить трифазну конденсаторну батарею та силові ключі, які виконують функції пристрою перезаряду конденсаторів та керування технологічним процесом у навантаженні. Розглянуто особливості складання комутаційних співвідношень, які використовуються для розрахунку кутів регулювання та комутації силових вентилів, відповідно до режимів роботи навантаження.

Статья посвящена дальнейшему исследованию электромагнитного процесса в компенсационной преобразовательной системе рис. 1, коммутирующее звено которой содержит кроме трехфазной конденсаторной батареи еще и силовые ключи, что позволяет регулировать выходные и энергетические характеристики системы. Результаты начала этих исследований изложены в [1], где получены соотношения для токов коммутации силовых вентилялей и токов фазы трехфазной конденсаторной батареи, соединенной в треугольник, при различных сочетаниях свободно устанавливающегося угла регулирования силовых вентилялей (диодов) и угла управления силовых ключей (например, тиристоров), задаваемого системой управления. Иссле-

дование показало, что таких сочетаний может быть шесть, и в работе они получили название диапазонов задержки (ДЗ).

Во все выражения токов входит величина свободно устанавливающегося опережающего угла регулирования (α) и угла коммутации (γ) силовых вентилялей, определить которые можно, исследовав особенности электромагнитного процесса.

В настоящей работе, как и в [1], при анализе приняты следующие допущения:

- система синусоидальных питающих ЭДС симметрична;
- вентили и ключи схемы идеальны;
- активное сопротивление оборудования и ошиновки не учитывается;

© Бойко В.С., Кудря Е.А., Шуляк А.А., 2009