

Логические автоматы управления электродвигателями на платформе программируемой логики

Б.Н. Попов, Фам Туан Тхань

На основании опыта проектирования устройств управления различными электродвигателями разработана обобщенная структура логического автомата, управляющего процессами коммутации ключевых элементов импульсного усилителя мощности для регулирования направления и скорости вращения, предназначенная для реализации на платформе программируемой логики. В качестве примера рассмотрен автомат для управления асинхронными двухфазными двигателями, реализованный на основе ПЛИС.

В современных цифровых следящих приводах - ЦСП (рис.1) в качестве исполнительных устройств применяют электродвигатели (ЭД) различного типа. При этом для управления ЭД используют следующие цифровые средства:

- специализированные микроконтроллеры;
- полузаказные БИС;
- универсальные микроконтроллеры.

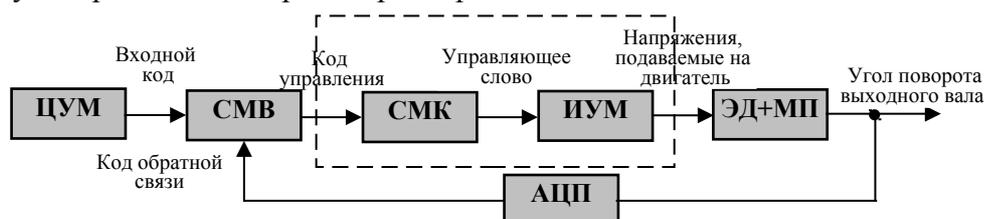


Рис.1. Блок-схема автономного цифрового следящего привода

На рис.1 приняты обозначения:

ЦУМ –цифровая управляющая машина;

СМВ – специализированный микропроцессорный вычислитель;

СМК – специализированный микроконтроллер;

ИУМ – импульсный усилитель мощности;

МП –механическая передача;

АЦП –аналогово-цифровой преобразователь.

Отметим, что вместо СМК в приводе можно использовать либо универсальный микроконтроллер, либо устройство управления на базе полузаказных БИС. Функции СМВ и СМК могут быть совмещены в одном устройстве.

В настоящее время в Российской Федерации специализированные микроконтроллеры для управления ЭД серийно не выпускаются. Исключение составляет микросхема К1868ВЕ6-01, разработанная и изготовленная ГП «НИИЭТ» г.Воронеж, и предназначенная для управления трехфазными бесконтактными двигателями постоянного тока.

Между тем в связи с наметившейся тенденцией к росту производства имеется насущная потребность в массовых недорогих устройствах управления (УУ), которые найдут применение не только в специальных робототехнических комплексах, системах судовой и авиационной автоматики, медицинской технике, но и в бытовой технике различной сложности.

Для создания таких УУ можно использовать универсальные микроконтроллеры импортного производства (например, недорогие восьмиразрядные *PIC*-контроллеры фирмы MicroChip, либо более дорогие модели, производимые Texas Instruments, Motorola, Intel и рядом других компаний).

Проведенный одним из авторов анализ в [1] показал, что для большинства типов ЭД (за исключением трехфазных – асинхронных и бесколлекторных, где при векторном управлении требуется обработка информации, связанная с пересчетом координат – прямые и обратные преобразования Кларка и Парка) целесообразным является проектирование УУ на основе полужаказных БИС. Для этих целей существует отечественная (базовые матричные кристаллы - БМК, например, серий 1515, 1537, 1578, 1589, 5501) и импортная (программируемые логические интегральные схемы - ПЛИСы) недорогая элементная база. Развитые средства САПР обеспечивают исключительно короткий цикл разработки и производства УУ электродвигателями на основе указанных типов БИС. В качестве подтверждения актуальности указанного подхода приведем работы [1...7], где рассматриваются устройства управления коллекторными двигателями постоянного тока, асинхронными двухфазными двигателями, двух- и трехфазными бесколлекторными двигателями постоянного тока (БДПТ), электромеханическими преобразователями гидравлических и пневматических приводов, реализованные на БМК и ПЛИС.

Опыт разработки УУ электродвигателями позволил сформировать общие принципы построения структур управляющих логических автоматов (УЛА) при реализации на платформе программируемой логики.

При широтно-импульсном управлении любым типом ЭД в состав УУ должно входить время-задающее устройство в виде генератора импульсов и собственно УЛА, который реализует в общем случае три следующих алгоритма.

1. Прием по внешнему сигналу записи (ЗП) m -разрядного кода управления K_y , формируемого вычислительным устройством более высокого уровня или любым другим цифровым задатчиком кода. Отметим, что, как правило, K_y поступает либо в обратном, либо в дополнительном коде. Выделение модуля $|K_y|$ и знака (первичная логическая переменная **SG**) из кода управления.

2. Формирование первичной логической переменной **Q (QV)**, длительность которой пропорциональна $|K_y|$ - преобразование код - широтно-импульсный сигнал. Формирование (либо получение извне) первичных логических переменных, обеспечивающих вращение магнитного поля статора (для двух- и трехфазных двигателей). Реализация вторичных логических переменных, обеспечива-

ющих энергосбережение при работе ИУМ. В результате формируется минимально-необходимая система логических переменных (МНСЛП).

3. На основе МНСЛП формирование управляющих логических функций и последовательности управляющих слов $CW = \langle UN...U1 \rangle$, обеспечивающей требуемый закон коммутации ключевыми элементами (КЭ) ИУМ. Разрядность CW определяется типом двигателя и схемой подключения обмоток.

Размерность векторов первичных и вторичных логических переменных зависит от конкретного типа двигателя. Так, например, для микроконтроллера управления двухфазным БДПТ с датчика положения ротора будут поступать две логические переменные, а в случае трехфазного БДПТ - три переменные.

В состав реальных УУ могут также входить блоки, реализующие функции:

- интерфейса,
- настроек на тип двигателя, количество разрядов, кратность периода ШИС периоду фазного напряжения, уровень активного сигнала по входу и выходу,
- преобразования кода (из дополнительного или обратного в прямой),
- защиты от токов короткого замыкания, перенапряжения в КЭ и ряд других функций контроля.

На рис.2 показана обобщенная структура логического автомата для управления электродвигателями, ориентированная на применение полузаказных БИС. Особенностью таких УЛА является отсутствие, по сравнению с процессорами управления движением, т.н. процессорного ядра в классическом его понимании.

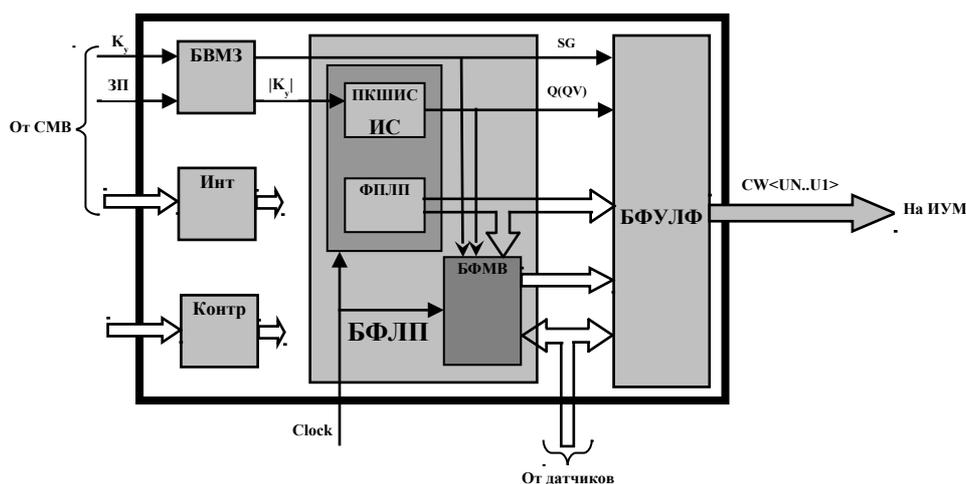


Рис.2. Структура универсального логического автомата для управления ЭД

На рис.2 приняты обозначения:

Интер – интерфейс;

Контр. - встроенный контроль;

БВМЗ - блок выделения модуля и знака;

БФЛП - блок формирования логических переменных;

БФУЛФ - блок формирования управляющих логических функций;

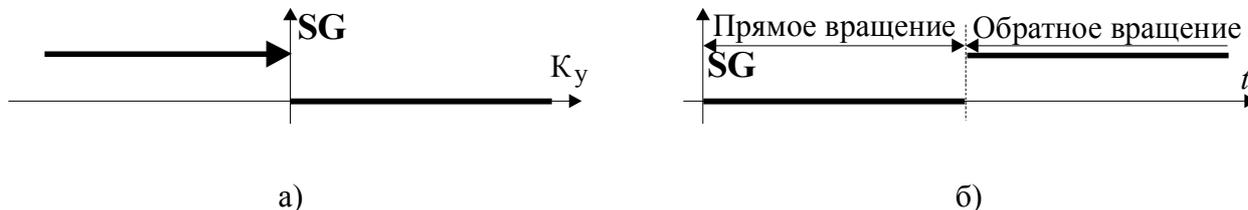
ФПЛП - формирователь первичных логических переменных, например, ССД (счетчик синхронного двигателя);
 ПКШИС - преобразователь код - широтно-импульсный сигнал;
 БФМВ - блок формирования мертвого времени.

На рис.2 условно показаны все возможные вектора логических переменных, формируемые соответственно БФЛП, БФМВ или приходящие на УЛА извне. Особо выделены первичные переменные **SG**, **Q** (**QV**), которые являются инвариантными к типу двигателя.

Направление вращения двигателя определяется полярностью прикладываемого напряжения U_n , зависит от знака кода управления и описывается логической переменной **SG**:

$$SG = \begin{cases} 1, & \text{если } K_y < 0 \\ 0, & \text{если } K_y > 0 \end{cases} \quad (1)$$

Логическая переменная **SG** является функцией координат ЦСП (код управления K_y несет полную информацию о текущем состоянии привода, рис.3,а). Между тем, считывание K_y происходит в строго определенные моменты времени, поэтому значение переменной **SG** синхронизировано с формированием логических переменных, являющихся функциями времени. В связи с этим на временных диаграммах переменная **SG** имеет вид, показанный на рис.3,б.



а) б)
 Рис.3. Графическая интерпретация переменной **SG**

Среднее значение скорости двигателя при импульсном управлении определяется средним напряжением, приложенным к точкам подключения обмоток двигателя (при моменте нагрузки $M_H=0$). Среднее напряжение, в свою очередь, определяется временными интервалами, в течение которых двигатель находится либо в двигательном, либо в тормозном режимах. По способу реализации различают фронтальный (**Q**) или центрированный (**QV**) широтно-импульсный сигнал (ШИС). Фронтальный ШИС, в свою очередь, может быть левым: **QL** (2,а), либо – правым: **QR** (2,б). Центрированный ШИС подразделяют на ШИС с однократным: **QV1** (2,в) и двукратным: **QV2** (2,г) изменением данных на удвоенном периоде. Центрированный ШИС, по сравнению с фронтальным, обеспечивает в два раза меньшее число переключений КЭ на удвоенном периоде ШИС.

$$QL = \begin{cases} 1, \text{ если } (k-1)T < m\tau_{02} \leq (k-1)T + |K_y| \tau_{02} \\ 0, \text{ если } (k-1)T + |K_y| \tau_{02} < m\tau_{02} \leq kT \end{cases} \quad (2,а)$$

$$QR = \begin{cases} 1, \text{ если } (k-1)T + (K_{СП} - |K_y|) \tau_{02} < m\tau_{02} \leq kT \\ 0, \text{ если } (k-1)T < m\tau_{02} \leq (k-1)T + (K_{СП} - |K_y|) \tau_{02} \end{cases} \quad (2,б)$$

$$QV1 = \begin{cases} 1, \text{ если } 2(k-1)T < m\tau_{02} \leq 2(k-1)T + |K_{y1}| \tau_{02} \\ \text{или } (2k-1)T + (K_{СП} - |K_{y1}|) \tau_{02} < m\tau_{02} \leq 2kT \\ 0, \text{ если } 2(k-1)T + |K_{y1}| \tau_{02} < m\tau_{02} \leq (2k-1)T + (K_{СП} - |K_{y1}|) \tau_{02} \end{cases} \quad (2,в)$$

$$QV2 = \begin{cases} 1, \text{ если } 2(k-1)T < m\tau_{02} \leq 2(k-1)T + |K_{y2}| \tau_{02} \\ \text{или } (2k-1)T + (K_{СП} - |K_{y2}|) \tau_{02} < m\tau_{02} \leq 2kT \\ 0, \text{ если } 2(k-1)T + |K_{y2}| \tau_{02} < m\tau_{02} \leq (2k-1)T + (K_{СП} - |K_{y2}|) \tau_{02} \end{cases} \quad (2,г)$$

В (2,а,б,в,г) приняты обозначения: $T=k_{СП} \tau_{02}$ - период ШИС, τ_{02} - период одного импульса, поступающего с генератора импульсов на ПКШИС; $k=1, 2, 3, \dots$ -номер периода; $m=m_1+(k-1)k_{СП}$; $m_1=1, 2, 3, \dots k_{СП}$; $k_{СП}$ – модуль счета счетчика периода ПКШИС.

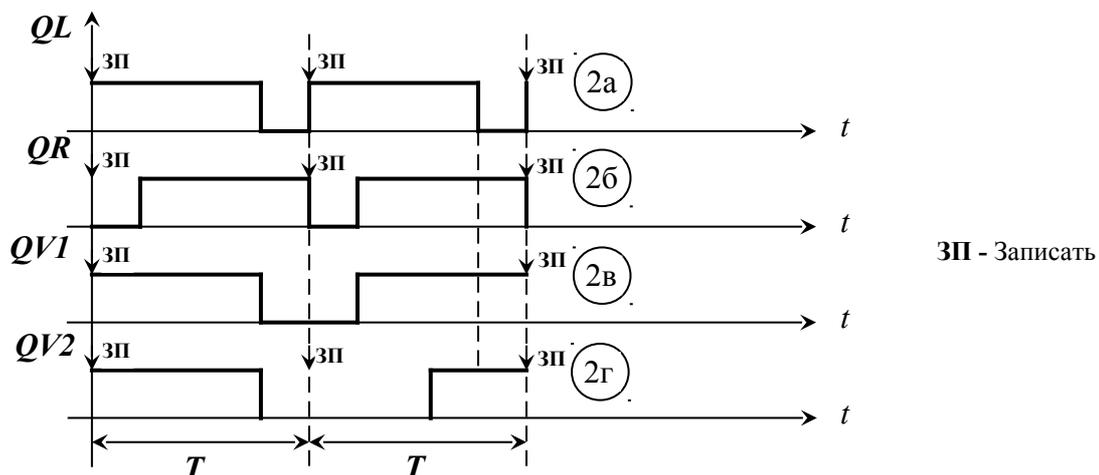


Рис.4. Графическая интерпретация переменных **QL**, **QR**, **QV1**, **QV2**

Остальные первичные логические переменные являются специфическими для каждого типа двигателя. Структура, показанная на рис.2, представляет собой конечный автомат и является базой для реализации УЛА на платформе программируемой логики.

В качестве примера рассмотрим синтез УЛА мехатронного модуля (рис.5), который входит в состав ЦСП и предназначен для управления асинхронным двухфазным двигателем (АДД).



Рис.5. Блок-схема мехатронного модуля на основе АДД

На рис.5. приняты следующие обозначения:

$\Omega_{дв}$ - скорость двигателя; U_y, U_b - напряжения фаз управления и возбуждения; $CW = \langle U_8 U_7 U_6 U_5 U_4 U_3 U_2 U_1 \rangle$ - восьмиразрядное управляющее слово, K_y - код управления.

Структура УЛА АДД, ориентированная на реализацию с помощью БМК или ПЛИС, показана на рис.6, где приняты те же обозначения, как на рис.2.

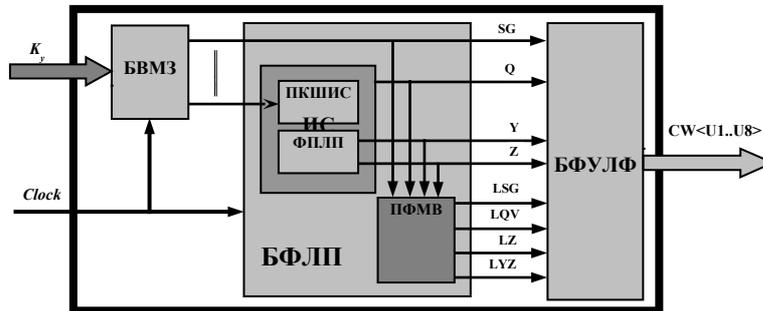


Рис.6. Структура логического автомата для управления АДД

УЛА могут реализовать амплитудное, фазовое или амплитудно-фазовое управление АДД импульсным способом. При этом формируются импульсные двуполярные напряжения фаз возбуждения U_b и управления U_y одинаковой частоты. УЛА формирует четыре первичные логические переменные SG, Q, Y, Z . Переменная SG обеспечивает направление вращения двигателя, Q определяет амплитуду первой гармонической составляющей фазного напряжения U_y . Переменная Z определяет период фазных напряжений U_b и U_y и совместно с переменной Y (для амплитудного управления) обеспечивает постоянный, равный 90 электрических градусов, сдвиг по фазе между напряжениями U_b и U_y .

В общем случае переменные Z и Y определяются частотой питающего напряжения, или, что является более удобным для описания переменных, периодом фазного напряжения T_ϕ :

$$Z = \begin{cases} 0, & \text{если } (n-1)T_\phi < m\tau_{02} \leq (n-1)T_\phi + T_\phi/2 \\ 1, & \text{если } (n-1)T_\phi + T_\phi/2 < m\tau_{02} \leq nT_\phi \end{cases} \quad (3)$$

$$Y = \begin{cases} 0, & \text{если } (n-1)T_\phi/2 < m\tau_{02} \leq (n-1)T_\phi/2 + T_\phi/4 \\ 1, & \text{если } (n-1)T_\phi/2 + T_\phi/4 < m\tau_{02} \leq nT_\phi/2 \end{cases} \quad (4)$$

где n – номер периода фазного напряжения.

В частном случае, так называемом ШИС на основной частоте [8], характеризуемом тем, что $T_\phi=4T$, переменные Z и Y удобно выражать через период ШИС (5,6).

$$Y = \begin{cases} 0, & \text{если } 2(k-1)T < m\tau_{02} \leq (2k-1)T \\ 1, & \text{если } 2(k-1)T < m\tau_{02} \leq 2kT \end{cases} \quad (5)$$

$$Z = \begin{cases} 0, & \text{если } 4(k-1)T < m\tau_{02} \leq 2(2k-1)T \\ 1, & \text{если } 2(2k-1)T < m\tau_{02} \leq 4kT \end{cases} \quad (6)$$

При фазовом методе управления АДД сдвиг по фазе между напряжениями U_B и U_Y реализуется с помощью логической переменной ZYQ , которая является функцией переменных Z , Y , Q и может быть получена из анализа временных диаграмм (рис.7).

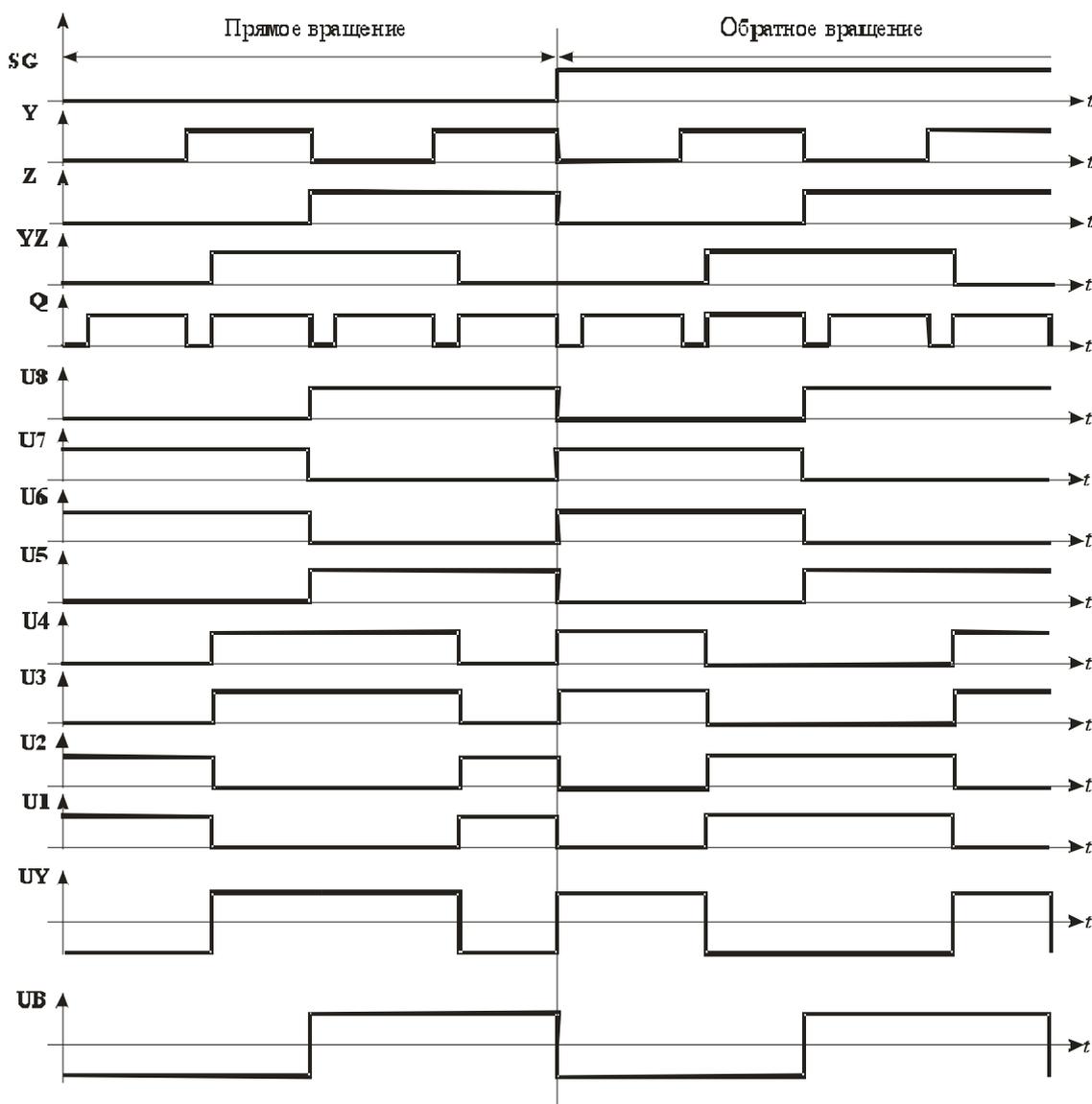


Рис.7. Временные диаграммы для цифровой реализации фазового управления АДД

На одном периоде фазного напряжения, равного четырем периодам ШИС (Q), переменная ZYQ определяется следующими условиями:

$$ZYQ = \begin{cases} ZY, & \text{если } Y=0 \\ ZY \cdot Q, & \text{если } \bar{Z} \cdot Y=1 \\ ZY \vee \bar{Q}, & \text{если } Z \cdot Y=1 \end{cases} \quad (7)$$

Как следует из временных диаграмм и выражения (7) на одном периоде фазного напряжения переменная ZYQ изменяется только на четных периодах ШИС, а на нечетных периодах – совпадает с переменной ZY=Z⊕Y. Изменение переменной ZYQ обеспечивает сдвиг по фазе напряжения U_γ относительно U_β от 0 до 90 электрических градусов. Значения ZYQ приведены в табл. 1.

Таблица 1

<i>i</i>	Z	Y	Q	ZYQ
0	0	0	0	0
1	0	0	1	0
2	0	1	0	0
3	0	1	1	1
4	1	0	0	1
5	1	0	1	1
6	1	1	0	1
7	1	1	1	0

Аналитическое выражение для ZYQ в соответствии с табл.1 имеет вид

$$ZYQ = Z \cdot \bar{Y} \vee Z \cdot \bar{Q} \vee \bar{Z} \cdot Y \cdot Q = Z \oplus (Y \cdot Q) \quad (8)$$

Анализ (8) показывает, что при Q=1 переменная ZYQ сдвинута относительно Z на 90 электрических градусов, а при Q=0 переменные ZYQ и Z синфазны.

Сквозные токи, которые могут протекать в стойках ИУМ во время перехода из двигательного режима в режим торможения и обратно, являются следствием изменения логических переменных SG, Z, ZY, Q. Для исключения сквозных токов реализуются четыре логические переменные LSG, LZ, LZY, LQ, которые являются функциями переменных SG, Z, ZY, Q соответственно.

$$LSG = \begin{cases} 0, & \text{если } SG_i \oplus SG_{i-1} = 0 \\ 1(D\tau_{02}), & \text{если } SG_i \oplus SG_{i-1} = 1 \end{cases} \quad (9)$$

Где: $D = E[T_D/\tau_{02} + 0,5]$, $T_D = T_p + T_-$ это время, необходимое для завершения процессов переключения в транзисторах; SG_i и SG_{i-1} - текущее и предыдущее значения логической переменной SG.

$$LZ = \begin{cases} 0, \text{ если } Z_i \oplus Z_{i-1} = 0 \\ 1(D\tau_{02}), \text{ если } Z_i \oplus Z_{i-1} = 1 \end{cases} \quad (10)$$

Где: Z_i и Z_{i-1} - текущее и предыдущее значения логической переменной Z .

$$LQ = \begin{cases} 0, \text{ если } Q_i \oplus Q_{i-1} = 0 \\ 1(D\tau_{02}), \text{ если } Q_i \oplus Q_{i-1} = 1 \end{cases} \quad (11)$$

Где: Q_i и Q_{i-1} - текущее и предыдущее значения логической переменной Q .

$$LZY = \begin{cases} 0, \text{ если } ZY_1 \oplus ZY_{i-1} = 0 \\ 1(D\tau_{02}), \text{ если } ZY_1 \oplus ZY_{i-1} = 1 \end{cases} \quad (12)$$

Где: ZY_i и ZY_{i-1} - текущее и предыдущее значения логической переменной ZY .

Таким образом, система логических переменных $SG, Q, Z, ZY, LSG, LQ, LZ, LZY$ (1...12) является полной и позволяет реализовать любой из указанных выше способов управления АДД.

Управляющие логические функции $U8...U1$ для фазового метода управления АДД имеют вид:

$$\begin{aligned} U8 = U5 = Z \cdot \overline{LZ}; \quad U6 = U7 = \overline{Z} \cdot \overline{LZ} \\ U1 = U4 = (SG \oplus ZYQ) \cdot \overline{LSG} \cdot \overline{LZY} \\ U2 = U3 = \overline{U1} \end{aligned} \quad (13)$$

Электрическая схема пятиразрядного УЛА, обеспечивающего фазовый метод управления и реализованная в MAX+PLUS II, приведена на рис.8.

На рис.9 приведен листинг самого сложного блока, реализующего преобразование код – широтно-импульсный сигнал и одновременное деление частоты.

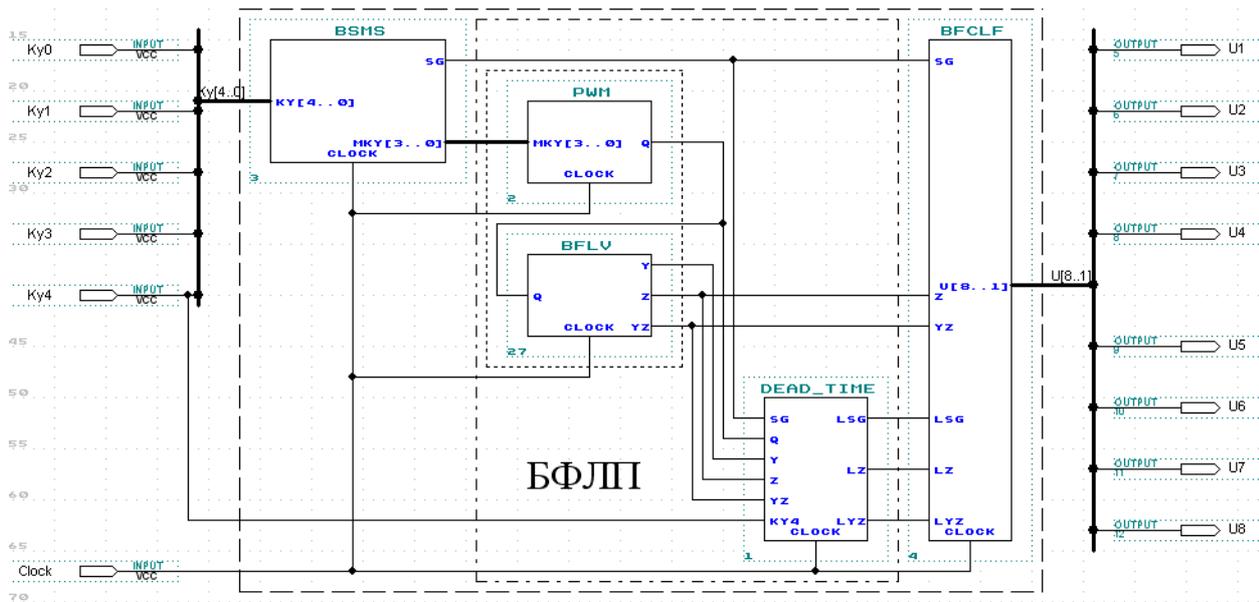


Рис.8. Функциональная электрическая схема УЛД с фазовым методом управления АДД

SUBDESIGN pwm

(

clock : INPUT;

mKy[3..0] : INPUT;

Q : OUTPUT;

)

VARIABLE

SPY[12..0] : DFF;

var_code[12..0] : DFF;

Q : DFF;

BEGIN

Q.(clk,prn,clrn) = (clock,VCC,VCC);

spy[.](clk,prn,clrn) = (clock,VCC,VCC);

(clk,prn,clrn) = (clock,VCC,VCC);

IF SPY[.].q < (B"1100001101010") THEN

SPY[.].d=SPY[.].q+1;

ELSE

SPY[.].clrn=GND;

END IF;

TABLE

mKy[3..0] => var_code[12..0];

B"0000" => B"000000000000";

B"0001" => B"0001100001101";

B"0010" => B"0010010010100";

B"0011" => B"0011000011011";

B"0100" => B"0011110100001";

B"0101" => B"0100100101000";

B"0110" => B"0101010101110";

B"0111" => B"0110000110101";

B"1000" => B"0110110111100";

B"1001" => B"0111101000010";

var_code[.].

```

B"1010" => B"1000011001001";
B"1011" => B"1001001010000";
B"1100" => B"1001111010110";
B"1101" => B"1010101011101";
B"1110" => B"1011011100011";
B"1111" => B"1100001101011";
END TABLE;
IF (var_code[] > spy[]) THEN
    Q=VCC;
ELSE
    Q=GND;
END IF;
END;

```

Рис.9. Листинг описания блока ПКШИС (PWM) на AHDL

Результаты моделирования приведены на временных диаграммах (рис.10,11,12).

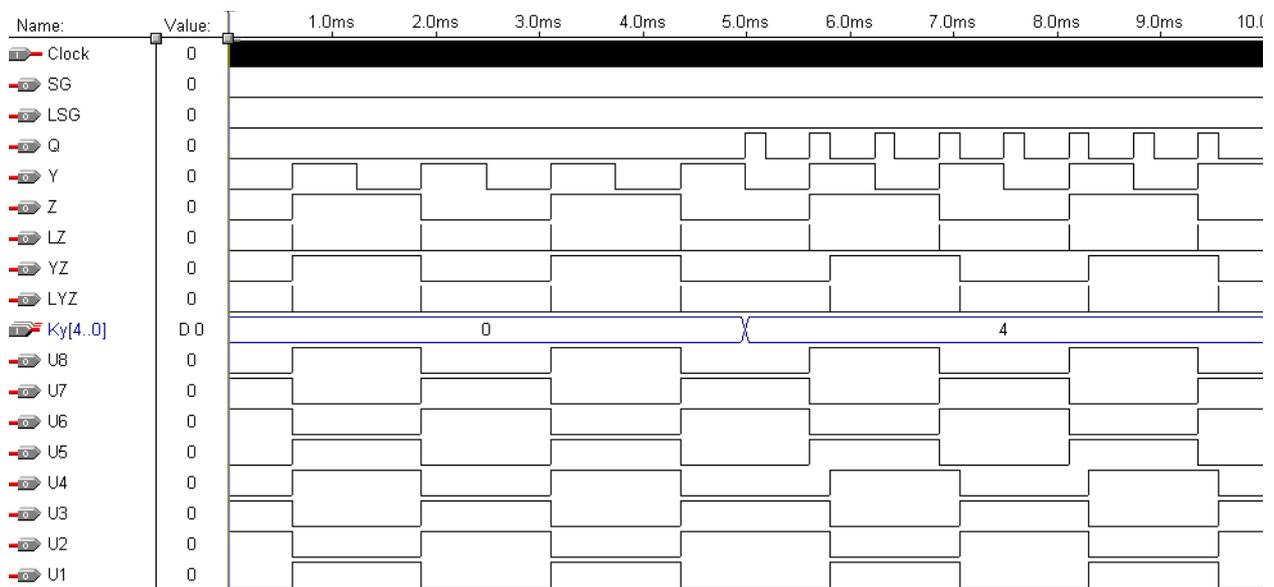


Рис.10. Результаты моделирования работы УЛА АДД при $SG=0$, $\gamma=0$ и $\gamma=0,25$

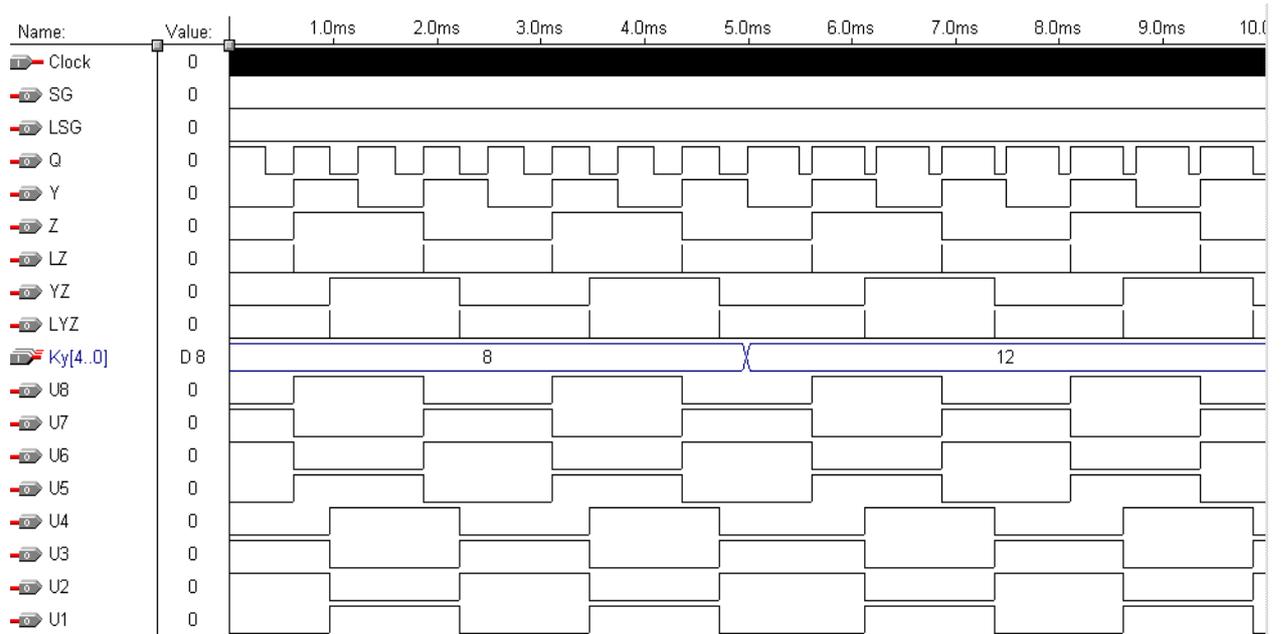


Рис.11. Результаты моделирования работы УИА АДД при $SG=0$, $\gamma=0,5$ и $\gamma=0,75$

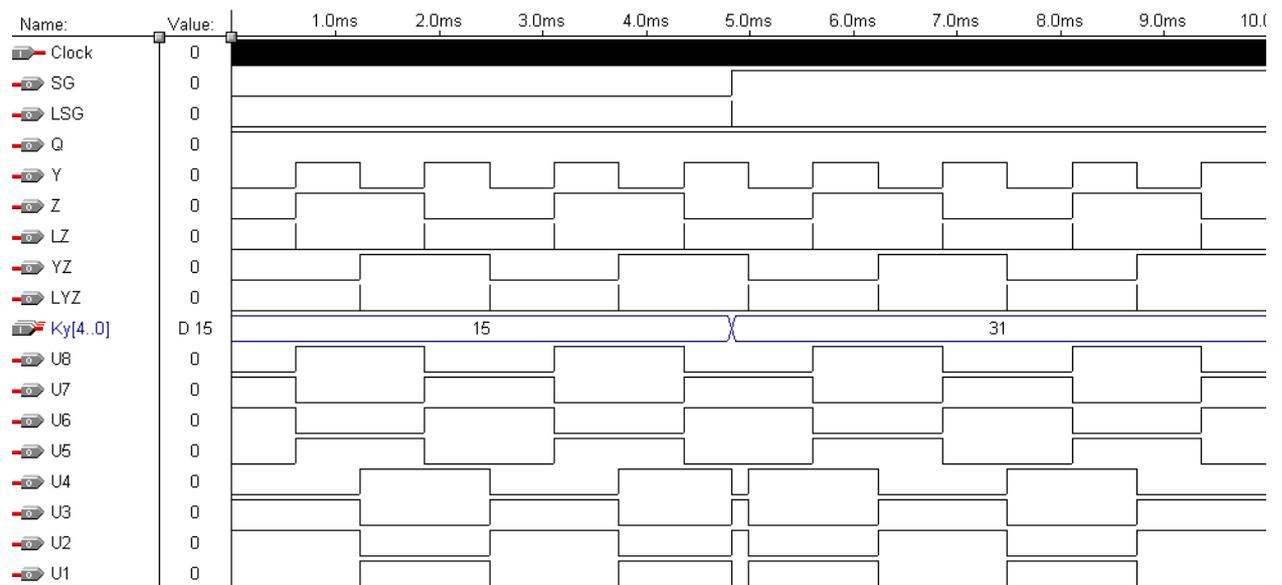


Рис.12. Результаты моделирования работы УИА АДД при $SG=0$, $\gamma=1$ и $SG=1$, $\gamma=1$

Опыт проектирования однокристалльного микроконтроллера электродвигателей на основе базового матричного кристалла КА1515ХМ1 (3200 вентиляей) показал [1,2], что для реализации даже универсального УУ, предназначенного для управления четырьмя типами ЭД, степень использования кристалла составляет 64%, то есть чуть более 2-х тысяч вентиляей.

В [3] описано УУ трехфазным БДПТ, используемым для приведения в движение меха аппарата искусственной вентиляции легких для наркоза. Несколько позже аналогичные устройства были разработаны для трех аппаратов искусственного сердца по заказу НИИ трансплантологии и искусственных органов. В обоих случаях УУ были реализованы на ИС EPM7128SLC84 –10 фирмы Altera с числом эквивалентных вентиляей - 2500.

Устройство, описанное в [5], применялось для управления струйным пневмоприводом для запорной арматуры. Основой УУ являлся кристалл EPM7064SLC44-10 с числом эквивалентных вентилях - 1250, степень использования которого составляла 86%.

В заключении отметим, что предлагаемая обобщенная структура логического автомата управления электродвигателями нашла широкое применение в различных разработках и может быть рекомендована разработчикам энергоприводных систем.

Разработанная система управляющих логических функций для фазового метода управления АДД является оригинальной и предлагается для применения.

Для проектирования УЛА для электродвигателей на платформе программируемой логики могут быть рекомендованы младшие модели следующих семейств ПЛИС фирм Actel, Altera, Atmel, Xilinx (табл.2), либо БМК отечественного производства (табл.3) с числом эквивалентных вентилях: 1200-4500.

Для авиационно-космических приложений кроме БМК особый интерес представляют однократно и многократно программируемые ПЛИС на основе технологий Antifuse и Flash фирмы Actel.

Таблица 2

Фирма	Семейство	Модель	Характеристики	
			Число вентилях	Макс.число I/O
Actel	eX	eX64	3000	84
	MX	A40MX02	3000	57
	Act 1,2,3	A1010B,A1020B	1200,2000	57,69
	RadHard	RH1020	2000	69
	RadTolerant	RT1020	2000	69
Altera	MAX3000	EPM3032A	1250	66
		EPM3128A	2500	96
	MAX7000	EPM7064/S	1250	68
		EPM7096	1800	76
		EPM7128E	2500	100
		EPM7160E	3200	160
		EPM7192E	3750	192
	MAX7000A/B	EPM7064AE/B	1250	68
		EPM7128AE/B	2500	100
	FLEX8000	EPF8282	2500	78
MAX9000	EPM9400	1250	159	
	EPM9480	2500	175	
Atmel	ATF15XXAS/L	ATF1508AS/L	2500	100
Xilinx	XC9500XV	XV9572XV/XL	1600	72
		XV95144XV/XL	3200	144
	XC9500	XV9572	1600	72
		XC95108	2400	108
		XC95144	3200	144

Таблица 3

	Изделие	Корпус Кол-во выводов	Характеристики	
			Число цифровых ячеек	Библиотека цифровых ячеек
Россия	H1806XM1 ОСМН1806XM1	H14.42 42	1500	125
	1806ВП1 ОСМ1806ВП1	2204.42-3 42	1500	125
	H1806ВП1	H14.42 42	1500	125
	KA1515XM1	4223.64 64	3200	25
	H1515XM1 ОСМН1515XM1	H18.64 64	3200	25
	H1593XM1 KH1593XM1	H16.64 -1B 64	3200	70
	KA1593XM1	4223.64 64	3200	70
	H1537XM1	H16.64 -1B 64	4500	51

Список литературы

1. Попов Б.Н. Однокристалльный микроконтроллер электродвигателей. // Электротехника. - 1994, № 7, с.30-34.
2. Попов Б.Н. Устройство управления двигателями. - Свидетельство №1773 на полезную модель от 16.02.1996.
3. Попов Б.Н., Кривилев А.В., Кривенко С.А. Однокристалльный микроконтроллер для трехфазных двигателей. // Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации. VIII международный научно-технический семинар, Алушта, 1999: Сборник трудов – М., 1999.- с.222-223.
4. Попов Б.Н., Кривилев А.В., Сарычев Э.П., Сперанский А.Н. Микропроцессорная система управления приводом аппарата искусственной вентиляции легких для наркоза. // Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации. IX международный научно-технический семинар, Алушта, 2000: Сборник трудов – М., 2000. - с.270-271.
5. Гуцин Д.В., Кривилев А.В., Петров А.С., Попов Б.Н., Сарычев Э.П., Саяпин В.В. Цифро-аналоговый следящий пневмопривод со струйным двигателем. // Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации XI международный научно-технический семинар, Алушта, 2002: Сборник трудов – М., 2002.- с.219-220.
6. Гуцин Д.В., Попов Б.Н., Фам Туан Тхань Логический автомат для управления асинхронными двухфазными двигателями. // Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации. XIII международный научно-технический семинар, Алушта, 2004: Сборник трудов – М., 2004. - с.296-297.
7. Вычужанин В. Устройство управления серводвигателем на основе ПЛИС. // Электронные компоненты. - 2004, №9. - с.110-113.
8. Герман-Галкин С.Г. и др. Цифровые электроприводы с транзисторными преобразователями. - Л.: Энергоатомиздат, 1986. –343 с.

Попов Борис Николаевич, профессор кафедры систем приводов авиационно-космической техники,
д.т.н.

Фам Туан Тхань, аспирант кафедры систем приводов авиационно-космической техники