2. УПРАВЛЯЕМЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

2.1. Управляемые выпрямители

В современных системах автоматического регулирования широко применяются управляемые полупроводниковые преобразователи: управляемые выпрямители, инверторы, преобразователи частоты. Все управляемые полупроводниковые преобразователи подключаются к источнику энергии переменного напряжения. Принцип управления состоит в том, что в положительный полупериод вентиль подобно ключу открывается и подает напряжение к нагрузке, при чем момент отпирания вентиля можно регулировать. Напряжение и ток на выходе такого преобразователя содержат постоянные и переменные составляющие. Для анализа работы вентильных преобразователей в зависимости от назначения необходимо найти постоянные или переменные составляющие напряжения и тока. Для этого определяют средние значения этих величин за период изменения напряжения сети. Изменяя время (фазу) открытия вентиля, меняют среднее значение напряжения на выходе вентильного преобразователя, и таким образом управляют двигателями постоянного и переменного тока.

Управляемым вентилем является *тиристор*. Существует большое число различных схем управляемых выпрямителей. По принципу действия и построения они могут быть разделены на две группы: однополупериодные (схемы с нулевым проводом), в которых используют только одну полуволну напряжения сети, и двухполупериодные (мостовые схемы), где используют обе полуволны переменного напряжения сети.

Принцип работы однополупериодной схемы выпрямителя. На рис. 2.1, а) представлена простейшая однополупериодная схема выпрямителя. К источнику синусоидального напряжения сети $\mathbf{U}_{\sim}$ с амплитудой $\mathbf{U_m}$ подключены и нагрузка **R** тиристор **T**, который открывается в момент времени, определяемый углом отпирания α, подачей на управляющий электрод (УЭ) импульса напряжения от схемы управления.

В интервал $\alpha - 180^0$ к нагрузке подводится напряжение

$$\mathbf{u = U_m \sin\omega t}. \qquad (2.1)$$

При активной нагрузке кривая выпрямленного тока (рис. 2.1, в) повторяет кривую напряжения (рис. 2.1, б). В момент времени $\omega t = 180^0$ ток уменьшается до нуля и тиристор закрывается. Этот

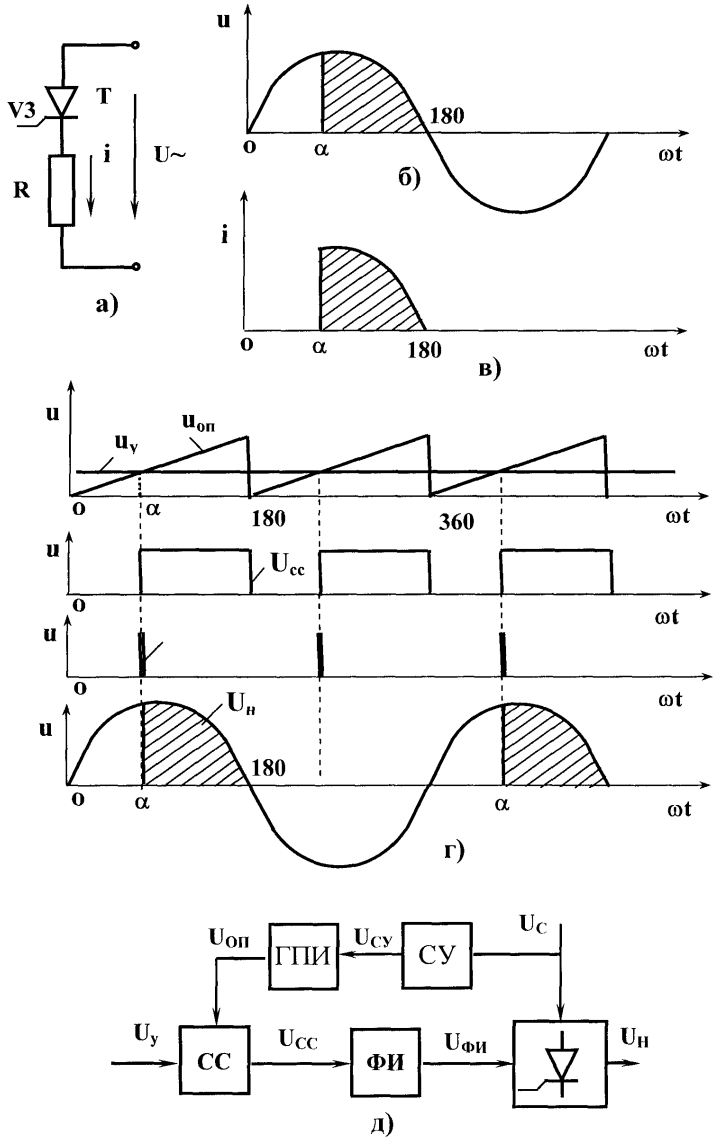

Рис. 2.1. Схема однополупериодного выпрямителя и кривые тока и напряжения

процесс повторяется каждый положительный полупериод (в отрицательный полупериод тиристор заперт напряжением сети).

Управление тиристором осуществляют импульсом возможно меньшей длительности и несколько превышающей время включения тиристора. Время включения тиристора – это время перехода тиристора из его запертого состояния в открытое. Необходимо также обеспечить достаточно крутой передний фронт управляющего импульса, чтобы уменьшить потери мощности в тиристоре при включении, т. е. его нагрев.

Для управления тиристором применяют фазовый метод управления, который может быть реализован с помощью фазосдвигающих способов. Одним из таких способов является «вертикальный» способ управления, основанный на сравнении опорного напряжения $\mathbf{u_{оп}}$ (обычно пилообразной формы) и постоянного напряжения сигнала управления $\mathbf{U_у}$ (рис. 2.1, г). Равенство мгновенных значений этих напряжений определяет фазу α, при которой схема вырабатывает импульс, затем усиливается, и подаются на управляющий электрод тиристора. Изменение фазы управляющего импульса достигается изменением уровня напряжения сигнала управления $\mathbf{U_у}$.

Схема управления тиристором приведена на рис. 2.1, д). Опорное напряжение, вырабатываемое генератором пилообразного напряжения (ГПН) синхронизированно с напряжением сети с помощью синхронизирующего устройства (СУ) подается на схему сравнения (СС), на которую одновременно поступает и напряжение сигнала управления $\mathbf{U_у}$. Сигнал со схемы сравнения поступает на формирователь импульсов (ФИ), откуда в виде мощного, обладающего крутым фронтом и регулируемого по фазе импульса $\mathbf{U_{фп}}$ подается на управляющий электрод.

Можно определить среднее за период значение напряжения на нагрузке на интервале $\alpha - \pi$, интегрируя выражение (2.1):

$$\mathbf{U_{ср}} = \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi} \mathbf{U_m} \sin\omega t d\omega t = \frac{\mathbf{U_m}}{\pi}(1+\cos\alpha). \qquad (2.2)$$

На рис. 2.2 изображена функция напряжения (2.2) при активной (1) и активно – индуктивной (2) нагрузках. При этом среднее значения напряжения $\mathbf{U_{ср}}$ приведены к максимальному (наибольшему) значению на нагрузке при $\alpha = 0$ $\mathbf{U_{ср\,max} = U_м / \pi}$.

Принцип работы двухполупериодной схемы выпрямителя. На рис. 2.3 показана схема мостового двухполупериодного тиристорного

преобразователя. Процесс выпрямления переменного тока в постоянный происходит следующим образом. Если на вход мостовой схемы тиристоров подается положительная полуволна напряжения питающей сети (рис. 2.3, б) эта полуволна обозначена знаком плюс в кружочках), тогда должны быть открыты тиристоры $\mathbf{T_1}$ и $\mathbf{T_2}$ и ток будет протекать через эти тиристоры и нагрузку, как показано на рисунке 2.3, а). При изменении полярности напряжения питающей сети (рис. 2.3, б) отрицательная полуволна напряжения обозначена знаком плюс в квадратиках), должны быть открыты тиристоры $\mathbf{T_3}$ и $\mathbf{T_4}$ и ток через нагрузку будет протекать в том же направлении. Это направление тока на рис. 2.3, а) показано штрихпунктирной стрелкой.

Следует отметить, что отпирание тиристоров осуществляют, как и в простейшей схеме рис. 2.1, а), в положительный полупериод напряжения питающей сети путем подачи на управляющие электроды отпирающих импульсов в момент времени α для тиристоров $\mathbf{T_1}$ и $\mathbf{T_2}$, а также в момент времени $\alpha+180^o$ для тиристора $\mathbf{T_3}$ и $\mathbf{T_4}$ (рис. 2.3 ,а). Таким образом, ток через нагрузку будет протекать в одном и том же направлении. При этом появляется возможность регулирования среднего значения выпрямленного напряжения $\mathbf{U_{ср}}$ и тем самым и тока в нагрузке.

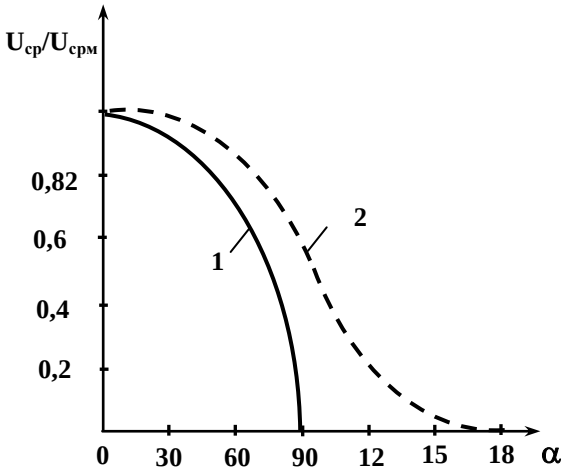

Рис. 2.2. Зависимость выходного напряжения управляемого выпрямителя от угла отпирания

На рис. 2.3, в приведены кривые напряжения и тока нагрузки (заштрихованы). Ток в цепи нагрузки может быть представлен в виде двух составляющих: постоянной и переменной. Постоянная составляющая определяется средним значением напряжения, переменная – зависит от способности схемы сглаживать пульсации и от угла α. Эта составляющая резко возрастает, когда ток становится прерывистым.

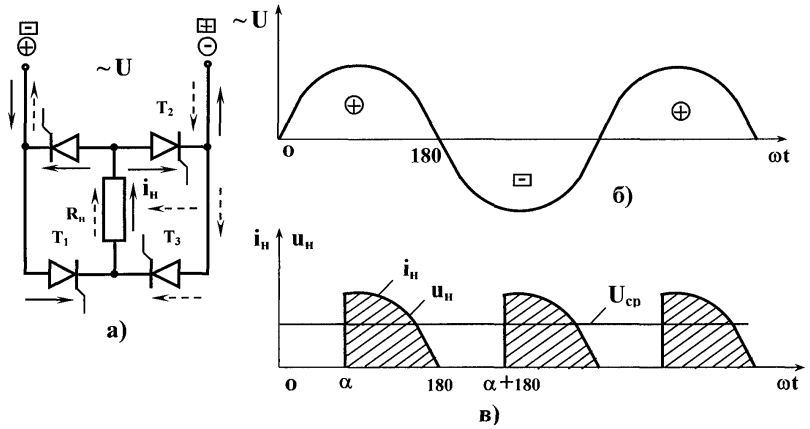

Рис. 2.3. Схема мостового двухполупериодного тиристорного преобразователя и кривые напряжения

Среднее значение напряжения на нагрузке в этом режиме равняется

$$\mathbf{U_{cp} = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+180} U_m \sin\omega t d\omega t = \frac{2U_m}{\pi}\cos\alpha = 0{,}9U\cos\alpha}, \qquad (2.3)$$

где **U** – действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора.

Так как переменная составляющая тока вызывает дополнительный нагрев и потери в нагрузке, при управлении двигателем стремятся обеспечить режим непрерывного тока, для чего последовательно с якорем включают дополнительный дроссель.

Следует отметить, что при активно – индуктивной нагрузке характер процессов в выпрямителе усложняются. Такое имеет место при управлении двигателем постоянного тока за счет индуктивности якоря $\mathbf{L_я}$ и дополнительного дросселя.

На рис. 2.4 приведена схема управления двигателем постоянного

тока с помощью тиристорного преобразователя и кривые напряжения и тока якоря.

Индуктивность дополнительного дросселя увеличивает электромагнитную, а его активное сопротивление – электромеханическую постоянные времени двигателя. Поэтому этот дроссель ухудшает динамические свойства привода. Анализ совместной работы двигателя постоянного тока и тиристорного преобразователя показал, что при значительной индуктивности регулирование напряжения на ней эффективно лишь при изменении α в пределах $0 < \alpha < 90^0$.

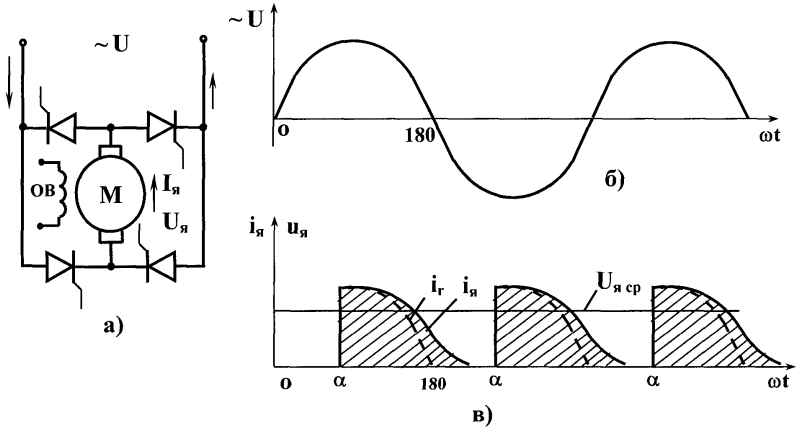

Рис. 2.4. Схема управления двигателем постоянного тока с помощью тиристорного преобразователя и кривые напряжения

Принцип работы трехфазного выпрямителя с нулевым проводом. На рис. 2.5 представлена схема трехфазного управляемого выпрямителя с нулевым проводом и кривые тока и напряжения.

Если тиристоры неуправляемые, то они будут пропускать ток в течение всего положительного полупериода фазного напряжения. Тогда, например, тиристор T_1 под действием напряжения вторичной обмотки трансформатора u_A будет открыт в интервале $0 < \omega t < 180^0$ (рис. 2.5, б и в). Однако на участке 0 – 30° тиристор T_1 оказывается запертым напряжением u_C, большим напряжения u_a и приложенным в запирающем тиристор T_1 направлении через открытый тиристор T_3. Подобным же образом тиристор T_1 окажется запертым и на участке

$150^0 < \omega t < 180^0$ за счет напряжения u_B, приложенного плюсом к катоду тиристора T_1 через открывшийся тиристор T_2. Интервал проводимости тиристора T_1 на рис. 2.5, в) заштрихован.

Таким образом, управлять моментом отпирания тиристоров можно лишь начиная с $\omega t = 30^0$. Поэтому именно с этого значения целесообразно отсчитывать угол α подачи на управляющих импульсов (УЭ). Следовательно, рис. 2.5, в) соответствует $\alpha = 0$ и максимальному напряжению на нагрузке

$$U_{cp\,max} = \frac{3}{2\pi}\int_{30^0}^{150^0} U_m \sin\omega t d\omega t = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi}U_m = 1{,}17U_m . \qquad (2.4)$$

Изменяя α, можно управлять средним значением напряжения на нагрузке, которое для режима непрерывного тока с учетом (2.5) определяется формулой

$$U_{cp} = \frac{3}{2\pi}\int_{30^0+\alpha}^{150^0+\alpha} U_m \sin\omega t d\omega t = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi}U_m \cos\alpha = 1{,}17U_ф \cos\alpha , \qquad (2.5)$$

где $U_Ф$ – действующее значение фазного напряжения вторичной обмотки трансформатора.

На рис. 2.5, г) показаны кривые напряжения и тока при активно-индуктивной нагрузке, когда $\alpha = 60^0$. Как видно из графика, у трехфазного управляемого выпрямителя с нулевым проводом выпрямленное напряжение имеет уменьшенные пульсации и фазы нагружены равномерно.

В общем случае для **m**-фазного управляемого выпрямителя среднее значение выпрямленного напряжения U_{cp} может быть получено при непрерывном токе путем интегрирования фазного напряжения на интервале проводимости $2\pi/\tau$ (рис. 2.6)

$$U_{cp} = \frac{3}{2\pi/m}\int_{\pi/m+\alpha}^{\pi/m+\alpha} U_m \cos\omega t d\omega t = \frac{m\sqrt{2}}{\pi}U_m \frac{\pi}{m}\cos\alpha = U_{cp\,max}\cos\alpha , \qquad (2.6)$$

где

$$U_{cp\,max} = \frac{\sqrt{2}m}{\pi}U_ф \sin\frac{\pi}{m} .$$

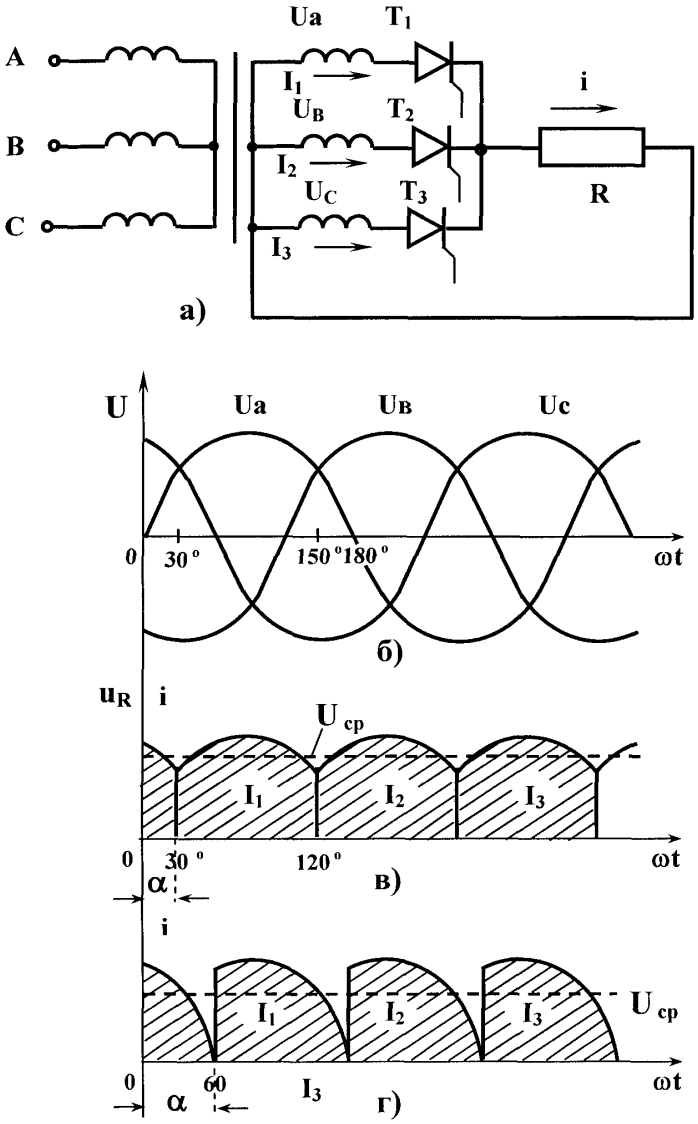

Рис. 2.5. Схема трехфазного управляемого выпрямителя с нулевым проводом и кривые тока и напряжения

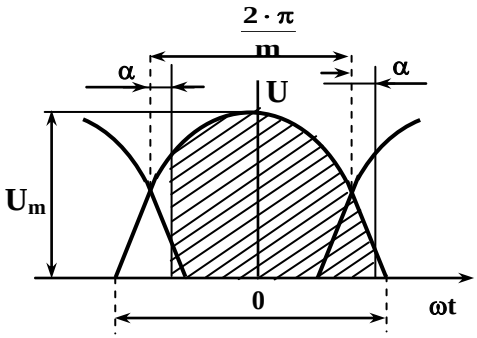

Рис. 2.6. Кривые напряжения **m**–фазного управляемого выпрямителя

2. 2. Тиристорное управление двигателем постоянного тока

В системах автоматического регулирования, в которых двигатель питается от управляемого выпрямителя, преобразующее переменное напряжение в регулируемое постоянное напряжение, возможно сформирование необходимого качества переходных режимов при пуске, торможении и реверсировании.

На рис. 2.7 представлена схема управления двигателем постоянного тока с помощью трехфазного управляемого выпрямителя с нулевым проводом.

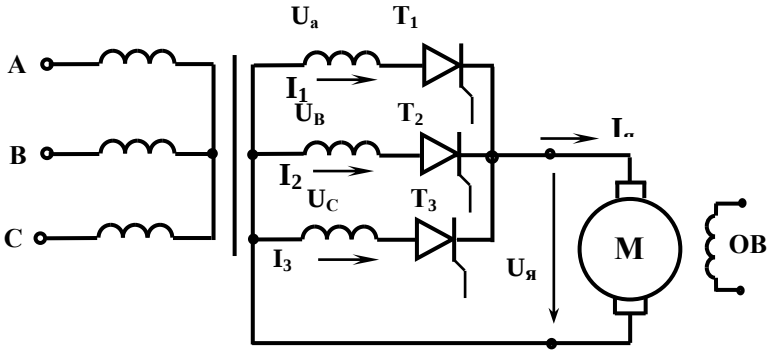

Рис. 2.7. Схема управления двигателем постоянного тока с помощью трехфазного управляемого выпрямителя с нулевым проводом

В этой схеме управления, изменяя угол отпирания α управляемых вентилей, регулируют выпрямленным напряжением на якоре двигателя, и этим самым регулируется частота вращения. Применение управляемых выпрямителей для регулирования в широких пределах частоты вращения двигателя постоянного тока за счет изменения угла отпирания α управляемых вентилей имеет свои особенности. Одним из таких особенностей работы является то, что индуктивность двигателя достаточно велика и обеспечивает режим непрерывного тока.

Принцип работы трехфазного мостового выпрямителя. Принцип регулирования напряжения на выходе мостовой схемы трехфазного управляемого выпрямителя, обеспечивающая наименьшую пульсацию выходного напряжения, показана на рис. 2.8.

Управляющие сигналы, открывающие тиристоры, подаются в последовательности $\mathbf{T_1 - T_6 - T_3 - T_2 - T_5 - T_4}$ со сдвигом на 60 °, т. е. $\mathbf{m} = 6$, причем тиристоры $\mathbf{T_1, T_3}$ и $\mathbf{T_5}$ открываются в положительные, а тиристоры $\mathbf{T_6, T_2}$ и $\mathbf{T_4}$ – в отрицательные полупериоды фазных напряжений. Интервал проводимости каждого тиристора равен 120 °, в каждый момент времени открыты два тиристора (по одному в плече моста), и напряжение на якоре определяется разностью фазных напряжений двух вторичных обмоток трансформатора, т. е. линейным напряжением.

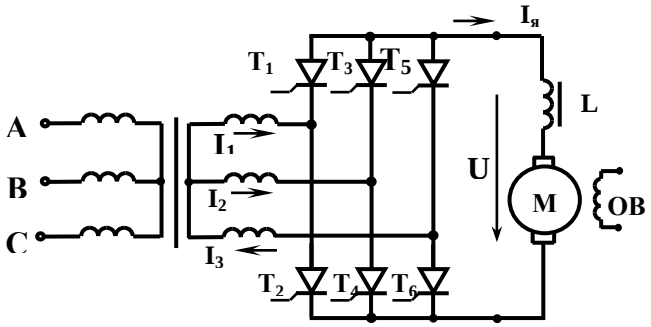

Рис. 2.8. Схема трехфазного мостового управляемого выпрямителя

Среднее значение напряжения на нагрузке в соответствии с (2.6) имеет следующий вид:

$$\mathbf{U_{ср} = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} U_m \sin\frac{\pi}{6} \cos\alpha = 1{,}35 U_л \cos\alpha = 2{,}34 U_ф \cos\alpha}, \quad (2.7)$$

где $\mathbf{U_л = \sqrt{3}U_ф}$ – действующее значение линейного напряжения вторичной обмотки трансформатора.

В зависимости от схемы управляемого выпрямителя выражение для механической характеристики двигателя постоянного тока при тиристорном управлении имеет следующий вид:

$$\omega = \frac{U_{ср max}\cos\alpha}{k_{эм}} - \frac{R_я + R_д}{k_{эм}^2} M, \qquad (2.8)$$

где добавочное сопротивление $R_Д$ состоит из активного сопротивления дросселя $R_{др}$ и эквивалентного активного сопротивления выпрямителя $R_{ЭК}$.

Можно доказать, что эквивалентное активное сопротивление выпрямителя

$$R_{ЭК} = m \cdot f \cdot L_Ф + R_Ф, \qquad (2.9)$$

где f – частота источника питания, Гц; $L_Ф$, $R_Ф$ – индуктивность и активное сопротивление фазной обмотки выпрямителя. Здесь произведение $m \cdot f \cdot L_Ф$ проявляет себя именно как активное сопротивление.

На рис. 2.9 приведены кривые тока и напряжения схемы трехфазного мостового управляемого выпрямителя. Наличие индуктивности $L_Ф$ в фазах приводит к уменьшению среднего значения напряжения выпрямителя.

Отметим, что механическая характеристика системы управляемый выпрямитель – двигатель (УВ–Д) прямолинейна и менее жестко. Прямые на рис. 2.10, построенные по выражению (2.11), отсекают на оси ординат отрезки, соответствующие угловой частоте вращения при идеальном холостом ходе

$$\omega_0' = \frac{U_{ср max}\cos\alpha}{k_{эм}}.$$

В действительности частота вращения идеального холостого хода при некотором значении угла α отличается от значения ω_0'. Это объясняется тем, что в режиме холостого хода для выпрямителей наступает режим прерывистых токов. При снижении нагрузочного момента угловая частота вращения возрастает, а, следовательно, увеличивается и противо-ЭДС двигателя. При этом ток уменьшается и наступает режим прерывистых токов. На рис. 2.10 участки реальных характеристик показаны штриховыми линиями.

Односторонняя проводимость вентилей не позволяет произвести реверс двигателя путем изменения полярности напряжения $U_{ср}$ выпрямителя. Для осуществления реверса с помощью контактного пере-

ключателя изменяют полярность напряжения на обмотке возбуждения или якоре.

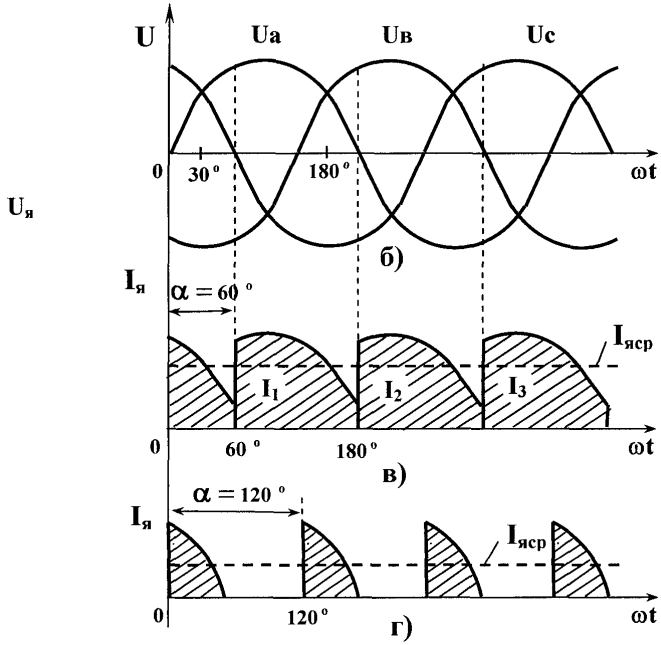

Рис. 2.9. Кривые тока и напряжения схемы трехфазного мостового управляемого выпрямителя

Недостаток первого способа состоит в большой продолжительности реверса, обусловленной относительно большой постоянной времени обмотки возбуждения. Недостатком второго способа является коммутация токов в мощной якорной цепи.

Для приводов, требующих высокого быстродействия и надежности реверса, применяют реверсивные управляемые выпрямители (рис. 2.11). Управляемые выпрямители $\mathbf{B_1}$ работают при одной полярности напряжения якоря, а выпрямители $\mathbf{B_2}$ – при другой полярности напряжения.

При работе системы в режиме рекуперативного торможения один из выпрямителей находится в режиме инвертирования, а второй закрыт или подготовлен к работе в режиме выпрямления.

В случае совместной работы выпрямителей необходимо ограничивать уравнительные токи, протекающие между выпрямителями за счет разности мгновенных значений их напряжений. Для этого в цепи

выпрямленного тока включают уравнительные дроссели $\mathbf{L_1}$ и $\mathbf{L_2}$.

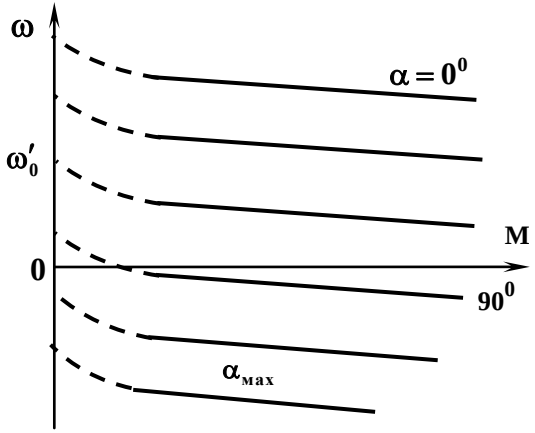

Рис. 2.10. Механические характеристики системы УВ –Д

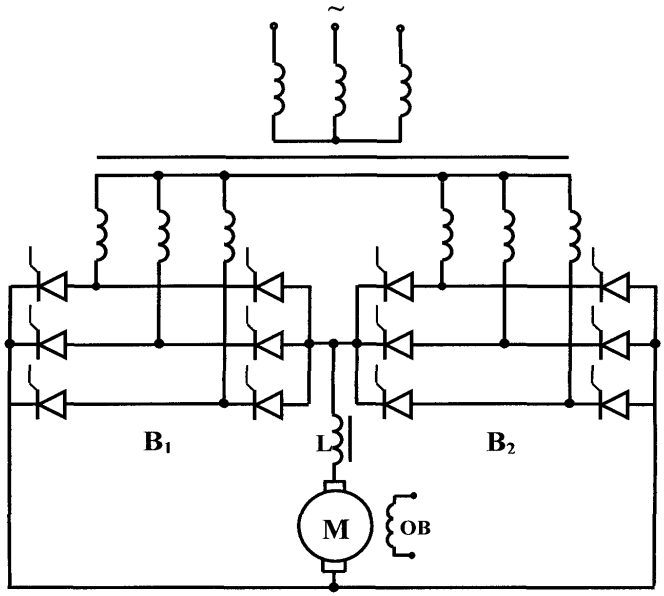

Рис. 2.11. Схема реверсивной системы УВ – Д

Возможны два вида управления выпрямителями реверсивной системы – совместный и раздельный. При совместном управлении целесообразно согласование линейных напряжений, обеспечения условия, когда

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \pi, \tag{2.10}$$

где α_1 и α_2 – углы отпирания управляемых выпрямителей $\mathbf{B_1}$ и $\mathbf{B_2}$

Недостатком совместного управления является возможность протекания уравнительных токов и необходимость включения дросселей. Для исключения уравнительных токов можно использовать раздельное управление выпрямителями, заключающееся в подаче управляющих импульсов только на работающий в данный момент выпрямитель. Вентили другого выпрямителя в это время закрыты. При изменении режима работы импульсы управления подаются на второй выпрямитель после прекращения работы первого с некоторой задержкой, необходимой для его надежного запирания.

2. 3. Пример применения тиристорного управления

В настоящее время на практике находят применение тиристорные системы питания автоматизированных электроприводов постоянного тока. Следует подчеркнуть, что использование практически безынерционного силового преобразователя, каким является тиристорный преобразователь, позволяет наиболее полно реализовать оптимальный график переходного процесса.

Один из вариантов схем управления электроприводом лифта показан на рис. 2.12.

В качестве основного оборудования используются две группы управляемых тиристоров $\mathbf{B_1}$ и $\mathbf{B_2}$**,** предназначенных для питания двигателя в соответствии с направлением частоты вращения.

Управление открыванием вентилей производится системой управления тиристорными выпрямителями (СУТВ), основанной на импульсно-фазовой системе, которая выполнена на полупроводниковых элементах. Для ограничения уравнительных токов в силовую цепь включаются дроссели 1ДР – 4ДР. Чтобы обеспечить заданный диапазон регулирования и точную остановку, применяется обратная связь по частоте вращения, осуществляемая с помощью тахогенератора **ТГ**. Сигналы обратной связи поступает на СУТВ, который позволяет ограничить до заданного уровня ускорения и рывки переходных процессов.

В схеме автоматизированного электропривода лифта: используется несколько видов защит: тиристорный преобразователь защищает-

ся от токов короткого замыкания автоматическим выключателем А1, якорный цепь от не допустимо больших токов защищается с помощью реле РМ, а от перегрузки – тепловым реле ТР. В якорной цепи установлено реле контроля тока РКТ, которое реагирует на величину и скорость нарастания токов.

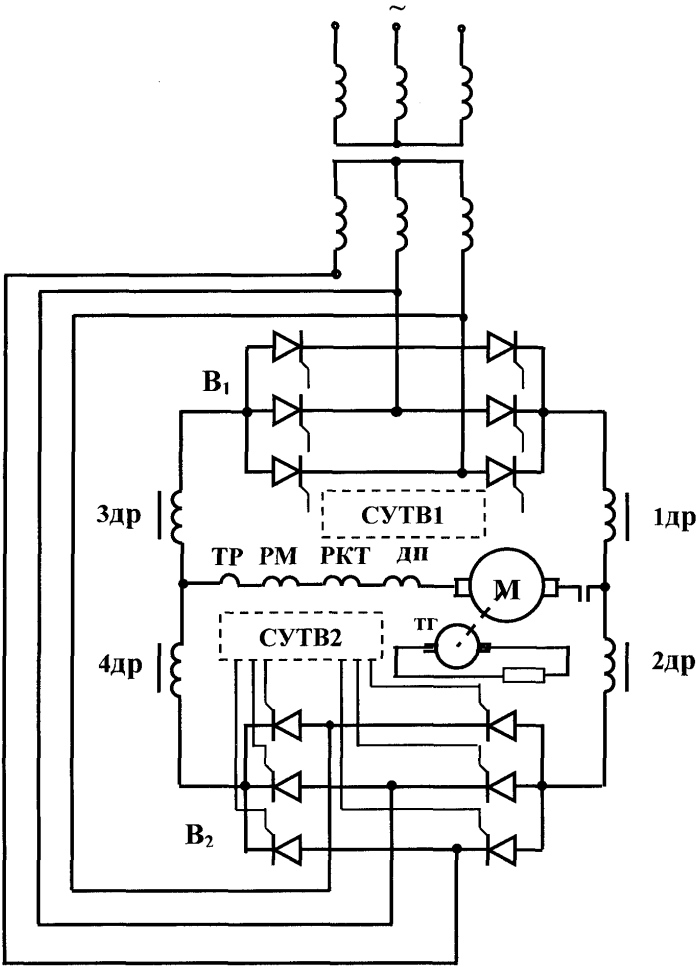

Рис. 2.12. Схема электропривода лифта с тиристорным управлением

2. 4. Контрольные вопросы

1. В каких случаях тиристор открыт?
2. Что преобразовывает управляемый выпрямитель?
3. Какой вид имеет зависимость выходного напряжения трехфазного управляемого выпрямителя от угла отпирания?
4. От чего зависит напряжение управляемого выпрямителя?
5. Как осуществляется реверс в тиристорных электроприводах постоянного тока?
6. Что преобразовывает управляемый трехфазный выпрямитель?
7. В тиристорном электроприводе постоянного тока за счет чего регулируется частота вращения?
8. Какой вид имеет механическая характеристика тиристорного электропривода?
9. От чего зависит выпрямленное напряжение управляемого выпрямителя?
10. Сколько тиристоров используется в трехфазном мостовом управляемом выпрямителе?