

## Часть 1.

### **Принцип действия бесконтактного электродвигателя постоянного тока. Совместная работа электродвигателя и полупроводникового коммутатора в различных режимах работы.**

#### 1.1. Создание вращающего момента вентильного электродвигателя.

Бесконтактный ЭД постоянного тока (БДПТ) – это электрическая машина постоянного тока, в которой механический коллектор заменен полупроводниковым коммутатором (ПК), поэтому его также называют вентильный ЭД (ВД).

Сам ЭД в конструктивном отношении практически полностью соответствует синхронному ЭД, возбуждение которого осуществляется от постоянных магнитов (МП), размещенных на роторе. Однако питание фаз статорных обмоток ВД осуществляется не от сети переменного тока, а постоянным током через ПК (см. рис 1.1.1). ПК по сигналам логического устройства (ЛУ) поочередно, в определенной последовательности, попарно запитывает фазы ЭД, создавая вращающееся поле статора, которое, взаимодействуя с полем МП ротора, создает вращающий момент ЭД:  $M_d = K\Phi I_a$ , где  $\Phi$  – поток постоянного магнита, расположенного на роторе,  $I_a$  – ток статорных обмоток (ток якоря),  $K$  – постоянный для данного ЭД коэффициент.

Материал магнита – на основе редкоземельных элементов (РЗМ) – самария и кобальта или на основе обычных магнитных материалов (например, ЮНДК). Магниты на основе РЗМ обладают большими магнитными силами и не подвержены размагничиванию магнитными полями, создаваемыми токами статорных обмоток при статических или динамических перегрузках ЭД.

Переключение фаз статора должно производиться при определенных, согласованных с ними, положениях ротора. Поэтому на валу ЭД обычно располагается датчик положения ротора (ДПР), формирующий сигналы DA, DB, DC, которые используются ЛУ для формирования команд управления ПК.

Принципиальное отличие ВД от синхронного ЭД состоит в том, что частота поля статора в нем не постоянна, а определяется частотой вращения ротора, так как частота сигналов ДПР, используемых для управления ПК, определяется частотой вращения ротора. Поэтому ВД можно рассматривать как синхронный ЭД с переменной частотой питания статорных обмоток, соответствующей частоте вращения ротора. Тем не менее, поле статора (хотя и принудительно – по сигналам ДПР) синхронно вращается с ротором, что позволяет в теоретическом плане для исследования ВД использовать теорию двух реакций, основанную на связанной с ротором системе координат d-q-0, как это делается при исследовании синхронных ЭД классической конструкции. В то же время происходящие процессы и механическая характеристика ВД такие же, как у обычных коллекторных ДПТ, поэтому средние за пе-

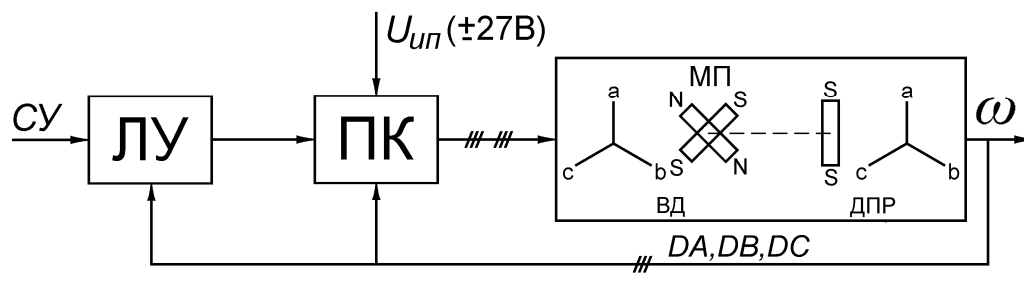


Рис. 1.1.1. Функциональная схема вентильного ЭД.

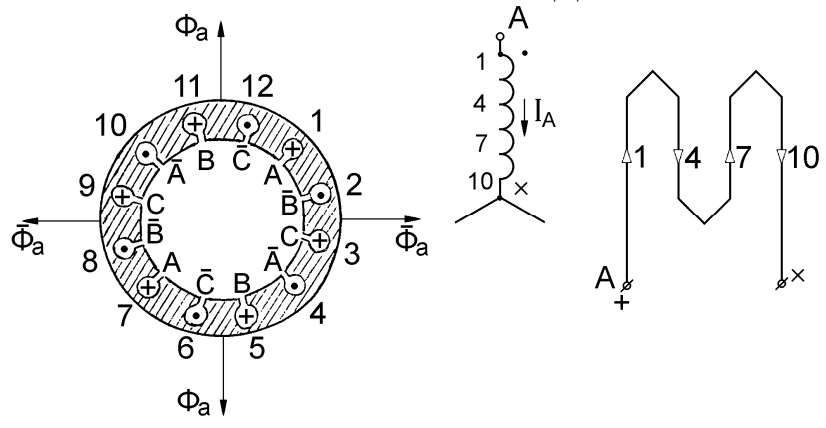


Рис. 1.1.2. Схема размещения обмотки и магнитных потоков фазы А ( $\Phi_a$ )

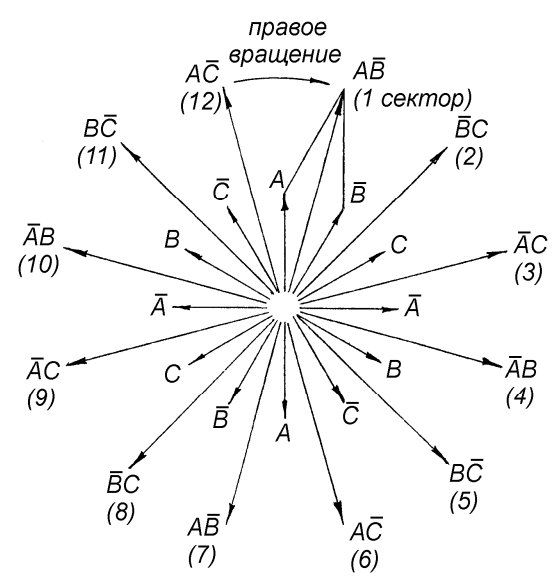


Рис. 1.1.3. Векторная диаграмма магнитного поля ДВ (исходные вектора при правом вращении в двигательном режиме).

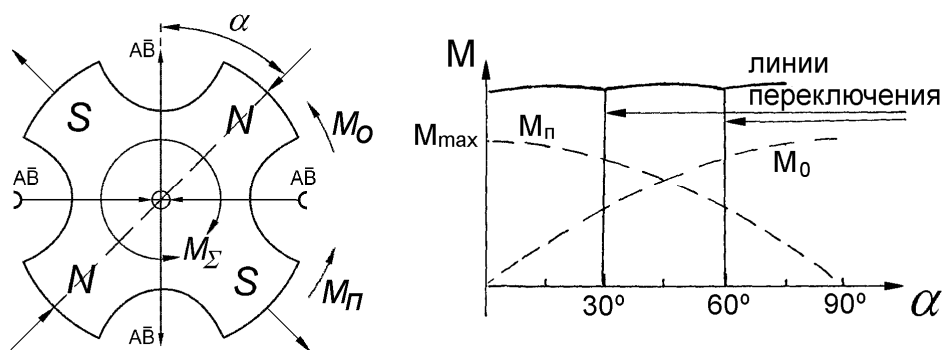


Рис. 1.1.4. Моментные характеристики БДПТ.

риод параметры ВД могут быть достаточно точно описаны их уравнениями.

Массо-энергетические показатели ВД при использовании современных магнитов высокой энергии превышают показатели коллекторных ДПТ, особенно при создании следящих приводов, управляемых от внешних сигналов управления (СУ) различных самолетных систем (систем управления рулями, рукоятками управления АД и др.).

При этом ВД свободен от недостатков обычных ДПТ, связанных с наличием у них щеточно-коллекторного узла:

- 1) искрение щеток, что ограничивает высотность ЭД;
- 2) наличие якорной обмотки не позволяет уменьшить диаметр якоря, а так как момент инерции пропорционален квадрату диаметра якоря, то быстродействие привода невысоко;
- 3) при больших скоростях возможен обрыв якорной обмотки;
- 4) размещение якорной обмотки на роторе ухудшает отвод тепла.

Рассмотрим процесс образования вращающего момента ВД на примере 4-х полюсного ЭД, статор которого содержит  $z=12$  пазов, в которых размещена трёхфазная обмотка ( $m_1=3$ ) с числом пазов на полюс и фазу  $q=1$ , т.е.  $Z = 2p \cdot q \cdot m = 4 \cdot 1 \cdot 3 = 12$  (см. Рис. 1.1.2).

Каждая из обмоток намотана таким образом, чтобы втекающий в нее ток создавал по правилу буравчика четыре магнитных потока, расположенных под углом  $90^\circ$  друг к другу (Рис. 1.1.2.а)

Индексы А, В, С внутри каждого сектора на рис. 1.1.2 означают, что ток в соответствующей фазе направлен от нас. Индексы  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$ ,  $\bar{C}$  означают, что ток в соответствующей фазе течет к нам. Аналогично можно построить векторы магнитных потоков для фазы В и фазы С и совместить их на одном рисунке (рис. 1.1.3).

Так как каждая фаза создает четыре вектора, то при  $m=3$  число таких векторов равно 12, т.е. они в пространстве (по окружности статора) смещены на  $360^\circ/12=30^\circ$  геометрических градусов. Если порядок обхода векторов соответствует цифровому обозначению 30-ти градусных секторов (1...12), то это будет соответствовать вращению поля статора ( и ротора) по часовой стрелке (правое движение). Диаграмма рис.1.1.3 имеет важное значение для разработки алго-

ритма управления ПК (см. раздел 1.4). Для удобства анализа стрелки всех векторов на рис.1.1.3 направлены к периферии, поэтому у векторов, у которых изменено направление стрелки, в обозначении введены отрицания (черта).

На этом же рисунке произведено геометрическое сложение соседних векторов: так сложение векторов  $A$  и  $\bar{B}$  дает вектор  $A\bar{B}$ ,  $C$  и  $\bar{B}$  - вектор  $C\bar{B}$  и т.д.

Заметим, что такое сложение векторов соответствует физическому процессу включения фаз: одновременно всегда включены только какие-либо 2 фазы, но в одну ток втекает (здесь  $A$ ), а через другую вытекает (фазы  $B$  или  $C$ ).

Заметим также, что при поочередном обходе векторов каждая фаза работает на интервале двух секторов (у рассмотренных векторов  $A\bar{B}$  и  $C\bar{B}$  фаза  $\bar{B}$  с вытекающим током работает в секторах 1 и 2).

Если теперь диаграмму рис.1.1.3 рассмотреть совместно с магнитными потоками, создаваемыми постоянным магнитом (рис.1.1.4), то можно отметить, что при каждом включении очередной пары фаз (на Рис.1.1.4 – фаз  $A$  и  $B$ ) они при взаимодействии с МП создают четыре притягивающих (при разной полярности) и четыре отталкивающих (при одноименных полюсах) момента ( $M_{\Pi}$  и  $M_0$ ):

$$M_{\Pi} = M_{\max} \cdot \sin \alpha, M_0 = M_{\max} \cdot \cos \alpha, \text{ и}$$

суммарный момент на валу ЭД составит:  $M_{\Sigma} = 4M_{\max} \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha)$ ,

где  $\alpha$  - угол взаимного расположения полей магнита и якоря.

Максимальное значение момента можно получить, если последнее выражение продифференцировать, приравняв производную нулю и решить относительно  $\alpha$ :

$$M_{\Sigma} = 4M_{\max} \cdot \sin \alpha + 4M_{\max} \cdot \cos \alpha$$

$$\frac{dM_{\Sigma}}{d\alpha} = \frac{d}{d\alpha} 4M_{\max} \cdot \sin \alpha + \frac{d}{d\alpha} 4M_{\max} \cdot \cos \alpha$$

$$\frac{dM_{\Sigma}}{d\alpha} = 4M_{\max} \cdot \cos \alpha - 4M_{\max} \cdot \sin \alpha$$

$$4M_{\max} \cdot \cos \alpha - 4M_{\max} \cdot \sin \alpha = 0$$

$$\text{и } \cos \alpha = \sin \alpha \text{ при } \alpha = 45^{\circ}$$

На основании векторной диаграммы магнитного поля ДБ (рис. 1.1.3) и его моментных характеристик можно сделать дополнительно следующие выводы, которые будут полезны для разработки алгоритма управления ПК (см. раздел 3.1.4):

1. Магнитное поле, образованное силовым магнитом и магнитное поле, образованное статорными обмотками, представляют собой фигуры в виде двух вращающихся крестов: первый вращается плавно, второй - скачками, через  $30^{\circ}$  геометрических. Наибольший взаимодействующий момент возникает тогда, когда угол между “крестами” будет составлять  $45^{\circ}$ . Таким образом, коммутация должна производиться при углах рассогласования “крестов”  $30^{\circ}$  -  $60^{\circ}$

2. Для осуществления реверса в двигательном режиме магнитный поток и ток обмоток якоря следует повернуть в обратную сторону, т.е. в алгоритме программы управления знак индекса ключа изменить на противоположный ( $\overline{A\overline{B}}$  на  $\overline{A}B$ ,  $\overline{B\overline{C}}$  на  $\overline{B}C$  и т.д.). В режиме динамического торможения алгоритм программы для правого и левого направлений вращения неизменен.
3. Моменты коммутации ключей силового моста при рассогласовании магнитных потоков, создаваемых с помощью обмоток статора и силовым магнитом ( $30^\circ$  и  $60^\circ$ ), должны определяться с помощью датчика положения ротора (ДПР).

Заметим, что в настоящее время разработаны и схемы бездатчикового управления ВД [ ], которые здесь не рассматриваются.

## 1.2 Типы и принцип действия датчиков положения ротора. Способы преобразования сигналов ДПР в логическую форму.

Переключения тока в фазах ЭД должны проводиться в согласованных с силовым магнитом положениях. Для этого на валу ЭД располагаются элементы ДПР, фиксирующие угловые положения ротора ЭД и, следовательно, взаимное расположение магнита ротора и обмоток статора. Возможны также и бездатчиковые схемы управления ВД с использованием для формирования сигналов о положении ротора моментов прохождения через нуль противо-эдс незапитанных в момент измерений фаз (в рабочем режиме в каждый момент времени запитаны только 2 фазы).

ДПР может быть реализован различными способами: с использованием эффекта Холла, оптическими или индукционными методами. Рассмотрим сначала индукционный метод: обмотки (L) ДПР намотаны на ферритовые кольца, расположенные на статоре ЭД, образуя дроссели (рис. 1.2.1,а). Через сопротивление R они запитаны от задающего генератора (ЗГ) частотой  $f=100\text{кГц}$ . На статоре они расположены под углом  $120^\circ$  друг к другу. Сигнальный двухполюсный магнит дважды за один оборот смещает рабочую точку дросселя в зону насыщения (рис.1.2.1,б) уменьшая тем самым его индуктивное сопротивление практически до нуля. Если магнит располагается к обмотке дросселя боковой поверхностью, то рабочая точка возвращается в центр характеристики, индуктивное сопротивление дросселя возрастает, на выходе фильтра детектора ДПР (рис.1.2.2) появляется напряжение (логическая единица) в виде сигналов ДА, ДВ, ДС. За один оборот ротора ( $360^\circ$  геометрических) период логического сигнала на выходе фильтра составит  $720^\circ$  электрических (рис.1.2.3).

Сигналы ДПР в точках  $DA', DB', DC'$  имеют импульсный характер вида рис.1.2.2 а). Для дальнейшей логической обработки они преобразуются в логическую форму вида 1.2.3,б) с помощью детектора (рис.1.2.2)

В разработанных отечественных приводах для самолетов класса Ил-96-300, Ту-204 чаще всего для определения положения ротора применяют рассмотренные индукционные датчики, питая их напряжением высокой частоты (например 100кГц). Но для того, чтобы детектировать высокочастотные сигналы, необходимы достаточно большие аппаратные затраты (рис.1.2.2)

Вместе с тем, применение датчиков Холла, вместо индукционных, значительно сокращает электронные затраты, позволяя непосредственно получить выходной сигнал в логической форме, минуя операцию детектирования (рис.1.2.4).

На выходе датчика Холла по мере прохождения под ним магнита на клеммах 2-3 датчиков D1...D3 появляется переменное напряжение с частотой, равной частоте вращения магнита очень низкого уровня - положительной полярности (55-70) мВ и отрицательной полярности (70-85)мВ.

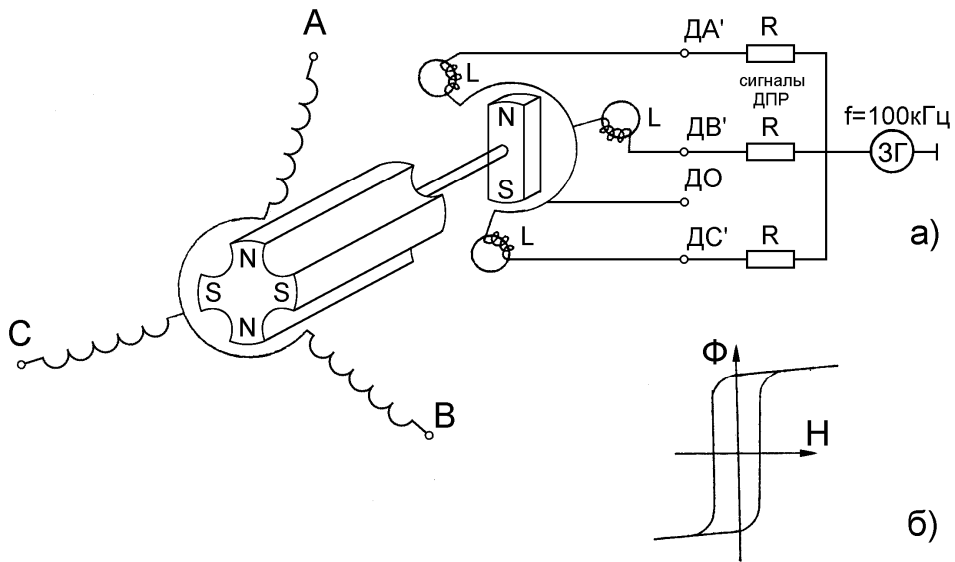


Рис.1.2.1. Схематичное изображение силовой и сигнальной части ВД.

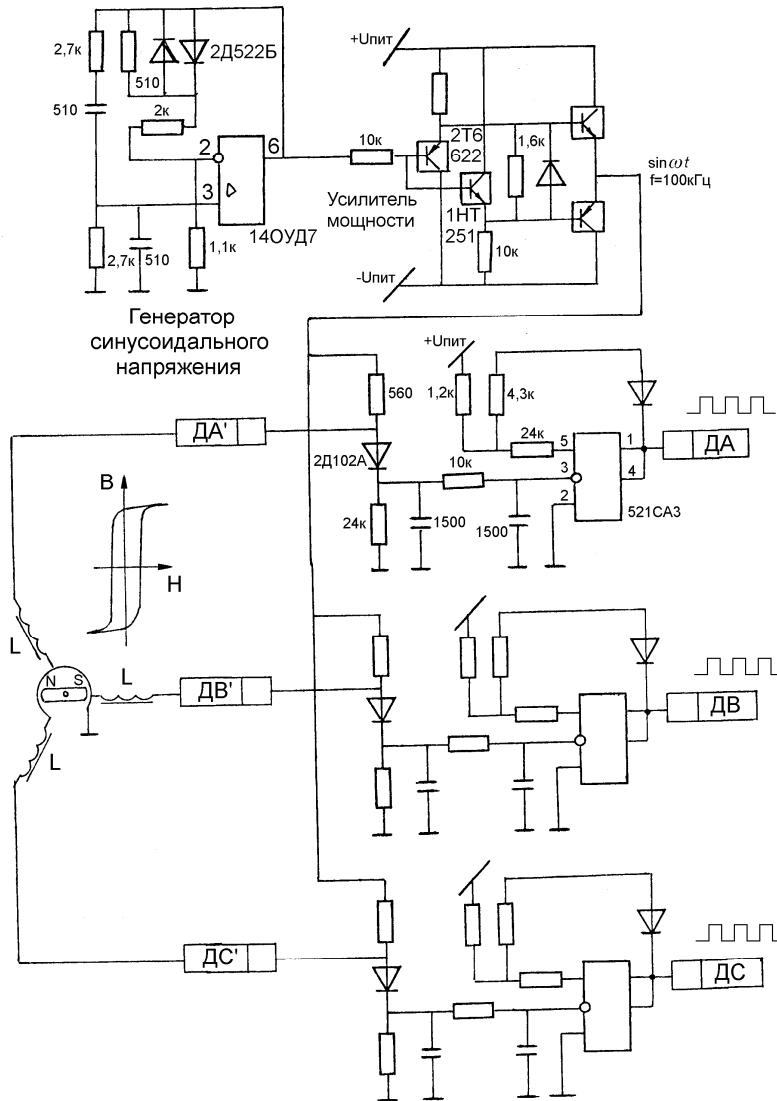


Рис.1.2.2. Детектор ДМР.

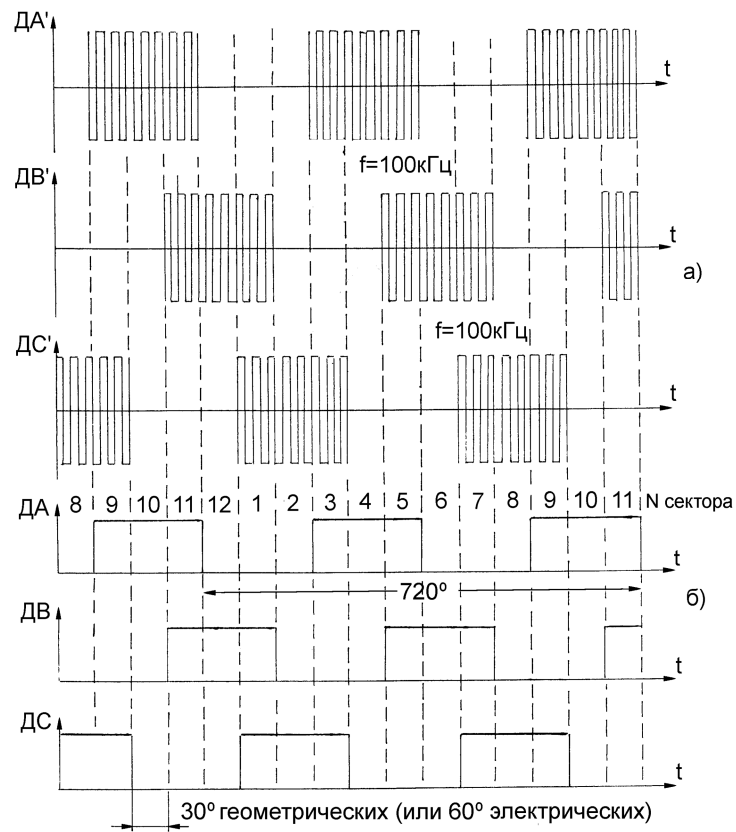
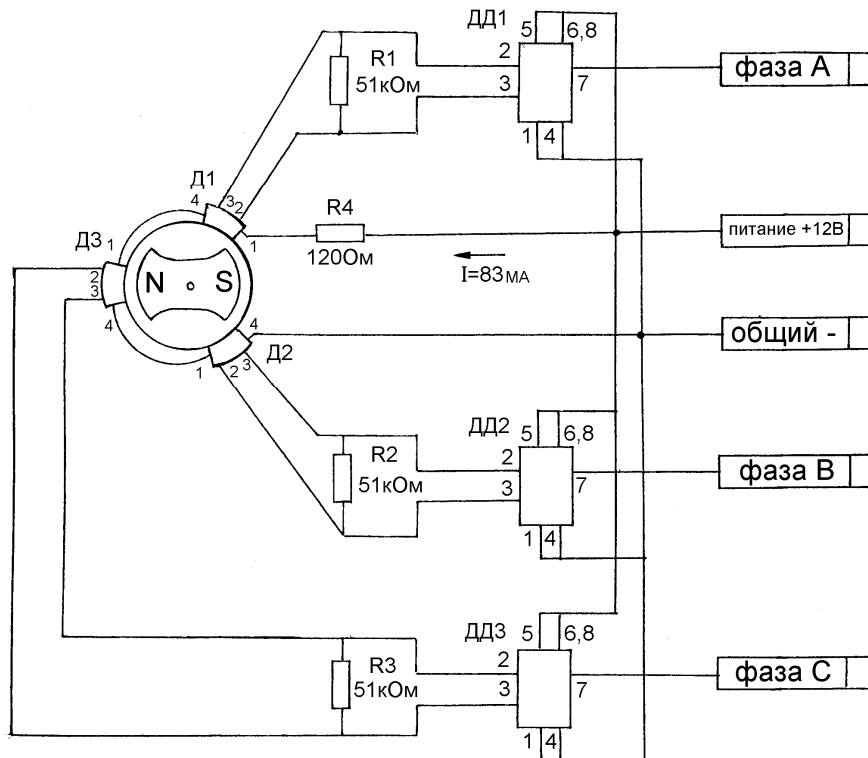


Рис.1.2.3. Сигналы индуктивных датчиков положения ротора (ДПР).



Д1, Д2, Д3 – датчики Холла (ДХЭ602117Б),  
 ДД1, ДД2, ДД3 – компараторы 521СА3.

Рис.1.2.4. Формирование сигнала о скорости с помощью датчиков Холла.



Вместе с тем, благодаря высокому коэффициенту усиления компаратора 521СА3, достигающего значения 150 тысяч, происходит преобразование переменного напряжения непосредственно в логическое прямоугольное.

Кроме того, применение датчиков Холла позволяет использовать вместо расщепленного биполярного монополярное питание, что сокращает и габариты источника питания. Характерно, что при применении индукционных датчиков частота  $f_{дпр} = (ДА, ДВ, ДС) = 2f_{дв}$ , а при применении датчиков Холла  $f_{дпр} = f_{дв}$ , т.е. в два раза ниже.

Датчики Холла, компараторы, резисторы устанавливаются непосредственно на корпус ДПР.

Контакты питания +12В, общий, фазы А,В,С выводятся через отдельный штепсельный разъем.

При использовании датчиков Холла сигналы ДПР показаны на рис.1.2.5, а связь сигналов ДПР и границ секторов, где происходит коммутация – на рис.1.2.6

Если при использовании индукционных датчиков коммутация производилась через  $30^\circ$ , то при использовании датчиков Холла – через  $60^\circ$ , т.е. силовой магнит и датчики Холла должны быть ориентированы взаимно таким образом, чтобы линии переключения (рис.1.1.4) проходили через  $15^\circ$  и  $75^\circ$ . При этом пульсация момента будет несколько больше, а число секторов сократится вдвое (рис.1.2.5 и 1.2.6).

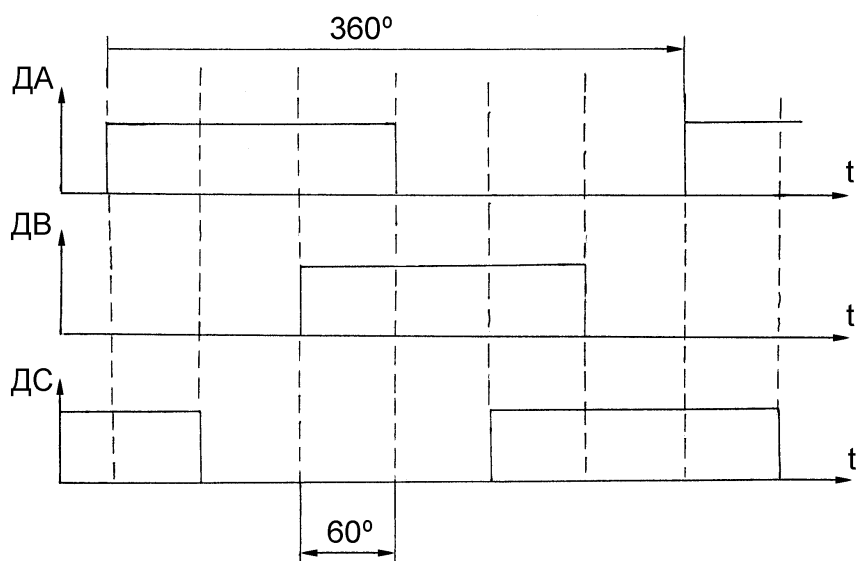


Рис.1.2.5. Сигналы ДПР при использовании датчиков Холла.

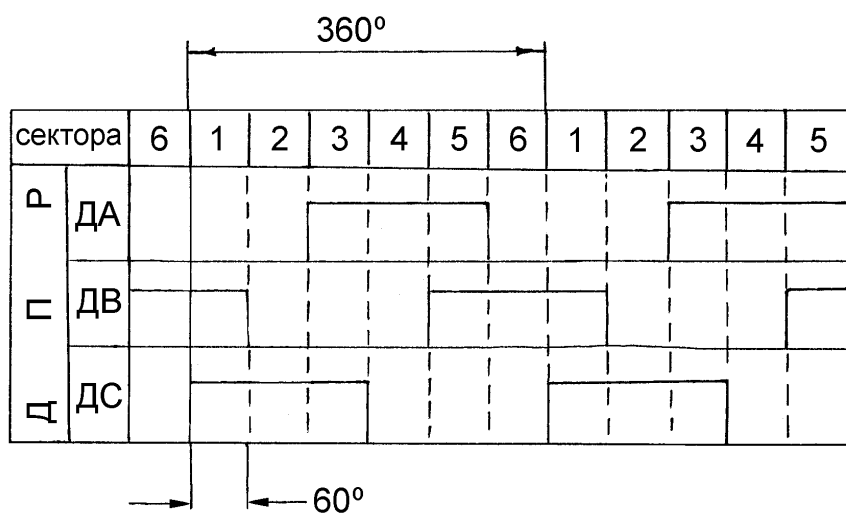


Рис.1.2.6. Связь сигналов ДПР и границ секторов при использовании датчиков Холла.

### 1.3. Режимы совместной работы вентильного электродвигателя с полупроводниковым коммутатором.

Подключение в требуемой последовательных статорных обмоток ЭД осуществляется с помощью шестиплеечевого полупроводникового моста, получившего название полупроводникового коммутатора (ПК), (см. рис.1.1.1, рис.1.3.1 и рис.1.3.2). Сигналы управления ПК вырабатываются в канале управления по сигналам ДПР (ДА, ДВ, ДС), требуемому направлению вращения (НВ) и требуемому режиму работы ЭД (ДТ). При этом значение ДТ=1 означает режим динамического торможения, а ДТ=0 – двигательный режим. Эти сигналы предварительно обрабатываются логическим устройством (ЛУ) по алгоритму, заложенному в программируемой матрице 556РТ5 (рис. 1.3.1), и в виде шести сигналов  $A^+ \dots C^-$  (рис. 1.3.2 и рис. 1.3.3) подаются на усилители мощности  $U^+$  и  $U^-$ , так как мощности сигналов  $A^+ \dots C^-$  - недостаточно для управления силовыми ключами моста ПК. На рис.1.3.3. транзисторы, окаймленные квадратными рамками, являются частью единой планарной интегральной структуры.

Обмотки ЭД подключены к средним точкам плечей («стоек») ПК (рис.1.3.2). Для реализации требуемых режимов работы ЭД (двигательный, реверс, динамическое торможение) должен быть обеспечен определенный порядок подключения соответствующих пар фазных обмоток.

При этом должны быть соблюдены по-крайней мере следующие правила:

а) в двигательном режиме работы для потребления тока от источника питания должны быть подключены по одному верхнему и нижнему ключу;

б) для исключения короткого замыкания вдоль «стойки» одновременное включение двух ключей одной «стойки» недопустимо;

в) в режиме динамического торможения ЭД должен быть отключен от сети (верхние ключи должны быть выключены), а включение нижних ключей должно обеспечить замыкание ранее работающих фаз (о работе антипараллельных диодов  $V_{D^{A^+}} \dots V_{D^{C^-}}$  см. ниже). С учетом сказанных ограничений для двигательного режима работы возможны шесть допустимых вариантов включения пар транзисторов и, соответственно, пар фазных обмоток (см. табл. 1.3.1):

Таблица 1.3.1 Варианты включения ключей в двигательном режиме работы.

NN вариантов и секторов	1	2	3	4	5	6	1
верхние ключи	1		3		5		1
нижние ключи	4	6		2		4	4
фазы и ключи	$A\bar{B}$	$A\bar{C}$	$B\bar{C}$	$B\bar{A}$	$C\bar{A}$	$C\bar{B}$	$A\bar{B}$ и т.д.

Рассмотрим более подробно работу ПК совместно с ЭД по рисунку 1.3.4.

Для формирования вектора  $\vec{A\bar{B}}$  (протекания тока через фазы А и В) необходимо открыть ключи VT1 и VT4.

Усредненные показатели квазиустановившегося двигательного режима с ШИМ регулятором может быть описаны уравнениями коллекторного ДПТ

$$U = E_{вр} + L \frac{di}{dt} + iR \quad (1.3.1),$$

где:  $E_{вр}$  – ЭДС вращения,

$L \frac{di}{dt}$  – ЭДС самоиндукции,

$R, L$  – активное сопротивление и индуктивность фазных обмоток ЭД,

$U, I$  – напряжение сети и ток.

Путь тока в двигательном режиме работы при открытых ключах VT1 и VT4 на рис. 1.3.4 показан сплошной жирной стрелкой «+» - VT1 – фаза А – фаза В – VT4 – фаза А – фаза В – П – П.

Для изменения направления вращения направления тока в фазах надо изменить на противоположное. Формально, при разработке алгоритма управления, для этого достаточно заменить обозначение вектора  $\vec{A\bar{B}} \rightarrow \vec{B\bar{A}}$ , т.е. ток должен втекать в фазу В и вытекать из фазы А. Для этого должны быть открыты ключи VT3 и VT2. Заметим, что для реверса порядок включения ключей и фаз изменится, т.е. чтобы из сектора №1 переместиться не в сектор 2, а в сектор

6, необходимо создать вектор  $\vec{B\bar{C}}$ , для чего открыть ключи VT3(В) и VT6(С).

Порядок коммутации ключей и фаз за 360 электрических градусов в этом случае будет такой:

Верхняя группа ключей: 3 5 5 1 1 3 3

Нижняя группа ключей : 2 2 4 4 6 6 2 и т.д.

В процессе работы ЭД переводится в два вида режима динамического торможения.

Первый вид динамического торможения реализуется, если в прямом контуре управления ЭД формируется логическая функция

$L = \Delta \cdot VЛ \cdot KVл \cdot VP \cdot KVп$  (1.3.2), требующая полной остановки ЭД, в которой

$\Delta$  - зона нечувствительности привода по уровню входящего сигнала ( $\Delta < 0,25B$ );

$L \cdot KVл$  - приход команды на левое вращение (Л), при нахождении концевого выключателя в крайнем левом положении (KVл);

$P \cdot KVп$  – приход команды на правое вращение (П), при нахождении концевого выключателя в крайнем правом положении (KVп);

График тока в этом случае представлен на рис. 1.3.5, б).

Второй вид динамического торможения непрерывно реализуется в рабочем режиме работы привода, в котором в процессе широтно-импульсного регулирования (ШИМ) с регулируемой скважностью чередуется двигательный режим и режим динамического торможения (ДТ).

В обоих случаях ДТ якорь ЭД отключается от сети и замыкается накоротко (рис. 1.3.5,а) или через дополнительное сопротивление.

При изменении положения ключа источником напряжения становится противо-ЭДС за счет энергии движения. Направление тока изменяется на противоположное, и этим создается тормозной момент динамического торможения (ДТ).

Спад тока происходит не мгновенно, а по экспоненте с постоянной времени, определяемой индуктивностью обмотки якоря  $L_{я}$ :

$T_{\varepsilon} = \frac{L_{я}}{R_{я}}$ . Одновременно по мере торможения происходит спад тока в противо-

положном направлении с постоянной времени, определяемой моментом инерции якоря  $J_{я}$  и жесткостью механической характеристики  $\beta$ :  $T_{м} = \frac{J_{я}}{\beta}$ .

При этом заметим, что в реальных системах  $T_{м} \gg T_{\varepsilon}$ .

Ток якоря ЭД будет спадать не мгновенно, а, не прерываясь, начиная с тока  $I_{g0}$  предшествующего двигательного режима работы, по пути, указанному на рис. 1.3.4 штриховой стрелкой. При этом верхний ключ предшествующего двигательного режима VT1 закрыт, а нижний ключ этой же «стойки» VT2 при это открыт, но ток по нему не течет. По этому пути рассеивается энергия, запасенная в индуктивности обмоток якоря (см. выражение 1.3.1).

После изменения знака тока якоря он протекает по пути, указанному контурной стрелкой. Ток спадает в соответствии с уравнением  $I_{д.т.}(t) = -\frac{E(t)}{R_{я}} = -\frac{K\Phi \omega(t)}{R_{я}}$ , и при остановке ЭД принимает нулевое значение.

Этот режим ДТ реализуется в случае необходимости полной остановки ЭД, в случае реализации функции вида (1.3.2). В рабочем режиме в процессе работы ШИМ-регулятора ток за время паузы не успевает спадать до нуля и принимает импульсный характер с частотой  $f_{шим} = (3 \dots 20)$  кГц.

Число периодов ШИМ для данной системы в межкоммутационный период изменяется от 1,25 ( $n_{max} = 12000$ ) до 50 при  $U_{y} = 0,25B$ .

Чем больше  $T_{шим}$  (т.е. чем меньше частота), тем больше пульсация тока, тем больше потери в стали, тем выгоднее частоту увеличивать, но, с другой стороны, чем выше частота ШИМ, тем выше динамические потери в транзисторах силового моста.

Компромиссная частота ШИМ выбирается в диапазоне (4÷5) кГц. Во всяком случае, чтобы удержать ток якоря от глубокой просадки в процессе ШИМ, необходимо, чтобы  $T_{\text{ШИМ}} \ll T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}$  (по крайней мере на порядок).

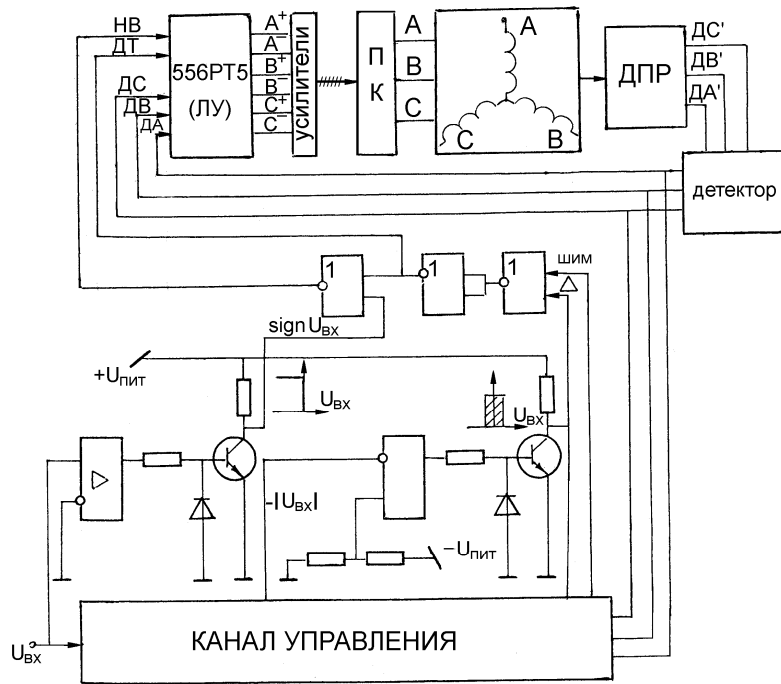


Рис.1.3.1. Структура управления бесконтактным двигателем постоянного тока.

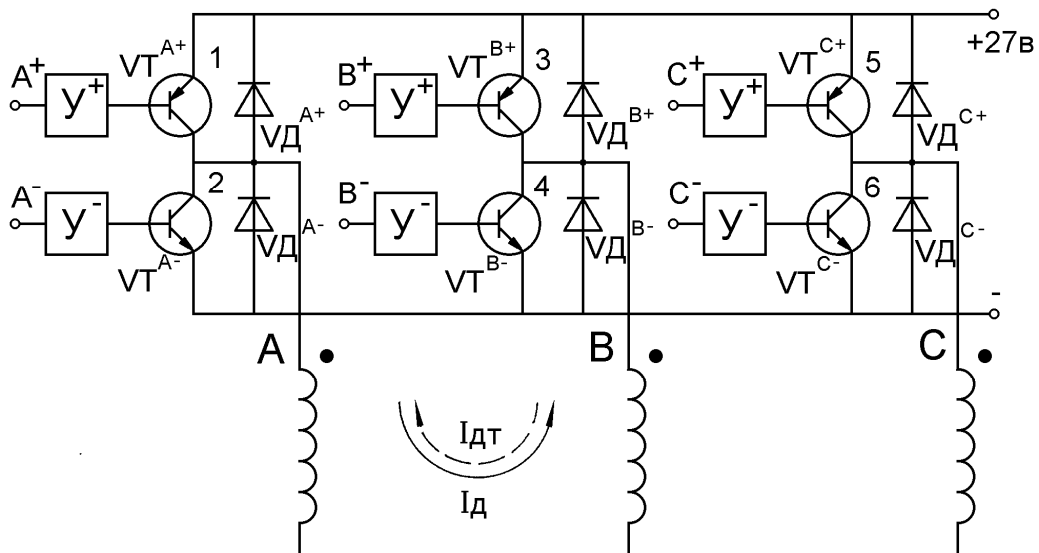


Рис.1.3.2. Силовой мост.

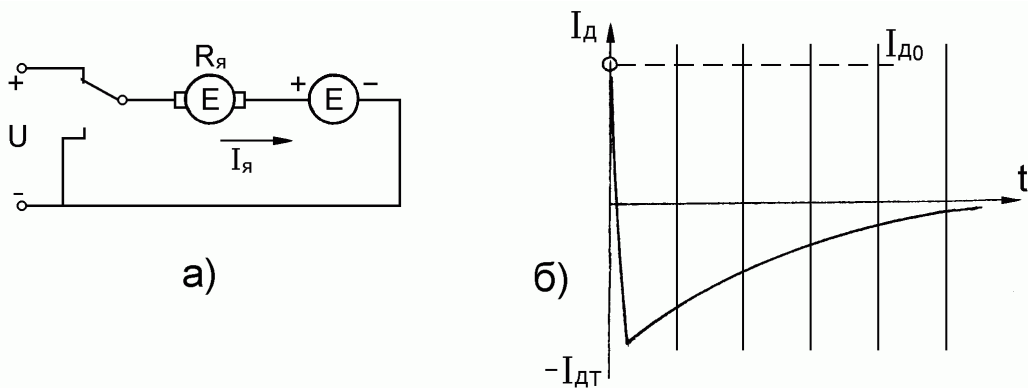


Рис 1.3.5 Эквивалентная схема коллекторного двигателя постоянного тока а) и график изменения тока при переходе от двигательного режима к режиму динамического торможения б).

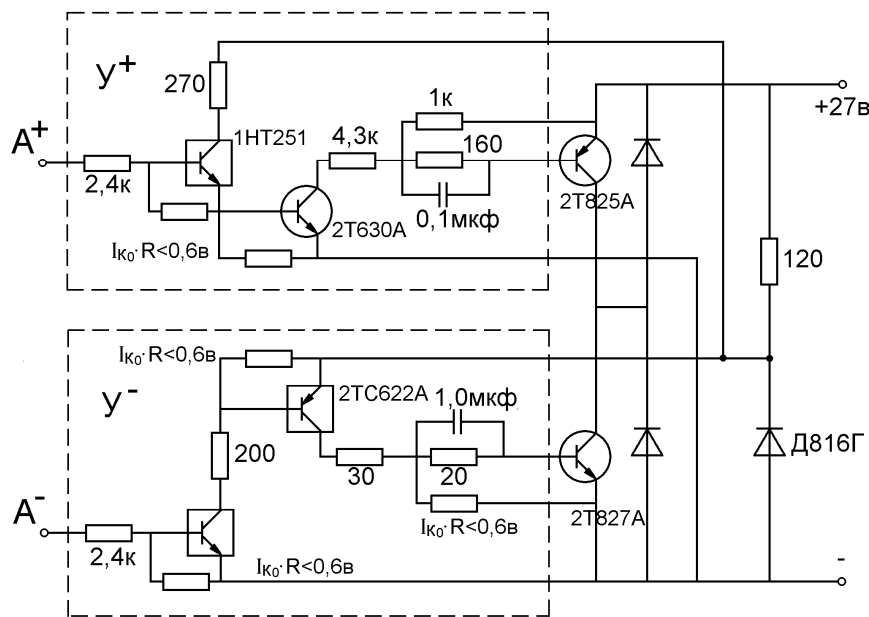


Рис.1.3.3. Усилители мощности  $U^+$  и  $U^-$ .

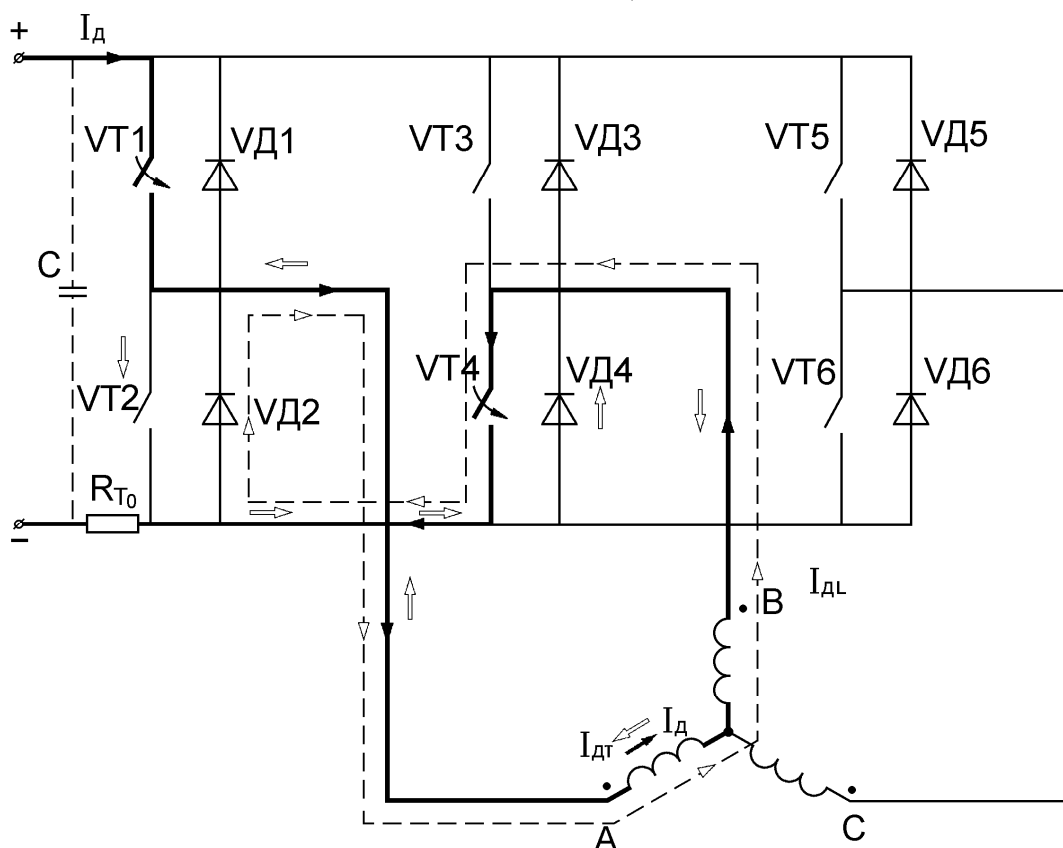


Рис.1.3.4. Контуры протекания тока в различных режимах работы ЭД и ПК.

- ➔ - путь тока  $I_g$  двигательного режима при открытии VT1 и VT4.
- ⇨ - путь тока  $I_{гт}$  в режиме динамического торможения при закрытии VT1 и включении VT2: фаза B – фаза A – VT2 – VD4 – фаза B.



---> - путь тока  $I_{gLOТ}$  ЭДС  $L \frac{d_i}{L_t}$  в начале динамического торможения при закрытии УТ1: фаза А – фаза В – VT4 – VD2 – фаза А.

## 1.4 Разработка алгоритмов управления полупроводниковым коммутатором с помощью логических элементов и программируемой матрицы 556PT5

Питание фаз ЭД от сети постоянного тока осуществляется через ПК, состоящий из шести ключей, сигналы управления на базы которых формируются по сигналам ДПР, установленных на валу ЭД.(рис.1.3.1)

Сигналы ДПР обрабатываются логическим устройством (программируемой матрицей 556PT5 или на основе логических элементов) и усиливаются предварительными усилителями (см. Рис.1.3.3)

Таким образом, разработка алгоритма управления ПК, обеспечивающего требуемый порядок подключения фаз, сводится к определению однозначного соответствия сигналов управления, формируемых логическим устройством, сигналам положения ротора, формируемым ДПР.

Мощные транзисторы силового моста управляются усилителями  $Y+$  и  $Y-$  (рис.1.3.3), которые являются согласующими звеньями с микросборкой 556PT5. Микросборка 556PT5 является программируемой матрицей. С помощью специальной установки можно, разрывая лишние связи, получить любую логическую зависимость между входами ( $A0...A8$ ) и выходами ( $Y0...Y7$ ). Подключение микросборки производится в соответствии с рис.1.4.1.

Исходным данным для разработки алгоритма является векторная диаграмма (рис.1.1.3), определяющая требуемый порядок включения пар фаз обмоток ЭД.

Все возможные комбинации подключения напряжения к силовым обмоткам позволяют разбить окружность статора на 12 секторов (рис.1.4.2.). Трехфазный силовой мост позволяет получить 6 комбинаций, поэтому за один оборот ротора, имеющего магнит с двумя парами полюсов индексы векторов повторяются: 1-6 сектор и 7-12 сектор. На рис.1.4.2 представлена индексация для двигательного режима при правом направлении вращения. Чтобы изменить направление вращения на противоположное, необходимо изменить направление тока, т.е. в обозначении вектора черту отрицания переместить с одной буквы на другую.

Режим динамического торможения ДТ осуществляется путем закорачивания якорной обмотки, размещенной на статоре (см. §1.3).

При этом необходимо открыть оба нижних транзистора, закрыв верхний. Знак скорости при этом не имеет значения. В обозначении вектора черту установить над каждой буквой.

Переключение ключей должно производиться на границе секторов. Эти координаты определяются с помощью сигналов ДПР. Силовой и сигнальный магниты должны быть расположены на валу таким образом, чтобы переход сигнала ДПР из одного состояния в другое совпадал с моментом коммутации ключей силового моста. Например, так, как показано на рис 1.4.2.

Учитывая вышеизложенное, используя векторную диаграмму рис 1.1.3, можно разработать алгоритм программирования матрицы 556PT5. В матрице необходимо использовать пять входов и шесть выходов (рис.1.4.1)

Порядок разработки алгоритма управления ПК может быть следующим.

1. В соответствии с рисунком 1.1.3 определяется порядок прохождения секторов (1...12), на границе которых должно осуществляться переключение фаз ЭД и, соответственно, поочередное формирование векторов  $\overline{A\bar{B}}$ ,  $\overline{C\bar{B}}$  и т.д.

Этот порядок заносится в таблицу 1.4.1.

Заметим, что через 360 градусов электрических (6 секторов по 60 градусов) порядок следования векторов повторяется, поэтому, в принципе, можно ограничиться рассмотрением первых 6-ти секторов (1...6).

2. Для реализации данного порядка следования векторов заполняются клетки необходимых для этого включенных ключей. Так, в секторе 1 необходимо включить ключи А (в верхней “стойке”, что означает подключение фазы А к “+” источника питания) и  $\bar{B}$  (в нижней “стойке”, что означает подключение конца фазы В к “-” источника питания). Ток втекает в фазу А и вытекает через В, формируя вектор  $\overline{A\bar{B}}$ . Аналогично заполняются остальные клетки последующих секторов.

Анализ этого этапа разработки алгоритма позволяет сделать 2 важных вывода:

1) каждая фаза и соответствующий ей ключ включен на протяжении двух секторов,

2) в то же время в любой момент переключения на границе секторов достаточно коммутировать один ключ (и соответствующую ему фазу).

Таблица 1.4.1. – Разработка алгоритма управления ПК.

подключаемые ключи и фазы		требуемый порядок подключения фаз по секторам 1...12											требуемая комбинация сигналов ДПР для автономного управления ключами			
NN секторов		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		12		
формируемые векторы		$A\bar{B}$	$C\bar{B}$	$C\bar{A}$	$B\bar{A}$	$B\bar{C}$	$A\bar{C}$	$A\bar{B}$	$C\bar{B}$	$C\bar{A}$	$B\bar{A}$	$B\bar{C}$		$A\bar{C}$		
К Л Ю Ч И	верхние	A	■					■	■					■	$D\bar{B} \cdot \bar{D}\bar{A}$	
		B				■	■					■	■		$D\bar{A} \cdot \bar{D}\bar{C}$	
		C		■	■					■	■					$D\bar{C} \cdot \bar{D}\bar{B}$
	нижние	$\bar{A}$			■	■					■	■				$D\bar{A} \cdot \bar{D}\bar{B}$
		$\bar{B}$	■	■					■	■						$D\bar{C} \cdot \bar{D}\bar{A}$
		$\bar{C}$					■	■					■	■		$D\bar{B} \cdot \bar{D}\bar{C}$
сигналы фаз ДПР	ДА			■	■	■				■	■	■				
	ДВ	■				■	■	■				■	■			
	ДС	■	■	■				■	■	■						
требуемые сочетания сигналов ДПР управления одновременно двумя ключами		$D\bar{B} \cdot \bar{D}\bar{A}$	$D\bar{A} \cdot \bar{D}\bar{C}$	$D\bar{C} \cdot \bar{D}\bar{B}$	$D\bar{A} \cdot \bar{D}\bar{C}$	$D\bar{B} \cdot \bar{D}\bar{C}$	$D\bar{A} \cdot \bar{D}\bar{B}$	$D\bar{C} \cdot \bar{D}\bar{A}$	$D\bar{B} \cdot \bar{D}\bar{C}$	$D\bar{A} \cdot \bar{D}\bar{B}$	$D\bar{C} \cdot \bar{D}\bar{A}$	$D\bar{B} \cdot \bar{D}\bar{C}$	$D\bar{A} \cdot \bar{D}\bar{C}$			
		$D\bar{C} \cdot \bar{D}\bar{B}$	$D\bar{B} \cdot \bar{D}\bar{A}$	$D\bar{A} \cdot \bar{D}\bar{C}$	$D\bar{C} \cdot \bar{D}\bar{B}$	$D\bar{B} \cdot \bar{D}\bar{A}$	$D\bar{A} \cdot \bar{D}\bar{C}$	$D\bar{C} \cdot \bar{D}\bar{B}$	$D\bar{B} \cdot \bar{D}\bar{A}$	$D\bar{A} \cdot \bar{D}\bar{C}$	$D\bar{C} \cdot \bar{D}\bar{B}$	$D\bar{B} \cdot \bar{D}\bar{A}$	$D\bar{A} \cdot \bar{D}\bar{C}$			

Это позволяет говорить о двух методах управления ПК:

- 1 - “жесткое” управление, при котором коммутируются сразу два ключа (верхний и нижний),
- 2 - “мягкое” управление, при котором коммутируется только один ключ (и фаза).

Однако “мягкое” управление возможно только при работе ЭД только в двигательном режиме без реверсирования или только в режиме динамического торможения, когда коммутация силовых ключей производится только в одном транзисторе стойки (“стойка” - это последовательно соединенные два силовых транзистора) через 30 градусов геометрических. Поэтому в этих случаях короткое замыкание в стойке исключено. При переходе же из двигательного режима в режим динамического торможения и наоборот, а также в случае реверса производится коммутация одновременно двух транзисторов в одной стойке: один транзистор открывается, второй - закрывается. Но, так как время закрывания транзистора, особенно силового, больше, чем время его открывания (25мкс против 5 мкс), то возникает короткое замыкание. Чтобы избежать этого посту-

пают следующим образом: в момент коммутации вначале все транзисторы закрывают на время 2 мкс, а затем открывают нужные.

Вернемся к следующему этапу (№3) разработки алгоритма.

3. Алгоритм управления ПК, реализуемый матрицей, определяется порядком появления на ее входах сигналов ДПР, поэтому для их совместного рассмотрения с состояниями ключей сигналы ДПР заносятся в соответствующих секторах таблицы 1.4.1 (о формировании сигналов ДПР см. §1.2).

4. Для окончательного формирования алгоритма управления необходимо установить однозначное соответствие сигналов ДПР (входных для матрицы) требуемой комбинации открытия ключей.

В наиболее общем случае управления приводом целесообразно иметь возможность отдельного управления каждым из ключей, поэтому рассмотрим сначала этот алгоритм управления, учитывая, что каждый ключ (и фаза) должны быть включены в течение двух интервалов (секторов).

Так, ключ А должен работать последовательно в секторах 6+7, 12+1; ключ В в секторах 4+5, 10+11; ключ С- 2+3, 8+9 и т.д.

Необходимым и достаточным условием включенного состояния ключа А в секторах 6+7 являются следующие сочетания сигналов ДПР:

$f_A = DB \cdot \overline{DA}$ , т.е. одновременно на входе должны быть сигналы  $DB=1$  и  $DA=0$ .

Проверка правильности алгоритма показывает, что смещение из сектора 6 влево (в сектор 5) приводит к нарушению условия  $DA=0$ , а вправо (в сектор 8) - нарушению условия  $DB=1$ .

Сигнал DC в данном случае неинформативен, так как сам изменяет свое состояние (в секторе 6  $DC=0$ , а в секторе 7  $DC=1$ ), поэтому его состояние не учитывается.

Аналогично рассуждая, можно заполнить весь правый столбец требуемых комбинаций ДПР для включения каждого из ключей.

Для разработки алгоритма “жесткого” управления одновременно двумя ключами для коммутации сразу двух фаз с формированием соответствующих векторов линейных напряжений  $\overline{AB}$ ,  $\overline{CB}$  и т.д. значения входных сигналов должны быть другими.

Так, условие формирования вектора  $\overline{CB}$  будет  $f_{\overline{CB}} = \overline{DA} \cdot \overline{CB}$ .

Аналогично заполняется вся нижняя строка таблицы для данного метода управления.

5. Аналогично рассуждая, можно составить по такой же методике и таблицу состояния системы для движения привода “влево” и в режиме динамического торможения.

Требуемые режимы работы элементов в этих режимах работы рассмотрены в разделе 1.3.

6. После этого можно составить обобщенную таблицу алгоритма программирования матрицы (табл.1.4.2), где каждое состояние системы описывается в виде пятизначного числового кода: первые три логических сигнала (0 или 1) определяют состояния выходов фаз ДПР; четвертый сигнал - требуемый режим работы: ДТ=0 - двигательный и ДТ=1 - динамическое торможение; пятый сигнал – о требуемом направлении вращения: НВ=1 – правое, НВ=0 левое. Неинформативные сигналы ДПР (для двигательного режима вправо) поставлены в скобки.

Таблица 1.4.2. Алгоритм программирования матрицы 556PT5.

N сектора	индекс вектора	Д П Р			ДТ	НВ	ключи		режим	
		A	B	C			1й	2й		
1	7	$A\bar{B}$	(0)	1	1	0	1	$A^+$	$B^-$	двигательный вправо
2	8	$\bar{B}C$	0	0	(1)	0	1	$C^+$	$B^-$	
3	9	$\bar{A}C$	1	(0)	1	0	1	$C^+$	$A^-$	
4	10	$\bar{A}\bar{B}$	(1)	0	0	0	1	$B^+$	$A^-$	
5	11	$B\bar{C}$	1	1	(0)	0	1	$B^+$	$C^-$	
6	12	$A\bar{C}$	0	(1)	0	0	1	$A^+$	$C^-$	
1	7	$\bar{A}\bar{B}$	0	1	1	0	0	$B^+$	$A^-$	двигательный влево
2	8	$B\bar{C}$	0	0	1	0	0	$B^+$	$C^-$	
3	9	$A\bar{C}$	1	0	1	0	0	$A^+$	$C^-$	
4	10	$A\bar{B}$	1	0	0	0	0	$A^+$	$B^-$	
5	11	$\bar{B}C$	1	1	0	0	0	$C^+$	$B^-$	
6	12	$\bar{A}C$	0	1	0	0	0	$C^+$	$A^-$	
1	7	$\bar{A}\bar{B}$	0	1	1	1	0	$A^-$	$B^-$	динамическое торможение
2	8	$\bar{B}C$	0	0	1	1	0	$B^-$	$C^-$	
3	9	$\bar{A}C$	1	0	1	1	0	$A^-$	$C^-$	
4	10	$\bar{A}\bar{B}$	1	0	0	1	0	$A^-$	$B^-$	
5	11	$\bar{B}C$	1	1	0	1	0	$B^-$	$C^-$	
6	12	$\bar{A}C$	0	1	0	1	0	$A^-$	$C^-$	

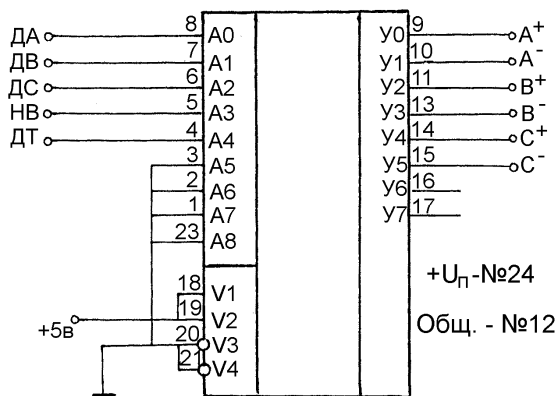


Рис.1.4.1. Схема подключения микросхемы 556PT5.



Рис.1.4.2. Согласование сигналов ДПР и границ секторов окружности статора

