

Министерство образования и науки Российской Федерации

---

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

Санкт-Петербургский государственный горный институт  
им. Г.В. Плеханова (технический университет)



1773

**Алексеев В.В.**

**КРАТКИЙ  
КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ**

**"ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД"**

Часть II

*для специальности ЭР*

*Санкт-Петербург' 2009*

## Часть II. 1. Электроприводы с замкнутой системой управления

### 1.1. Структурная схема регулируемого электропривода

Управление электрическими приводами (ЭП) заключается в осуществлении пуска, регулировании скорости, торможения, а также поддержания режима работы привода в соответствии с требованиями технологического процесса. Замкнутые системы автоматического управления электроприводами наилучшим образом выполняют управление технологическим процессом, позволяя достичь максимального быстродействия, повысить производительность механизмов, облегчить выполнение операций по управлению с требующейся точностью.

В соответствии со структурой электропривода с замкнутой системой управления рис.1.1 ЭП кроме двигательного устройства ДУ и рабочей машины РМ содержит: задающее устройство ЗУ, управляющее устройство УУ (САР), преобразователь энергии Пр, передаточное устройство ПУ, датчики-преобразователи информации ДПИ [1-4].

Выходными координатами привода являются электромагнитный момент  $M$ , (или сила  $F$ ), обеспечивающие функционирование РМ, координаты движения угловая  $\omega$  или линейная  $v$  скорости (или соответствующие отрезки пути  $\Delta\alpha$ ,  $\Delta s$ ).

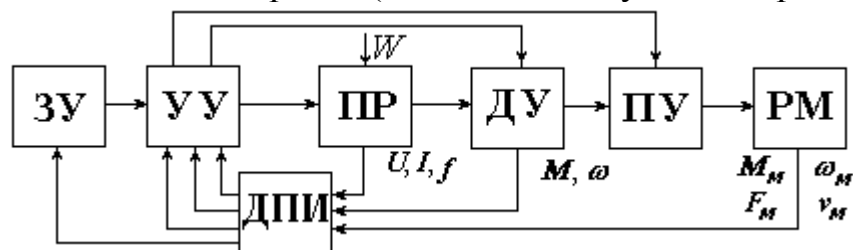


Рис.1.1.

Назначение основных элементов ЭП

1. *Передаточное устройство* - для преобразования форм движения и передачи механической энергии от двигателя к рабочим органам машины.

2. *Двигательное устройство* преобразует электрическую энергию в механическую, а также формирует совместно с ПУ заданные формы движения рабочих органов и обычно содержит один или несколько электродвигателей (ЭД). В современных электроприводах применяются различные типы двигателей, отличающиеся по роду тока, типу исполнения, принципу действия и т.д.

3. *Преобразователь* – это устройство, связанное с источником электроэнергии  $W$  служащее для преобразования одного вида электроэнергии в другой, формирования и усиления по мощности сигналов управления УУ. Например, Пр может быть выпрямителем, служить для преобразования напряжения 380 В, 50Гц в напряжение переменной амплитуды и частоты.

4. *Управляющее устройство совместно с информационным устройством* (датчиками-преобразователями информации ДПИ) формируют заданные законы управления (поток энергии  $W$  и движения РМ). ДПИ преобразует координаты ЭП в электрические сигналы.

5. *Задающее устройство* формирует управляющие воздействия УУ, используя информацию ДПИ.

Управление выходными координатами в замкнутой системе современного привода невозможно без применения в электрической части силового канала управляемых полупроводниковых преобразователей.

## 1.2. Электрическая часть силового канала электропривода

### Управляемые тиристорные преобразователи (ТП)

В настоящее время в ЭП вместо электромеханического преобразователя - генератора (система Г-Д) применяются полупроводниковые преобразователи. В этих системах используются полупроводниковые управляемые диоды – тиристоры (в мощных приводах) и транзисторы (системы ТП-Д) [2, 7].

Тиристор обладает полупроводниковыми свойствами, т.е. проводит ток только в одном направлении. Кроме того, можно управлять моментом открывания тиристора. Тиристор открывается только тогда, когда на его управляющий электрод подан сигнал. Однако после снятия управляющего сигнала тиристор сам не закрывается, пока ток в нем не прекратится под действием другой внешней силы (например, перемены полярности напряжения, когда диод перестает пропускать ток). Вследствие этого управляющий сигнал можно подавать в виде узких (малой длительности) импульсов, открывающих соответствующий диод.

Рассмотрим выпрямитель, состоящий из обычных диодов (Рис.1.2). В момент времени  $t = 0$   $U_A > U_B$ ,  $U_A > U_C$ , поэтому ток протекает через диод фазы А (1). При  $t > t_1$   $U_B > U_A$  ток переходит на диод 2, а диод 1 закрывается. В точках равенства напряжения, таким образом, происходит естественная коммутация вентилей (переход тока с вентиля на вентиль). Кривая напряжения на нагрузке (двигателе) имеет вид, приведенный на рисунке 1.3.

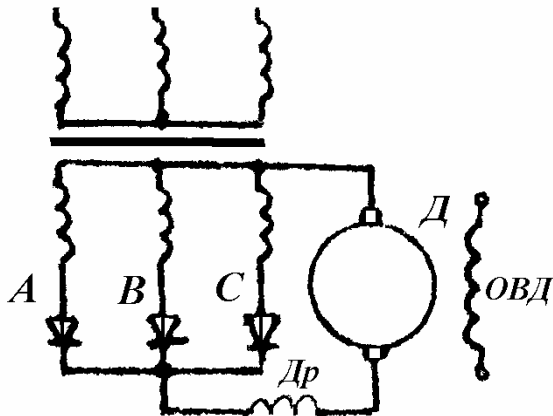


Рис.1.2.

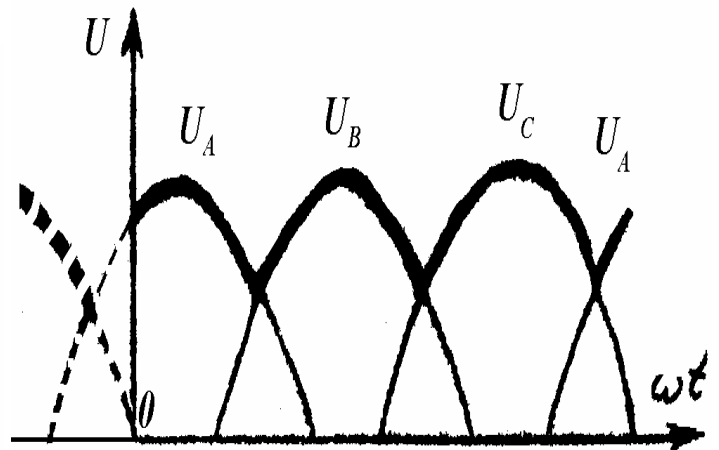


Рис.1.3

При использовании тиристоров в точке естественной коммутации переход тока на тиристор фазы В не происходит, т.к. он закрыт (Рис.1.4). Предположим, что импульс на отпирание диода подан с запаздыванием на угол  $\alpha_1$  (Рис.1.5).

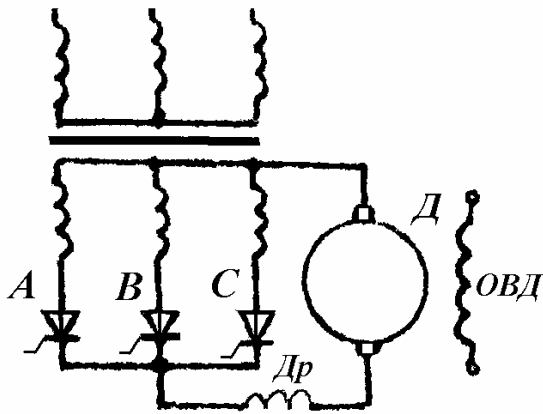


Рис.1.4

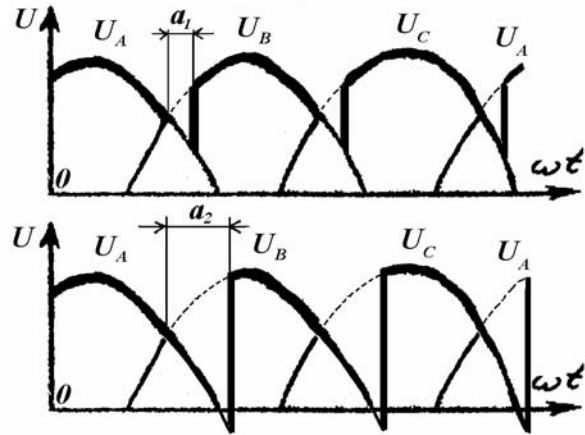


Рис.1.5

В этот момент происходит переход тока на тиристор фазы  $B$  и т.п. При изменении угла отпирания (угол управления) с  $\alpha_1$  до  $\alpha_2$  кривая напряжения изменится. При  $U < 0$  ток в цепи поддерживается за счет ЭДС самоиндукции дросселя  $Др$ , т.е. энергии, запасенной в магнитном поле дросселя). Как видно при изменении угла управления изменяется среднее выпрямленное напряжение

$$U_{\alpha} = \frac{1}{T} \int_0^T U dt.$$

После интегрирования получим  $U_{\alpha} = U_{d0} \cdot \cos \alpha$ .

где  $U_{d0}$  среднее выпрямленное напряжение при  $\alpha = 0$ , т.е. при работе неуправляемого преобразователя, которое подчиняется закону

$$U_{d0} = U_M \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}.$$

Следовательно, с помощью тиристорных преобразователей можно изменить величину напряжения, и таким образом регулировать скорость двигателей.

$$\omega = \frac{U_{d0} \cdot \cos \alpha}{k\Phi} - \frac{R_{я}}{k^2\Phi^2} M.$$

По мощности тиристорные преобразователи достигают 10000 кВт. На основе их могут создаваться также установки для электросварки, электролиза и т.п.

Преимущества тиристорных преобразователей

а) более высокий КПД, т.к. нет многократного преобразования энергии, присущего системе генератор-двигатель (Г-Д), а падение напряжения на вентилях не превосходит величины 1 В;

б) высокое быстродействие;

в) отсутствие вращающихся частей, не требуется фундамент, упрощение обслуживания механической части.

Недостатки

1) Необходимость системы импульсно-фазового управления

(формирующей и смещающей отпирающие импульсы)

2) Ухудшение  $\cos\varphi$ . Так как  $\cos\varphi \approx \cos\alpha$ , то при понижении напряжения резко ухудшаются энергетические показатели.

3) ТП (мостовая схема) пропускает ток только в одном направлении, поэтому усложняется реверсирование и генераторное торможение двигателя (необходимо два комплекта ТП) [7].

Двухкомплектные выпрямители обеспечивают работу ДПТ во всех 4-ех квадрантах механических характеристик. Они работают как в выпрямительном (двигательный режим), так и в инверторном (при рекуперативном торможении двигателя) режиме.

По принципу построения существует два типа схем реверсивных выпрямителей: перекрестная рис.1.6 (а), встречно-параллельная рис.1.6 (б).

Оба типа схемных решений делятся по типу управления на выпрямители с раздельным и согласованным (совместным) управлением.

*При согласованном управлении оба комплекта (выпрямителя) работают все время. Один комплект - в выпрямительном, другой - в инверторном режиме. Сопряжение углов (закон импульсно-фазового управления)  $\alpha_1 + \alpha_2 = 180^\circ$ .*

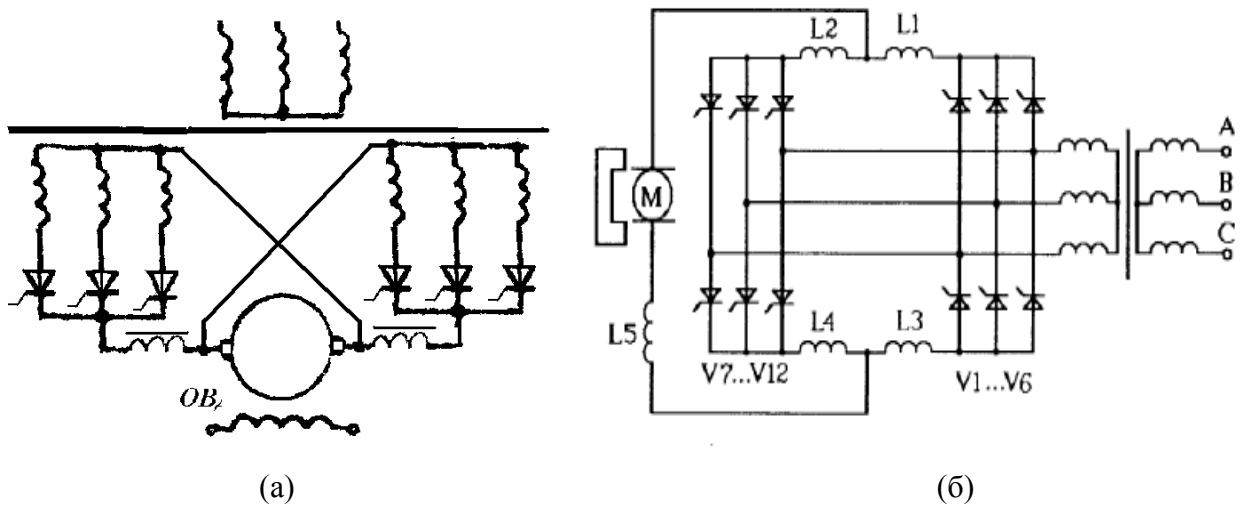


Рис.1.6

Так как мгновенные значения напряжений комплектов не равны, то при согласованном управлении между ними протекает уравнивающий ток, который снижают до величины  $I_{ур} < 10\% I_{ном}$  введением уравнивающих реакторов.

**При раздельном управлении** комплекты работают раздельно так, что первый – в режиме выпрямителя, а второй не работает. При переходе ДПТ в генераторный режим (торможение) импульсы управления снимают с первого комплекта, а второй работает в инверторном режиме. *Для определения момента снятия управляющих импульсов при переходе тока через ноль нужны датчики тока.* Кроме того, требуется пауза 10-20 мс для деблокирования импульсов второго комплекта. Это приводит к снижению быстродействия при переключении комплектов.

Таким образом, для управляемого выпрямителя является недостатком сложность технического осуществления генераторного торможения.

Указанные недостатки устраняются и поэтому тиристорные преобразователи вытесняют систему Г-Д.

В системе ТП-Д могут быть организованы те же обратные связи, что и в системе Г-Д, т.е. по своим свойствам система ТП-Д не уступает системе Г-Д, а вследствие малой инерционности - превосходит её.

На рис.1.7, рис.1.8 приведены схемы преобразователей частоты (ПЧ). Согласно этим схемам включение тиристоров I и II (рис.1.7) или групп тиристоров I и II (рис.1.8) обеспечивает одно направление тока, а групп или тиристоров III, IV – противоположное. Переключением тиристоров или групп можно получить в нагрузке переменный ток требуемой частоты.

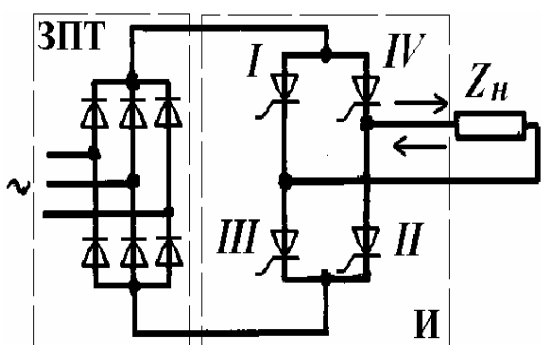


Рис.1.7. ПЧ со звеном ПТ

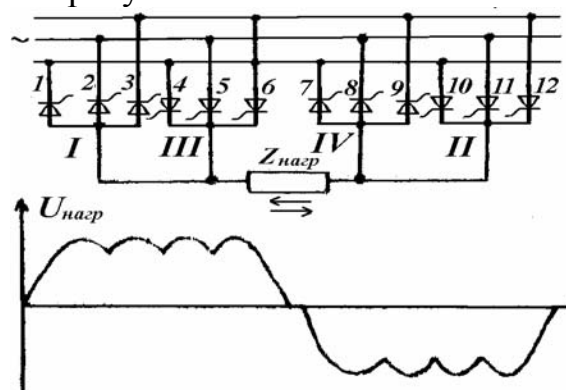


Рис.1.8. НПЧ

Схема рис.1.7 позволяет регулировать частоту. Для управления уровнем напряжения звено постоянного тока (ЗПТ) можно выполнить в виде управляемого выпрямителя (УВ), данного на рис.1.9. Для питания трехфазной нагрузкой инвертор дополняется еще двойкой тиристоров по рис.1.10.

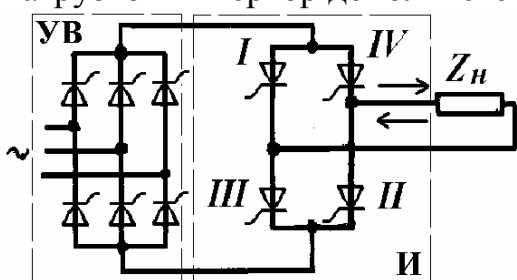


Рис.1.9

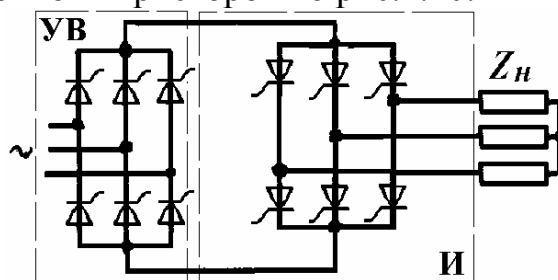


Рис.1.10

Для получения в схеме рис.1.8 трехфазного выходного напряжения НПЧ должен содержать больше тиристоров. На рис.1.11 дана упрощенная схема трехфазного НПЧ. На рис.1.12 дана диаграмма напряжений НПЧ при прямоугольном напряжении.

Кроме рассмотренного в современных статических преобразователях частоты используются следующие способы регулирования величины выходного фазного напряжения: **амплитудный; широтно-импульсный; широтно-импульсный с модуляцией по синусоидальному закону, пространственно-**

векторный.

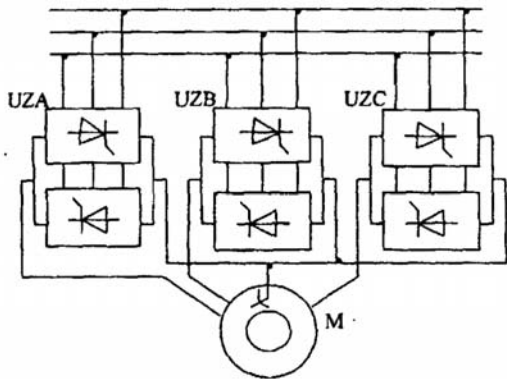


Рис.1.11.

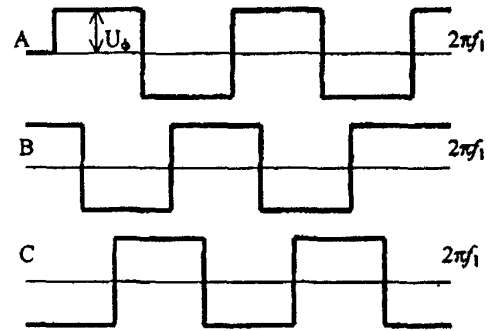


Рис.1.12.

Недостатком рассмотренных схем является несинусоидальная форма выходного напряжения.

В ТПЧ со звеном постоянного тока этот недостаток при использовании управляемого выпрямителя проявляется наиболее остро и характеризуется также низким коэффициентом мощности.

Более эффективным является способ широтно-импульсного регулирования вентильми инвертора при неуправляемом выпрямителе.

На схеме рис.1.13 дана схема частотного асинхронного электропривода с транзисторным инвертором напряжения на IGB транзисторах

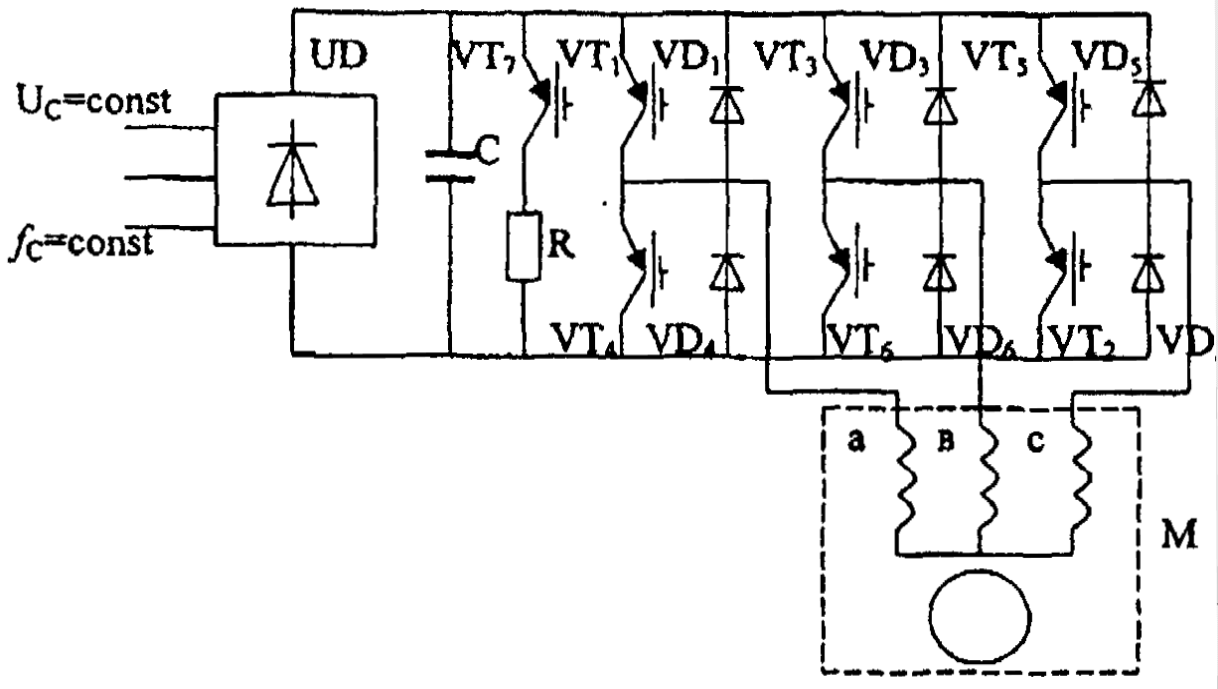


Рис.1.13

При широтно-импульсном способе регулирования возможно не только регулирование средней величины напряжения за период, но и коррекция формы выходного напряжения. Такое регулирование называется широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), которая основана на принципе широтно-импульсного регулирования. Принцип широтно-импульсной модуляции синусоидального напряжения поясняется рис.1.14.

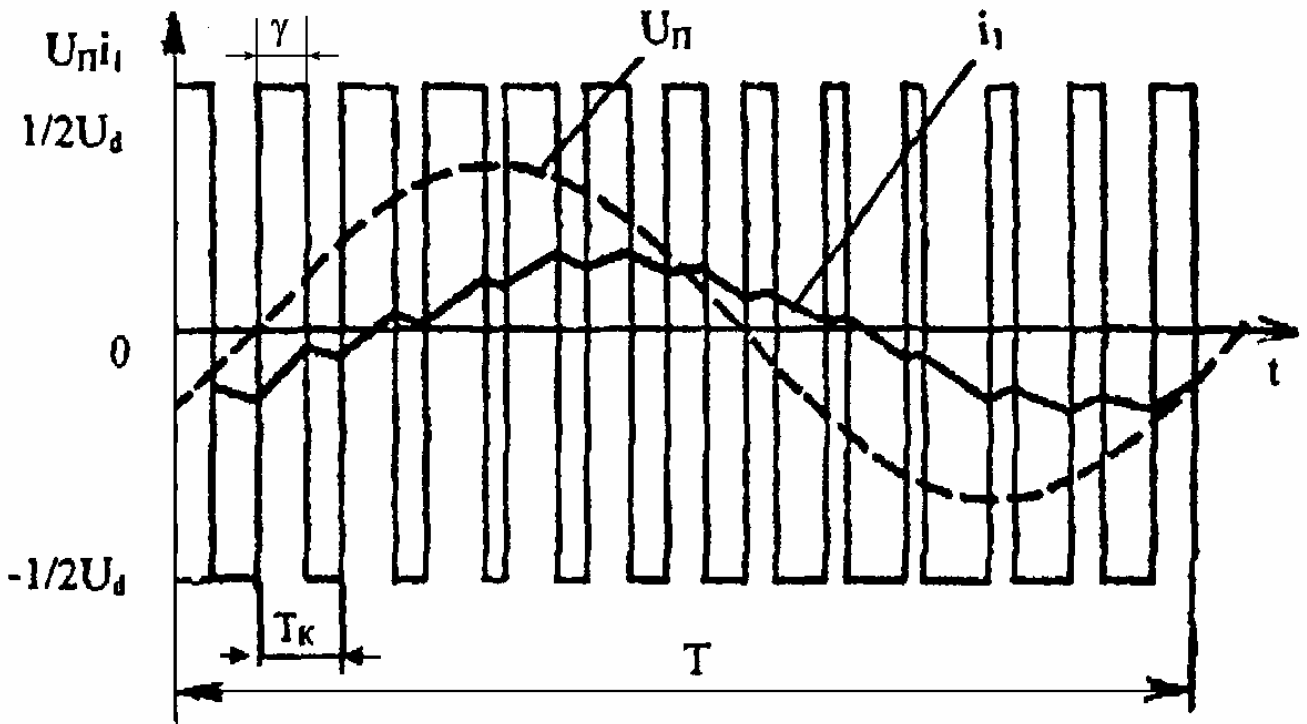


Рис.1.14. Принцип широтно-импульсной модуляции напряжения и тока фазы автономного инвертора напряжения ( $U_{\pi}$ , и  $i_1$  - фазные напряжение и ток статора)

Так как для двухполярной коммутации выходное ПЧ  $U_{\pi} = \frac{U_d}{2}(2\gamma - 1)$ , то, регулируя непрерывно скважность по синусоидальному закону,  $\gamma = \frac{1}{2U_1}(\sin 2\pi f_{1j}t + 1)$  можно получить среднее фазное напряжение, также изменяющееся по синусоиде. Изменяя с помощью системы управления амплитуду  $U_1$  можно регулировать выходное напряжение ПЧ. Для режима рекуперации АД необходим двухкомплектный ПЧ. Для упрощения в инверторе напряжения устанавливается резистор  $R$  (рис.1.13), на котором рассеивается энергия торможения при срабатывании тормозного транзистора VT7.

Подробно с этими и другими типами преобразователей студенты знакомятся при изучении дисциплин СД.01 Теория электропривода, СД.02 Системы управления электроприводов, СД.03 Элементы систем автоматики. В связи с этим рассмотрим кратко принцип работы транзисторного широтно-импульсного преобразователя.

### 1.3. Транзисторные преобразователи

Для управления двигателями постоянного тока используется широтно-импульсный преобразователь. Упрощённая принципиальная схема ШИП представлена на рис.1.15. Она содержит четыре транзисторных ключа ТК1 -ТК4. В диагональ моста, образованного транзисторными ключами, включен двигатель постоянного тока. Питание ШИП осуществляется или от сети постоянного тока или от сети переменного тока через выпрямитель, шунтированный конденсатором.



Существуют следующие способы управления ШИП.

1. Симметричный, при котором одновременно включены все четыре транзисторных ключа. Это наиболее простой способ управления ШИП по цепи якоря. При симметричном способе напряжение на выходе ШИП представляет собой знакопеременные импульсы, длительность которых регулируется входным сигналом. Симметричный способ управления обычно используется в маломощных приводах постоянного тока.

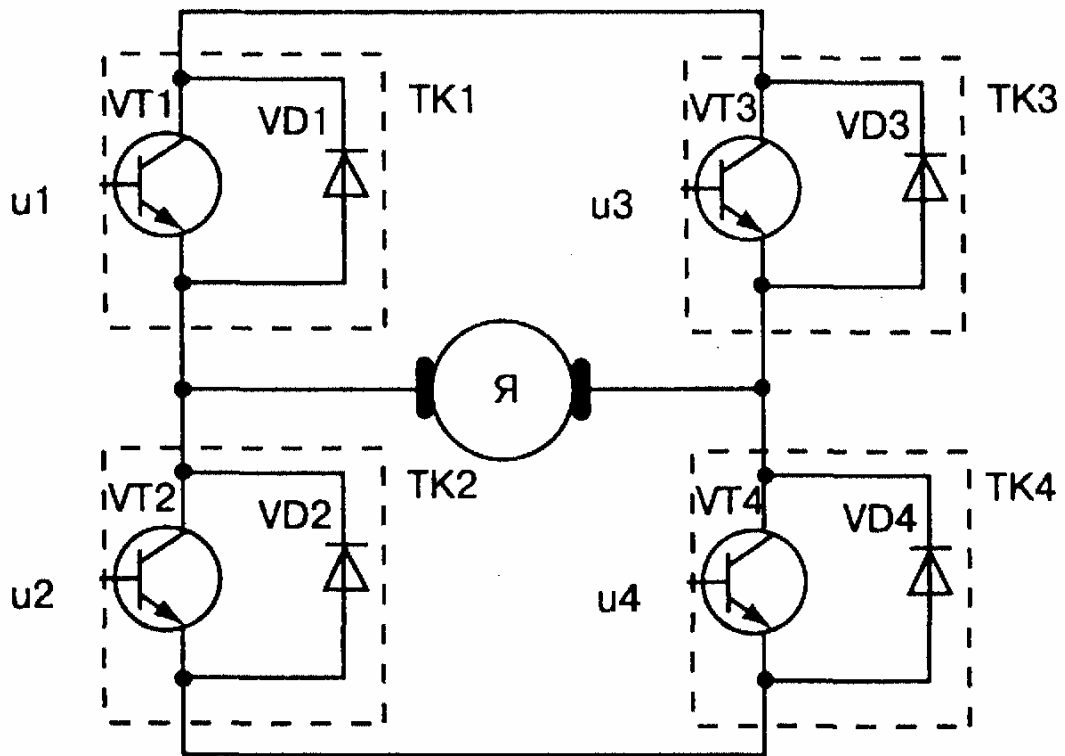


Рис.1.15. Транзисторный ШИП

Его преимуществом является простота реализации и отсутствие зоны нечувствительности в регулировочной характеристике. Недостатком ШИП с симметричным управлением является двухполярное напряжение на нагрузке и, в связи с этим, повышенные пульсации тока в якоре двигателя.

2. Несимметричное управление. В этом случае переключаются транзисторные ключи фазной группы ТК3 и ТК4 (ключи ТК1 и ТК2 при противоположной полярности входного сигнала), транзисторный ключ ТК1 постоянно открыт и насыщен, а ключ ТК2 постоянно закрыт. Транзисторные ключи ТК3 и ТК4 переключаются в противофазе, обеспечивая протекание тока якоря от противо-ЭДС двигателя. При этом на выходе ШИП формируются однополярные импульсы и среднее напряжение на выходе равно нулю, когда относительная продолжительность включения одного из нижних по схеме рис. 1.15 транзисторов  $\gamma_0 = 0$ .

Недостатком рассмотренного способа управления является то, что верхние по схеме транзисторные ключи (ТК1, ТК3) по току нагружены больше, чем нижние.

Этот недостаток устранён при поочерёдном управлении.

3. Поочередное управление. Здесь при любом знаке входного сигнала в состоянии переключения находятся все четыре транзисторных ключа моста, при этом частота переключения каждого из них в два раза меньше частоты напряжения на выходе. Управляющие напряжения транзисторных ключей одной фазы моста ТК1, ТК2 и ТК3, ТК4 постоянно находятся в противофазе; при этом ключи переключаются через период выходного напряжения  $T$ . Этим достигаются одинаковые условия работы полупроводниковых приборов в мостовой схеме.

При некотором знаке входного сигнала управляющие импульсы  $u_1, u_4$  длительностью  $t = (1+\gamma)T$  подаются на диагонально расположенные транзисторные ключи (рис.1.15) со сдвигом на полпериода, а управляющие импульсы  $u_2, u_3$  длительностью  $t = (1-\gamma)T$ , также со сдвигом на полпериода, подаются на транзисторы противоположной диагонали (ТК2, ТК3). В этом случае на интервале нагрузка подключена к источнику питания с помощью диагонально расположенных ключей, а на интервале  $(1-\gamma)T$  нагрузка закорочена с помощью верхних или нижних транзисторных ключей. При изменении знака входного сигнала порядок управления диагональными ключами изменяется на противоположный.

При поочерёдном управлении на нагрузке формируются однополярные импульсы длительностью  $T$ , пропорциональной, как и при симметричном, несимметричном управлении, сигналу на входе.

Обобщенная функциональная схема управления транзисторным ШИП изображена на рис.1.16. Она содержит генератор ( $\Gamma$ ), генератор пилообразного напряжения (ГПН), схему сравнения (СС), распределитель импульсов (РИ) и усилители ( $У$ ). Как правило, между усилителями сигнала управления и распределителем включены элементы гальванической развязки (оптотранзисторы). Диаграммы на рис.1.17 поясняют принцип работы схемы управления ШИП.

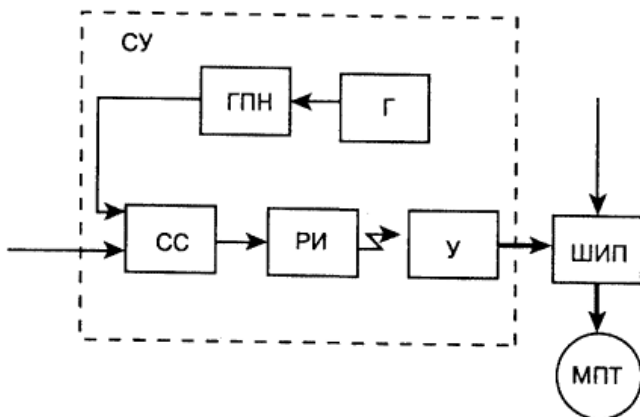


Рис.1.16.

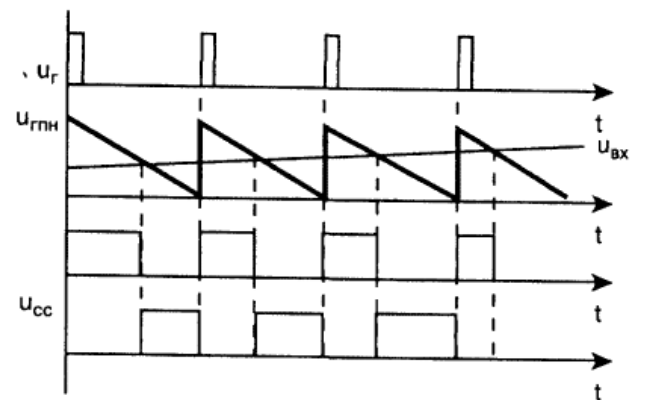


Рис.1.17.

## 2. Автоматическое регулирование в замкнутых электроприводах

### 2.1. Принципы управления в замкнутых электроприводах

Основным достоинством разомкнутых систем регулирования является относительная простота реализации. Основным недостатком является невысокая точность регулирования выходных координат. В разомкнутых системах электропривода под воздействием возмущающих воздействий происходят изменения частоты вращения. Эти изменения, прежде всего, зависят от жесткости механических характеристик. Кроме того, и сами механические характеристики в результате изменения параметров двигателя, например, в результате изменения сопротивления обмоток при нагреве, могут изменять свое положение (рис.2.0). Это обстоятельство обуславливает изменение частоты вращения двигателя даже при постоянстве статического момента нагрузки.

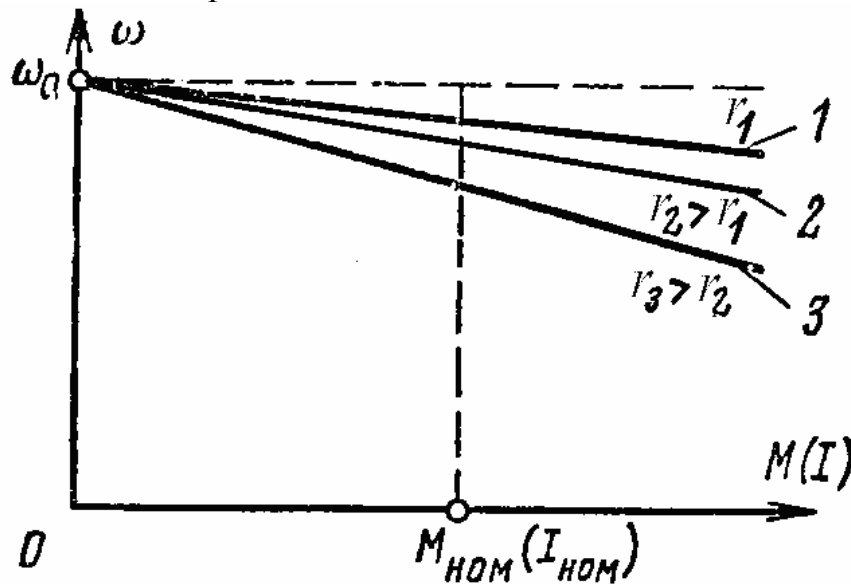


Рис.2.0

Для устранения этого недостатка электроприводов применяются так называемые замкнутые системы (системы ЭП с замкнутой системой управления) [1-5].

В замкнутых системах изменение частоты вращения под действием возмущающих факторов компенсируется за счет изменения механической характеристики двигателя. Рассмотрим это на примере электропривода по системе ТП-Д. Предположим, что двигатель работает на механической характеристике 1 (рис.2.1), которая соответствует определенному сигналу управления  $U_{y1}$  и напряжения ТП  $U_D$ . При статическом моменте нагрузки равен  $M_1$ , то двигатель вращается с частотой  $\omega_1$ . Для того чтобы при приращении  $\Delta M$  статического момента нагрузки уменьшения частоты вращения до значения  $\omega_2$  не произошло, в электроприводе должно автоматически увеличиться задающее воздействие, и стать равным  $U_{y2}$ , при котором механическая характеристика будет иметь вид 2. В этом случае, несмотря на то, что статический момент нагрузки возрос, двигатель будет работать с той же частотой вращения  $\omega_1$ .

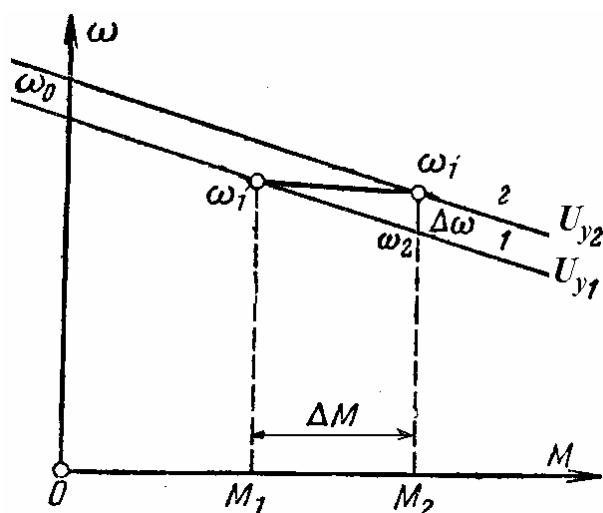


Рис.2.1

**Условием технической реализации замкнутых систем электропривода является наличие так называемых обратных связей.** В замкнутых системах используются не одна, а зачастую несколько обратных связей. Обратные связи подразделяются на жесткие и гибкие. **Жесткие обратные связи** - это такие связи, которые действуют как в установившихся, так и в переходных режимах. **Гибкие** обратные связи действуют только в *переходных* режимах. Например, у гибких обратных связей с использованием дифференцирующих элементов напряжение на выходе узла обратной связи  $U_{oc}$  равно производной от выходной координаты электропривода  $dx/dt$ . В установившихся режимах, выходная координата  $X$  есть величина постоянная, поэтому напряжение на выходе узла гибкой обратной связи  $U_{oc}=dx/dt$  будет равно нулю.

Обратные связи бывают как положительные, так и отрицательные. **Положительные** обратные связи (ПОС) - это такие обратные связи, которые при увеличении выходной координаты  $X$ , еще больше увеличивают ее, так как напряжение на выходе узла обратной связи  $U_{oc}$  суммируется с задающим воздействием  $U_3$ . Например, при гибкой ПОС  $U = U_3 + \kappa \frac{dX}{dt}$ .

**Отрицательные** обратные связи (ООС) - это такие обратные связи, которые при увеличении выходной координаты  $X$ , стремятся ее уменьшить, так как напряжение на выходе узла обратной связи  $U_{oc}$  вычитается из задающего воздействия  $U_3$ . Например, при жесткой ООС  $U = U_3 - \kappa X$ .

Обратные связи могут формировать сигналы (напряжения) пропорциональные значению или пропорциональные производной от значения напряжения, тока, частоты вращения, угла поворота и т.д. В этих случаях они называются жесткими или гибкими, положительными или отрицательными обратными связями соответственно по напряжению, току, частоте вращения, углу поворота и т.д. При этом система привода должна иметь соответствующие датчики (датчики напряжения, тока, частоты вращения...).

Для осуществления автоматического регулирования в замкнутых

электроприводах необходимо измерить сигнал обратной связи, затем результат измерения в виде напряжения сравнить (произвести алгебраическое суммирование) с заданным и направить результат сравнения к регулируемому объекту. Обычно *энергии измерительного органа оказывается недостаточной* для воздействия на регулирующий орган, поэтому возникает *необходимость в применении усилительного устройства*.

## 2.2. Система автоматического регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока с жесткой отрицательной обратной связью по напряжению

Упрощенная схема автоматизированного электропривода с жесткой обратной связью по напряжению представлена на рис.2.2,а [2].

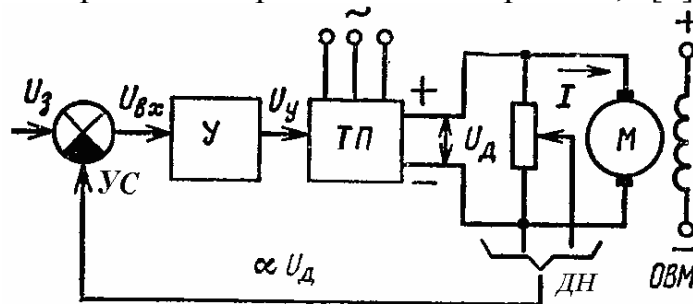


Рис.2.2,а

В соответствии со схемой в состав электропривода входят:

**М**-двигатель постоянного тока независимого возбуждения; **ТП**-**тиристорный преобразователь**, от которого получает питание цепь якоря двигателя; **У** - усилитель; **РМ** - рабочий механизм; **УС**- узел сравнения; **ДН**- датчик напряжения, с которого снимается напряжение обратной связи.

Система уравнений, которая характеризует все элементы электропривода в установившемся режиме его работы, имеет следующий вид:

1.  $U_{BX} = U_3 - \alpha U_{\text{я}}$  - напряжение на выходе узла сравнения, где  $\alpha$  - **коэффициент усиления обратной связи**.

2.  $U_{\text{я}} = E_{\text{ТП}} - IR_{\text{ТП}}$  - напряжение в цепи якоря двигателя, здесь  $E_{\text{ТП}}$  - ЭДС ТП,  $R_{\text{ТП}}$  - внутреннее сопротивление ТП.

3.  $E_{\text{я}} = K\omega$  - противо-ЭДС двигателя.

4.  $E_{\text{ТП}} = K_{\text{У}}K_{\text{ТП}}U_{\text{ВХ}}$  - ЭДС ТП, здесь  $K_{\text{У}}$  - коэффициент усиления усилителя,  $K_{\text{ТП}}$  - коэффициент усиления ТП.

5.  $U_{\text{я}} = E_{\text{я}} + IR_{\text{я}}$  - напряжение в цепи якоря, здесь  $R_{\text{я}}$  - сопротивление цепи якоря.

6.  $M = KI$  - электромагнитный момент двигателя ( $K$  - *машинная постоянная*).

Решая совместно систему состоящую из представленных выше уравнений относительно частоты вращения, можно получить уравнение механической характеристики двигателя, работающего в составе рассматриваемого электропривода.

$$\omega = \frac{K_C U_3}{K(1 + \alpha K_C)} - M \frac{R_{\text{ТП}} + R_{\text{я}}(1 + \alpha K_C)}{K^2(1 + \alpha K_C)}, \quad \text{где } K_C = K_{\text{У}}K_{\text{ТП}}.$$

Поскольку коэффициенты усиления усилителя и ТП являются

постоянными величинами, то можно утверждать, что механическая характеристика двигателя представляет собой прямую линию. Первое слагаемое в правой части уравнения представляет собой частоту вращения идеального холостого хода. Дробь второго слагаемого определяет жесткость механической характеристики.

Проанализируем уравнение механической характеристики двигателя. Предположим, что коэффициент  $K_C \Rightarrow \infty$ , т.е. очень большой. В этом случае дробь при втором слагаемом, определяющая жесткость механической характеристики будет иметь следующий вид

$$\frac{R_{TP} + R_{Я}(1 + \alpha K_C)}{K^2(1 + \alpha K_C)} = \frac{R_{TP}}{K^2(1 + \alpha K_C)} + \frac{R_{Я}}{K^2} = \frac{R_{Я}}{K^2}.$$

Уравнение естественной механической характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения, получающего питание от электрической сети имеет вид:

$$\omega = \frac{U}{K} - M \frac{R_{Я}}{K^2}.$$

Сравнивая жесткость естественной механической характеристики и жесткость механической характеристики двигателя, работающего в рассматриваемом электроприводе, можно заключить, что они одинаковые (характеристика 1 на рис.2.2б). На рис.2.2,б для сравнения даны механические характеристики 2 в разомкнутой системе при  $R_{Я} = R_{д} + R_{TP}$  и характеристики 3, 3' при конечном значении коэффициента  $K_{У}$ . Таким образом, в рассматриваемой системе автоматизированного электропривода введение жесткой отрицательной обратной связи по напряжению не компенсирует уменьшение частоты вращения под действием статического момента нагрузки. Обратная связь по напряжению

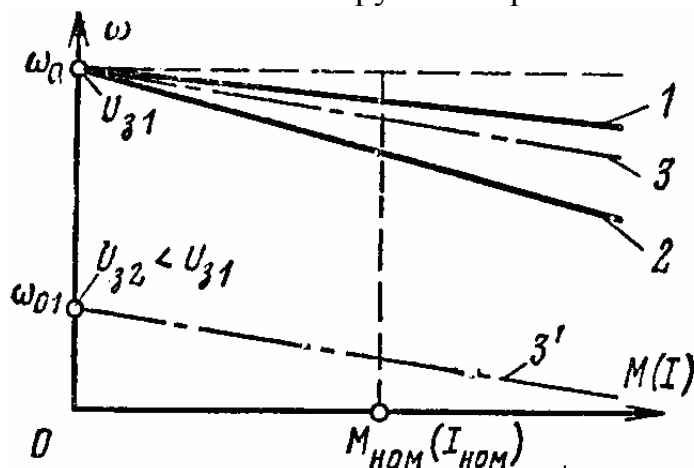


Рис.2.2,б

будет компенсировать изменение частоты вращения при колебаниях напряжения  $U$  в сети, от которой получает питание ТП за счет сигнала управления на выходе усилителя  $U_{У} = (U_{3} - \alpha U_{Я}) K_{У}$ .

### 2.3. Система автоматического регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока с жесткой положительной обратной связью по току якоря

Упрощенная принципиальная схема электропривода с жесткой

положительной связью по току якоря приведена на рис.2.3,а.

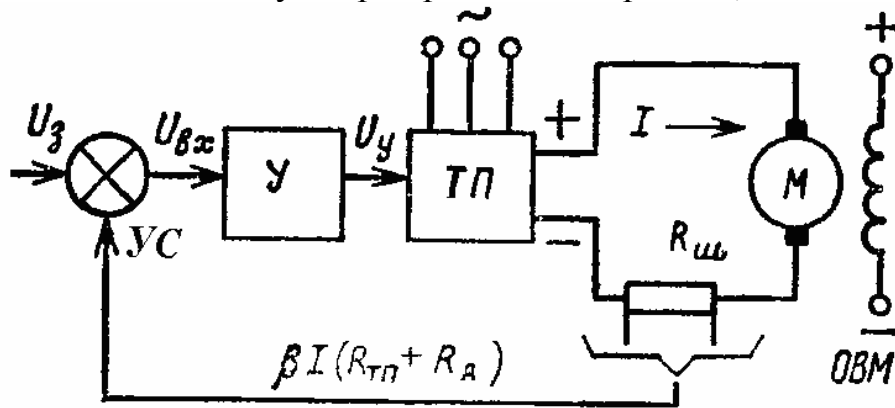


Рис.2.3,а

Отличие этой схемы от схемы, показанной на рис.2.2,а, заключается в том, что в ней используется датчик тока в виде электрического шунта с сопротивлением  $R_{ш}$ . В качестве датчика тока иногда используются дополнительные полюсы двигателя. С шунта снимается напряжение обратной связи, пропорциональное току якоря

$$U_{oc} = IR_{ш}.$$

Если ввести обозначение

$$\beta = R_{ш} / (R_{я} + R_{ТП}),$$

то напряжение обратной связи будет равно

$$U_{oc} = \beta I (R_{я} + R_{ТП}).$$

В этом случае система уравнений, описывающих поведение звеньев электропривода в установившемся режиме его работы, можно записать в следующем виде

1.  $U_{BX} = U_3 + \beta I (R_{я} + R_{ТП})$  - напряжение на выходе УС;  $\beta$  - коэффициент усиления обратной связи  $\beta = R_{ш} / (R_{я} + R_{ТП})$ .

2.  $U_{я} = E_{ТП} - IR_{ТП}$  - напряжение в цепи якоря двигателя, здесь  $E_{ТП}$  - ЭДС ТП,  $R_{ТП}$  - внутреннее сопротивление ТП.

3.  $E_{я} = K\omega$  - противо-ЭДС двигателя.

4.  $E_{ТП} = K_{У} K_{ТП} U_{BX}$  - ЭДС ТП, здесь  $K_{У}$  - коэффициент усиления усилителя;  $K_{ТП}$  - коэффициент усиления ТП.

5.  $U_{я} = E_{я} + IR_{я}$  - напряжение в цепи якоря, здесь  $R_{я}$  - сопротивление цепи якоря.

6.  $M = KI$  - электромагнитный момент двигателя.

Решив эту систему уравнений относительно частоты вращения можно получить, приняв  $K_C = K_{У} K_{ТП}$ , уравнение механической характеристики двигателя, работающего в рассматриваемом электроприводе

$$\omega = \frac{K_C U_3}{K} - M \frac{(R_{я} + R_{ТП})(1 - K_C \beta)}{K^2}.$$

Поскольку коэффициенты усиления усилителя и ТП являются постоянными величинами, то можно утверждать, что механическая

характеристика двигателя представляет собой прямую линию. Первое слагаемое в правой части уравнения представляет собой частоту вращения идеального холостого хода. Дробь второго слагаемого определяет жесткость механической характеристики.

Проанализируем полученное уравнение механической характеристики двигателя. Оказывается, что наклон механической характеристики определяется произведением  $K_c\beta$ , величину которого можно выставить при настройке электропривода. Здесь возможны три случая:

**1. Если  $K_c\beta = 1$ ,** то уравнение механической характеристики будет выглядеть следующим образом

$$\omega = \frac{K_c U_3}{K},$$

то есть механическая характеристика будет абсолютно жесткой (рис.2.3,б, характеристика 3). Если при росте нагрузки коэффициент усиления падает, характеристика становится нелинейной (кривая 3').

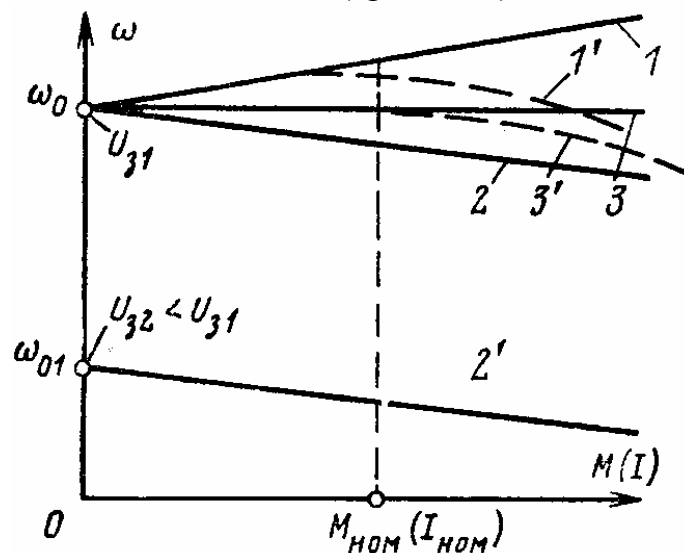


Рис.2.3,б

**2. Если  $K_c\beta > 1$ ,** то в этом случае механическая характеристика будет иметь **затрагивающийся** кверху вид (рис.2.3,б, характеристика 1).

**3. Если  $K_c\beta \leq 1$ ,** то механическая характеристика будет **более мягкой, чем естественная** (характеристика 2).

Анализ трех возможных случаев настройки электропривода показывает, что в системе автоматического регулирования с положительной обратной связью по току якоря компенсация падения частоты вращения из-за изменения статического момента нагрузки достигается в первом случае за счет изменения ЭДС ТП.

#### **2.4. Система автоматического регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока с жесткой отрицательной обратной связью по частоте вращения (ТП-Д)**

Упрощенная принципиальная схема электропривода с жесткой



отрицательной связью по частоте вращения приведена на рис.2.4,а [6]. Отличие этой схемы от схем, показанных на рис.2.2,а и 2.3,а, заключается в том, что в ней **используется датчик частоты вращения в виде тахогенератора GT**. GT представляет собой измерительную электрическую машину М2, у которой генерируемое напряжение пропорционально частоте вращения.

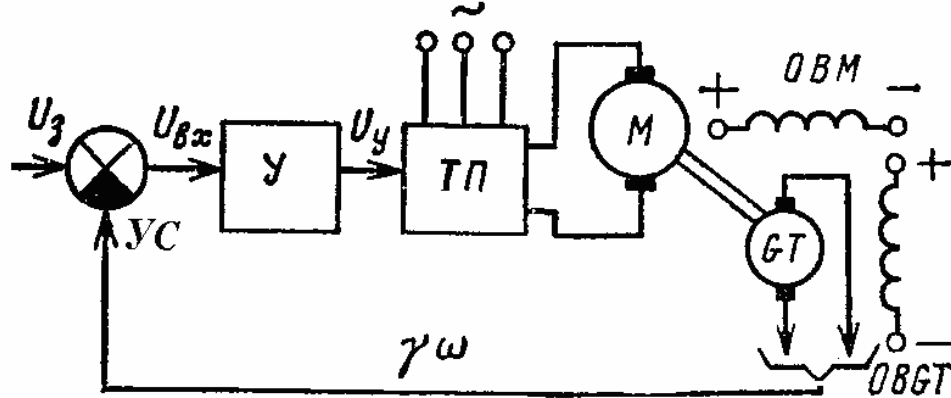


Рис.2.4,а

Принцип действия жесткой обратной связи в такой схеме заключается в следующем. С увеличением статического момента нагрузки, частота вращения двигателя начнет уменьшаться, следовательно, начнет уменьшаться напряжение обратной связи  $U_{oc} = \gamma\omega$ . Так как задающий сигнал при этом остается постоянным, то напряжение на выходе узла сравнения равно  $U_{вх} = U_3 - U_{oc}$  увеличится, **а на выходе усилителя будет**  $U_y = (U_3 - U_{oc})K_y$ . Следовательно, возрастет ЭДС ТП, что автоматически приведет к компенсации падения частоты вращения двигателя.

Составим систему уравнений, описывающих работу всех элементов, входящих в состав электропривода, в установившемся режиме его функционирования.

1.  $U_{вх} = U_3 - \gamma\omega$  - напряжение на выходе узла сравнения, здесь  $\gamma$  - коэффициент пропорциональности тахогенератора.
2.  $U_{я} = E_{ТП} - IR_{ТП}$  - напряжение в цепи якоря двигателя, здесь  $E_{ТП}$  - ЭДС ТП,  $R_{ТП}$  - внутреннее сопротивление ТП.
3.  $E_{я} = K\omega$  - противоЭДС двигателя.
4.  $E_{ТП} = K_y K_{ТП} U_{вх}$  - ЭДС ТП, где  $K_y$  - коэффициент усиления усилителя,  $K_{ТП}$  - коэффициент усиления ТП.
5.  $U_{я} = E_{я} + IR_{я}$  - напряжение в цепи якоря, здесь  $R_{я}$  - сопротивление цепи якоря.
6.  $M = KI$  - электромагнитный момент двигателя.

Решая совместно систему, состоящую из представленных выше уравнений относительно частоты вращения, можно получить уравнение механической характеристики двигателя, работающего в составе рассматриваемого

электропривода:

$$\omega = \frac{\frac{K_c U_3}{K}}{1 + \gamma \frac{K_c}{K}} - M \frac{R_{III} + R_{Я}}{K^2 (1 + \gamma \frac{K_c}{K})}$$

При постоянстве коэффициентов усиления усилителя и ТП ( $K_c = const$ ) механические характеристики будут представлять собой семейство прямых линий. Очевидно, что, как и в предыдущих случаях, первое слагаемое уравнения представляет собой частоту вращения идеального холостого хода. Величина этой частоты вращения определяется уровнем напряжения задания  $U_3$ . Дробь во втором слагаемом определяет жесткость механических характеристик, или другими словами их наклон.

Графические изображения механических характеристик двигателя, работающего в составе системы автоматического регулирования с *жесткой* отрицательной обратной связью по частоте вращения, приведены на рис. 2.4,б.

Характеристики построены для двух случаев.

В первом случае коэффициент *усиления системы стремится к бесконечности*, т.е.  $K_c \Rightarrow \infty$ , а дробь второго слагаемого стремится к нулю. Механические характеристики в этом случае являются *абсолютно жесткими* (характеристика 1 на рис.2.4,б).

Во втором случае коэффициент усиления системы имеет *конечное определенное значение*, т.е.  $K_c \neq \infty$ . При этом дробь второго слагаемого не равна нулю и двигатель имеет *не абсолютно жесткие механические* характеристики (характеристика 2). Причем жесткость этих характеристик будет определяться величиной коэффициента усиления системы. Чем он будет больше, тем меньше будет угол наклона механических характеристик.

И, наконец, на этом же рисунке для сравнения показана естественная механическая характеристика двигателя, работающего в разомкнутой системе (характеристика 3 на рис.2.4,б).

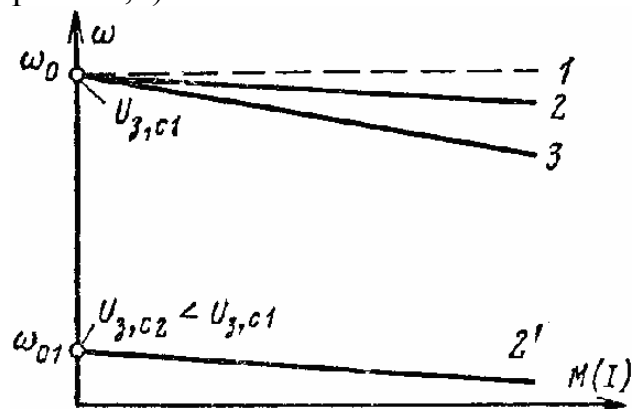


Рис.2.4,б

Говоря о всех трех рассмотренных выше системах автоматического управления, следует отметить следующее. *Увеличение коэффициента усиления системы ограничивается ее чувствительностью к помехам* (и динамической устойчивостью). Это обстоятельство объясняется тем, что при больших коэффициентах усиления и появлении на входе узла сравнения или после него

паразитного сигнала, наведенного, например, по эфиру или по кабельным соединениям, эта наводка приведет к изменению режима работы электропривода. Для устранения этого нежелательного эффекта обычно вводятся гибкие отрицательные связи, которые работают только в динамике, т.е. при изменении выходных координат электропривода. Использование гибких обратных связей делают системы автоматического регулирования более помехоустойчивыми.

### 2.5. Системы автоматического регулирования переменного тока с частотным управлением

В целях увеличения точности регулирования выходных координат электропривода переменного тока, также используются замкнутые системы управления. Как известно наиболее перспективным и широко применяемым способом регулирования частоты вращения асинхронных двигателей является частотный способ. Техническая реализация этого способа связана с применением автономных инверторов напряжения и системы блочных регуляторов. Для реализации жесткой ОС используются П-регуляторы, гибких – Д-регуляторы и И-регуляторы. Наибольшее распространение в замкнутых системах управления приводов переменного тока получили П-регуляторы и ПИ-регуляторы (См. Приложение). Регуляторы в таких системах включают устройства сравнения сигнала задания и сигнала датчика обратной связи и узел, имеющий передаточную функцию, обеспечивающую заданный закон регулирования (технический оптимум, симметричный оптимум и т.д.) [4,5]. Проанализируем основные особенности замкнутых систем частотного регулирования асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, управляемых с помощью автономных инверторов напряжения. Существуют схемы скалярного управления замкнутых электроприводов такого типа:

1. Схема с жесткой отрицательной обратной связью по частоте вращения;
2. Схема с жесткими отрицательными обратными связями по частоте вращения и по магнитному потоку.
3. Схема подчиненного регулирования с отрицательной обратной связью по частоте вращения и внутренним контуром тока.

Схемы подчиненного векторного управления асинхронными двигателями, в которых кроме канала управления скоростью (моментом) имеется канал управления магнитным потоком, как в системах подчиненного регулирования ЭП постоянного тока описаны в [3,4]. В этих системах осуществляется преобразование координат к вращающейся системе магнитного потока.

Схема электропривода первого типа приведена на рис.2.5. В этой схеме используется статический преобразователь частоты (ПЧ). **В состав ПЧ входят: 1. Электрический фильтр (Ф). 2. Выпрямитель (УВ). 3. Система управления (СУИ и СУВ). 4. Автономный инвертор напряжения (АИН).**

На выходе ПЧ изменяются как частота  $f$ , так и величина действующего значения напряжения  $U$ . Изменение этих параметров осуществляется по двум каналам с помощью регулятора частоты РЧ, системы управления выпрямителем (СУВ) и системы управления инвертором СУИ. Частота вращения регулируется по сигналу ошибки на выходе РЧ. **Связь между каналами (регуляторами) частоты и напряжения осуществляется с помощью функционального преобразователя ФП**, который обеспечивает требуемое соотношение между частотой и напряжением, например,  $U/f = \text{const}$ .

В схеме рис.2.5,а по ошибке скорости РЧ регулирует (с помощью СУВ) напряжение АД (см.[8, рис.32]), в схеме рис.2.5,б по ошибке скорости – частоту инвертора АИН (см. [8, рис.35], [2]).

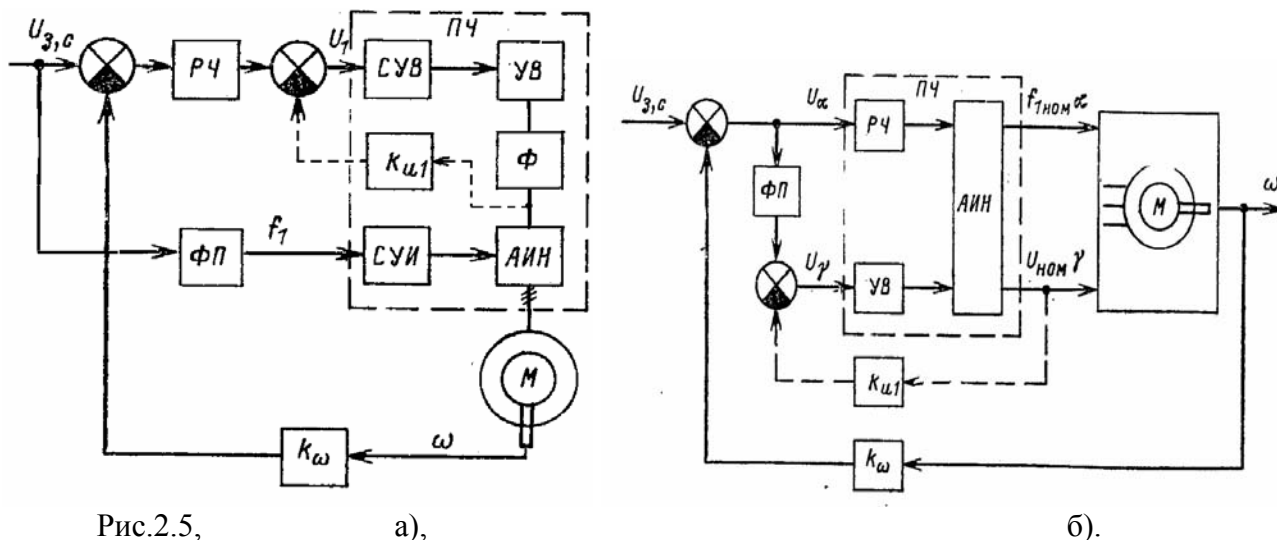


Рис.2.5, а),

б).

Семейство механических характеристик электропривода, выполненного по рассматриваемой схеме рис.2.5а, показано на рис.2.6,б. Жесткость механических характеристик определяется коэффициентами усиления статического преобразователя ПЧ и регулятора РЧ. Для рис.2.5,б характеристики - на рис.2.6,а.

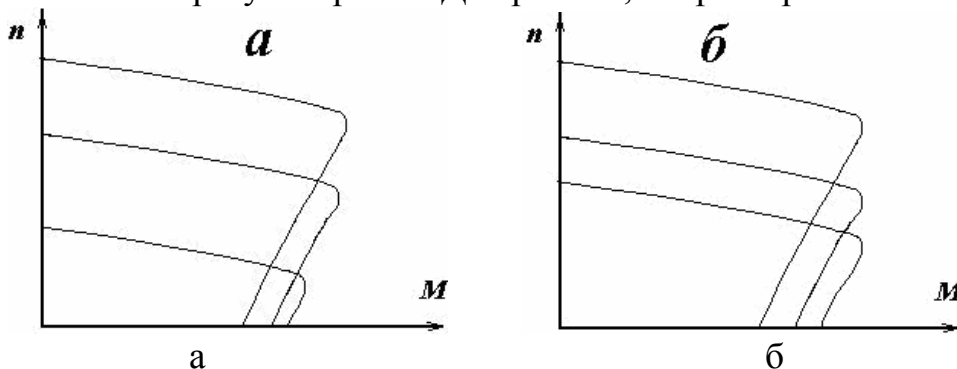


Рис.2.6

Коэффициент передачи регулятора частоты вращения  $K_{РЧ}$  канала регулирования напряжения на выходе преобразователя может быть вычислен по формуле для определения статической точности. Для выполнения расчета необходимо определить коэффициенты передачи (пример расчета):

Коэффициент передачи ПЧ:

$$K_{пч} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{упр}}} = \frac{380}{10} = 38; \quad (1)$$

Коэффициент передачи устройства изменения скорости (частоты вращения):

$$K_{\text{унс}} = \frac{\Delta U_{\text{унс}}}{\Delta n} = \frac{12}{102} = 0,11 \text{ В} \cdot \text{с}; \quad (2)$$

Коэффициент АД:

$$K_{\text{дв}} = \frac{\Delta n}{\Delta U_{\text{вых}}} = \frac{102}{380} = 0,27 / \text{Вс}$$

Требуемый коэффициент усиления разомкнутой системы регулирования напряжения ПЧ  $K_{\text{тр}}$ :

$$K_{тр} = K_{рч} \cdot K_{уис} \cdot K_{пч} \cdot K_{дв} = \frac{\delta n_p \cdot D}{\delta n} - 1; \quad (3)$$

где  $\delta n_p$  – статическая ошибка разомкнутой системы регулирования привода в %, при заданных изменениях момента нагрузки двигателя и напряжения питания преобразователя при фиксированной частоте статора  $f_c$ ;

$\delta n$  – статическая точность выраженная в % требуемая при регулировании скорости в диапазоне  $D=10$  (10:1).

Уровень снижения скорости АД в разомкнутой системе регулирования определяется критическим скольжением ( $\delta n_p = 10\%$ ).

Статическая ошибка в нашем примере составляет  $\Delta n = 5\%$ . При принятых значениях коэффициентов коэффициент передачи регулятора канала регулирования напряжения из условия заданной статической точности согласно (3) равен

$$K_{рч} = [(\delta n_p \cdot D / \delta n) - 1] / (K_{уис} \cdot K_{пч} \cdot K_{дв}) = ((10 \cdot 10 / 5) - 1) / (0,11 \cdot 38 \cdot 0,268) = 16,9.$$

Требуемый коэффициент передачи канала управления напряжением ПЧ согласно (3) составит 18,9.

**Недостатком электропривода, выполненного по схеме 2.5, б с жесткой отрицательной связью по частоте вращения, является снижение критического момента и уменьшение перегрузочной способности двигателя при низких частотах вращения (Рис.2.6,б) [2].**

Для устранения указанного недостатка применяется схема автоматического регулирования с жесткими отрицательными обратными связями по частоте вращения и магнитному потоку (рис.2.7).

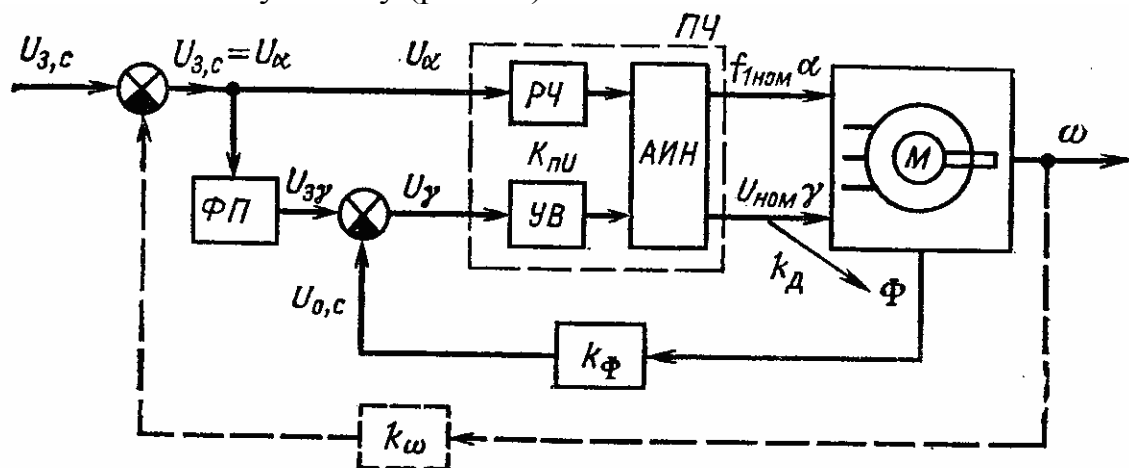


Рис.2.7.

В этой схеме осуществляется стабилизация магнитного потока двигателя посредством отрицательной обратной связи по потоку. Если в электроприводе оставить только эту обратную связь, то механические характеристики двигателя будут обеспечивать постоянство критического момента и будут иметь жесткость, соответствующую естественной характеристике (см. рис.2.6,б). Введение обратной связи по частоте вращения увеличивает жесткость механических характеристик, которые будут иметь вид, показанный на рис.2.8.

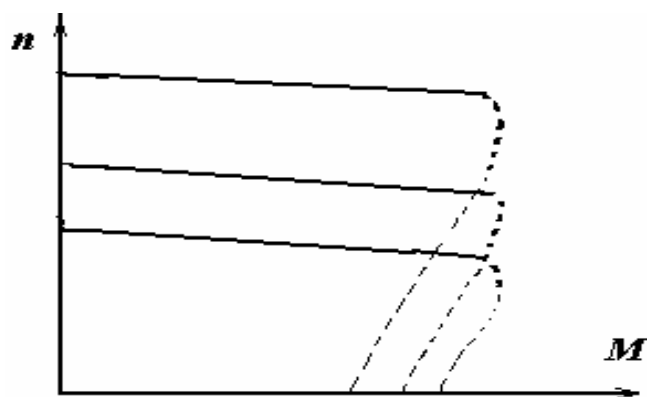


Рис.2.8.

## 2.6. Электроприводы по системе «тиристорный коммутатор – синхронный двигатель»

В качестве вентильных двигателей средней и большой мощности обычно используют синхронные двигатели обычной конструкции с электромагнитным возбуждением. Поскольку двигатели большой мощности имеют напряжение статора 6 или 10 кВ, то в качестве вентильного коммутатора используется тиристорный преобразователь, состоящий из управляемого выпрямителя  $UZ1$  (рис.2.9) и инвертора  $UZ2$ . Инвертор выполняет функции коммутатора, переключение которого осуществляется от датчика положения ротора  $DR$ . Поскольку тиристоры являются полууправляемыми приборами, инвертор работает как зависимый, коммутируемый за счет ЭДС двигателя, которая наводится в обмотках статора вращающимся электромагнитным полем ротора. Для обеспечения устойчивой коммутации вентилей инвертора предусматривается опережение угла их открывания на угол  $\beta < 15^\circ$ , что ведет к некоторому уменьшению момента вентильного двигателя  $M = M\Phi_0 I_1 \sin(\theta - \beta)$ . Возбуждение двигателя осуществляется возбудителем  $UZ_L$ .

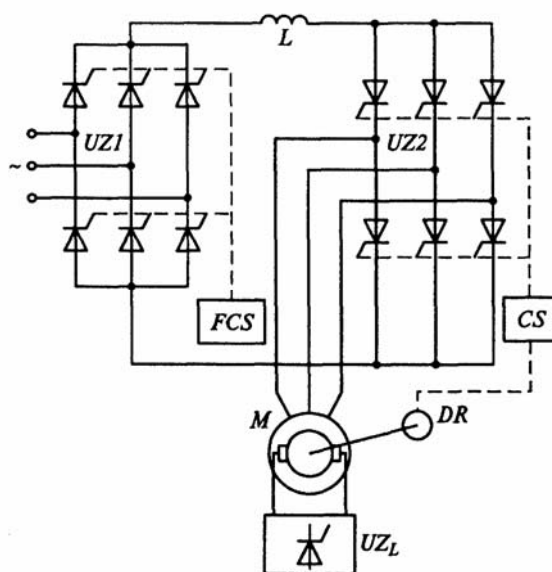


Рис.2.9. Схема двигателя с тиристорным коммутатором:  $UZ1$  — управляемый выпрямитель;  $UZ2$  — инвертор;  $UZ_L$  — выпрямитель питания обмотки возбуждения;  $FCS$  — устройство управления выпрямителем;  $ZS$  — устройство управления инвертором;  $L$  — дроссель

Благодаря включению в цепь постоянного тока дросселя  $L$  со значительной индуктивностью преобразователь  $UZ1...UZ2$  работает как источник тока, значение которого регулируется путем импульсно-фазового регулирования выходного напряжения выпрямителя  $UZ1$ :

$$I_1 = \frac{k_e U_d \cos \alpha - k \Phi_o \omega}{R_{эКВ}}$$

где  $U_d$  — напряжение питания выпрямителя;  $\Phi_o$  — поток ротора, создаваемый обмоткой возбуждения;  $R_{эКВ}$  — эквивалентное сопротивление цепи обмоток статора.

Изменяя значение тока, можно изменять момент, развиваемый двигателем. Регулирование скорости в приводах рассматриваемого типа обычно выполняется введением внешнего контура регулирования скорости (рис.2.10). При этом механические характеристики вентильного двигателя (рис.2.11) будут подобны характеристикам системы ТП—Д.

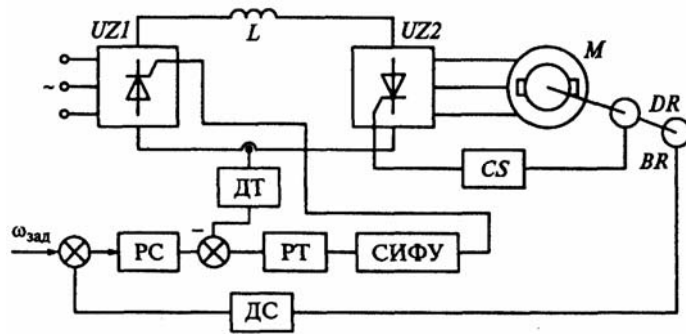


Рис. 2.10. Функциональная схема регулируемого электропривода с вентильным двигателем:

РС — регулятор скорости; РТ — регулятор тока; ДС — датчик скорости; ДТ — датчик тока; DR. — датчик положения ротора; BR — тахогенератор

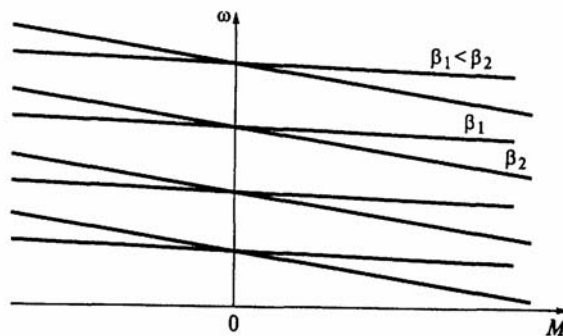


Рис. 2.11. Механические характеристики вентильного двигателя

При увеличении угла опережения открывания ( $\beta_2 > \beta_1$ ) жесткость механических характеристик уменьшается.

Поскольку в данной схеме входной выпрямитель выполнен управляемым, то возможен режим рекуперативного торможения, когда ЭДС двигателя  $k\Phi_o \omega > k_e U_d \cos \alpha \cos \beta$ .

Недостаток рассматриваемой схемы — усложнение коммутации тиристорov инвертора при малых скоростях (ниже  $0,1\omega_n$ ), так как при этом ЭДС двигателя становится недостаточной для естественной коммутации вентиляей

зависимого инвертора. В этом случае при пуске двигателя до достижения скорости  $0,1\omega_n$  для обеспечения запираания вентиля инвертора приходится прерывать ток, запирая тиристоры выпрямителя, что усложняет схему его управления.

В последние годы с появлением *IGBT*-транзисторов и запираемых тиристоров стали применять схемы с принудительной коммутацией вентиля инвертора, что повышает регулировочные свойства вентиляльного двигателя и дает возможность его использования для динамичных электроприводов с широким диапазоном регулирования скорости.

## СОДЕРЖАНИЕ

### Часть II

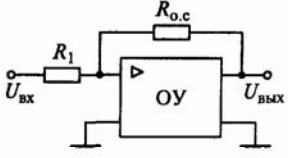
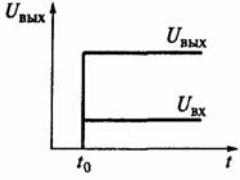
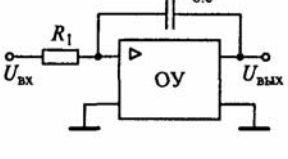
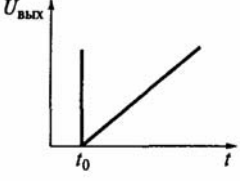
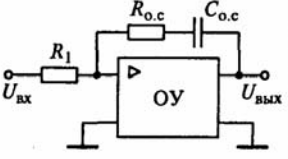
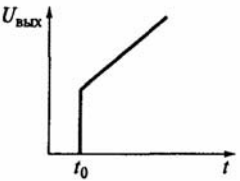
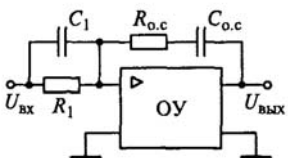
1. Электроприводы с замкнутой системой управления.....	40
1.1. Структурная схема регулируемого электропривода.....	40
1.2. Электрическая часть силового канала электропривода. Управляемые тиристорные преобразователи (ТП) .....	41
1.3. Транзисторные преобразователи.....	46
2. Автоматическое регулирование частоты вращения в замкнутых электроприводах.....	49
2.1. Принципы управления в замкнутых электроприводах.....	49
2.2. Система автоматического регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока с жесткой отрицательной обратной связью по напряжению.....	51
2.3. Система автоматического регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока с жесткой положительной обратной связью по току.....	52
2.4. Система автоматического регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока с жесткой отрицательной обратной связью по частоте вращения.....	54
2.5. Системы автоматического регулирования приводов переменного тока с частотным управлением.....	57
2.6. Электроприводы по системе «тиристорный коммутатор - синхронный двигатель».....	60
Рекомендуемая литература.....	62
Приложение.....	63

### Рекомендуемая литература

1. *Онищенко Г.Б.* Электрический привод. М.: АКАДЕМИЯ, 2006.
2. *Чиликин М.Г., Сандлер А.С.* Общий курс электропривода. М.: Энергоиздат, 1991.
3. *Алексеев В.В., Козярук А.Е., Загривный Э.А.* Электрические машины. Моделирование электрических машин приводов горного оборудования: Учебное пособие. СПГГИ (ТУ), 2006.
4. *Алексеев В.В., Козярук А.Е., Алексеев П.В.* Электрический привод. Учебное пособие к практическим занятиям. СПГГИ. СПб, 2009.
5. *Бацежев Ю.Г., Костюк В.С.* Электропривод и электроснабжение. М. Недра, 1990.
6. Электрический привод: Программа и методические указания с расчетными заданиями/СПГГИ (ТУ). Сост, *Алексеев В.В и др.*, СПб, 2006.
7. *Амбарцумян Н.А., Павлов Ю.П.* Силовые преобразователи. Учебное пособие. ЛГИ.1989
8. Алексеев В.В. Электрический привод. Краткий конспект лекций. Часть 1.



## Приложение. Регуляторы САР

Тип регулятора	Схема	Передаточная функция	Параметры регулятора	Переходная функция
П		$W(p) = k$	$k = \frac{R_{o.c.}}{R_1}$	
И		$W(p) = \frac{1}{Tp}$	$T = R_1 C_{o.c.}$	
ПИ		$W(p) = k + \frac{1}{Tp}$	$k = \frac{R_{o.c.}}{R_1};$ $T = R_{o.c.} C_{o.c.}$	
ПИД		$W(p) = k + T_1 p + \frac{1}{T_2 p}$	$k = \frac{R_{o.c.}}{R_1};$ $T_1 = R_1 C_1;$ $T_2 = R_{o.c.} C_{o.c.}$	