

# УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

---

УДК 621.313.2.072.2

© А.В. КРИВИЛЁВ, 2009

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА УПРАВЛЯЮЩЕГО СЛОВА МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ ПРИВОДА С ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

---

Александр Владимирович КРИВИЛЁВ родился в 1975 г. в городе Москве. Доцент МАИ. Кандидат технических наук. Основные научные интересы — в области импульсного управления электродвигателями. Автор более 10 научных работ. E-mail: alexkrivilev@gmail.com.

Alexander V. KRIVILYOV, Ph.D. was born in 1975 in Moscow. He is an Associate Professor at the MAI. His major research interests are in electric motor control with pulse width modulation. He has published more than 10 technical papers. E-mail: alexkrivilev@gmail.com

---

*Рассмотрен метод анализа управляющего слова на основе модифицированной матрицы смежности и паттернов ограничений, позволяющий определить все возможные состояния управляющего слова и переходы между ними при произвольном методе коммутации ключевыми элементами, выявить наличие запрещённых состояний и переходов, приводящих к возникновению сквозных токов. Описание и программная реализация метода выполнены на языке Mathematica.*

*A technique is presented to analyze mechatronic unit control words basing on a modified adjacency matrix and constraint patterns. The technique allows us to find all possible control word states as well as all transitions between the states for an arbitrary switching method using key elements. Besides this technique reveals forbidden states and transitions for the command word which cause through currents. A description and implementation of the technique is performed by means of the Mathematica language tools.*

**Ключевые слова:** метод анализа, управляющее слово, модифицированная матрица смежности, паттерн ограничений, метод коммутации ключевыми элементами, двигатель постоянного тока, мехатронный модуль, цифровая система управления, усилитель мощности.

**Key words:** analysis technique, control word, modified adjacency matrix, constraints pattern, switching method using key elements, direct current motor, mechatronic unit, digital control system, power amplifier.

### Введение

Один из заключительных этапов синтеза управляющих булевых функций (УБФ) мехатронного модуля (ММ) привода с двигателем постоянного тока (ДТП), представленного на рис. 1, — анализ состояний и переходов управляющего слова (УС), представляющего собой совокупность УБФ, а также переходов между ними с целью определения

наличия запрещённых состояний и возможности возникновения сквозных токов при использовании незащищённых ключевых элементов (КЭ).

На рис. 1 приняты следующие обозначения: ЦУМ — цифровая управляющая машина; СМВ — специализированный микропроцессорный вычислитель; ЦСУ — цифровая система управления;

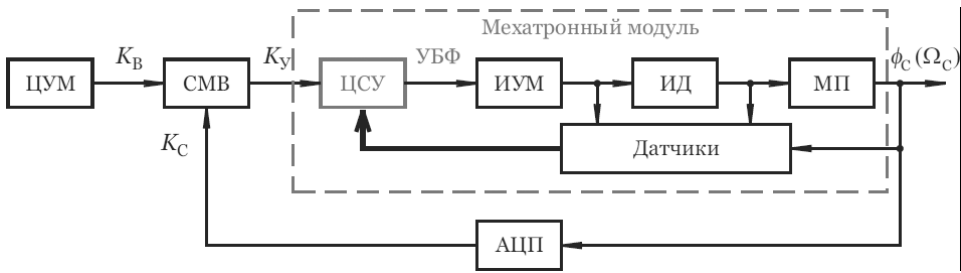


Рис. 1. Цифровой следящий привод с мехатронным модулем

ИУМ — импульсный усилитель мощности; ИД — исполнительный двигатель; МП — механическая передача; АЦП — аналого-цифровой преобразователь;  $K_B$  — код входного сигнала;  $K_C$  — код сигнала обратной связи;  $K_U$  — код управления;  $\phi_C$  — угол поворота выходного вала;  $\Omega_C$  — скорость вращения выходного вала.

Известными методами анализа состояний УС являются методы, описанные в [1] и [2]. Оба метода графические. Первый метод базируется на использовании модифицированной карты Карно, клетки которой представляют собой состояния ИУМ, а переходы между состояниями обозначаются в виде стрелок. Наклон относительно вертикальной или горизонтальной осей модифицированной карты, под которым осуществляется переход из одного состояния в другое, определяет, будет ли протекать сквозной ток или нет. Число клеток, которые пересекает стрелка при сквозном токе, соответствует числу стоек ИУМ со сквозным током. Однако приведенные утверждения справедливы не для всех случаев. На рис. 2 в виде стрелок равной длины, направленных под одним и тем же углом к горизонтальной оси карты, представлены переходы управляющего слова. В первом случае, когда переход осуществляется из клетки с номером 1 в клетку с номером 8 или наоборот, в ИУМ переключаются ключевые элементы, расположенные в разных стойках, что исключает возможность возникновения сквозного тока. Во втором случае при переходе из клетки с номером 5 в клетку с номером 9 или наоборот переключаются КЭ, расположенные в одной

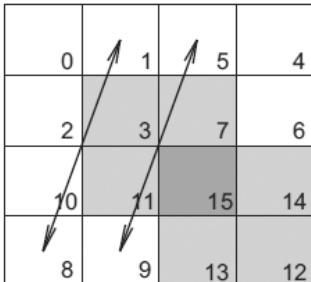


Рис. 2. Модифицированная карта Карно

стойке, что приводит к возникновению сквозного тока в соответствующей стойке. Метод на основе объёмных графов ориентирован на анализ УС ММ с трёхфазными двигателями и не может напрямую быть использован для случая, когда в качестве ИД применяется двигатель постоянного тока с независимым возбуждением от постоянных магнитов. Несмотря на наглядность обоих методов, они не являются автоматизированными и, следовательно, не могут быть использованы в автоматизированных системах проектирования мехатронных модулей электроприводов.

С учётом изложенного выше, необходимо разработать автоматизированный метод анализа управляющего слова, который позволит выявить запрещённые состояния, однозначно определить условия возникновения сквозных токов в стойках ИУМ в случае их наличия и получить информацию о числе состояний и переходов для произвольного метода коммутации КЭ.

### Описание метода

Предлагаемый метод анализа состояний и переходов управляющего слова основывается на паттернах ограничений и модифицированной матрице смежности и состоит из следующих шагов:

- определение множества состояний УС;
- выявление наборов условий нахождения в состояниях УС в виде соответствующих им наборов значений логических переменных;
- создание двух матриц условий переходов. Первая матрица содержит условия переходов между состояниями в виде двух наборов значений логических переменных, соответствующих начальному и конечному состояниям УС при переходе. Вторая матрица состоит из условий изменения логических переменных в моменты переходов;
- формирование паттернов ограничений, с помощью которых накладываются ограничения на изменения логических переменных во время работы;
- последовательное применение паттернов ограничений к матрицам условий переходов с целью удаления из них условий, не существующих при выбранном методе коммутации;

- составление модифицированной матрицы смежности, содержащей информацию о всех возможных состояниях УС и переходах между ними;
- визуализация результатов анализа в виде модифицированной таблицы состояний, модифицированной матрицы смежности и таблиц переходов.

**Определение множества состояний управляющего слова**

В [2] представлена классификация множеств состояний для системы «ИУМ—ИД», которую можно использовать и для классификации множеств состояний управляющего слова. Таким образом, при рассмотрении мехатронного модуля с двигателем постоянного тока имеют место три множества состояний управляющего слова: *множество располагаемых состояний* ( $TF^2$ ), *множество допустимых состояний* ( $T^2$ ) и *множество запрещённых состояний* ( $F^2$ ). Значение в верхнем индексе указывает на число стоек в ИУМ. Множество допустимых состояний и множество запрещённых состояний являются взаимно дополняющими и не пересекающимися подмножествами множества располагаемых состояний.

Множество располагаемых состояний управляющего слова представляет собой совокупность всех возможных состояний, в которых может находиться управляющее слово. Количество элементов множества располагаемых состояний равно  $\sqrt{4^n}$ , где  $n$  — число управляющих булевых функций. Так как управляющее слово состоит из четырёх управляющих булевых функций ( $U_4, U_3, U_2, U_1$ ), то множество располагаемых состояний содержит 16 элементов ( $TF^2 = \{tf_0^2, tf_1^2, tf_2^2, \dots, tf_{14}^2, tf_{15}^2\}$ , где нижний индекс элемента множества соответствует десятичному эквиваленту значения управляющего слова, рассматриваемого в виде двоичного числа.)

Множество допустимых состояний представляет собой совокупность состояний УС, при которых происходит либо подключение обмотки двигателя к источнику питания, либо её отключение от источника питания. Количество элементов множества располагаемых состояний равно  $\sqrt{3^n}$ , где  $n$  — число УБФ. При четырёх управляющих булевых функциях множество допустимых состояний содержит 9 элементов ( $T^2 = \{t_0^2, t_1^2, t_2^2, \dots, t_7^2, t_8^2\}$ , где нижний индекс является порядковым номером элемента).

Множеством запрещённых состояний является совокупность состояний управляющего слова, которые приводят к протеканию тока короткого замыкания через соответствующие стойки импульсного усилителя мощности. Количество элементов множества запрещённых состояний определяется

как  $\sqrt{4^n} - \sqrt{3^n}$ , где  $n$  — число УБФ. При четырёх управляющих булевых функциях количество элементов множества запрещённых состояний равно 7 ( $F^2 = \{f_0^2, f_1^2, f_2^2, \dots, f_5^2, f_6^2\}$ , где нижний индекс является порядковым номером элемента).

При анализе УС формируется множество его состояний, которые имеют место при рассматриваемом методе коммутации КЭ. Полученное множество представляет собой подмножество множества располагаемых состояний. Если полученное множество содержит хотя бы один элемент из множества запрещённых состояний, то рассматриваемый метод коммутации нельзя использовать для управления скоростью вращения ротора ИД. Методы коммутации должны состоять только из элементов множества допустимых состояний. Например, при методе диагональной коммутации КЭ [3] множество состояний УС состоит из трёх элементов:

$$D^2 = \{d_0^2, d_1^2, d_2^2\}, \text{ где } d_0^2 \equiv t_0^2 \equiv tf_0^2, \quad d_1^2 \equiv t_5^2 \equiv tf_6^2 \text{ и } d_2^2 \equiv t_7^2 \equiv tf_9^2. \text{ Все рассмотренные элементы являются элементами множества допустимых состояний.}$$

**Формирование множества наборов значений логических переменных**

Каждому состоянию УС при помощи таблицы состояний можно поставить в соответствие один или несколько наборов значений логических переменных, которые являются условиями нахождения управляющего слова в соответствующем состоянии. Совокупность наборов значений логических переменных для всех состояний управляющего слова называется *множеством наборов значений логических переменных*. При этом количество элементов этого множества равно количеству элементов множества состояний УС.

Например, для метода диагональной коммутации КЭ с таблицей состояний (табл. 1) множество наборов значений логических переменных имеет следующий вид:  $\Delta^2 = \{\delta_0^2, \delta_1^2, \delta_2^2\}$ , где элемент  $\delta_0^2$  содержит наборы значений логических переменных, при которых УС находится в состоянии  $d_0^2, \delta_1^2 - d_1^2$  и  $\delta_2^2 - d_2^2$ .

Таблица 1

Состояния управляющего слова

№	DR	SP	U <sub>4</sub>	U <sub>3</sub>	U <sub>2</sub>	U <sub>1</sub>
0	False	False	False	False	False	False
1	False	True	True	False	False	True
2	True	False	False	False	False	False
3	True	True	False	True	True	False

Следовательно,

$$\delta_0^2 = \{\{\overline{DR}, \overline{SP}\}, \{DR, \overline{SP}\}\},$$

$$\delta_1^2 = \{\{DR, SP\}\}, \quad \delta_2^2 = \{\{\overline{DR}, SP\}\}.$$

Таким образом, множество наборов логических переменных состоит из трёх элементов, первый из которых содержит два набора значений логических переменных, а остальные два — по одному набору.

### Создание матриц условий переходов

На основании множества наборов значений логических переменных составляются матрицы условий переходов размера  $n \times n$ , где  $n$  — число элементов множества наборов значений логических переменных. Элементами первой матрицы являются все возможные пары сочетаний наборов значений логических переменных. На первом месте в паре располагается набор из соответствующего элемента множества, связанного со строкой, а на втором месте — со столбцом. Каждый элемент матрицы условий переходов связан с отдельным переходом. Общая формула для элемента первой матрицы условий переходов имеет вид

$$a_{m,n} = \{L_{i=0}^k S_{j=0}^l \{\alpha_{m,i}^2, \alpha_{n,j}^2\}\},$$

где  $S$  — операция создания последовательности;  $L$  — операция создания списка;  $\alpha_{m,i}^2$  и  $\alpha_{n,j}^2$  — набор логических переменных;  $m$  и  $n$  — номера элементов множества наборов значений логических переменных;  $i$  и  $j$  — номера наборов значений логических переменных;  $k$  и  $l$  — число наборов значений логических переменных в элементах  $\alpha_m^2$  и  $\alpha_n^2$  соответственно.

Например, в случае диагональной коммутации с таблицей состояний (табл. 1) элемент

$$d_{0,0} = \{\{\{\overline{DR}, \overline{SP}\}, \{\overline{DR}, \overline{SP}\}\}, \{\{\overline{DR}, \overline{SP}\}, \{DR, \overline{SP}\}\}, \{\{DR, \overline{SP}\}, \{\overline{DR}, \overline{SP}\}\}, \{\{DR, \overline{SP}\}, \{DR, \overline{SP}\}\}\}.$$

Вторая матрица условий переходов содержит информацию о том, какие логические переменные изменяют своё значение в случае перехода при выполнении соответствующих условий из первой матрицы. Отрицание переменной обозначает отсутствие изменения значения этой переменной при переходе. Каждый набор переменных в элементах этой матрицы связан с соответствующей парой наборов значений логических переменных из первой матрицы. Например, для рассмотренного ранее случая

$$d'_{0,0} = \{\{\{\overline{DR}, \overline{SP}\}, \{\overline{DR}, \overline{SP}\}\}, \{\{DR, \overline{SP}\}, \{\overline{DR}, \overline{SP}\}\}, \{\{\overline{DR}, \overline{SP}\}, \{DR, \overline{SP}\}\}, \{\{DR, \overline{SP}\}, \{DR, \overline{SP}\}\}\}.$$

### Формирование паттернов ограничений

Несмотря на то что логические переменные обозначают отдельные условия работы ММ, они синхронизированы во времени с помощью тактового сигнала, поступающего из генератора импульсов, и могут быть связаны друг с другом. Под связью понимается обязательное одновременное изменение ряда логических переменных при переходе управляющего слова из одного состояния в другое. Так как матрицы условий переходов содержат все возможные сочетания пар наборов значений логических переменных, то необходимо из них удалить те варианты, которые нарушают связи или принципы формирования логических переменных. Варианты нарушения связи или принципов формирования для каждой переменной оформляются в виде отдельного паттерна ограничений.

Паттерн ограничений образуется из двух частей. В первой части размещаются варианты изменения логических переменных, соответствующие наборам из второй матрицы условий переходов, а во второй части — пары наборов значений логических переменных, соответствующие парам из первой матрицы условий переходов.

Паттерны ограничений определены для следующих переменных:  $PR$ ,  $DT_{DR}$ ,  $DT_{SP}$  и  $DT_{PR}$ .

Логическая переменная  $PR$ , предназначенная для реализации поочерёдных методов коммутации, не изменяется при нулевом значении кода управления. Это связано с исключением переключений КЭ в тот период, когда обмотка двигателя отключена от источника питания. Смена открытых верхних КЭ на открытые нижние может привести к кратковременному протеканию сквозных токов в обеих стойках в случае использования незащищённых ключевых элементов в ИУМ. Паттерн ограничений логической переменной  $PR$  на языке *Mathematica* имеет следующий вид:

$$\text{constrainsPR} = \{\{\{\_, PR, \_ \}, \{\_, !SP, \_ \}, \{\_, !SP, \_ \}\}\};$$

Логическая переменная  $DT_{DR}$  введена для исключения возможности возникновения сквозных токов в случае изменения логической переменной  $DR$ . Следовательно, значение переменной  $DT_{DR}$  изменяется с нуля на единицу каждый раз при изменении значения логической переменной  $DR$  и возвращается в ноль по истечении некоторого времени, необходимого для окончания переходных процессов в ключевом элементе. Паттерн ограни-

чений логической переменной  $DT_{DR}$  имеет следующий вид:

```
{ {Alternatives@@(Insert[Riffle[#,___],___,{ {1},{-1}}]&/@Permutations[{DR,!DTdr}]),{ }},
  {Alternatives@@(Insert[Riffle[#,___],___,{ {1},{-1}}]&/@Permutations[!DR,DTdr])},
  { {___,!DTdr,___},{___,DTdr,___}}},
  {Alternatives@@(Insert[Riffle[#,___],___,{ {1},{-1}}]&/@Permutations[{DR,DTdr}]),
  { {___,DTdr,___},{___,!DTdr,___}}},
  {Alternatives@@(Insert[Riffle[#,___],___,{ {1},{-1}}]&/@Permutations[!DR,SP,DTdr] )}, { }},
  {Alternatives@@(Insert[Riffle[#,___],___,{ {1},{-1}}]&/@Permutations[!DR,PR,DTdr] )}, { }},
  {Alternatives[ {___,DR,___},{___,SP,___},{___,DTsp,___},{___,PR,___},{___,DTpr,___}],
  { {___,DTdr,___},{___,DTdr,___}} } };
```

Первое ограничение исключает вариант изменения переменной  $DR$  при неизменной переменной  $DT_{DR}$  при любых сочетаниях пар значений логических переменных. Второе ограничение позволяет исключить возможность изменения значения переменной  $DT_{DR}$  с нуля на единицу при неизменном значении переменной  $DR$ . Третье ограничение служит для исключения варианта изменения значения переменной  $DT_{DR}$  с единицы на ноль при изменении значения переменной  $DR$ . Четвёртое ограничение предназначено для удаления случаев одновременного изменения логических переменных  $SP$  и  $DT_{DR}$  при неизменном значении переменной  $DR$ . Пятое ограничение позволяет удалить случаи одновременного изменения переменных  $PR$  и  $DT_{DR}$  при неизменном значении переменной  $DR$ . Шестое ограничение служит для исключения случаев изменения значения любой логической переменной, когда значение логической переменной  $DT_{DR}$  равно единице.

Аналогично задаются паттерны ограничений для логических переменных  $DT_{SP}$  и  $DT_{PR}$ .

### Применение паттернов ограничений

С целью исключения из матриц условий переходов тех условий, которые не существуют при рассматриваемом наборе логических переменных, последовательно к обеим матрицам применяются паттерны ограничений, связанные с этими переменными.

В случае метода диагональной коммутации присутствуют только две логические переменные  $DR$  и  $SP$ , которые не имеют паттернов ограничений. Следовательно, имеют место все возможные варианты изменения логических переменных друг относительно друга, т.е. итоговые матрицы условий переходов из одного состояния УС в другое совпадают с соответствующими исходными матрицами.

В случае существования нескольких связанных с паттернами ограничений логических переменных

выполняется последовательное применение этих паттернов к матрицам условий переходов, полученным после предыдущего исключения условий.

### Составление модифицированной матрицы смежности

После получения итоговых матриц условий переходов на их основе составляются модифицированные матрицы смежности, содержащие информацию не только о наличии или отсутствии переходов между состояниями управляющего слова, но и о числе стоек ИУМ, по которым может протекать сквозной ток при соответствующих переходах. В модифицированной матрице смежности используются следующие обозначения:  $-1$  или пробел — переход отсутствует,  $0$  — переход присутствует, но не приводит к протеканию сквозных токов,  $1$  — переход существует и является причиной возникновения сквозного тока в одной стойке,  $2$  — переход возможен и приводит к появлению сквозных токов в двух стойках.

При переходе от итоговых матриц условий переходов к модифицированной матрице смежности элементы множества наборов значений логических переменных, обозначающие строки и столбцы матриц условий переходов, заменяются на соответствующие им элементы из множества состояний управляющего слова. Далее, для тех элементов матриц условий, которые содержат наборы условий, выявляются изменяемые разряды управляющего слова при переходе из начального состояния в конечное. После группировки на пары определяются варианты одновременного изменения разрядов в парах и подсчитывается сумма этих пар. Полученная сумма заносится в соответствующий элемент модифицированной матрицы смежности и равна числу стоек, по которым будут протекать сквозные токи при выполнении соответствующего перехода.

Таким образом, на основании модифицированных матриц смежности можно сделать вывод о количестве состояний управляющего слова, общем количестве переходов и о числе переходов, которые приводят к протеканию сквозного тока в одной и двух стойках импульсного усилителя мощности. Модифицированная матрица смежности для метода диагональной коммутации представлена на рис. 3.

В случае метода диагональной коммутации имеют место три состояния управляющего слова и девять переходов, два из которых приводят к протеканию сквозных токов в двух стойках.

### Визуализация результатов

Заключительный этап метода анализа состояний управляющего слова и переходов между ними — представление полученных результатов в виде, удобном для их оценки. Результаты представляются с помощью модифицированной таблицы состояний, модифицированной матрицы смежности и таблиц переходов. Результаты анализа для метода диагональной коммутации изображены на рис. 3.

Модифицированная таблица состояний содержит информацию о всех состояниях УС, в которых оно может находиться в случае рассматриваемого

СОСТОЯНИЯ УПРАВЛЯЮЩЕГО СЛОВА			
i	{U4, U3, U2, U1}	n	
0	{0, 0, 0, 0}	0	
1	{0, 1, 1, 0}	6	
2	{1, 0, 0, 1}	9	
Запрещённые: 0			
МОДИФИЦИРОВАННАЯ МАТРИЦА СМЕЖНОСТИ			
	0	6	9
0	0	0	0
6	0	0	2
9	0	2	0
ПЕРЕХОДЫ УПРАВЛЯЮЩЕГО СЛОВА			
Без протекания сквозных токов			
N	Управляющее слово		Условия перехода
	Нач. состояние	Кон. состояние	
1	{0, 0, 0, 0}	{0, 0, 0, 0}	см. таблицу состояний
2	{0, 0, 0, 0}	{0, 1, 1, 0}	{{{(!DR, !SP), (DR, SP)}, {(DR, !SP), (DR, SP)}}
3	{0, 0, 0, 0}	{1, 0, 0, 1}	{{{(!DR, !SP), (!DR, SP)}, {(DR, !SP), (!DR, SP)}}
4	{0, 1, 1, 0}	{0, 0, 0, 0}	{{{(DR, SP), (!DR, !SP)}, {(DR, SP), (DR, !SP)}}
5	{0, 1, 1, 0}	{0, 1, 1, 0}	см. таблицу состояний
6	{1, 0, 0, 1}	{0, 0, 0, 0}	{{{(!DR, SP), (!DR, !SP)}, {(!DR, SP), (DR, !SP)}}
7	{1, 0, 0, 1}	{1, 0, 0, 1}	см. таблицу состояний
С протеканием сквозных токов в двух стойках			
N	Управляющее слово		Условия перехода
	Нач. состояние	Кон. состояние	
1	{0, 1, 1, 0}	{1, 0, 0, 1}	{{{(DR, SP), (!DR, SP)}}
2	{1, 0, 0, 1}	{0, 1, 1, 0}	{{{(!DR, SP), (DR, SP)}}

Рис. 3. Результаты анализа управляющего слова

метода коммутации КЭ. В первом столбце отображаются порядковые номера элементов множества состояний управляющего слова, во втором столбце — значения управляющих булевых функций и в третьем — соответствующие значениям УБФ номера элементов множества располагаемых состояний. В нижней части таблицы выводится информация о количестве запрещённых состояний.

Выводимые матрицы смежности содержат номера элементов множества располагаемых состояний и информацию о наличии перехода и количестве стоек, по которым будет протекать сквозной ток при соответствующем переходе в случае незащищённых КЭ.

методов на основе модифицированной карты Карно и объёмных графов тем, что позволяет определить все возможные состояния управляющего слова и переходы между ними при рассматриваемом методе коммутации КЭ, выявить наличие запрещённых состояний и переходов, приводящих к возникновению сквозных токов в случае использования незащищённых КЭ, а также значительно сократить время, затрачиваемое на получение конечного результата.

Получены данные о количестве состояний и переходов УС для всех рассмотренных методов коммутации (табл. 2). Во всех рассмотренных методах отсутствуют запрещённые состояния УС. При

Таблица 2

Результаты анализа

Метод коммутации ключевыми элементами	Количество состояний УС	Количество переходов		
		без сквозных токов	со сквозными токами	
			в одной стойке	в двух стойках
Диагональная	3(3)	7(7)	0(0)	2(0)
Симметричная	2(3)	2(7)	0(0)	2(0)
Несимметричная	3(6)	3(18)	4(0)	2(0)
Поочерёдная	4(9,9)	4(29, 29)	8(4, 0)	2(0, 0)
Несимметрично-диагональная	4(5)	10(17)	4(0)	2(0)
Поочерёдно-диагональная	4(7)	10(27)	4(0)	2(0)
Симметрично-несимметричная	4(5)	10(19)	4(0)	2(0)
Симметрично-поочерёдная	6(7)	18(35)	8(0)	2(0)

Таблицы переходов предназначены для вывода полной информации о всех переходах в рассматриваемом методе коммутации. В первой таблице отображаются переходы, не приводящие к возникновению сквозных токов в стойках ИУМ, во второй — переходы со сквозным током в одной стойке и в третьей — переходы со сквозными токами в двух стойках. В таблице переходов выводятся начальное и конечное состояния УС при соответствующем переходе, а также все условия переходов в виде пар наборов значений переменных, соответствующих начальному и конечному состояниям УС. В случае перехода в то же самое состояние вместо условий перехода указывается ссылка на таблицу состояний, где содержатся все возможные условия нахождения УС в соответствующем состоянии. При отсутствии переходов без сквозных токов, со сквозным током в одной стойке или со сквозными токами в двух стойках импульсного усилителя мощности соответствующие таблицы переходов не отображаются.

**Выводы**

Разработан автоматизированный метод анализа управляющего слова на основе модифицированной матрицы смежности и паттернов ограничений, отличающийся от известных ранее графических

использовании методов коммутации, где учитываются паузы при переключении КЭ, отсутствуют возможности возникновения сквозных токов. В случае поочерёдной коммутации КЭ для исключения появления сквозных токов при переднем фронтальном широтно-импульсном сигнале необходимо использовать три логические переменные  $DT_{DR}$ ,  $DT_{SP}$  и  $DT_{PR}$ , а при центрированном и заднем фронтальном ШИС достаточно двух —  $DT_{DR}$  и  $DT_{SP}$ .

**Библиографический список**

1. *Кривилев А.В.* Использование объёмных графов для исследования работы трехфазного бесконтактного двигателя постоянного тока // Сборник трудов X международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации». 2001. С. 125—126.
2. *Попов Б.Н.* Диссертационная работа на соискание ученой степени доктора технических наук. — М., 2001.
3. *Петров Б.И., Полковников В.А., Попов Б.Н.* Электропривод летательных аппаратов: Учебник для авиационных вузов / Под ред. В.А. Полковникова. — М.: Машиностроение, 1990.

Московский авиационный институт  
Статья поступила в редакцию 20.04.2009