

# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД СИНТЕЗА УПРАВЛЯЮЩИХ БУЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ 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 research interests are in motor control with pulse width modulation. He has published more than 10 technical papers. E-mail: alexkrivilev@gmail.com

Владимир Григорьевич СТЕБЛЕЦОВ (1946—2008) Был заведующим кафедрой МАИ. Основные научные интересы — в области нелинейных динамических систем с разрывными координатными связями. Автор более 50 научных работ.

Vladimir G. STEBLETSOV (1946-2008), D.Sci., was a Professor and the Head of a Department at the MAI. His major research interests were in the field of nonlinear dynamic systems with discontinuities. He had published over 50 technical papers.

*Рассмотрен метод синтеза управляющих булевых функций, позволяющий получить таблицу состояний и их аналитические выражения для произвольного метода коммутации ключевыми элементами с последующей передачей результатов в системы моделирования и автоматизированного проектирования. Программная реализация метода выполнена на языке Mathematica.*

*A synthesis technique is described for control logic functions, which allows us to obtain appropriate truth table and analytical expressions for any arbitrary method of switching with key elements. The obtained results can be transferred into various simulation systems and computer-aided design systems. The technique is implemented using the Mathematica software system.*

**Ключевые слова:** метод синтеза, управляющие булевы функции, метод коммутации ключевыми элементами, классификация методов коммутации, аналитические выражения.

**Key words:** synthesis technique, control logical functions, method of switching with key elements, classification of switching methods, analytical expressions.

## Введение

Существуют три структуры цифрового следящего привода (ЦСП) [4]. Наибольшее применение в автономных системах получила структура II, в которой исполнительный механизм заменён мехатронным модулем (ММ) (рис. 1). ММ включает в

себя цифровую систему управления (ЦСУ), импульсный усилитель мощности (ИУМ), исполнительный двигатель (ИД), механическую передачу (МП) и элементы обратной связи. На рис. 1 приняты следующие обозначения: ЦУМ — цифровая управляющая машина; СМВ — специализированный микропроцессорный вычислитель; АЦП — аналого-

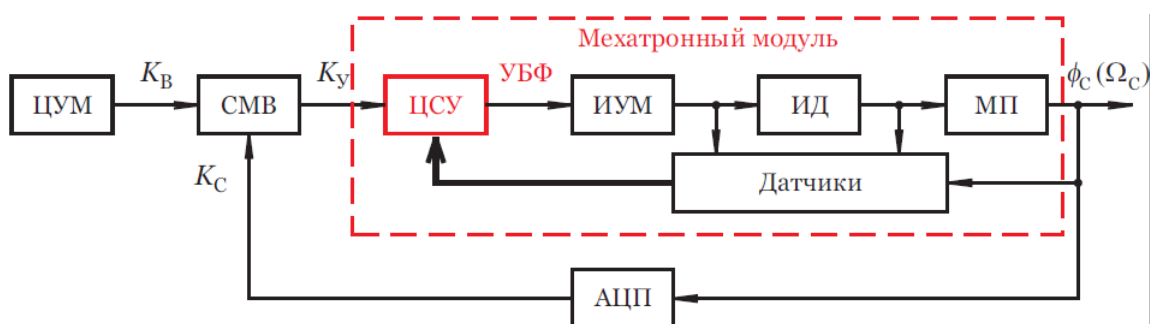


Рис. 1. Цифровой следящий привод с мехатронным модулем

цифровой преобразователь;  $K_B$  — входной код управления;  $K_C$  — код сигнала обратной связи;  $K_Y$  — код управления;  $\phi_C$  — угол поворота выходного вала;  $\Omega_C$  — скорость вращения выходного вала.

Если в качестве ИД используется двигатель постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов, то ЦСУ на основе значения  $K_Y$  и с учётом используемых алгоритмов формирует циклическую последовательность четырёх управляющих булевых функций (УБФ)  $\langle U_1, U_2, U_3, U_4 \rangle$ , которые поступают на соответствующие ключевые элементы (КЭ) ИУМ.

Начальным этапом исследования процессов коммутации и получения соответствующих характеристик мехатронного модуля является этап математического описания ЦСУ. Первый шаг при описании цифровой системы управления — получение аналитических выражений УБФ, с помощью которых осуществляется управление процессом коммутации.

Методы получения математических выражений УБФ для различных типов двигателей рассмотрены в работах [2, 5]. В основе обоих методов лежит построение временной диаграммы, которая в первом случае связывает эпюры линейных напряжений и управляющих сигналов, поступающих из распределителя импульсов на вход транзисторного преобразователя, а во втором случае — эпюры линейных напряжений, управляющих логических функций и логических переменных. После построения временной диаграммы на её основе заполняется таблица истинности и с помощью карт Карно получают аналитические выражения управляющих сигналов.

Несмотря на наглядность рассмотренных методов синтеза УБФ, они не являются автоматизированными и, следовательно, не могут использоваться при автоматизации этапов проектирования приводов. Следовательно, возникает необходимость в разработке автоматизированного метода синтеза УБФ с возможностью передачи результатов в другие системы моделирования и автоматизированного проектирования.

### Описание метода

Предлагаемый метод синтеза УБФ состоит из следующей последовательности шагов:

- анализ условий работы ММ и определение минимальной совокупности условий, обеспечивающей требуемое управление ключевыми элементами;
- формализация совокупности условий работы в виде минимально необходимой системы переменных и функций с их программной реализацией;
- описание метода коммутации ключевыми элементами и его формализация;
- формирование таблицы состояний УБФ;

- получение аналитических выражений УБФ в полной системе булевых функций (например, в минимальной дизъюнктивной нормальной форме (МДНФ), минимальной конъюнктивной нормальной форме, алгебраической форме и т.д.);

- визуализация результатов синтеза в виде демонстрационной панели, включающей схему системы «ИУМ—ИД» и временную диаграмму, для исследования последовательности УБФ;

- анализ состояний и переходов управляющего слова с целью определения запрещённых состояний и переходов, приводящих к аварийным ситуациям;

- экспорт полученных результатов в виде таблицы состояний в системы моделирования и автоматизированного проектирования для дальнейшего исследования состояний и характеристик ММ при соответствующем методе коммутации КЭ.

### Анализ условий работы

К мехатронному модулю предъявляются многочисленные требования, определяемые техническим заданием, среди которых могут быть и такие, как обеспечение:

- вращения ротора двигателя в разные стороны;
- регулирования скорости вращения ротора;
- равномерности загрузки КЭ по току;
- отсутствия возможности протекания сквозных токов в стойках импульсного усилителя мощности;
- линейности механических и регулировочных характеристик;
- минимизации дополнительных потерь мощности, вызванных пульсациями тока в обмотке якоря.

Для удовлетворения заданным требованиям необходимо провести анализ:

- влияния электромагнитных процессов в ИД на создаваемый движущий момент;
- типов широтно-импульсного сигнала (ШИС);
- существующих методов коммутации КЭ;
- подходов к формированию паузы при переключении КЭ, расположенных в одной стойке ИУМ.

Методом коммутации ключевыми элементами называется циклическая последовательность включения и отключения КЭ, обеспечивающая формирование импульсов напряжения на обмотке двигателя. Методы отличаются друг от друга набором включённых КЭ при нулевом значении широтно-импульсного сигнала. Приведенная на рис. 2 классификация методов коммутации позволяет систематизировать исследование процессов коммутации КЭ в двигателях постоянного тока.

Согласно представленной классификации, существует 8 методов коммутации ключевыми элементами: Д — диагональная; С — симметричная; Н — несимметричная; П — поочередная; НД — не-

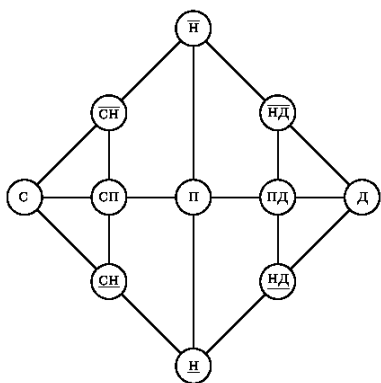


Рис. 2. Классификация методов коммутации

симметрично-диагональная; ПД — поочерёдно-диагональная; СН — симметрично-несимметричная; СП — симметрично-поочередная. Методы Н, СН и НД имеют по два варианта реализации. В вариантах  $\overline{СН}$  и  $\overline{НД}$  при нулевом значении ШИС в ИУМ открыт один верхний КЭ, а в вариантах  $\underline{СН}$  и  $\underline{НД}$  — один нижний. В варианте  $\overline{Н}$  при нулевом значении ШИС открыты два верхних КЭ, а в  $\underline{Н}$  — два нижних. На горизонтальной линии располагаются методы, при которых КЭ равномерно нагружены по току.

Описание метода Д и соответствующие ему эпюры токов и напряжений наряду с механическими характеристиками приведены в [6]. Метод Н достаточно подробно рассмотрен в [1,2,4,6]. Особенности методов С и П приведены в [1,2,6]. В [5] приведено математическое описание УБФ для методов С, Н и П. Вопросы, связанные с дополнительными потерями мощности вследствие пульсации тока в обмотке якоря двигателя в методах С, Н и П, рассмотрены в [6]. Для остальных методов коммутации отсутствует информация о соответствующих им математических выражениях УБФ, эпюрах токов и напряжений на обмотке двигателя, статических, динамических и энергетических характеристиках мехатронного модуля.

### Формализация условий работы

На основании проведенного анализа условий работы ММ производится их формализация — представление условий в виде системы переменных и функций с их программной реализацией. Перед формализацией рассмотренные условия делятся на две группы. В первую группу входят условия, не связанные с импульсным управлением. Переменные и функции, используемые для описания этих условий, называются *базовыми*. Импульсные переменные образуют вторую группу и связаны исключительно с импульсным управлением. Среди базовых и импульсных переменных имеются переменные, которые принимают только логические значения True или False. Такие переменные называются *логическими*. Программная реализация переменных и функций может выполняться на любом языке, позволяющем работать со списками. В данном случае для программной реализации использовался язык *Mathematica*.

Базовые переменные соответствуют предельным режимам работы: вращению двигателя в разных направлениях с максимально возможной скоростью в зависимости от момента нагрузки. Программная реализация базовых переменных и функций показана в листинге. С помощью базовых переменных можно реализовать релейное управление ИД.

Представленная в таблице система из 13 переменных и функций позволяет реализовать любой метод коммутации, приведенный на рис. 2. При реализации метода коммутации определяются необходимые переменные и функции, которые образуют *минимально необходимую систему переменных и функций*.

### Формализация метода коммутации

В качестве метода коммутации КЭ, формирующего циклическую последовательность импульсов напряжения на обмотке двигателя, можно выбрать

Система переменных и функций

Переменные и функции	Текстовое описание
Базовые	
logicFuns	Список имён УБФ
directRotation	Вращение в прямом направлении
reverseRotation	Вращение в обратном направлении
bothSideRotation	Вращение в обоих направлениях
varVal	Текущее значение переменной
DR	Сигнал направления вращения
Импульсные	
turnOff	Отключены все КЭ
maskUp	Включены два верхних КЭ
SP	Широтно-импульсный сигнал
PR	Сигнал равномерной загрузке КЭ по току
DTdr, DTsp, DTpr	Сигналы паузы при переключении КЭ

один из представленных на рис. 2 либо определить иной метод, являющийся их комбинацией. После выбора метода необходимо выполнить его формализацию. Под формализацией метода коммутации понимается его программная реализация с возможностью получения результатов синтеза в виде временной диаграммы, таблицы состояний и аналитических выражений для каждой управляющей булевой функции.

В листинге приведена программная реализация метода симметрично-несимметричной коммутации.

### Создание таблицы состояний

Таблица состояний содержит информацию о всех возможных наборах значений логических переменных и соответствующих им значениям УБФ при рассматриваемом методе коммутации.

Листинг. Программная реализация метода синтеза управляющих булевых функций

```
(* Базовые переменные и функции *)
logicFuns = {U4, U3, U2, U1};
directRotation = {True, False, False, True};
reverseRotation = Not /@ directRotation;
bothSideRotation := Function[{lstVars, valVars},
  If[varValue[lstVars, valVars, DR], reverseRotation, directRotation]];
varValue := Function[{lstVars, valVars, logVar},
  If[MemberQ[lstVars, logVar], Extract[valVars, Position[lstVars, logVar][[1]]], False]];
maskUp = {False, True, False, True};

(* Программная реализация метода коммутации *)
methodSymmetricAsymmetricUp[lstVar_, valVar_] :=
  If[varValue[lstVar, valVar, SP], bothSideRotation[lstVar, valVar],
    Thread[And[maskUp, Not /@ bothSideRotation[lstVar, valVar]]]];
methodSymmetricAsymmetricUpWithDeadTime[lstVar_, valVar_] :=
  Which[(varValue[lstVar, valVar, DTdr] && Not[varValue[lstVar, valVar, SP]]),
    Thread[And[maskUp, Not /@ bothSideRotation[lstVar, valVar]]],
    (varValue[lstVar, valVar, DTdr] && varValue[lstVar, valVar, SP] &&
      varValue[lstVar, valVar, DTsp]),
    Thread[And[maskUp, bothSideRotation[lstVar, valVar]]],
    (varValue[lstVar, valVar, DTdr] || varValue[lstVar, valVar, DTsp]),
    turnOff, True, methodSymmetricAsymmetricUp[lstVar, valVar]];

(* Формирование таблицы состояний *)
formStateTable := Function[{lstVars, lstFuns, method}, Join[{Prepend[Join[lstVars, lstFuns], N]},
  Table[Prepend[#==1&/@IntegerDigits[i, 2, Length[lstVars]], i]~Join~
    method[lstVars, #==1&/@IntegerDigits[i, 2, Length[lstVars]], {i, 0, 2^Length[lstVars]-1}]]];
```

Разработанная функция `formStateTable`, представленная в листинге, выполняет формирование таблицы состояний.

### Формирование аналитических выражений

Одним из этапов синтеза УБФ является этап формирования аналитических выражений, представляющих собой математическую запись метода коммутации ключевыми элементами.

Получение УБФ в виде МДНФ осуществляется с помощью разработанного модуля `boolMinimize`, на вход которого поступает таблица состояний. При работе модуля на основании таблицы состояний определяются совершенные дизъюнктивные нормальные формы для каждой управляющей булевой функции с последующей их передачей в стандартную функцию `BooleanMinimize`, выполняющую

```
(* Минимизация управляющих булевых функций *)
boolMinimize[table_] := Module[{lstVars,lstFuns,setTrue},
  lstVars = Take[table[[1]], {2, 1 + Log[2,Length[Rest[table]]]};
  lstFuns = Take[table[[1]], {2 + Log[2,Length[Rest[table]],-1}];
  setTrue = Pick[Rest[table[[All,1]]],Rest[table[[All,Position[table,#][[1,2]]]]]&;
  Table[{BooleanMinimize[Or@@Table[BooleanMinterms[{i},lstVars],{i,setTrue[k]}]],
  {k,lstFuns}}];

(* Отображение результатов *)
showOutput[stateTable_, minFuns_] := Module[{lstVars, lstFuns}, ... ]

(* Экспорт данных в MATLAB *)
createMATLABfile[fileName_, table_] :=
Module[{getLstFuns, generateFunTableMatlab, stream},
  getLstFuns[t_] := Take[t[[1]], {2 + Log[2, Length[Rest[t]]], -1};
  generateFunTableMatlab := StringJoin[Table[
    Which[k == 1, "StateTable = [...\n",
      k == Length[#] + 1, "];",
    True, " " <> StringJoin[Table[ToString[Boole#[[k, i]]] <>
      Which[i == Length#[[1]], ";\n", True, " "],
      {i,Length#[[1]]-Length[getLstFuns[#]]+1,Length#[[1]]}],
    {k, 1, Length[#] + 1}]]&;
  stream = OpenWrite[fileName <> ".m"];
  WriteString[stream, generateFunTableMatlab[table]];
  Close[stream];];

(* Применение метода *)
logicVars={DR,DTdr,SP,DTsp};
stateTable=formStateTable[logicVars,logicFuns,methodSymmetricAsymmetricUpWithDeadTime];
minFuns=boolMinimize[stateTable];
showOutput[stateTable, minFuns];
createMATLABfile["stateTable.m", stateTable];
```

минимизацию. Программная реализация модуля `boolMinimize` представлена в листинге.

### Визуализация результатов синтеза

С целью наглядного представления результатов синтеза управляющих булевых функций используется демонстрационная панель, позволяющая не только интерактивно или в режиме анимации наблюдать за последовательностью переключения КЭ при различных типах широтно-импульсного сигнала и направлениях вращения ротора двигателя, но и соотносить текущее состояние управляющего слова с соответствующим моментом времени на

временной диаграмме. Вид демонстрационной панели изображён на рис. 3.

Наряду с демонстрационной панелью выводится таблица состояний, содержащая все условия работы при рассматриваемом методе коммутации.

Совместно с демонстрационной панелью и таблицей состояний отображаются аналитические выражения управляющих булевых функций, представленные в минимальной дизъюнктивной нормальной форме.

Визуализация результатов синтеза реализована с помощью разработанной функции `showOutput`, которая принимает два входных параметра. Первый

параметр представляет собой таблицу состояний, а второй — аналитические выражения.

### Анализ состояний и переходов управляющего слова

Во время синтеза управляющих булевых функций необходимо проанализировать все возможные состояния управляющего слова (совокупности управ-

ляющих булевых функций), а также переходы между ними с целью определения наличия запрещённых состояний и возможности возникновения сквозных токов при использовании незащищённых КЭ.

При анализе управляющего слова можно воспользоваться существующими методами его анализа на основе модифицированной карты Карно или объемных графов [3].

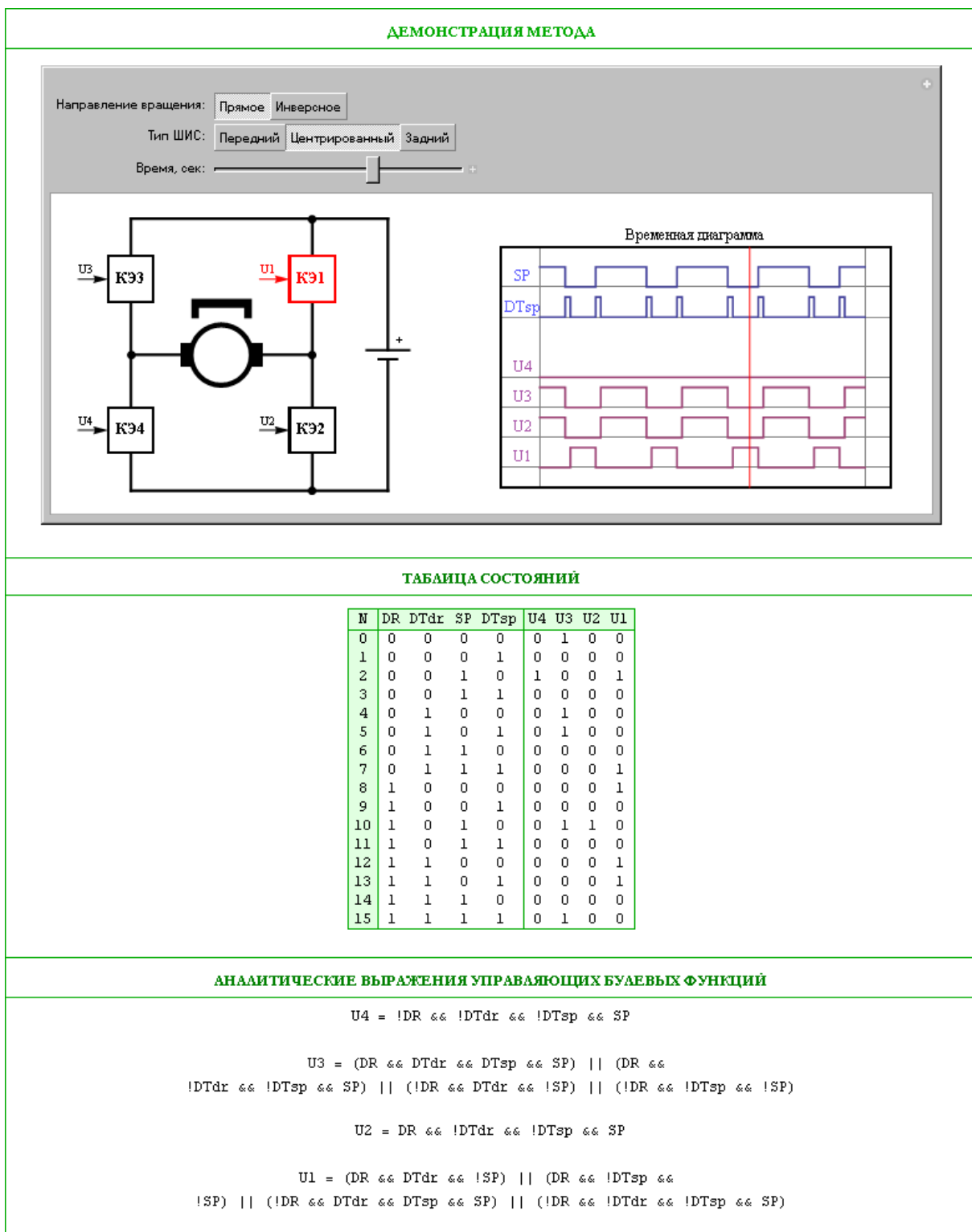


Рис. 3. Результаты синтеза для метода симметрично-несимметричной коммутации ключевыми элементами

Если в результате анализа выявлены переходы управляющего слова, которые приводят к появлению сквозного тока в стойках ИУМ, то необходимо определить, изменение какой логической переменной связано с соответствующими переходами, и ввести дополнительную логическую переменную, позволяющую реализовать паузу на переключение КЭ.

### Экспорт результатов

Полученные в результате синтеза таблицу состояний или/и аналитические выражения необходимо передать в другие программы для проведения экспериментальных исследований или моделирования работы ЦСУ в составе мехатронного модуля.

Наиболее известной в академических кругах средой моделирования сложных динамических систем является программа Simulink, входящая в состав системы компьютерной математики Matlab. Моделирование таблицы состояний в Simulink реализуется с помощью стандартного блока Combinatorial logic, позволяющего в качестве единственного параметра указывать имя переменной, в которой в виде матрицы содержатся значения УБФ на всех наборах значений логических переменных.

В литинге представлен модуль createMATLABfile, с помощью которого осуществляется перевод таблицы состояний на язык Matlab. В результате выполнения этого модуля создаётся скрипт-файл с расширением *m*, содержащий команду, при задании которой в рабочей области системы Matlab появляется переменная StateTable. Переменная stateTable в виде матрицы содержит правую часть таблицы состояний.

### Выводы

Разработан метод синтеза управляющих булевых функций мехатронного модуля электропривода с системой «ИУМ—ДПТ» на основе анализа условий работы и их формализации, отличающийся от известных ранее методов на основе временных диаграмм и карт Карно тем, что позволяет получить аналитическое и табличное описание УБФ для произвольных методов коммутации ключевыми элементами ИУМ, передать полученные результаты в системы моделирования и автоматизированного проектирования для последующего исследования физических процессов в электроприводе, а также значительно сократить время, требуемое для получения конечного результата.

Приведена классификация методов коммутации ключевыми элементами импульсного усилителя мощности, облегчающая исследование коммутационных

процессов, происходящих в мехатронном модуле, и выбор метода коммутации при проектировании электропривода с импульсным управлением.

Предложен способ исследования последовательности значений управляющих булевых функций на основе демонстрационной панели со схемой системы «импульсный усилитель мощности — двигатель постоянного тока» и временной диаграммой и отличающийся от известных методов на основе графов и объёмных графов тем, что позволяет автоматически формировать временную диаграмму с логическими переменными и управляющими булевыми функциями, интерактивно получать информацию о состоянии управляющего слова в произвольный момент времени на периоде широтно-импульсного сигнала и соотносить ее с соответствующим моментом времени на временной диаграмме, а также визуализировать в виде анимации саму последовательность управляющих булевых функций и её цикличность при вращении ротора в прямом и обратном направлениях и при различных типах широтно-импульсного сигнала.

### Библиографический список

1. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. — СПб.: КОРОНА-Век, 2008.
2. Герман-Галкин С.Г., Лебедев В.Д., Марков Б.А., Чичерин Н.И. Цифровые электроприводы с транзисторными преобразователями. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
3. Кривилёв А.В. Использование объёмных графов для исследования работы трёхфазного бесконтактного двигателя постоянного тока // Сборник трудов X международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации». М.: Изд-во МАИ, 2001. С. 125-126.
4. Крымов Б.Г., Рабинович Л.В., Стеблецов В.Г. Исполнительные устройства систем управления летательными аппаратами. — М.: Машиностроение, 1987.
5. Попов Б.Н. Цифровые устройства систем приводов летательных аппаратов. — М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2008.
6. 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 11.05.2009