

УДК 004.942

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИДЕАЛЬНЫХ КЛЮЧЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В МОДЕЛИРОВАНИИ СХЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Федотов Ю.Б., Кондратьев Р.Е.

ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева», г. Саранск

Тел. (8-927)2745154. E-mail: [FedotovYB@mail.ru](mailto:FedotovYB@mail.ru)

Тел. (8-963)1481335 E-mail: [Ruslan2933@mail.ru](mailto:Ruslan2933@mail.ru)

**Аннотация.** В докладе рассматривается одна из особенностей использования идеального ключа как основы моделирования диодов, тиристоров и транзисторов в схемах преобразовательной техники.

**Ключевые слова:** диод; матрица; контур; сечение; бесконечное сопротивление; методика; численный метод.

### Постановка задачи

Такие элементы как диоды, тиристоры и транзисторы, работающие в ключевых режимах, являются, по своей сути, структурными элементами схемы. Они определяют ее состояние на межкоммутационном интервале и практически не влияют на величины токов и напряжений благодаря тому, что сопротивления в открытых и проводимости в закрытых состояниях малы. Однако при учете сопротивлений диодов и тиристоров увеличиваются размеры матриц и соответственно затраты времени на перемножение этих матриц и векторов. Наиболее целесообразно проводить моделирование ключевых схем, считая диоды, тиристоры и транзисторы, работающие в ключевом режиме, идеальными, то есть считая проводимости открытых и сопротивления закрытых диодов и транзисторов бесконечными.

### Формировании уравнений схем с ключевыми элементами.

Электрическая цепь, содержащая идеальные вентили, рассматривается как цепь с переменной структурой. Каждой комбинации открытых и закрытых вентилях соответствует определенная эквивалентная (частная) электрическая схема замещения. Для получения расчетной системы уравнений цепи с переменной структурой необходимо иметь описание структуры полной (исходной) цепи и структуры эквивалентной (частной) цепи. Такое описание можно получить, упорядочивая после каждого переключения вентилях фундаментальную матрицу контуров полной цепи в соответствии с установленным приоритетом ветвей. После каждого переключения производится формирование структурной матрицы и расчетной системы уравнений заново. Возможны разные варианты организации процедур формирования и счета. Важное значение приобретает экономичность процедуры счета, поскольку она выполняется на каждом шаге счета. Поэтому, большинство вычислительных операций должно выполняться на стадии формирования уравнений. Одним из возможных вариантов является формирование системы алгебро-дифференциальных уравнений в общей канонической форме:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= A \cdot x + B \cdot v + \tilde{B} \cdot \dot{v} \\ y &= C \cdot x + D \cdot v + \tilde{D} \cdot \dot{v} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Вычисление производных переменных состояния ( $\dot{x}$ ) и алгебраических переменных ( $y$ ) производится умножением этих матриц на вектор переменных состояния, вектор

возбуждающих источников  $v$  и вектор производных возбуждающих источников  $\dot{v}$ . Для сложных цепей матрицы коэффициентов имеют большую размерность и могут содержать много нулевых элементов, поэтому счет по уравнениям (3.140) можно оказаться неэффективным. Можно отказаться от формирования матриц  $A, B, \tilde{B}, C, D$  и  $\tilde{D}$  в явном виде, а в процедуре счета вычислять сразу правые части уравнений состояния. Такой расчет эквивалентной цепи проводится только внутри межкоммутационного интервала. Чтобы найти правую границу межкоммутационного интервала необходимо вычислять внутри интервала напряжения на разомкнутых ключах и токи замкнутых ключей. Эти ветви в эквивалентную цепь не входят, и для расчета их используется описание структуры полной цепи.

Если цепь при рассматриваемой комбинации состояний ключей не содержит сечений с бесконечным сопротивлением (т.е.  $PJ$ -сечений), то в упорядоченное фундаментальное дерево  $P$ -,  $J$ -ветви не войдут и напряжения на разомкнутых ключах определяются однозначно матричными уравнениями вида:

$$\vec{U}_P^X = -T_{P,ECRL} \vec{U}_{ECRL}^D \quad (2)$$

где  $U_P^X$  – вектор напряжений замкнутых ветвей хорд графа схемы,

$U_{ECRL}^D$  – вектор напряжений E,C,R,L-ветвей дерева графа схемы

$T_{P,ECRL}$  – субблок матрицы контуров

Аналогично, если цепь при рассматриваемой комбинации состояний не содержит контуров с бесконечной проводимостью (т.е.  $ZE$ -контуров), то в упорядоченное фундаментальное дерево войдут все ветви и токи замкнутых ключей однозначно определяются выражением

$$\vec{I}_Z^D = T'_{Z,CRLJ} \vec{I}_{CRLJ}^X \quad (3)$$

где  $I_Z^D$  – вектор токов замкнутых ветвей дерева графа схемы,

$I_{CRLJ}^X$  – вектор токов C,R,L,J-ветвей хорд графа схемы,

$T'_{Z,CRLJ}$  – субблок матрицы контуров

### Особенные состояния.

В случае представления диодов, тиристоров и транзисторов, работающих в ключевых режимах идеальными характеристиками, описанными выше, возможно возникновение так называемых контуров с бесконечной проводимостью и сечений с бесконечным сопротивлением, упомянутых выше, которые не поддаются классическому расчету уравнениями Кирхгофа. Неразрешимая ситуация возникает из-за принятия новых характеристик диодов.

Решением проблемы просчета  $ZE$ -контуров и  $LJ$ -сечений может служить приписывание моделируемым диодам конечных проводимостей и сопротивлений произвольной величины. Важным является только факт того, чтобы матрицы сопротивлений были не отрицательно определенными. Данная абстракция необходима лишь для того, чтобы получить расчетные формулы для адекватного распределения токов и напряжений ключей. В полученные формулы приписываемые сопротивления ни коим образом не входят, тем самым сохраняя принцип идеальности характеристик ключевых элементов. Для правильного распределения токов между замкнутыми ключами и напряжений на разомкнутых ключах в особенных состояниях из полной цепи выделяется  $ZE$  – подцепь, в которую включены все ветви, входящие в  $ZE$ -контур, а остальные ветви представлены источниками тока, и  $PJ$ -подцепь, в которую включены все ветви, входящие в  $PJ$ -сечения, а остальные представлены источниками э.д.с.

Для расчета распределений необходимо рассмотреть уравнение ветвей, уравнения соединений и уравнений Кирхгофа для  $ZE$ - и  $PJ$ -подцепи. Из трех рассмотренных уравнений

выведены системы матричных уравнений для  $ZE$  контуров вида:

$$\left. \begin{aligned} \vec{I}_{ZE}^X &= -Y_{ZE} T_{ZE,ZE} T'_{CRLJ,ZE} \vec{I}_{CRLJ}^X ; \\ \vec{I}_Z^D &= T'_{ZECRLJ,Z} \vec{I}_{ZECRLJ}^X , \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $Y_{ZE} = (J + T_{ZE,ZE} T'_{ZE,ZE})^{-1}$ .

Для  $PJ$ -сечений:

$$\left. \begin{aligned} \vec{U}_{JP}^D &= -Y_{JP} T'_{JP,JP} T_{JP,ECRL} \vec{U}_{ECRL}^D ; \\ \vec{U}_P^X &= T_{P,ECRLJP} \vec{U}_{ECRLJP}^D \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $Y_{JP} = (J + T'_{JP,JP} T_{JP,JP})^{-1}$

В общем случае обозначения в формулах (4) и (5) те же, что и в формулах (2) и (3). Матрицы  $Y_{ZE}$  и  $Y_{JP}$  отражают характер искусственно внесенных сопротивлений. Благодаря такому подходу, как представление диодов в виде конечных сопротивлений становится возможным правильное распределение токов и напряжений на идеальных ключах в  $ZE$ -контурх и  $PJ$ -сечениях. В итоге система уравнений (1) дополняется еще одним алгебраическим матричным уравнением:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= A \cdot x + B \cdot v + \tilde{B} \cdot \dot{v} \\ y &= C \cdot x + D \cdot v + \tilde{D} \cdot \dot{v} \\ z &= E \cdot x + F \cdot v + \tilde{F} \cdot \dot{v} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Новые матрицы  $E$ ,  $F$  и  $\tilde{F}$  это по сути сгруппированные уравнения (4) и (5), вектор переменных ветвей ( $z$ ) содержит в себе искомые токи и напряжения ветвей, попавших в  $ZE$ -контур и  $LJ$ -сечения.

### **Моделирование схемы переменной структуры с идеальными тиристорами на примере однофазного мостового выпрямителя.**

В рамках диссертационного исследования на языке высокого уровня написана программа для ЭВМ, задачей которой является моделирование широкого класса схем преобразовательной техники, содержащих в себе большое количество ключевых элементов идеальной структуры и имеющих малый период межкоммутационного интервала. Программа запрограммирована на работу с особенностями, связанными с идеализацией ключей, в том числе возникновением  $ZE$ -контуров и  $JP$ -сечений. В качестве проверки адекватности формул, описанных выше, в обозначенной программе проведено моделирование схемы однофазного управляемого мостового выпрямителя, в котором на этапе перекоммутации тиристоров возникает интересное  $JP$ -сечение. Схема выпрямителя с параметрами приведена на рисунке 1. Результаты моделирования диссертационной программы, а также результаты прогона той же схемы, но в программах, учитывающих внутреннее сопротивление ключей приведены ниже на рисунке 2.

Параметры моделирования следующие:

- численный метод программы диссертации: Рунге-Кутта 4-го порядка (РК4);
- шаг метода РК4 0,0001 с.
- временной интервал 0,8 с.
- Угол открытия тиристоров 60 градусов

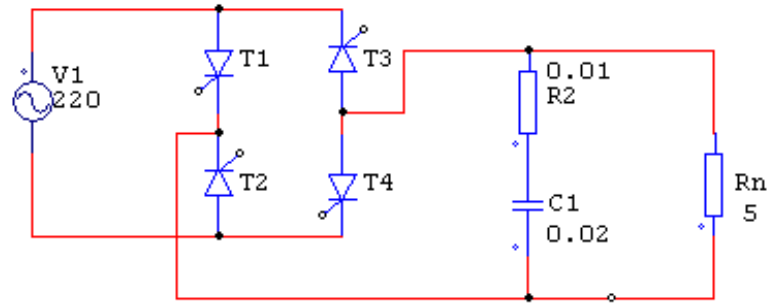
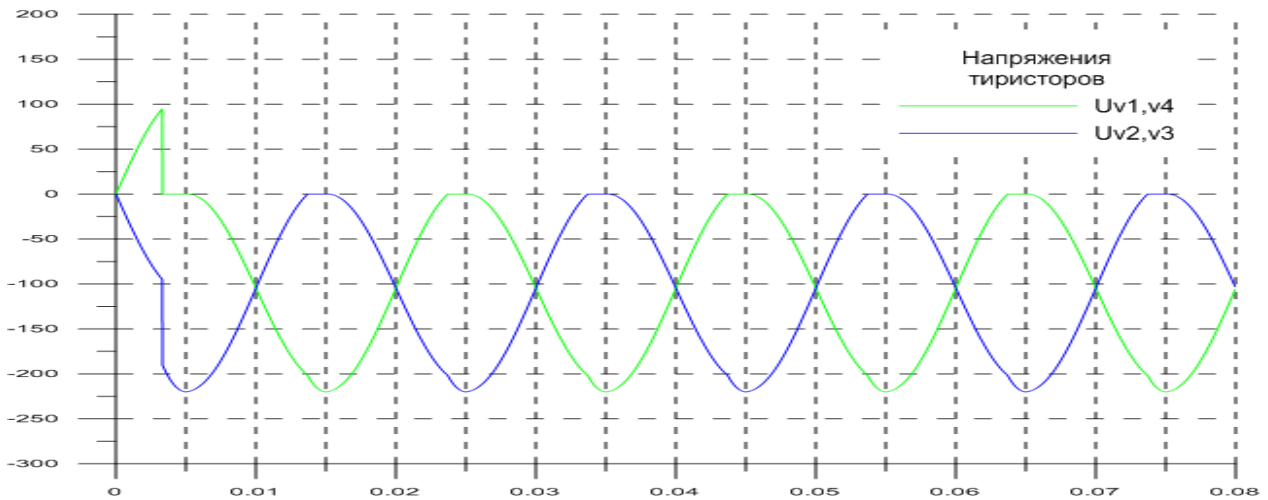
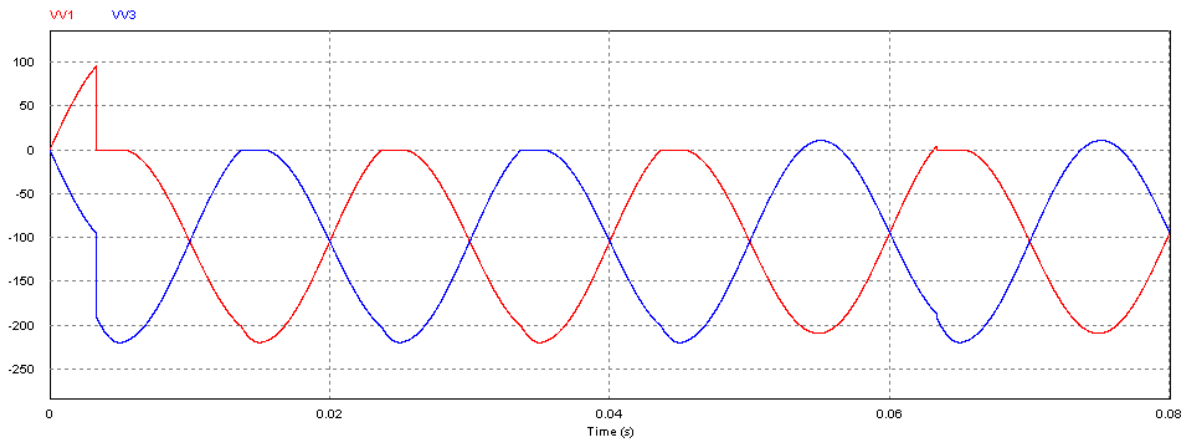


Рис. 1. Однофазный мостовой управляемый выпрямитель



а)



б)

Рис. 2. Диаграммы напряжений тиристоров:  
а) в программе диссертации  
б) сторонней программе моделирования

### Заключение.

Проведенное моделирование схемы однофазного управляемого выпрямителя подтвердило правильность полученных формул расчета  $ZE$ -контуров и  $JP$ -сечений. Диаграммы напряжений тиристоров полностью соответствуют диаграммам моделирования

тиристоров с конечным внутренним сопротивлением на рисунке 2б. Стоит отметить, что резистор R2 на рисунке 1 отсутствовал при моделировании идеальных тиристорov. Его наличие ликвидирует возникновение другой не корректной ситуацией, а именно возникновение CZ-контуров, что также присуще ключам с идеальными характеристиками. Таким образом возможно проведение моделирования ключевых схем преобразовательной техники без учета внутреннего сопротивления диодов, тиристорov и транзисторов, работающих в ключевых режимах, что ведет к уменьшению порядка формируемых матриц и как следствие затрат машинного времени.

### Литература

1. Мустафа Г.М., Шаранов И.М., «Математическое моделирование тиристорных преобразователей», «Электричество» №1, 1978г., стр. 40-45
2. Мустафа Г.М., Федотов Ю.Б., Еряшев В.Ф., Шаранов И.М., Орехова Е.Н., «Основные характеристики программного комплекса ЭЛТРАН, опыт применения и перспективы развития», В кн. Моделирование силовых вентильных преобразователей. Изд. Ин-т. Электродинамики АН УССР, Киев, 1989, стр.118-129.
3. Чабан Б.И. Уравнения переменных состояния автономных электро-энергетических систем. Изв. ВУЗов СССР - Энергетика, 1983.

### USING THE IDEAL OF KEY ELEMENTS IN MODELING SCHEMES CONVERTERS

**Summary.** The report addresses one of the key features of an ideal as the basis for modeling diodes, thyristors and transistors in the circuits converters.

**Keywords:** LED, matrix, contour, cross section, infinite resistance, the method, a numerical method.