

# Математическое описание функций управления двухфазным вентильным двигателем с двухсекционной фазной обмоткой

КРИВИЛЁВ А.В., ДУНИЧ Е.А.  
 МАИ (НИУ), Москва, Россия

Представлено математическое описание цифрового устройства управления современного электропривода на основе двухфазного вентильного двигателя с двухсекционными фазными обмотками. Для всех возможных схем соединения секций обмоток и основных способов их задействования с учётом использования четырёхстоечного или четырёхключевого усилителя мощности определены циклические последовательности управляющих сигналов и их аналитические выражения, учитывающие вращение ротора двигателя в разные стороны. Получены компактные варианты их представления в виде полинома Жегалкина либо в виде дизъюнктивной формы. Определены аналитические зависимости цифровых сигналов о положении ротора, получаемых с датчиков Холла, и выявлена их связь с базовыми векторами и числом пар полюсов магнита ротора. Сформированы комбинированные способы задействования секций фаз, обеспечивающие равномерность распределения базовых векторов по окружности вращения и минимальные различия их амплитуд. Полученные математические выражения могут быть использованы при проектировании цифрового электропривода и реализации быстродействующих алгоритмов на основе программируемых логических интегральных схем и систем на кристалле.

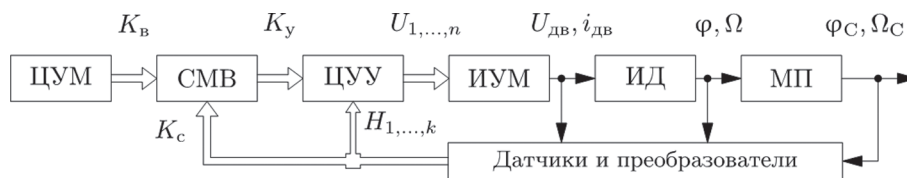
**Ключевые слова:** электропривод, импульсное управление, двухфазный вентильный двигатель, схемы соединения секций, математическое описание управляющих функций

Одним из направлений совершенствования существующих робототехнических систем является разработка быстродействующих и энергоэффективных параллельных цифровых алгоритмов управления и их реализация на современной элементной базе, позволяющей обеспечить разнородное резервирование узлов управления с целью достижения высокой надёжности системы в целом.

Современные робототехнические системы, используемые в перспективных роботах-помощниках,

беспилотных летательных аппаратах, электромобилях, электробусах, электросамокатах, интеллектуальной медицинской технике и т.д., базируются на цифровом электроприводе (ЦЭП), структура которого приведена на рис. 1.

С помощью СМВ решаются вопросы фильтрации, вычисления ошибки, коррекции и реализации основных алгоритмов. ЦУУ обеспечивает необходимую циклическую коммутацию ключевых элементов (КЭ) многостоечного ИУМ и влияет на механические, регу-



**Рис. 1.** Структура цифрового электропривода: ЦУМ – цифровая управляющая машина; СМВ – специализированный микропроцессорный вычислитель; ЦУУ – цифровое устройство управления; ИУМ – импульсный усилитель мощности; ИД – исполнительный двигатель; МП – механическая передача;  $K_B$  – входной цифровой код, сформированный ЦУМ;  $K_C$  – цифровой код сигнала обратной связи, который может содержать информацию о текущих значениях фазных напряжений и токов, угловых скоростей и углов поворота ротора двигателя и выходного вала и т.д.;  $H_{1,...,k}$  – сигналы о текущем положении ротора;  $K_Y$  – вычисленный код управления с учётом обеспечения необходимых показателей качества работы привода;  $U_{1,...,n}$  – управляющие булевы функции;  $U_{дв}, i_{дв}$  – соответственно фазные напряжения и токи;  $\Omega(\Omega_C), \varphi(\varphi_C)$  – скорости и углы поворота ротора двигателя и выходного вала соответственно

**Fig. 1.** Structure of a digital electric drive: ЦУМ – digital control machine; СМВ – specialized microprocessor computer; ЦУУ – digital control device; ИУМ – impulse power amplifier; ИД – executive engine; МП – mechanical transmission;  $K_B$  – the input digital code generated by the ЦУМ;  $K_C$  – the digital code of the feedback signal, which can contain information about the values of phase voltages and currents, angular velocities and rotation angles of the motor rotor and output shaft, etc.;  $H_{1,...,k}$  – signals about the current position of the rotor;  $K_Y$  – the calculated control code, taking into account the provision of the necessary indicators of the drive quality;  $U_{1,...,n}$  – control boolean functions;  $U_{дв}, i_{дв}$  – phase voltages and currents;  $\Omega(\Omega_C), \varphi(\varphi_C)$  – the speeds and angles of the motor rotor rotation and output shaft

лировочные и энергетические характеристики системы «ИУМ – ИД» [1–3]. В качестве ИД в электроприводе может быть задействован двухфазный вентильный двигатель (ДВД) с двухсекционной фазной обмоткой, позволяющий развивать большой пусковой момент в сравнении со стандартным трёхфазным вентильным двигателем при аналогичных параметрах секций (активного сопротивления и коэффициента момента) [4].

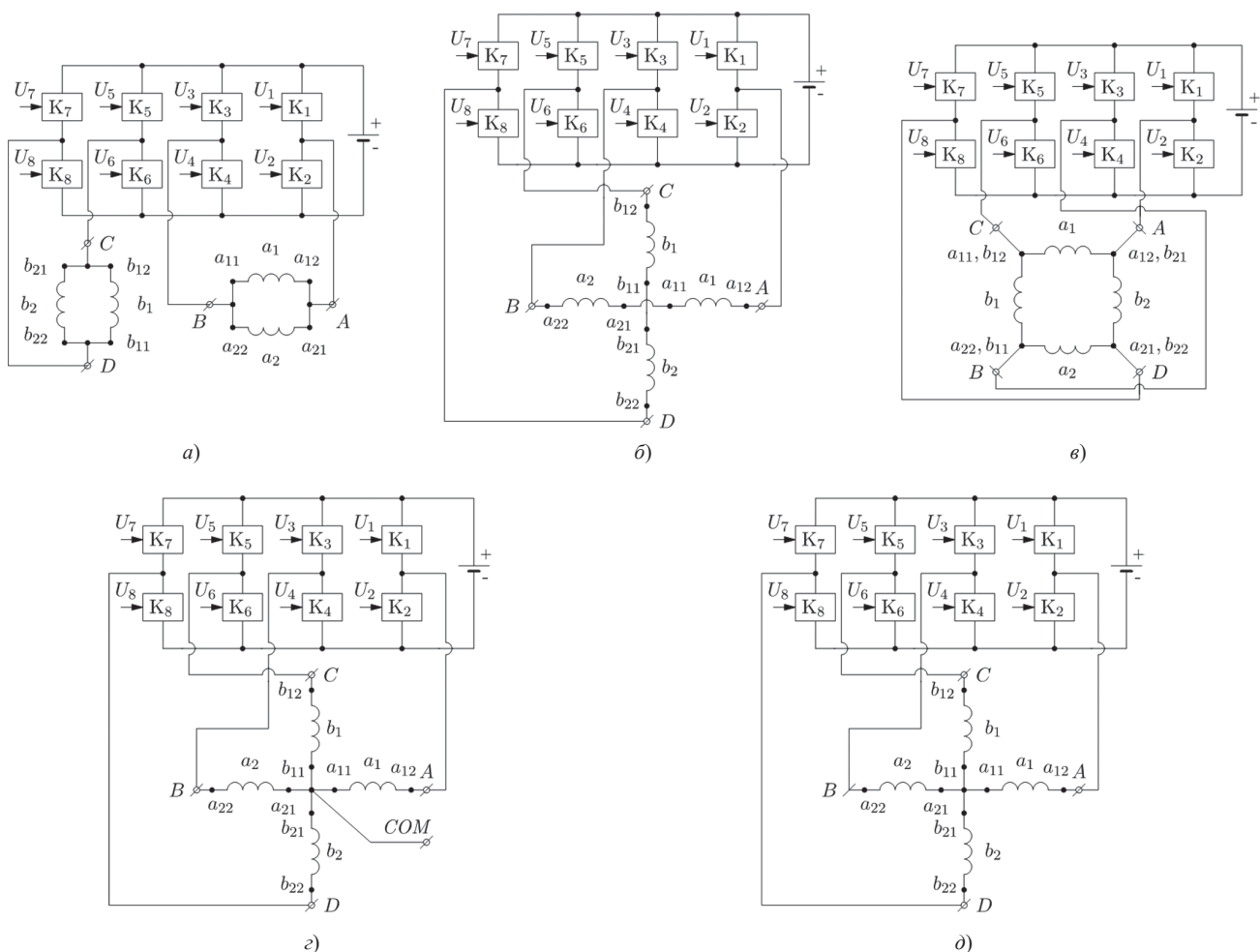
На рис. 2 представлены различные варианты соединения секций фаз ДВД между собой и со стойками ИУМ. Во всех пяти случаях на рис. 2 рассматривается четырёхстоечный ИУМ с двумя КЭ в стойке ( $K_i$  и  $K_{i+1}$ , где  $i = 2k+1, k = \{0, 1, 2, 3\}$ ). На вход ИУМ подаётся восемь управляющих сигналов  $U_{1,\dots,8}$ , сформированных ЦУУ в зависимости от применяемого метода импульсного управления, текущего положения ротора и входного значения  $K_{\gamma}$ .

В [5] рассматриваются способы управления таким двигателем с помощью линейного усилителя мощности при реверсивном и нереверсивном питании сек-

ций, приведено сравнение механических характеристик при параллельном, последовательном и лучевом соединении секций.

В настоящее время функции ЦУУ выполняют отдельные блоки, встроенные в микроконтроллеры, которые ориентированы на управление конкретным типом электродвигателя [6–10]. Однако возможности блоков ограничиваются настройкой ШИМ-сигналов на соответствующем выводе и не позволяют изменять внутреннюю конфигурацию и увеличивать или уменьшать ресурсы, отводимые под этот блок.

Указанных недостатков лишены программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), которые можно использовать для реализации быстродействующих параллельных алгоритмов, влияющих как на динамику системы в целом, так и на статические характеристики системы «ИУМ – ИД». ПЛИС выпускаются как зарубежными компаниями *Intel FPGA, Lattice Semiconductor, Microsemi* и *Xilinx* [11, 12], так и отечественным АО «ВЗПП-С» [13]. Одним из сдер-



**Рис. 2.** Схемы соединения секций ДВД между собой и со стойками ИУМ: *a* – параллельное; *б* – последовательное; *в* – «квадрат»; *г* – лучевое с общей точкой; *д* – лучевое с нейтральной точкой

**Fig. 2.** Connection schemes of sections with one another and the Impulse Power Amplifier *a* – parallel connection; *б* – serial; *в* – «square»; *г* – radial connection with a common point; *д* – radial connection with a neutral point

живающих факторов широкого применения ПЛИС для реализации методов импульсного управления ДВД и получения максимально возможных по быстродействию и КПД приводных систем является отсутствие математического описания ЦУУ.

Математическое описание ЦУУ системой «ИУМ – ИД» содержит выражения для управляющих булевых функций (УБФ), поступающих на КЭ, и логических переменных (ЛП), от которых зависят значения УБФ [14]. Логические переменные содержат информацию о текущем положении ротора двигателя, желаемом направлении и скорости вращения. В поочерёдных методах импульсного управления используется логическая переменная, позволяющая равномерно загрузить по току все ключевые элементы усилителя на периоде фазных напряжений [15]. При реализации векторной ШИМ необходимо задействовать дополнительную переменную для выбора необходимого базового вектора на периоде ШИМ-сигнала [16].

**Логические переменные.** Для различных схем соединения секций и способов их задействования при формировании базовых векторов (БВ) в общей сложности существует 12 множеств БВ, среди которых присутствует одно множество с нулевым БВ. Каждое из оставшихся 11 множеств включает в себя четыре элемента ( $2n$  для  $n$ -фазной машины). Соседние элементы этих множеств отличаются поворотом БВ на угол, равный  $\pi/2$  ( $\pi/n$  для  $n$ -фазной машины). Элементы множеств А, Д, Н и Р направлены вдоль осей комплексной плоскости, а элементы множеств В, Е и М – по биссектрисам четвертей. Первые элементы множеств F и К повернуты на угол, равный  $\arctg 1/3$ , а множеств G и L – на угол  $\arctg 3$ .

При вращении двигателя четыре БВ последовательно переключаются на основе текущих значений сигналов датчиков положения ротора, имеющих вид двух цифровых сигналов, сдвинутых по фазе на  $90^\circ$ , которые представлены в данной работе как логические переменные  $H_1$  и  $H_2$ , изменяющиеся согласно коду Джонсона. Формирование этих сигналов реализуется с помощью двух датчиков Холла (ДХ), расположенных

относительно друг друга под углом  $90^\circ$  электрических градусов.

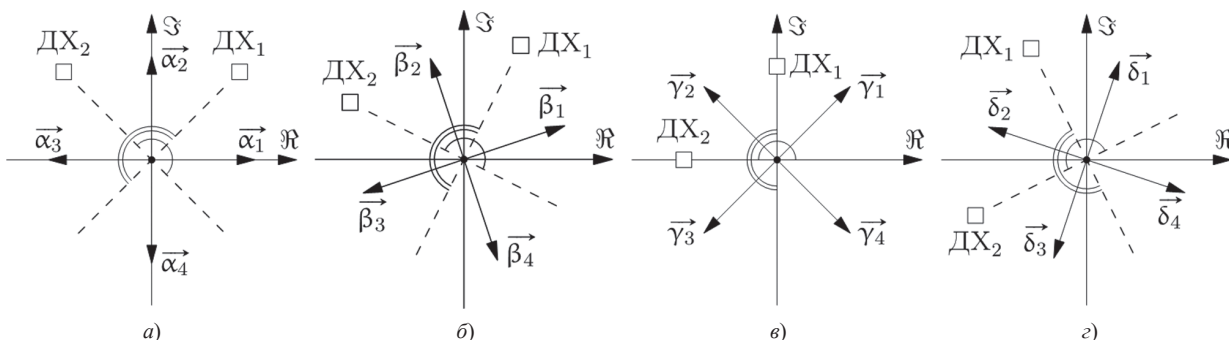
При размещении датчиков Холла относительно БВ необходимо учитывать, что максимальный электромагнитный момент имеет место при угле  $\pi/2$  между БВ и вектором магнитной индукции индуктора  $\vec{B}_n$ . В случае использования четырёх БВ переключение между ними должно происходить, когда угол между текущим БВ и  $\vec{B}_n$  равен  $45^\circ$ , а угол между следующим БВ и  $\vec{B}_n$  составляет  $135^\circ$ . Так как значение на выходе ДХ в течение  $180^\circ$  равно нулю и на протяжении других  $180^\circ$  – единице, то ДХ располагаются между БВ. Разместить таким образом два ДХ можно восемью различными способами. В качестве рабочего взят способ, при котором во время прямого вращения (против часовой стрелки) ротора двигателя комбинации ЛП  $h_0 = \overline{H_2 H_1}$  соответствует первый элемент рассматриваемого множества,  $h_1 = \overline{H_2} H_1$  – второй элемент,  $h_3 = H_2 H_1$  – третий элемент и  $h_2 = H_2 \overline{H_1}$  – четвёртый элемент.

На рис. 3 показано размещение ДХ и БВ в комплексной плоскости для всех четырёх вариантов поворота первого БВ на угол  $\xi$ . Базовые векторы обозначены греческими буквами, алфавитный порядок которых сопоставлен номеру варианта; индекс БВ связан с номером элемента множества. Вариант 1 (рис. 3, а) соответствует элементам множеств А, Д, Н и Р, вариант 2 (рис. 3, б) – элементам множеств F и К, вариант 3 (рис. 3, в) – элементам множеств В, Е и М, вариант 4 (рис. 3, г) – элементам множеств G и L. Одинарной дугой обозначена область, в которой переменная  $H_1$  равна единице, область единичного значения  $H_2$  отмечена двойной дугой.

Таким образом, угловой сдвиг  $i$ -го ДХ определяется по формуле:

$$\psi_i = \frac{1}{p} \left( \text{Arg}(\overline{\omega_1}) + \frac{(2i-1)\pi}{2n} \right), \quad (1)$$

где  $i = \overline{1,2}$  – номер ДХ;  $\overline{\omega_1}$  – первый элемент рассматриваемого множества БВ;  $p$  – число пар полюсов постоянного магнита ротора;  $n$  – общее число ДХ.



**Рис. 3.** Варианты размещения датчиков Холла: а – вариант 1 ( $\xi = \arctg 0$ ); б – вариант 2 ( $\xi = \arctg 1/3$ ); в – вариант 3 ( $\xi = \arctg 1$ ); г – вариант 4 ( $\xi = \arctg 3$ )

**Fig. 3.** Hall sensor allocation variants: а – option 1 ( $\xi = \arctg 0$ ); б – option 2 ( $\xi = \arctg 1/3$ ); в – option 3 ( $\xi = \arctg 1$ ); г – option 4 ( $\xi = \arctg 3$ )

Аналитическое описание цифровых сигналов, поступающих с ДХ, имеет вид:

$$H_i = \cos(p\theta - \psi_i) > 0, \tag{2}$$

где  $i = \overline{1, 2}$  – номер ДХ;  $\theta$  – текущее угловое положение ротора.

Логическая переменная  $DR$  обеспечивает вращение ротора двигателя в разные стороны и зависит от знака входного сигнала управления  $K_y$  в ЦУУ:

$$DR = \text{sgn}K_y.$$

При нулевом значении  $DR$  вал двигателя на холостом ходу вращается в прямом направлении (против часовой стрелки), а при  $DR = 1$  – в противоположном.

**Управляющие булевы функции.** Начальным шагом в получении аналитических выражений системы УБФ идёт определение набора состояний КЭ ИУМ для формирования всех БВ при выбранной схеме соединения секций. На состояния КЭ влияют значения УБФ. Считается, что единичное значение  $U_i$  включает ключевой элемент  $K_i$  и ток может протекать в прямом направлении (например, от истока к стоку при использовании MOSFET-транзисторов). Нулевое значение на входе выключает  $K_i$ , и ток может протекать только в обратном направлении за счёт наличия обратных диодов. В табл. 1 представлены в шестнадцатеричной системе счисления значения УБФ  $U = \langle U_8 U_7 U_6 U_5 U_4 U_3 U_2 U_1 \rangle$  для формирования соответствующего БВ при схемах соединения секций и стоек ИУМ (рис. 2).

Способы задействования секций  $A\bar{B}$  и  $AB$  при их соединении параллельно (рис. 2, а), последовательно (рис. 2, б) и по лучевой схеме с нейтральной точкой (рис. 2, д) имеют по одному варианту наборов значений УБФ соответственно  $\{06_h, 60_h, 09_h, 90_h\}$  и  $\{66_h, 69_h, 99_h, 96_h\}$  для формирования БВ.

Для схемы «квадрат» (рис. 2, в) и способа задействования секций  $A\bar{b}$  элементам множеств  $\mathbb{F}$  и  $\mathbb{G}$  в табл. 1 поставлены в соответствии значения УБФ, когда БВ создаётся при включении одного верхнего и двух нижних КЭ. Существует и второй вариант для каждого множества, при котором открыты два верхних и один нижний КЭ  $\{16_h, 64_h, 49_h, 91_h\}$  и  $\{46_h, 61_h, 19_h, 94_h\}$  соответственно. Все варианты являются равноправными с точки зрения числа переключений КЭ. В каждом из оставшихся двух способов задействования секций –  $Ab^*$  и  $\bar{a}\bar{b}$  – имеются по два набора значений УБФ (способ  $Ab^*$ :  $\{84_h, 42_h, 21_h, 18_h\}$  и  $\{12_h, 24_h, 48_h, 81_h\}$ ; способ  $\bar{a}\bar{b}$ :  $\{44_h, 4A_h, A1_h, 1A_h\}$  и  $\{52_h, 25_h, 58_h, 85_h\}$ . В первом наборе способа  $\bar{a}\bar{b}$  открыт один верхний и два нижних КЭ, а во втором наборе – два верхних и один нижний КЭ. Из каждой пары наборов этих значений можно составить 16 различных комбинаций. Однако только две из них не приводят к переключению КЭ, расположенных в одной из стоек, а следовательно, к возможности появления сквозных токов и выходу ИУМ из строя. Этими комбинациями для способа  $Ab^*$  являются наборы  $\{84_h, 24_h, 21_h, 81_h\}$  и  $\{12_h, 42_h, 48_h, 18_h\}$ , а для  $\bar{a}\bar{b}$  – наборы  $\{44_h, 25_h, A1_h, 85_h\}$  и  $\{52_h, 4A_h, 58_h, 1A_h\}$ .

Для случая лучевой схемы соединения секций с общей точкой (рис. 2, з) показаны наборы УБФ, которые справедливы, если под общей точкой понимается «земля» (низкий потенциал). При втором варианте, когда под общей точкой понимается высокий потенциал, имеют место другие 12 наборов:  $(A\bar{b} \rightarrow \{02_h, 20_h, 08_h, 80_h\}, \bar{a}\bar{b} \rightarrow \{22_h, 28_h, 88_h, 82_h\}, \bar{a}b^* \rightarrow \{A2_h, 2A_h, A8_h, 8A_h\}$ , отличающиеся от всех приведённых в табл. 1.

В случае лучевой схемы с нейтральной точкой (рис. 2, д) и способа задействования секций  $A\bar{b}$  с элементами множеств  $\mathbb{K}$  и  $\mathbb{L}$  связаны значения УБФ, при которых БВ формируется посредством включения од-

Таблица 1

Связь элементов множеств БВ со значениями УБФ  $U = \langle U_8 U_7 U_6 U_5 U_4 U_3 U_2 U_1 \rangle$   
Relation between BV sets and CBF values  $U = \langle U_8 U_7 U_6 U_5 U_4 U_3 U_2 U_1 \rangle$

Рис. 2, а				Рис. 2, б				Рис. 2, в											
$A\bar{B}$		$AB$		$A\bar{B}$		$AB$		$A\bar{B}$		$AB$		$A\bar{b}$				$Ab^*$		$\bar{a}\bar{b}$	
A	U	B	U	D	U	E	U	A	U	E	U	F	U	G	U	H	U	E	U
$\bar{a}_1$	06 <sub>h</sub>	$\bar{b}_1$	66 <sub>h</sub>	$\bar{d}_1$	06 <sub>h</sub>	$\bar{e}_1$	66 <sub>h</sub>	$\bar{a}_1$	96 <sub>h</sub>	$\bar{e}_1$	06 <sub>h</sub>	$\bar{f}_1$	86 <sub>h</sub>	$\bar{g}_1$	26 <sub>h</sub>	$\bar{h}_1$	12 <sub>h</sub>	$\bar{e}_1$	52 <sub>h</sub>
$\bar{a}_2$	60 <sub>h</sub>	$\bar{b}_2$	69 <sub>h</sub>	$\bar{d}_2$	60 <sub>h</sub>	$\bar{e}_2$	69 <sub>h</sub>	$\bar{a}_2$	66 <sub>h</sub>	$\bar{e}_2$	60 <sub>h</sub>	--	62 <sub>h</sub>	$\bar{g}_2$	68 <sub>h</sub>	$\bar{h}_2$	42 <sub>h</sub>	$\bar{e}_2$	4A <sub>h</sub>
$\bar{a}_3$	09 <sub>h</sub>	$\bar{b}_3$	99 <sub>h</sub>	$\bar{d}_3$	09 <sub>h</sub>	$\bar{e}_3$	99 <sub>h</sub>	$\bar{a}_3$	69 <sub>h</sub>	$\bar{e}_3$	09 <sub>h</sub>	$\bar{f}_3$	29 <sub>h</sub>	$\bar{g}_3$	89 <sub>h</sub>	$\bar{h}_3$	48 <sub>h</sub>	$\bar{e}_3$	58 <sub>h</sub>
$\bar{a}_4$	90 <sub>h</sub>	$\bar{b}_4$	96 <sub>h</sub>	$\bar{d}_4$	90 <sub>h</sub>	$\bar{e}_4$	96 <sub>h</sub>	$\bar{a}_4$	99 <sub>h</sub>	$\bar{e}_4$	90 <sub>h</sub>	$\bar{f}_4$	98 <sub>h</sub>	$\bar{g}_4$	92 <sub>h</sub>	$\bar{h}_4$	18 <sub>h</sub>	$\bar{e}_4$	1A <sub>h</sub>
Рис. 2, з				Рис. 2, д															
$A\bar{b}$		$\bar{a}\bar{b}$		$\bar{a}b^*$		$A\bar{B}$		$AB$		$A\bar{b}$				$Ab^*$		$\bar{a}\bar{b}$		$\bar{a}b^*$	
D	U	E	U	D	U	D	U	E	U	K	U	L	U	D	U	M	U	P	U
$\bar{d}_1$	04 <sub>h</sub>	$\bar{e}_1$	44 <sub>h</sub>	$\bar{d}_1$	54 <sub>h</sub>	$\bar{d}_1$	06 <sub>h</sub>	$\bar{e}_1$	66 <sub>h</sub>	$\bar{k}_1$	46 <sub>h</sub>	$\bar{l}_1$	64 <sub>h</sub>	$\bar{d}_1$	A6 <sub>h</sub>	$\bar{m}_1$	24 <sub>h</sub>	$\bar{p}_1$	A4 <sub>h</sub>
$\bar{d}_2$	40 <sub>h</sub>	$\bar{e}_2$	41 <sub>h</sub>	$\bar{d}_2$	45 <sub>h</sub>	$\bar{d}_2$	60 <sub>h</sub>	$\bar{e}_2$	69 <sub>h</sub>	$\bar{k}_2$	61 <sub>h</sub>	$\bar{l}_2$	49 <sub>h</sub>	$\bar{d}_2$	6A <sub>h</sub>	$\bar{m}_2$	21 <sub>h</sub>	$\bar{p}_2$	25 <sub>h</sub>
$\bar{d}_3$	01 <sub>h</sub>	$\bar{e}_3$	11 <sub>h</sub>	$\bar{d}_3$	51 <sub>h</sub>	$\bar{d}_3$	09 <sub>h</sub>	$\bar{e}_3$	99 <sub>h</sub>	$\bar{k}_3$	19 <sub>h</sub>	$\bar{l}_3$	91 <sub>h</sub>	$\bar{d}_3$	A9 <sub>h</sub>	$\bar{m}_3$	81 <sub>h</sub>	$\bar{p}_3$	A1 <sub>h</sub>
$\bar{d}_4$	10 <sub>h</sub>	$\bar{e}_4$	14 <sub>h</sub>	$\bar{d}_4$	15 <sub>h</sub>	$\bar{d}_4$	90 <sub>h</sub>	$\bar{e}_4$	96 <sub>h</sub>	$\bar{k}_4$	94 <sub>h</sub>	$\bar{l}_4$	16 <sub>h</sub>	$\bar{d}_4$	9A <sub>h</sub>	$\bar{m}_4$	84 <sub>h</sub>	$\bar{p}_4$	85 <sub>h</sub>

ного верхнего и двух нижних КЭ (табл. 1). Как и при схеме «квадрат» существует второй равноправный вариант, где включены два верхних и один нижний КЭ. В случае способа  $Ab^*$  был выбран вариант значений УБФ, при которых открыты один верхний и три нижних КЭ. Вариант  $\{56_h, 65_h, 59_h, 95_h\}$ , при котором открыты три верхних и один нижний КЭ, приводит к тому же самому числу переключений КЭ за оборот вала двигателя. Значения УБФ для способов  $\overline{ab}$  и  $\overline{ab}^*$  определяются так же, как для случаев  $Ab^*$  и  $\overline{ab}$  при схеме «квадрат» соответственно. В этом случае в табл. 1 приведены наборы, которые отличаются от показанных для схемы «квадрат».

На основе табл. 1 формируется таблица истинности, связывающая значения ЛП и УБФ, и определяются

аналитические выражения УБФ. В табл. 2 представлена таблица истинности для одного из распространённых наборов значений УБФ с учётом различного направления вращения.

В табл. 3 показаны аналитические выражения УБФ для остальных случаев из табл. 2. Определения  $t$  и  $v$  показаны в табл. 2.

С учётом изложенного общее число уникальных наборов значений УБФ, при которых возможно создание ненулевого БВ, равно 72. Общее число уникальных наборов значений УБФ для четырёхстоечного ИУМ равно 256, из которых 175 являются запрещёнными, так как приводят к протеканию тока короткого замыкания. Оставшиеся девять наборов  $00_h, 05_h, 0A_h, 50_h, 55_h, 5A_h, A0_h, A5_h, AA_h$  приводят к нулевому БВ.

Таблица 2

**Таблица истинности одного набора значений УБФ**  
**Truth table of one CBF value set**

$i$	$DR$	$H_2H_1$	$\mathbb{A}$	$U$	$U_8$	$U_7$	$U_6$	$U_5$	$U_4$	$U_3$	$U_2$	$U_1$	Математическое описание системы УБФ  $U_1 = U_4 = t \oplus DR;$ $U_2 = U_3 = t \oplus v;$ $U_5 = U_8 = t \oplus H_2;$ $U_6 = U_7 = t \oplus H_1;$  где $t = DRH_1 \oplus DRH_2 \oplus H_1H_2;$ $v = DR \oplus H_2 \oplus H_1 \oplus 1$
0	0	$h_0$	$\overline{a}_1$	$06_h$	0	0	0	0	0	1	1	0	
1	0	$h_1$	$\overline{a}_2$	$60_h$	0	1	1	0	0	0	0	0	
2	0	$h_2$	$\overline{a}_4$	$90_h$	1	0	0	1	0	0	0	0	
3	0	$h_3$	$\overline{a}_3$	$09_h$	0	0	0	0	1	0	0	1	
4	1	$h_0$	$\overline{a}_3$	$09_h$	0	0	0	0	1	0	0	1	
5	1	$h_1$	$\overline{a}_4$	$90_h$	1	0	0	1	0	0	0	0	
6	1	$h_2$	$\overline{a}_2$	$60_h$	0	1	1	0	0	0	0	0	
7	1	$h_3$	$\overline{a}_1$	$06_h$	0	0	0	0	0	1	1	0	

Таблица 3

**Аналитические описания систем УБФ с учётом направления вращения**  
**Analytical expressions of the CBF considering rotating direction**

Рис. 2, а		Рис. 2, в					
$AB: \{66_h, 69_h, 99_h, 96_h\}$		$\overline{Ab}: \{04_h, 40_h, 01_h, 10_h\}$		$\overline{ab}: \{44_h, 41_h, 11_h, 14_h\}$		$\overline{ab}^*: \{54_h, 45_h, 51_h, 15_h\}$	
$U_1 = U_4 = \overline{U}_2 = \overline{U}_3 = DR \oplus H_1;$ $U_5 = U_8 = \overline{U}_6 = \overline{U}_7 = DR \oplus H_2$		$U_2 = U_4 = U_6 = U_8 = 0;$ $U_1 = t \oplus DR;$ $U_3 = t \oplus v;$ $U_5 = t \oplus H_2;$ $U_7 = t \oplus H_1$		$U_2 = U_4 = U_6 = U_8 = 0;$ $U_1 = \overline{U}_3 = DR \oplus H_1;$ $U_5 = \overline{U}_7 = DR \oplus H_2;$		$U_2 = U_4 = U_6 = U_8 = 0;$ $U_1 = t \oplus v \oplus 1;$ $U_3 = t \oplus DR \oplus 1;$ $U_5 = t \oplus H_1 \oplus 1;$ $U_7 = t \oplus H_2 \oplus 1$	
Рис. 2, б		Рис. 2, г		Рис. 2, д		Рис. 2, е	
$\overline{AB}: \{96_h, 66_h, 69_h, 99_h\}$		$\overline{Ab}: \{86_h, 62_h, 29_h, 98_h\}$		$Ab^*: \{12_h, 42_h, 48_h, 18_h\}$		$\overline{ab}: \{52_h, 4A_h, 58_h, 1A_h\}$	
$U_1 = U_4 = \overline{U}_2 = \overline{U}_3 = DR \oplus H_2;$ $U_6 = U_7 = \overline{U}_5 = \overline{U}_8 = DR \oplus H_1$		$U_1 = t \oplus DR;$ $U_4 = \overline{U}_2 = DR \oplus H_2;$ $U_3 = t \oplus v;$ $U_5 = t \oplus H_2;$ $U_6 = \overline{U}_8 = DR \oplus H_1;$ $U_7 = t \oplus H_1$		$U_1 = U_3 = U_6 = U_8 = 0;$ $U_4 = \overline{U}_2 = DR \oplus H_2;$ $U_7 = \overline{U}_5 = DR \oplus H_1$		$U_1 = U_3 = U_6 = U_8 = 0;$ $U_2 = t \oplus DR \oplus 1;$ $U_4 = t \oplus v \oplus 1;$ $U_5 = t \oplus H_1 \oplus 1;$ $U_7 = t \oplus H_2 \oplus 1$	
$\overline{Ab}: \{46_h, 61_h, 19_h, 94_h\}$		$Ab^*: \{A6_h, 6A_h, A9_h, 9A_h\}$		$\overline{ab}: \{24_h, 21_h, 81_h, 84_h\}$		$\overline{ab}^*: \{52_h, 4A_h, 58_h, 1A_h\}$	
$U_1 = \overline{U}_3 = DR \oplus H_1;$ $U_2 = t \oplus v;$ $U_4 = t \oplus DR;$ $U_5 = \overline{U}_6 = DR \oplus H_2;$ $U_6 = t \oplus H_1;$ $U_8 = t \oplus H_2$		$U_1 = \overline{U}_2 = t \oplus DR;$ $U_3 = \overline{U}_4 = t \oplus v;$ $U_5 = \overline{U}_6 = t \oplus H_2;$ $U_7 = \overline{U}_8 = t \oplus H_1$		$U_2 = U_4 = U_5 = U_7 = 0;$ $U_1 = \overline{U}_3 = DR \oplus H_1;$ $U_8 = \overline{U}_6 = DR \oplus H_2$		$U_1 = U_3 = U_6 = U_8 = 0;$ $U_2 = t \oplus DR \oplus 1;$ $U_4 = t \oplus v \oplus 1;$ $U_5 = t \oplus H_1 \oplus 1;$ $U_7 = t \oplus H_2 \oplus 1$	

При описании УБФ было использовано 13 различных трёхместных функций, шесть из которых взаимно инверсные и одна является константой нуль. У взаимно инверсных функций следующие изображающие числа: 90 и 165, 60 и 195, 129 и 126, 24 и 231, 66 и 189, 36 и 219. Константа нуль означает, что данный КЭ в ИУМ можно не использовать, что приведёт к удешевлению систем и повышению надёжности. Следовательно, в

лучевой схеме с общей точкой при всех способах взаимодействия фаз, в схеме «квадрат» при способах  $Ab^*$  и  $\bar{a}\bar{b}$ , а также в лучевой схеме с нейтральной точкой при способах  $\bar{a}\bar{b}$  и  $\bar{a}b^*$  можно использовать не четырёхстоечные, а четырёхключевые ИУМ.

**Четырёхключевые импульсные усилители мощности.** В табл. 4, 5 и 6 представлены возможные варианты подключения четырёхключевого ИУМ к источни-

Таблица 4

**Лучевое соединение с общей точкой**  
**Radial Connection with Common Point**

$\bar{A}\bar{b}$	Д	1	$\bar{a}\bar{b}$	Е	$\sqrt{2}$	$\bar{a}b^*$	Д	1	$\bar{A}\bar{b}$	Д	1	$\bar{a}\bar{b}$	Е	$\sqrt{2}$	$\bar{a}b^*$	Д	1
$U_1 = t \oplus DR;$ $U_2 = t \oplus v;$ $U_3 = t \oplus H_2;$ $U_4 = t \oplus H_1$			$U_1 = DR \oplus H_1;$ $U_2 = DR \oplus H_1;$ $U_3 = DR \oplus H_2;$ $U_4 = DR \oplus H_2$			$U_1 = t \oplus v \oplus 1;$ $U_2 = t \oplus DR \oplus 1;$ $U_3 = t \oplus H_1 \oplus 1;$ $U_4 = t \oplus H_2 \oplus 1$			$U_1 = t \oplus v;$ $U_2 = t \oplus DR;$ $U_3 = t \oplus H_1;$ $U_4 = t \oplus H_2$			$U_1 = DR \oplus H_1;$ $U_2 = DR \oplus H_1;$ $U_3 = DR \oplus H_2;$ $U_4 = DR \oplus H_2$			$U_1 = t \oplus DR \oplus 1;$ $U_2 = t \oplus v \oplus 1;$ $U_3 = t \oplus H_2 \oplus 1;$ $U_4 = t \oplus H_1 \oplus 1$		

Таблица 5

**Лучевое соединение с нейтральной точкой**  
**Radial Connection with Neutral Point**

$\bar{a}\bar{b}$	М	$1/\sqrt{2}$	$\bar{a}b^*$	Р	$2/3$	$\bar{a}\bar{b}$	М	$1/\sqrt{2}$	$\bar{a}b^*$	Р	$2/3$
$U_1 = DR \oplus H_1 \oplus 1;$ $U_2 = DR \oplus H_1;$ $U_3 = DR \oplus H_2;$ $U_4 = DR \oplus H_2 \oplus 1$			$U_1 = t \oplus DR \oplus 1;$ $U_2 = t \oplus v \oplus 1;$ $U_3 = t \oplus H_1 \oplus 1;$ $U_4 = t \oplus H_2 \oplus 1$			$U_1 = DR \oplus H_1;$ $U_2 = DR \oplus H_1 \oplus 1;$ $U_3 = DR \oplus H_2 \oplus 1;$ $U_4 = DR \oplus H_2$			$U_1 = t \oplus v \oplus 1;$ $U_2 = t \oplus DR \oplus 1;$ $U_3 = t \oplus H_2 \oplus 1;$ $U_4 = t \oplus H_1 \oplus 1$		

Таблица 6

Замкнутое соединение «квадрат»

Closed Connection «Square»

$\bar{a}\bar{b}$	$\mathbb{E}$	$\sqrt{2}$	$Ab^*$	$\mathbb{H}$	4/3	$\bar{a}\bar{b}$	$\mathbb{E}$	$\sqrt{2}$	$Ab^*$	$\mathbb{H}$	4/3
$U_1 = t \oplus DR \oplus 1;$ $U_2 = t \oplus v \oplus 1;$ $U_3 = t \oplus H_1 \oplus 1;$ $U_4 = t \oplus H_2 \oplus 1;$			$U_1 = DR \oplus H_2 \oplus 1;$ $U_2 = DR \oplus H_2;$ $U_3 = DR \oplus H_1 \oplus 1;$ $U_4 = DR \oplus H_1$			$U_1 = t \oplus v \oplus 1;$ $U_2 = t \oplus DR \oplus 1;$ $U_3 = t \oplus H_2 \oplus 1;$ $U_4 = t \oplus H_1 \oplus 1;$			$U_1 = DR \oplus H_2;$ $U_2 = DR \oplus H_2 \oplus 1;$ $U_3 = DR \oplus H_1;$ $U_4 = DR \oplus H_1 \oplus 1$		

ку питания и к ДВД со схемами соединения секций с общей точкой, с нейтральной точкой и в виде «квадрата» соответственно.

Четырёхключевой ИУМ представляет собой частный случай четырёхстоечного ИУМ, в котором в каждой стойке один из КЭ заменён на обратный диод (ОД). Нумерация КЭ и ОД в четырёхключевом ИУМ совпадает с нумерацией стоек и с последовательностью выводов двигателя:  $K_1$  соединён с выводом  $A$ ,  $K_2$  – с выводом  $B$ ,  $K_3$  – с выводом  $C$  и  $K_4$  – с выводом  $D$ .

Приведённые в табл. 4, 5 и 6 системы аналитических выражений УБФ совпадают с показанными в табл. 3 математическими описаниями, где четыре функции равны константе нуль. Например, для схемы «квадрат» (рис. 2, в) и способа заедьствования секций  $\bar{a}\bar{b}$  (набор  $\{52_h, 4A_h, 58_h, 1A_h\}$ ) аналитические описания в табл. 3 для  $U_2, U_4, U_5$  и  $U_7$  совпадают соответственно с математическими выражениями в табл. 6 для  $U_1, U_2, U_3$  и  $U_4$ , где  $K_1$  и  $K_2$  соединены с «землёй». Определения  $t$  и  $v$  совпадают с показанными в табл. 2. Рядом с обозначением способа заедьствования секций приведено обозначение множества и значение амплитуды БВ.

В [17] рассмотрено использование четырёхключевого ИУМ и ДВД с лучевой схемой с общей точкой в виде «земли» для вращения вала двигателя в одном направлении. В [18] был предложен ДВД со схемой «квадрат» с четырёхключевым ИУМ и способом  $Ab^*$  без возможности реверса, а в [19] с возможностью реверса посредством механического двухпозиционного переключателя.

Приведённые в табл. 4, 5 и 6 аналитические выражения позволяют выполнять реверс двигателя. Как и в случае с четырёхстоечным ИУМ существует 12 не-

нулевых выражений. Все 12 имеют место при лучевой схеме с общей точкой и по 8 выражений при лучевой схеме с нейтральной точкой и схеме «квадрат». Если приравнять  $DR$  к нулю или единице, то, как и в случае четырёхстоечного ИУМ, получаются выражения для вращения вала двигателя в единственном направлении против или по часовой стрелке соответственно.

В лучевой схеме с общей точкой 12 наборов УБФ формируют 12 различных БВ. Оставшиеся четыре набора  $0_h, 3_h, C_h$  и  $F_h$  соответствуют нулевому БВ. Следовательно, нет запрещенных наборов УБФ.

**Комбинированные способы заедьствования секций.** Амплитуда пульсаций электромагнитного момента в двухфазном ВД при четырёх БВ составляет около 15%, а в трёхфазном ВД при шести БВ – около 7%. Большие пульсации момента негативно сказываются на плавности хода и приводят к дополнительным потерям мощности. Одним из подходов к уменьшению амплитуды пульсации момента является создание комбинированных способов заедьствования секций, в которых не менее восьми БВ. При формировании комбинированных способов следует выбирать БВ таким образом, чтобы их длина не отличалась более чем на 14%, а угловой сдвиг между соседними БВ был одинаковым и не превышала 45 градусов.

Указанным рекомендациям удовлетворяют две пары множеств. Первую пару образуют множества  $\mathbb{E}$  и  $\mathbb{H}$ , которые имеют место при схеме «квадрат», а вторую пару – множества  $\mathbb{M}$  и  $\mathbb{P}$  в случае использования лучевой схемы с нейтральной точкой. В обеих парах разница между длинами векторов составляет около 6% и угловой сдвиг – 45 градусов, что приводит к амплитуде пульсации момента, равной приблизительно

4%. Элементы множества  $\mathbb{E}$  могут быть сформированы двумя способами  $AB$  и  $\bar{a}\bar{b}$ . Элементы остальных множеств имеют единственную реализацию:  $\mathbb{H} - Ab^*$ ,  $\mathbb{M} - \bar{a}\bar{b}$  и  $\mathbb{P} - \bar{a}b^*$ . При схеме «квадрат» имеет место множество  $\mathbb{S} = \{\bar{h}_1, \bar{e}_1, \bar{h}_2, \bar{e}_2, \bar{h}_3, \bar{e}_3, \bar{h}_4, \bar{e}_4\}$ , а при лучевой схеме с нейтральной точкой – множество  $\mathbb{T} = \{\bar{p}_1, \bar{m}_1, \bar{p}_2, \bar{m}_2, \bar{p}_3, \bar{m}_3, \bar{p}_4, \bar{m}_4\}$ , где  $\text{Arg}(\bar{s}_i) = \text{Arg}(\bar{t}_i)$ ,  $|\bar{s}_i| = 2|\bar{t}_i|$ ,  $i$  – номер элемента множества.

Восемь БВ множеств  $\mathbb{S}$  и  $\mathbb{T}$  соответствуют восьми 45-градусным секторам, которые можно сформировать с помощью четырёх ДХ. Четыре ДХ размещаются согласно (1), где  $i = \bar{1}, \bar{4}$ ,  $\bar{\omega}_1 \equiv \bar{s}_1$  и  $n = 4$ . Аналитические выражения для  $H_1, H_2, H_3$  и  $H_4$  определяются согласно (2). На рис. 4 в комплексной плоскости показано размещение ДХ, изображены векторы множеств  $\mathbb{S}$  и  $\mathbb{T}$  и секторы со значениями сигналов  $\mathbf{H} = \langle H_4 H_3 H_2 H_1 \rangle$ . Единичные значения соответствующих сигналов  $\mathbf{H}$  обо-

значены единичными и двойными полуокружностями и полуквадратами.

В табл. 7 приведены все возможные значения УБФ  $\mathbf{U} = \langle U_4 U_3 U_2 U_1 \rangle$  для четырёхключевого ИУМ и  $\mathbf{U} = \langle U_8 U_7 U_6 U_5 U_4 U_3 U_2 U_1 \rangle$  для четырёхстоечного ИУМ, которые необходимы для формирования БВ при комбинированных способах задействования секций. Первый ( $\mathbf{U}^I$ ) и второй ( $\mathbf{U}^{II}$ ) варианты при четырёхключевом ИУМ как при схеме «квадрат» (множество  $\mathbb{S}$ ), так и при лучевой схеме (множество  $\mathbb{T}$ ) имеют место при соединении  $K_1$  и  $K_2$  соответственно с низким и высоким потенциалами. В случае четырёхстоечного ИУМ и схемы «квадрат» (множество  $\mathbb{S}$ ) существуют два равноправных варианта ( $\mathbf{U}^I$  и  $\mathbf{U}^{II}$ ), при которых отсутствуют переключения КЭ в стойке и при переходе к следующему межкоммутационному интервалу изменяется направление протекания тока только в одной из четырёх секций при формировании БВ. В последнем столбце табл. 7 с помощью символа «~» указаны все оставшие-

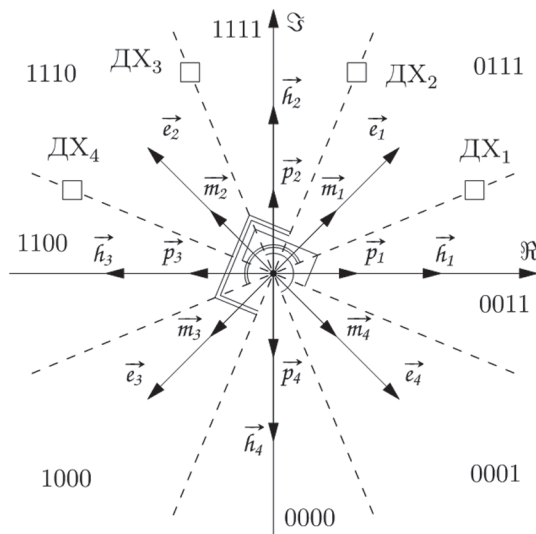


Рис. 4. Размещение датчиков Холла при комбинированных способах  
 Fig. 4. Hall Sensor Allocation at combined methods

Таблица 7

ЛП, УБФ и множества  $\mathbb{S}$  и  $\mathbb{T}$   
 Logic Variables, CBF,  $\mathbb{S}$  and  $\mathbb{T}$  Sets

$i$	0	1	3	7	15	14	12	8	24	28	30	31	23	19	17	16	~
$DR$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	~
$\mathbf{H}$	0000	0001	0011	0111	1111	1110	1100	1000	1000	1100	1110	1111	0111	0011	0001	0000	~
$\mathbb{S}$	$\vec{h}_1$	$\vec{e}_1$	$\vec{h}_2$	$\vec{e}_2$	$\vec{h}_3$	$\vec{e}_3$	$\vec{h}_4$	$\vec{e}_4$	$\vec{e}_2$	$\vec{h}_2$	$\vec{e}_1$	$\vec{h}_1$	$\vec{e}_4$	$\vec{h}_4$	$\vec{e}_3$	$\vec{h}_3$	
$\mathbf{U}^I$	$5_h$	$D_h$	$9_h$	$B_h$	$A_h$	$E_h$	$6_h$	$7_h$	$B_h$	$9_h$	$D_h$	$5_h$	$7_h$	$6_h$	$E_h$	$A_h$	$0_h$
$\mathbf{U}^{II}$	$A_h$	$E_h$	$6_h$	$7_h$	$5_h$	$D_h$	$9_h$	$B_h$	$7_h$	$6_h$	$E_h$	$A_h$	$B_h$	$9_h$	$D_h$	$5_h$	$0_h$
$\mathbf{U}^I$	$12_h$	$06_h$	$24_h$	$60_h$	$48_h$	$09_h$	$81_h$	$90_h$	$60_h$	$24_h$	$06_h$	$12_h$	$90_h$	$81_h$	$09_h$	$48_h$	$00_h$
$\mathbf{U}^{II}$	$84_h$	$06_h$	$42_h$	$60_h$	$21_h$	$09_h$	$18_h$	$90_h$	$60_h$	$42_h$	$06_h$	$84_h$	$90_h$	$18_h$	$09_h$	$21_h$	$00_h$
$\mathbb{T}$	$\vec{p}_1$	$\vec{m}_1$	$\vec{p}_2$	$\vec{m}_2$	$\vec{p}_3$	$\vec{m}_3$	$\vec{p}_4$	$\vec{m}_4$	$\vec{m}_2$	$\vec{p}_2$	$\vec{m}_1$	$\vec{p}_1$	$\vec{m}_4$	$\vec{p}_4$	$\vec{m}_3$	$\vec{p}_3$	
$\mathbf{U}^I$	$D_h$	$9_h$	$B_h$	$A_h$	$E_h$	$6_h$	$7_h$	$5_h$	$A_h$	$B_h$	$9_h$	$D_h$	$5_h$	$7_h$	$6_h$	$E_h$	$0_h$
$\mathbf{U}^{II}$	$E_h$	$6_h$	$7_h$	$5_h$	$D_h$	$9_h$	$B_h$	$A_h$	$5_h$	$7_h$	$6_h$	$E_h$	$A_h$	$B_h$	$9_h$	$D_h$	$0_h$



ся комбинации ЛП, которые соответствуют аварийным ситуациям, и значения УБФ, равные нулю. Следовательно, при выходе из строя ДХ или линии обратной связи происходит отключение КЭ и перевод двигателя в генераторный режим.

На базе табл. 7 формируются аналитические выражения УБФ для комбинированных способов. В случае четырехключевого ИУМ и схемы «квадрат» (табл. 7) УБФ в дизъюнктивной форме имеют вид:

$$\begin{aligned}
 U_1^I &= U_2^{II} = DR \overline{H_4} \left( \overline{H_3} \overline{H_2} \vee H_2 H_1 \right) \vee \\
 &\vee \overline{DR} \overline{H_4} \left( H_3 H_2 \vee \overline{H_2} \overline{H_1} \right) \vee \overline{H_4} H_3 H_2 H_1 \vee H_4 \overline{H_3} \overline{H_2} \overline{H_1}; \\
 U_2^I &= U_1^{II} = DR H_4 \left( H_3 H_2 \vee \overline{H_2} \overline{H_1} \right) \vee \\
 &\vee \overline{DR} H_4 \left( \overline{H_3} \overline{H_2} \vee H_2 H_1 \right) \vee \overline{H_4} H_3 H_2 H_1 \vee H_4 \overline{H_3} \overline{H_2} \overline{H_1}; \\
 U_3^I &= U_4^{II} = DR \left( \overline{H_3} \overline{H_2} \overline{H_1} \vee \overline{H_4} \overline{H_3} \overline{H_2} \vee H_4 H_3 \overline{H_1} \right) \vee \\
 &\vee \overline{DR} \left( H_3 H_2 H_1 \vee H_4 H_3 H_2 \vee \overline{H_4} \overline{H_3} H_1 \right); \\
 U_4^I &= U_3^{II} = DR \left( H_3 H_2 H_1 \vee H_4 H_3 H_2 \vee \overline{H_4} \overline{H_3} H_1 \right) \vee \\
 &\vee \overline{DR} \left( \overline{H_3} \overline{H_2} \overline{H_1} \vee \overline{H_4} \overline{H_3} \overline{H_2} \vee H_4 H_3 \overline{H_1} \right).
 \end{aligned} \quad (3)$$

При четырёхстоечном ИУМ и схеме «квадрат» (рис. 2, в):

$$\begin{aligned}
 U_1^I &= U_4^{II} = DR \overline{H_4} \overline{H_3} H_1 \vee \overline{DR} H_4 H_3 \overline{H_1}; \\
 U_2^I &= U_3^{II} = DR H_4 H_3 H_2 \vee \overline{DR} \overline{H_4} \overline{H_3} \overline{H_2}; \\
 U_3^I &= U_2^{II} = DR H_4 H_3 \overline{H_1} \vee \overline{DR} \overline{H_4} \overline{H_3} H_1; \\
 U_4^I &= U_1^{II} = DR \overline{H_4} \overline{H_3} \overline{H_2} \vee \overline{DR} H_4 H_3 H_2; \\
 U_5^I &= U_8^{II} = DR H_3 H_2 H_1 \vee \overline{DR} \overline{H_3} \overline{H_2} \overline{H_1}; \\
 U_6^I &= U_7^{II} = DR H_4 \overline{H_2} \overline{H_1} \vee \overline{DR} \overline{H_4} H_2 H_1; \\
 U_7^I &= U_6^{II} = DR \overline{H_3} \overline{H_2} \overline{H_1} \vee \overline{DR} H_3 H_2 H_1; \\
 U_8^I &= U_5^{II} = DR \overline{H_4} H_2 H_1 \vee \overline{DR} H_4 \overline{H_2} \overline{H_1}.
 \end{aligned} \quad (4)$$

Для четырёхключевого ИУМ и лучевой схемы с нейтральной точкой (табл. 6):

$$\begin{aligned}
 U_1^I &= U_2^{II} = DR H_2 \left( H_4 H_3 \vee \overline{H_4} H_1 \right) \vee \\
 &\vee \overline{DR} \overline{H_2} \left( \overline{H_4} \overline{H_3} \vee H_4 \overline{H_1} \right) \vee \overline{H_4} \overline{H_3} H_2 H_1 \vee H_4 H_3 \overline{H_2} \overline{H_1}; \\
 U_2^I &= U_1^{II} = DR \overline{H_2} \left( \overline{H_4} \overline{H_3} \vee H_4 \overline{H_1} \right) \vee \\
 &\vee \overline{DR} H_2 \left( H_4 H_3 \vee \overline{H_4} H_1 \right) \vee \overline{H_4} \overline{H_3} H_2 H_1 \vee H_4 H_3 \overline{H_2} \overline{H_1}; \\
 U_3^I &= U_4^{II} = DR \overline{H_4} \left( \overline{H_3} \overline{H_2} \vee H_2 H_1 \right) \vee \\
 &\vee \overline{DR} H_4 \left( H_3 H_2 \vee \overline{H_2} \overline{H_1} \right) \vee \overline{H_4} H_3 H_2 H_1 \vee H_4 \overline{H_3} \overline{H_2} \overline{H_1}; \\
 U_4^I &= U_3^{II} = DR H_4 \left( H_3 H_2 \vee \overline{H_2} \overline{H_1} \right) \vee \\
 &\vee \overline{DR} \overline{H_4} \left( \overline{H_3} \overline{H_2} \vee H_2 H_1 \right) \vee \overline{H_4} H_3 H_2 H_1 \vee H_4 \overline{H_3} \overline{H_2} \overline{H_1}.
 \end{aligned} \quad (5)$$

Если в (3), (4) и (5) положить  $DR = 0$  или  $DR = 1$ , то получаются выражения для вращения ротора в одном направлении против и по часовой стрелке соответственно.

Таким образом, комбинированные способы задействования секций с минимальной амплитудой пульсаций момента можно реализовать с помощью четырёхстоечного ИУМ со схемой соединения секций «квадрат» и способами задействования секций  $AB$  и  $Ab^*$ , а также посредством четырёхключевого ИУМ с лучевой схемой с нейтральной точкой (табл. 5) и со схемой «квадрат» (табл. 6). Последний вариант был предложен в [20] без математического описания и возможности реверса.

**Выводы.** Получено математическое описание управляющих булевых функций цифрового устройства управления современного электропривода на основе двухфазного вентильного двигателя с двухсекционной фазной обмоткой, которое учитывает:

наличие 256 наборов управляющих булевых функций в четырёхстоечном импульсном усилителе мощности, среди которых 175 наборов приводят к току короткого замыкания;

существование 16 наборов управляющих булевых функций в четырёхключевом импульсном усилителе мощности, среди которых отсутствуют наборы, приводящие к току короткого замыкания;

семь способов задействования секций ( $AB, \overline{AB}, \overline{Ab}, Ab^*, \overline{Ab}, \overline{ab}, \overline{ab}^*$ );

пять схем соединения секций (параллельная, последовательная, «квадрат», лучевая с общей и нейтральной точками);

два варианта импульсного усилителя мощности (четырёхстоечный и четырёхключевой);

прямое и обратное направления вращения ротора двигателя;

в случае комбинированных способов появление аварийных ситуаций, связанных с выходом из строя датчика Холла или линии обратной связи.

Приведено аналитическое выражение для размещения датчиков Холла, которое было использовано для расположения двух и четырёх датчиков, а также для вывода математического описания соответствующих сигналов о положении ротора. Выявлено, что форма сигналов о положении ротора при вращении вала двигателя соответствует коду Джонсона.

Представленные аналитические выражения могут быть использованы для получения механических, регулировочных и энергетических характеристик, а также при исследовании физических процессов в силовой части электропривода.

Показанными математическими выражениями можно воспользоваться при реализации цифрового устройства управления на основе программируемых логических интегральных схем, которые позволяют создавать быстродействующие системы управления с параллельными алгоритмами управления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кривилёв А.В.** Автоматизация формирования характеристик в задачах импульсного управления системой «усилитель мощности – исполнительный двигатель». I. Механические характеристики. – Известия РАН. Теория и системы управления, 2013, № 2, с. 92–104.
2. **Кривилёв А.В.** Автоматизация формирования характеристик в задачах импульсного управления системой «усилитель мощности – исполнительный двигатель». II. Энергетические характеристики. – Известия РАН. Теория и системы управления, 2013, № 3, с. 133–142.
3. **Гридин В.М.** Бесконтактные двигатели постоянного тока с дискретным управлением и модуляцией тока по положению ротора. – Электричество, 2021, № 3, с. 60–64.
4. **Кривилёв А.В., Дунич Е.А.** Управление двухфазным вентильным двигателем с двухсекционной фазной обмоткой. I. Формирование и аналитическое описание базовых векторов – Электричество, 2021, № 10, с. 31–39.
5. **Беленький Ю.М., Зеленков Г.С., Микеров А.Г.** Опыт разработки и применения бесконтактных моментных приводов. Л.: ЛДНТП, 1987, 28 с.
6. **Arm®-based microcontrollers (MCUs) – Products.** Texas Instruments [Электрон. ресурс], URL: <https://www.ti.com/microcontrollers-mcus-processors/microcontrollers/arm-based-microcontrollers/products.html#p887=ARM%20Cortex-M4F> (дата обращения 10.05.2021).
7. **Z16FMC Series of Motor Control MCUs** [Электрон. ресурс], URL: [https://www.zilog.com/index.php?option=com\\_product&task=product&businessLine=152&id=153&parent\\_id=153&Itemid=105](https://www.zilog.com/index.php?option=com_product&task=product&businessLine=152&id=153&parent_id=153&Itemid=105) (дата обращения 10.05.2021).
8. **Motor Control ICs** [Электрон. ресурс], URL: <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/motor-control-ics/> (дата обращения 14.05.2021).
9. **Микроконтроллеры 32 бит** – АО «НИИЭТ» [Электрон. ресурс], URL: <https://niiet.ru/product-category/civil/civil-microcont-32-bit/> (дата обращения 14.05.2021).
10. **Микроконтроллеры и процессоры.** Сайт АО «ПКК Миландр» [Электрон. ресурс], URL: [https://ic.milandr.ru/products/mikrokontrollery\\_i\\_protessory/32\\_razryadnye\\_mikrokontrollery/](https://ic.milandr.ru/products/mikrokontrollery_i_protessory/32_razryadnye_mikrokontrollery/) (дата обращения 14.05.2021).
11. **Rodriguez-Andina J.J., et al.** FPGA: Fundamentals, Advanced Features, and Applications in Industrial Electronics. CRC Press, 2017, 250 p., DOI:10.1201/9781315162133.
12. **Intel FPGA** [Электрон. ресурс], URL: <https://www.intel.ru/content/www/ru/ru/products/programmable.html> (дата обращения 14.05.2021).

13. **АО «ВЗПП-С»** [Электрон. ресурс], URL: <https://vzpp-s.ru> (дата обращения 14.05.2021).

14. **Кривилев А.В.** Автоматизированный синтез управляющих булевых функций мехатронного модуля привода с трёхфазным вентильным двигателем. – Известия РАН. Теория и системы управления, 2010, № 2, с. 153–163.

15. **Кривилев А.В.** Методы импульсного управления электрическими двигателями современных приводных систем. – Мехатроника, автоматизация, управление, 2013, № 4, с. 44–49.

16. **Гагарин С.А.** Автоматизированный синтез цифровых алгоритмов импульсного управления исполнительным механизмом привода с трёхфазным вентильным двигателем: дис. ... канд. техн. наук, 2012, 200 с.

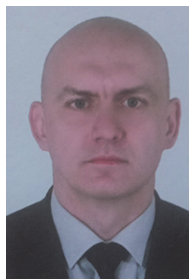
17. **Кацман М.М.** Электрические машины приборных устройств и средств автоматизации. М.: Издательский центр "Академия", 2006, 368 с.

18. **Пат. RU 2075820 С1.** Бесконтактный двигатель постоянного тока / Д.А. Ицков, 1997.

19. **Пат. RU 2076447 С1.** Бесконтактный двигатель постоянного тока / Д.А. Ицков, 1997.

20. **Пат. RU 2075821 С1.** Бесконтактный двигатель постоянного тока / Д.А. Ицков, 1997.

[31.05.2021]



*Авторы: Кривилёв Александр Владимирович – доктор техн. наук, директор Института №7 «Робототехнические и интеллектуальные системы», и.о. зав. кафедрой «Системы приводов авиационно-космической техники» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).*



*Дунич Евгений Алексеевич – аспирант кафедры «Системы приводов авиационно-космической техники» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).*

## Mathematical Description of the Control Functions of a Switched Two-Phase Motor with a Two-Sectional Phase Winding

**KRIVILEV Alexander V.** (Moscow Aviation Institute (The National Research University), Moscow, Russia) – Director of the Institute No. 7 "Robotic and Intelligent Systems", Acting Head of the Drive Systems of Aerospace Engineering Dept., Dr. Sci. (Eng.).

**DUNICH Evgeniy A.** (Moscow Aviation Institute (The National Research University), Moscow, Russia) – Postgraduate Student of the Drive Systems of Aerospace Engineering Dept.

*The mathematical description of a digital control device for a modern electric drive based on a switched two-phase motor with two-sectional phase windings is presented. For all possible winding section connection schemes and their basic usage methods involving the application of a four-arm or four-*

switch power amplifier; the cyclic sequences of control signals are determined and analytical expressions for them are derived that take into account the motor rotor rotation in both directions. Compact versions of representing them in form of Zhegalkin's polynomial or in the disjunctive form are obtained. Analytical dependencies of the rotor position digital signals received from Hall sensors are obtained, and their interrelation with the base vectors and number of pole pairs on the rotor magnet is revealed. Combined methods for using the phase winding sections are elaborated, which make it possible to obtain the base vectors uniformly distributed over the rotation circumference with their amplitudes minimally differing from each other. The derived mathematical expressions can be used in designing a digital electric drive and implementing high-speed algorithms based on programmable logic circuits and systems on a chip.

**К е у о р д с:** electric drive, impulse control, switched two-phase motor, section connection schemes, mathematical de-scription of control functions

## REFERENCES

1. **Krivilev A.V.** *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya – in Russ. (Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Control Systems and Theory)*, 2013, No. 2, pp. 92–104.
2. **Krivilev A.V.** *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya – in Russ. (Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Control Systems and Theory)*, 2013, No. 3, pp. 133–142.
3. **Gridin V.M.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2021, No. 3, pp. 60–64.
4. **Krivilyov A.V., Dunich E.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2021, No. 10, pp. 31–39.
5. **Belen'kiy Yu.M., Zelenkov G.S., Mikerov A.G.** *Opyt razrabotki i primeneniya beskontaktnykh momentnykh privodov* (Brushless torque drive development experience). L.: LDNTP, 1987, 28 p.
6. **Arm@-based microcontrollers (MCUs) – Products.** Texas Instruments [Electron. Resource], URL: <https://www.ti.com/microcontrollers-mcus-processors/microcontrollers/arm-based-microcontrollers/products.html#p887=ARM%20Cortex-M4F> (Date of appeal 10.05.2021).
7. **Z16FMC Series of Motor Control MCUs** [Electron. Resource], URL: [https://www.zilog.com/index.php?option=com\\_product&task=product&businessLine=152&id=153&parent\\_id=153&Itemid=105](https://www.zilog.com/index.php?option=com_product&task=product&businessLine=152&id=153&parent_id=153&Itemid=105) (Date of appeal 10.05.2021).
8. **Motor Control ICs** [Electron. Resource], URL: <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/motor-control-ics/> (Date of appeal 14.05.2021).
9. **Mikrokontrollery 32 bit** (32 Bit Microcontrollers). АО «НИИ-ЭТ» [Electron. Resource], URL: <https://niiet.ru/product-category/civil/civil-microcont-32-bit/> (Date of appeal 14.05.2021).
10. **Mikrokontrollery i protsessory** (Microcontrollers and processors). Website of JSC "PKK Milander" [Electron. Resource], URL: [https://ic.milandr.ru/products/mikrokontrollery\\_i\\_protssory/32\\_razryadnye\\_mikrokontrollery/](https://ic.milandr.ru/products/mikrokontrollery_i_protssory/32_razryadnye_mikrokontrollery/) (Date of appeal 14.05.2021).
11. **Rodriguez-Andina J.J., et al.** *FPGA: Fundamentals, Advanced Features, and Applications in Industrial Electronics.* CRC Press, 2017, 250 p., DOI:10.1201/9781315162133.
12. **Intel FPGA** [Electron. Resource], URL: <https://www.intel.ru/content/www/ru/ru/products/programmable.html> (Date of appeal 14.05.2021).
13. **JSC "VZPP-S"** [Electron. Resource], URL: <https://vzpp-s.ru> (Date of appeal 14.05.2021).
14. **Krivilev A.V.** *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya – in Russ. (Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Control Systems and Theory)*, 2010, No. 2, pp. 153–163.
15. **Krivilev A.V.** *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie – in Russ. (Mechatronics, Automation, Control)*, 2013, No. 4, pp. 44–49.
16. **Gagarin S.A.** *Avtomatizirovanny sintez tsifrovyykh algoritmov impul'snogo upravleniya ispolnitel'nykh mekhanizmom privoda s tryohfaznym ventil'nykh dvigatelem: dis. ... kand. tekhn. nauk* (Automated Synthesis of Impulse Control Digital Algorithms for Servomechanism of Drive with brushless DC Motor: Dis. ... Cand. Sci. (Eng.)), 2012, 200 p.
17. **Katsman M.M.** *Elektricheskie mashiny pribornykh ustroystv i sredstv avtomatizatsii* (Electric Machines of Instrument Devices and Automatic Tools). M.: Izdatel'skiy tsentr "Akademiya", 2006, 368 p.
18. **Pat. RU 2075820 C1.** *Beskontaktnyy dvigatel' postoyannogo toka* (Brushless DC Motor) / D.A. Itskov, 1997.
19. **Pat. RU 2076447 C1.** *Beskontaktnyy dvigatel' postoyannogo toka* (Brushless DC Motor) / D.A. Itskov, 1997.
20. **Pat. RU 2075821 C1.** *Beskontaktnyy dvigatel' postoyannogo toka* (Brushless DC Motor) / D.A. Itskov, 1997.

[31.05.2021]