

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

Харьковская национальная академия городского хозяйства

В.П. Андрейченко

В.Н. Фатеев

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине

«ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ»

*(для студентов 4 курса всех форм обучения направления подготовки
6.050702(0922) «Электромеханика» по специальности
«Электромеханические системы автоматизации и электропривод»)*

Харьков ХНАГХ 2009

Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Проектирование электромеханических устройств и систем» (для студентов 4 курса всех форм обучения направления підготовки 6.050702 (0922) «Электромеханика» по специальности – «Электромеханические системы автоматизации и электропривод»). Состав.: Андрейченко В.П., Фатеев В.Н., Харьк. нац. акад. город. хоз-ва – Х.: ХНАГХ, 2009. – 35 с.

Составители: В.П. Андрейченко, В.Н. Фатеев

Рецензент: доц., к.т.н. Н.И. Шпика

Рекомендовано кафедрой электрического транспорта,
протокол № 2 от 09.09.2009 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Цель работы	4
Общие методические указания	4
Лабораторная работа № 1	
Исследование системы П-Д с обратной связью по напряжению преобразователя	15
Лабораторная работа № 2	
Исследование системы П-Д с обратной связью по скорости.....	22
Список литературы	35

1. Цель работы

Исследование электромеханических характеристик двигателя постоянного тока с независимым возбуждением в системе «управляемый преобразователь - двигатель» (П-Д).

2. Общие методические указания

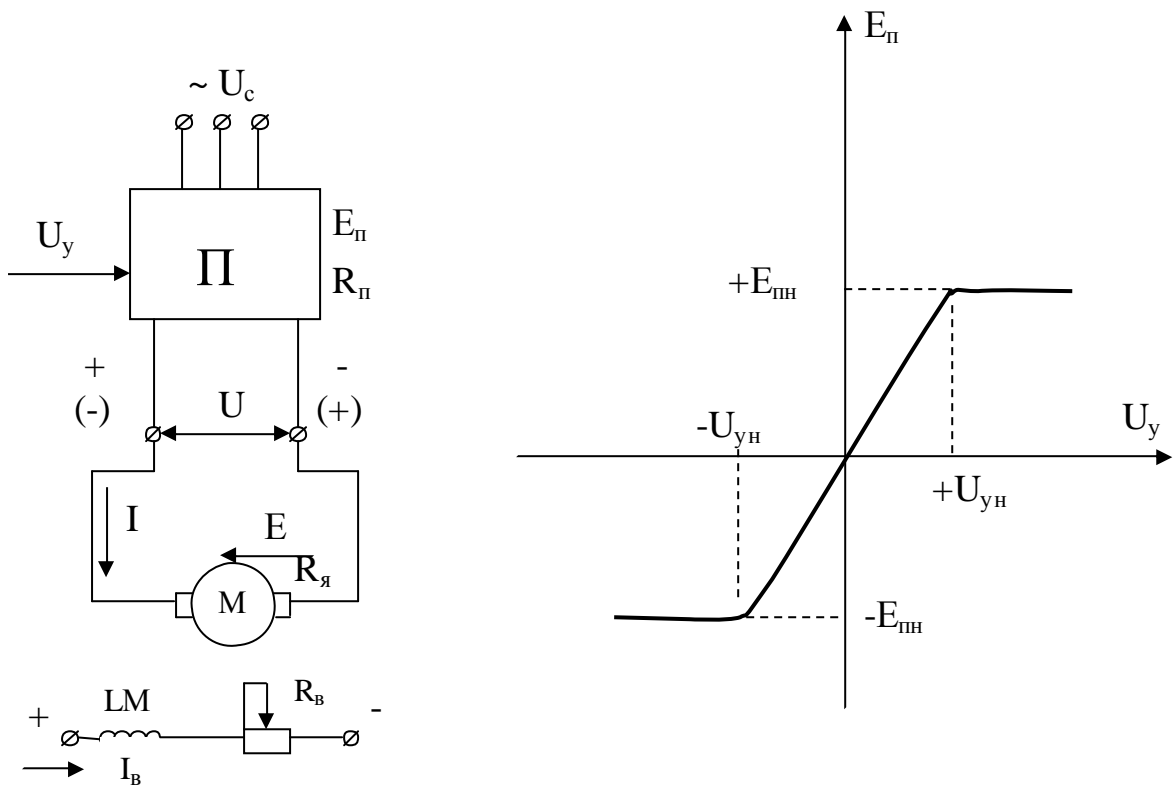
Схема включения двигателя в системе П-Д приведена на рис. 1а. Якорь двигателя М питается от управляемого преобразователя П, в качестве которого могут использоваться электромашинные, электромагнитные или полупроводниковые устройства. Независимо от принципа действия любое из названных устройств осуществляет преобразование напряжения переменного тока U_c в напряжение постоянного тока U (выпрямление), обеспечивает возможность регулирования величины и полярности выпрямленного напряжения. Статическая характеристика реверсивного преобразователя приведена на рис. 1б. При изменении управляющего сигнала от значения $+U_{yn}$ до $-U_{yn}$ ЭДС преобразователя E_n изменяется от $+E_{nn}$ до $-E_{nn}$. Расположение точки номинального режима на статической характеристике таково, что при $U_y > U_{yn}$ ЭДС преобразователя может на 30÷40% превышать номинальное значение.

Обмотка возбуждения двигателя LM питается от отдельного источника. Величина тока в ней I_e регулируется с помощью резистора R_e .

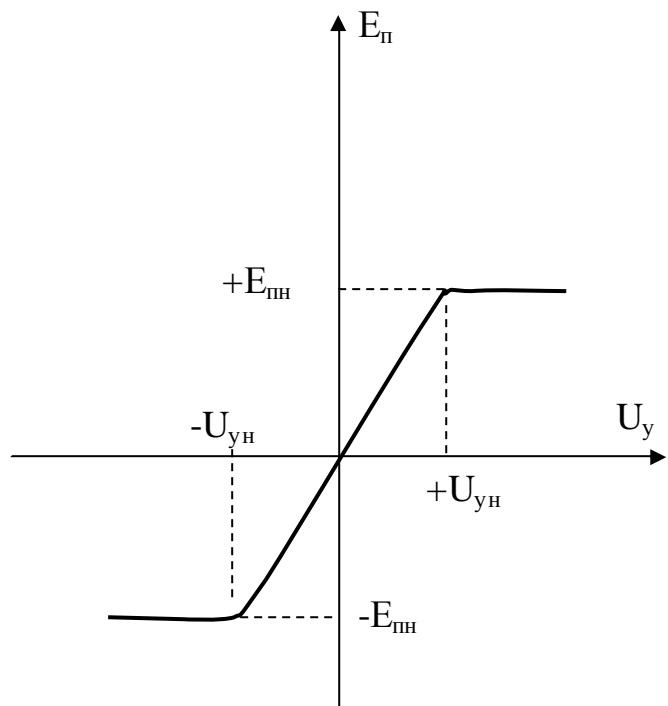
Схема замещения для якорной цепи системы П-Д приведена на рис. 1в. Кроме упоминавшихся ранее элементов, на ней обозначены индуктивности преобразователя L_n и двигателя $L_{я}$, активные сопротивление якоря $R_{я}$ и преобразователя R_n , ЭДС вращения E , наводимая в обмотке якоря М.

Уравнение равновесия ЭДС для установившегося режима в якорной цепи двигателя ($dI_{я}/dt=0$) будет иметь вид:

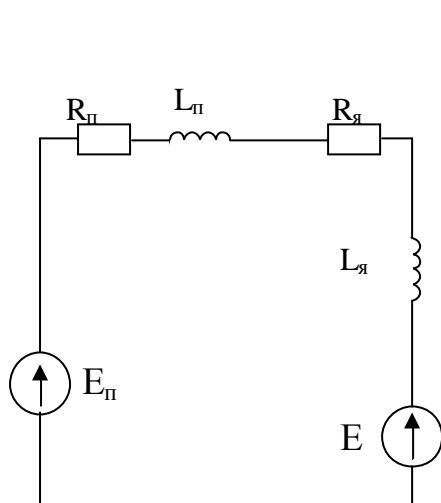
$$E_n = I_{я}R_{я} + I_{я}R_n + E.$$



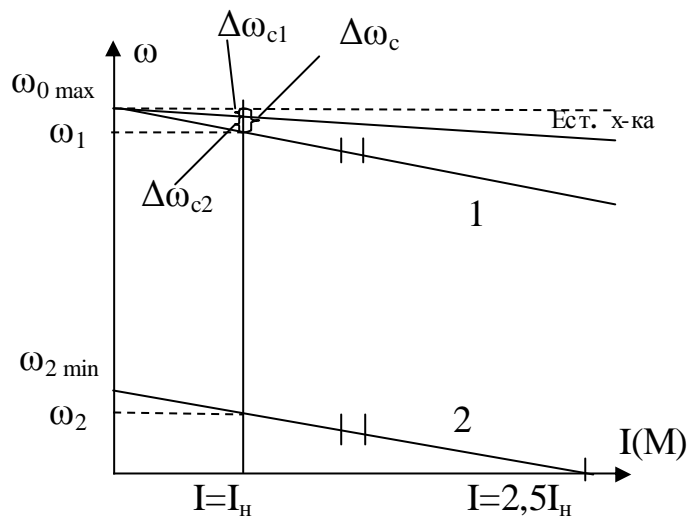
а)



б)



в)



г)

Рис. 1: а) схема включения двигателя;
 б) статическая характеристика преобразователя;
 в) схема замещения;
 г) характеристики двигателя

Величина ЭДС вращения определяется как

$$E = k\Phi\omega,$$

где k – конструктивный коэффициент; Φ – магнитный поток; ω – скорость вращения двигателя.

Подставив в уравнение равновесия ЭДС выражение для E и решив его относительно ω , получим уравнение электромеханической характеристики двигателя $\omega = f(I_a)$:

$$\omega = \frac{E_n}{k\Phi} - \frac{I_a R_a}{k\Phi} - \frac{I_a R_n}{k\Phi} = \omega_0 - \Delta\omega_{c1} - \Delta\omega_{c2},$$

где ω_0 – скорость идеального холостого хода; $\Delta\omega_{c1}$, $\Delta\omega_{c2}$ – составляющие статического падения скорости $\Delta\omega_c$.

$$\Delta\omega_c = \Delta\omega_{c1} + \Delta\omega_{c2}.$$

Из уравнения следует, что электромеханическая характеристика двигателя в системе П-Д – прямая линия. На рис. 1г она построена в первом квадранте и обозначена цифрой 1.

Так как вращающий момент M двигателя прямопропорционально зависит от тока якоря $M = k\Phi I_a$, то механическая характеристика двигателя $\omega = f(M)$ будет иметь такой же вид и отличаться от электромеханической только масштабом по оси абсцисс.

Наклон характеристики 1 к оси абсцисс больше, чем у приведенной там же естественной характеристики, так как из-за падения напряжения от якорного тока на внутреннем активном сопротивлении преобразователя при одном и том же токе якоря (моменте сопротивления) к статическому падению скорости на естественной характеристике $\Delta\omega_{c1} = I_a R_a / k\Phi$ добавляется составляющая $\Delta\omega_{c2} = I_a R_n / k\Phi$.

При изменении управляющего сигнала U_y изменяется величина E_n , что в свою очередь ведет к изменению скорости идеального холостого хода ω_0 . Обе составляющие статического падения скорости от величины E_n не зависят и поэтому при изменении E_n остаются постоянными. Следовательно, при изменении управляющего сигнала от U_{yn} до нуля искусственные

характеристики двигателя получаются параллельным переносом вниз прямой 1. Тем самым обеспечивается плавное регулирование скорости двигателя вниз от основной.

Диапазон регулирования скорости D в данном случае ограничен и не может превышать величины $D=(8\div 10):1$. Это связано, во-первых, с необходимостью сохранять перегрузочную способность двигателя. Для двигателей постоянного тока с независимым возбуждением коэффициент перегрузки по току якоря (моменту) κ_n , определяемый как отношение допустимого тока $I_{я\ доп}$ к номинальному току якоря $I_{я\ н}$ $\kappa_n = I_{я\ доп} / I_{я\ н} \leq 2,5$. Следовательно, характеристика 2 на рис.1г, получаемая при параллельном переносе характеристики 1, является последней, на которой сохраняется перегрузочная способность двигателя, а диапазон регулирования скорости, определяемый обычно при $I_{я\ н}$, находится как $D = \omega_1 / \omega_2$.

Расширен диапазон регулирования скорости может быть только лишь за счет уменьшения наклона характеристик 1, 2, т.е. за счет уменьшения статического падения скорости $\Delta\omega_c$.

Второй причиной, ограничивающей диапазон регулирования скорости, является необходимость обеспечения заданной точности регулирования. Точность регулирования скорости количественно оценивается статизмом механических характеристик двигателя S_x , который показывает на сколько процентов от скорости идеального холостого хода ω_0 уменьшится скорость двигателя ω при увеличении нагрузки на двигатель от момента сопротивления холостого хода до номинального. Величина статизма определяется как

$$S_x = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \cdot 100\% ,$$

где $\omega_0 - \omega = \Delta\omega_c$ – статическое падение скорости.

При рассматриваемом способе регулирования с уменьшением скорости двигателя величина $\Delta\omega_c$ остается постоянной, поэтому статизм увеличивается, а точность регулирования ухудшается. Наибольшей величина статизма будет для

характеристики 2. До требуемого значения она может быть уменьшена только лишь за счет уменьшения $\Delta\omega_c$.

Уменьшение $\Delta\omega_c$ достигается посредством применения системы П-Д, построенной по замкнутому принципу. В зависимости от требований к диапазону и точности регулирования применяются различные обратные связи. Если эти требования не очень жесткие, то возможно применение отрицательной обратной связи по напряжению преобразователя. Схема включения двигателя в такой системе приведена на рис.2а. Ее основу составляет разомкнутая система П-Д. Требуемая скорость вращения M определяется величиной сигнала задания U_{zc} . Выпрямленное напряжение преобразователя U контролируется датчиком напряжения ДН. Из-за наличия внутреннего активного сопротивления преобразователя R_n выпрямленное напряжение зависит от тока в якорной цепи M . В установившемся режиме $U = E_n - I_a R_n$. Выходной сигнал ДН $U_{oc} = \alpha U$ является сигналом обратной связи по напряжению. Здесь α – коэффициент передачи датчика напряжения.

В суммирующем устройстве сигнал обратной связи вычисляется из задающего сигнала U_{zc} и их разность в виде сигнала ошибки $U_{ex} = U_{zc} - U_{oc}$ подается на вход регулятора напряжения РН, который с коэффициентом $K_{рн}$ усиливает сигнал ошибки и подает его в виде сигнала управления $U_y = K_{рн} U_{ex}$ на вход преобразователя П.

При увеличении момента сопротивления M_c на валу двигателя уменьшается его скорость ω и поэтому увеличивается ток в якорной цепи I_a . За счет увеличения падения напряжения на активном сопротивлении преобразователя $I_a R_n$ снижается напряжение на якоре M и уменьшается сигнал обратной связи U_{oc} . Это вызывает увеличение сигнала ошибки U_{ex} и сигнала управления U_y , что в свою очередь приведет к росту ЭДС преобразователя E_n и напряжения на якоре двигателя. Тем самым компенсируется составляющая статического падения скорости $\Delta\omega_2$, определяемая величиной $I_a R_n$. Поэтому прямая 2 на рис. 2б, отображающая характеристику двигателя в замкнутой системе, будет расположена выше прямой 1, отображающей характеристику

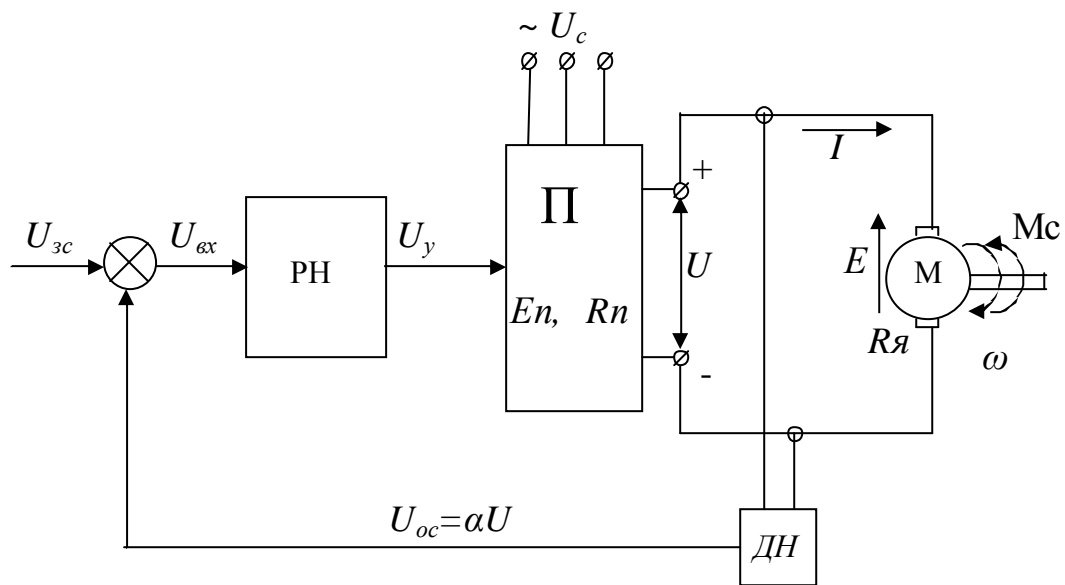
двигателя в разомкнутой системе П-Д. Рассматриваемая система регулирования напряжения является статической, так как величина $I_{я}R_n$ увеличением E_n компенсирует не полностью. Полная компенсация падения напряжения на активном сопротивлении преобразователя может быть достигнута в астатической системе регулирования напряжения. В этом случае можно предположить, что двигатель питается от преобразователя с нулевым внутренним сопротивлением. При $U=U_n$ двигателя он будет работать на естественной характеристике. Статическое падение скорости при работе двигателя на других характеристиках будет таким же, как и на естественной.

Прямой 3 на рис. 2б изображена характеристика двигателя в статической системе при сигнале задания $U_{zc2} < U_{zc1}$.

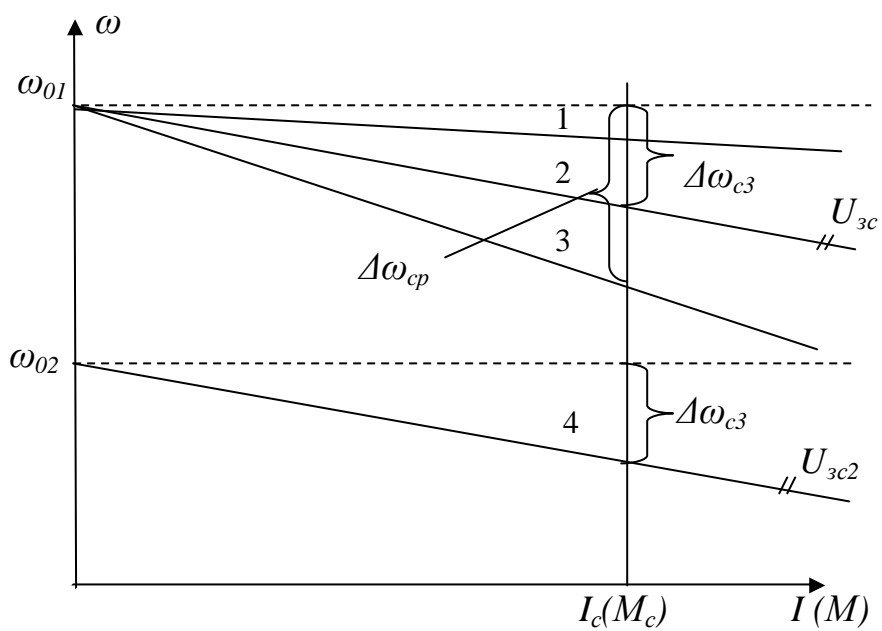
Дальнейшее расширение диапазона и точности регулирования скорости связано с компенсацией составляющей $\Delta\omega_{c1}$ статического падения скорости. В этом случае применяется система П-Д с главной обратной связью, т.е. с обратной связью по регулируемой величине скорости двигателя. Схема включения двигателя в такой системе приведена на рис. 3а.

Требуемая скорость вращения определяется величиной сигнала задания U_{zc} . Скорость двигателя ω контролируется тахогенератором BR. Выходной сигнал тахогенератора $U_{oc} = \beta_c \omega$ является сигналом обратной связи по скорости. Здесь β_c – коэффициент передачи тахогенератора. В суммирующем устройстве сигнал обратной связи вычитается из задающего сигнала и их разность в виде сигнала ошибки $U_{ex} = \kappa_{zc} U_{oc}$ подается на вход регулятора скорости РС, который с коэффициентом κ_{pc} усиливает сигнал ошибки и подает его в виде сигнала управления $U_y = \kappa_{pc} U_{ex}$ на вход преобразователя П.

При увеличении момента сопротивления скорость двигателя и тахогенератора уменьшается. Уменьшается сигнал обратной связи U_{oc} . Это вызывает увеличение сигнала ошибки U_{ex} и сигнала управления U_y , что в свою очередь ведет к росту E_n и напряжения на якоре двигателя. Тем самым



а)



б)

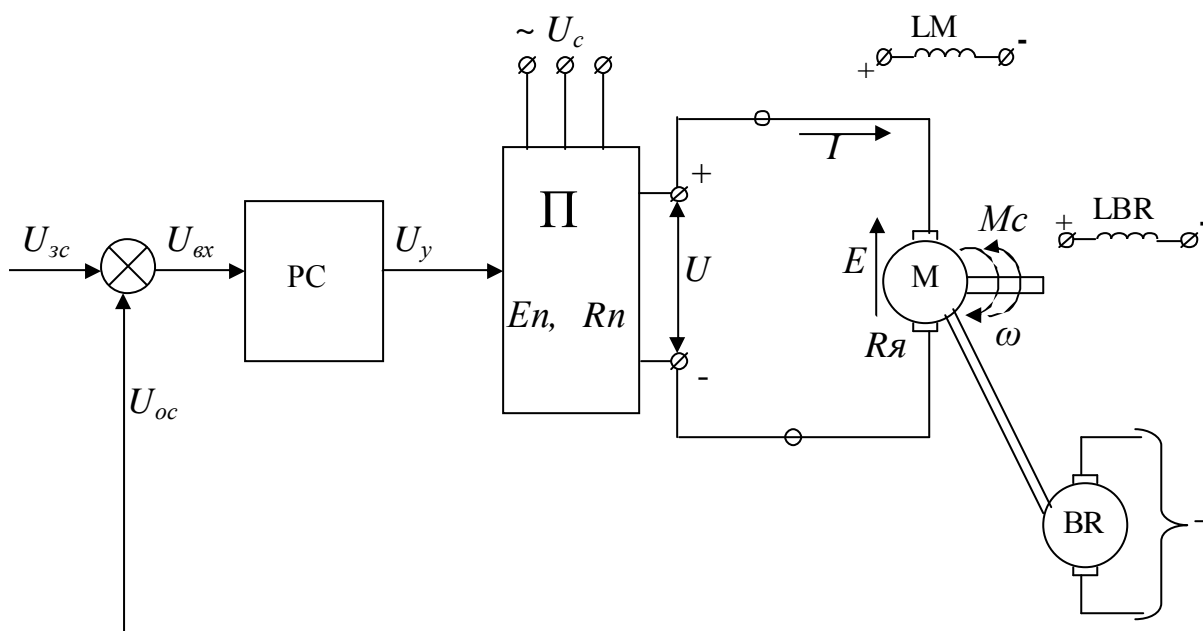
Рис. 2: а) схема включения двигателя в замкнутой системе П-Д с отрицательной обратной связью по напряжению;
б) характеристики двигателя

компенсируются обе составляющие $\Delta\omega_c$. При пропорциональном регуляторе скорости $\Delta\omega_{c2}$ компенсируется полностью, а $\Delta\omega_{c1}$ – частично. Система регулирования скорости является статической и прямая 2 на рис. 3б, отображающая характеристику двигателя в рассматриваемой системе, будет расположена выше естественной характеристики. Прямой на рис. 3б изображена характеристика двигателя в статической системе при сигнале задания $U_{zc2} < U_{zc1}$.

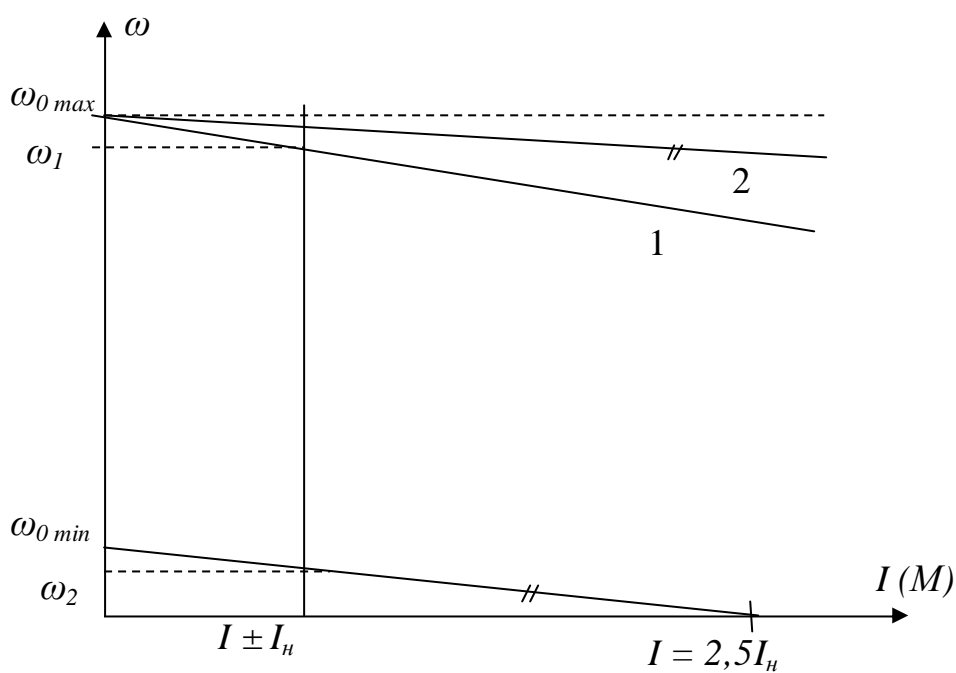
Полная компенсация $\Delta\omega_{c1}$, $\Delta\omega_{c2}$ обеспечивается в случае использования интегро-пропорционального регулятора скорости. В такой системе характеристика двигателя параллельна оси абсцисс. Это позволяет расширить диапазон регулирования скорости до величины 10000:1 и более и осуществлять процесс регулирования при $S_x=0$.

В рассмотренных замкнутых системах П-Д с помощью задержанной отрицательной обратной связи по току якоря можно обеспечить защиту двигателя от перегрузки, связанной с режимом работы двигателя «на упор».

Работа «на упор» или механическое стопорение рабочего органа технологического механизма может возникать в электроприводе лебедки при подъеме примерзшего или заклиненного груза, в электроприводе подъема ковша экскаватора при черпании экскаватором скальной породы или смерзшегося грунта и др. В любом случае при работе «на упор» момент сопротивления неограниченно возрастает. Скорость двигателя снижается, уменьшается ЭДС вращения двигателя E и возрастают якорный ток, величина которого определяется как $I_{\text{я}} = (U - E) / R_{\text{я}}$, и момент двигателя $M = k\Phi I_{\text{я}}$. Когда двигатель остановится, ЭДС вращения будет равна 0. В якорной цепи будет протекать ток короткого замыкания $I_{\text{я кз}} = U / R_{\text{я}}$ и двигатель будет развивать момент короткого замыкания $M_{\text{кз}}$. Это может привести как к поломке двигателя, так и рабочего органа технологической машины. Система электропривода должна ограничивать ток двигателя при работе «на упор» таким образом, чтобы при остановке двигателя $I_{\text{я}} \leq 2,5 I_{\text{ян}}$ развиваемый двигателем момент, называемый моментом стопорения $M_{\text{ст}}$,



а)



б)

Рис. 3: а) схема включения двигателя в замкнутой системе П-Д с отрицательной обратной связью по скорости;
б) характеристики двигателя.

по отношению к номинальному моменту M_n не будет превосходить перегрузочной способности двигателя $M_{ct} \leq 2,5 M_n$.

Схема включения двигателя в замкнутой системе П-Д с обратной связью по скорости и задержанной обратной отрицательной связью по току якоря приведена на рис. 4а. В качестве датчика тока используется включенный в якорную цепь двигателя шунт с сопротивлением $R_{ш}$. Падение напряжения на $R_{ш}$ пропорционально току якоря I_a , поэтому сигнал обратной связи по току определяется как

$$U_{oc} = \beta_m I_a,$$

где β_m – коэффициент передачи обратной связи по току.

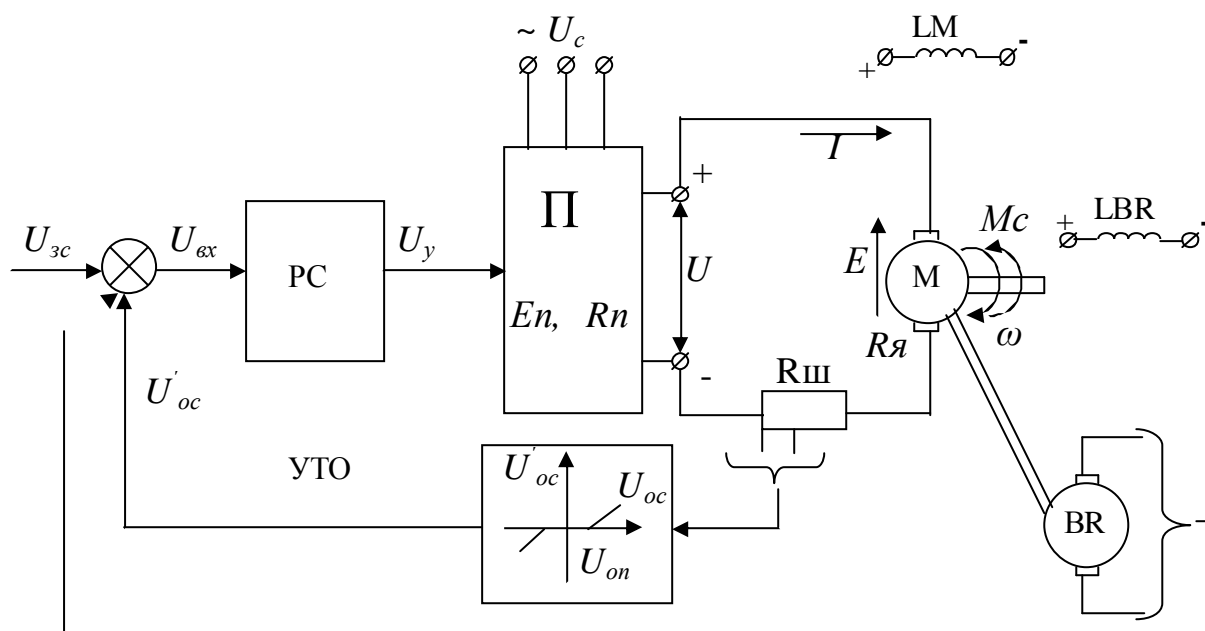
В канале обратной связи по току включен узел токового ограничения (УТО).

Статическая характеристика УТО, показанная внутри изображающего его прямоугольника, имеет зону нечувствительности. Поэтому, до тех пор, пока сигнал обратной связи U_{oc} не превосходит по величине некоторого опорного сигнала U_{on} , сигнал U'_{oc} на выходе УТО равен 0. При $U_{oc} > U_{on}$ на выходе УТО появляется сигнал отрицательной обратной связи U'_{oc} , который поступает на суммирующее устройство.

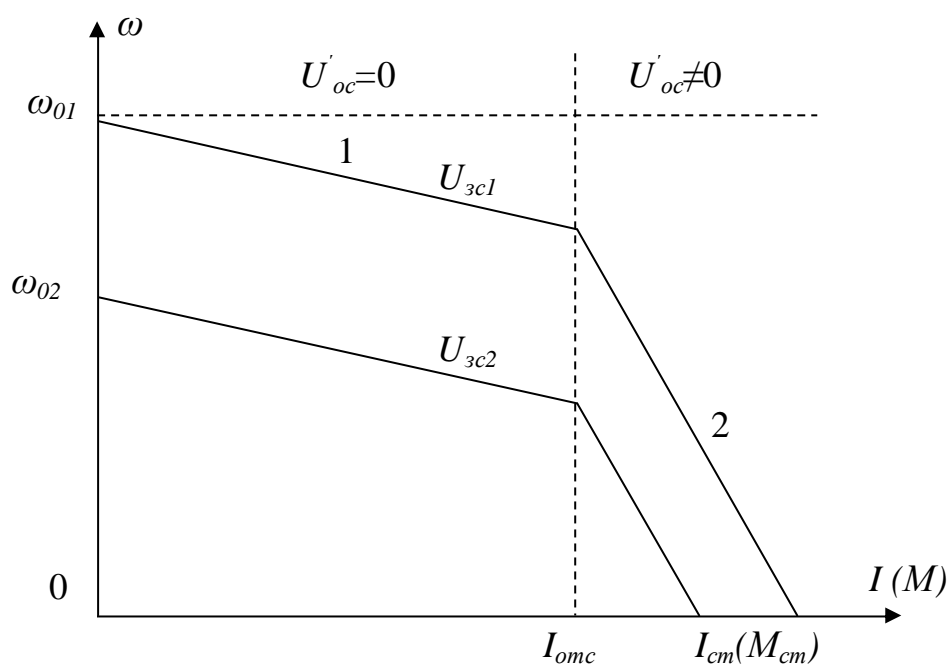
Величина U_{on} определяется величиной тока, с которой должно начинаться его ограничение. Этот ток называется током отсечки $I_{отс}$. Обычно $I_{отс} \geq 1,5 I_{ан}$.

Электромеханические характеристики двигателя на рис. 4б имеют два участка: на первом $U'_{oc} = 0$, система замкнута по скорости и разомкнута по току. Статизм характеристики небольшой и это способствует повышению производительности технологической машины.

На втором участке характеристики двигатель находится при возникновении режима работы «на упор». Ток якоря I_a превышает ток отсечки $I_{отс}$, на выходе УТО появляется сигнал U'_{oc} и система становится замкнутой по току. С ростом I_a увеличивается сигнал U'_{oc} и, следовательно,



а)



б)

Рис. 4: а) схема включения двигателя в замкнутой системе П-Д с отрицательной обратной связью по скорости и задержанной по току;

б) характеристики двигателя.

уменьшается сигнал на входе регулятора скорости $U_{\text{вх}} = U_{\text{зс}} - U_{\text{ос}} - U'_{\text{ос}}$. Уменьшаются сигнал управления $U_y = \kappa_{\text{pc}} U_{\text{вх}}$, ЭДС и напряжение преобразователя U , что и приводит к дальнейшему ограничению роста тока и момента двигателя. Скорость двигателя резко уменьшается. Коэффициент передачи обратной связи по току β_m выбирается таким образом, чтобы при остановке двигателя $I_{\text{я}} \leq 2,5 I_{\text{ян}}$.

Лабораторная работа № 1

Исследование системы П-Д с обратной связью по напряжению преобразователя

1. Описание лабораторной установки системы П-Д с обратной связью по напряжению преобразователя.

Электрическая принципиальная схема лабораторной установки приведена на рис.5.

В качестве управляемого преобразователя (генератора) G1 в ней используется электромашинный усилитель с поперечным полем типа ЭМУ-50. Усилитель имеет два каскада. Первый каскад включает в себя четыре обмотки управления и обмотку якоря с выходом на короткозамкнутые щетки поперечной оси 1-1. Суммарный магнитный поток обмоток управления Φ индуцирует в обмотке якоря ЭДС поперечной оси $E_{\text{кз}}$. Во втором каскаде усиления ток $I_{\text{кз}}$ создает поперечный поток реакции якоря $\Phi_{\text{кз}}$, который индуцирует в якоре ЭДС продольной оси $E_{\text{эму}}$, снимаемую со щеток 2-2. Для компенсации реакции якоря от тока нагрузки ЭМУ по продольной оси на статоре располагается компенсационная обмотка КО, поток которой регулируется при помощи сопротивления $R_{\text{к}}$. Обмотка дополнительных полюсов ДП улучшает коммутацию по продольной оси машины.

Изменение величины и направления суммарного потока Φ приводит к изменению величины и полярности $E_{\text{эму}}$. Поэтому характеристика холостого хода ЭМУ имеет вид кривой, приведенной на рис. 1б.

Якорь генератора G1 приводится во вращение короткозамкнутым асинхронным двигателем M1. Подключение к сети статорной обмотки M1 осуществляется через автоматический выключатель QF1 и главные контакты магнитного пускателя KM1. В фазах А и С цепей питания статорной обмотки M1 включены чувствительные элементы тепловых реле FR1, FR2, защищающих M1 от перегрузки. Размыкающий контакт FR1, FR2 включен в цепи питания катушки KM1.

К якорю G1 через автоматический выключатель QF2 и амперметр PA1 подключен якорь исследуемого двигателя M2. Обмотка возбуждения двигателя LM2 подключена через рубильник Q1 к независимому источнику напряжения. Ток в обмотке регулируется с помощью резистора R7 и контролируется амперметром PA5. Вольтметр PV1 контролирует напряжение на якоре M2.

Нагрузкой исследуемого двигателя M2 является генератор G2. Вал G2 соединен с валом M2. К якорю G2 подключен резистор R8. С его помощью регулируется ток в якорной цепи G2, а следовательно, и нагрузка на M2. Номинальное значение тока в обмотке возбуждения LG2 генератора устанавливается с помощью резистора R9.

Токовая защита M2 обеспечивается с помощью максимально-токового реле КА. Если ток в якорной цепи M2 превышает допустимое значение (превышает уставку КА), то КА срабатывает. Своим размыкающим контактом оно разрывает цепь питания катушки KM1 и двигатель M1 отключается от сети.

Скорость вращения M2 контролируется с помощью тахогенератора BR, к якорю которого подключен вольтметр PV2. Номинальное значение тока в обмотке возбуждения тахогенератора LBR устанавливается с помощью резистора R10.

Обмотка 0IV используется в качестве задающей. Ток в обмотке, а следовательно, и создаваемый ею поток регулируется с помощью резистора R1. Полярность напряжения на R1, направление тока и потока обмотки 0IV могут изменяться на противоположные, так как резистор включен в реверсивный мост, образованный контактами контакторов KM2, KM3.

Управление контакторами КМ2, КМ3 осуществляется с помощью кнопочных переключателей SB3, SB4, SB5. Ток в обмотке 0IV контролируется амперметром РА2. Максимальное напряжение, снимаемое с R1, равно 220В. При этом напряжении ток в обмотке 0IV с помощью R2 устанавливается равным 4х-кратному по отношению к номинальному току обмотки.

Обмотка 0I ЭМУ используется в цепи отрицательной обратной связи по напряжению. С помощью резистора R3 регулируется коэффициент передачи обратной связи. Амперметр РА3 контролирует ток в обмотке, который устанавливается с помощью R4. Поток, создаваемый обмоткой 0I, направлен встречно по отношению к потоку, создаваемому 0IV. При замыкании переключателя S1 осуществляется алгебраическое суммирование сигнала задания (потока обмотки 0IV) и сигнала обратной связи (потока обмотки 0I).

В установившемся режиме ЭДС ЭМУ и, скорость вращения М2 определяется суммарным потоком ЭМУ, определяемым как разность потоков обмоток 0IV и 0I. При увеличении M_c на валу М2 скорость вращения М2 уменьшается, а ток в якорной цепи М2 увеличивается. Из-за увеличений падения напряжения на активном сопротивлении якоря ЭМУ уменьшается напряжение на якоре двигателя М2. Уменьшается напряжение, снимаемое с резистора R3. Поэтому уменьшается и поток, создаваемый обмоткой 0I. Суммарный поток ЭМУ возрастает, что приводит к росту ЭДС ЭМУ, компенсирующему падение напряжения на активном сопротивлении якоря ЭМУ и уменьшающему статическое падение скорости М2.

Обмотка 0II ЭМУ используется в цепи задержанной отрицательной обратной связи по току якоря М2. В качестве сигнала обратной связи используется падение напряжения на активном сопротивлении компенсационной обмотки КО и дополнительных полюсов ДП ЭМУ. При замыкании переключателя S2 этот сигнал поступает на узел токовой отсечки, выполненный на диодах VD7÷VD10. Опорное напряжение на УТО подается с резистора R5, который, в свою очередь, подключен к выходу трехфазного

выпрямителя на диодах VD1÷VD6. Трансформатор TV понижает напряжение сети.

Опорное напряжение с резистора R5 запирает диоды VD7÷VD10. При увеличении тока в якорной цепи M2 падение напряжения на КО и ДП возрастает. Допустим, что в точке 27 полярность напряжения положительна по отношению к полярности напряжения в точке 29. При токе якоря, равном току отсечки $I=I_{omc}$ напряжение обратной связи превышает опорное напряжение. Отпираются диоды VD7, VD10 и через обмотку ОП начинает протекать ток. Его величина контролируется амперметром РА4. Поток, создаваемый обмоткой ОП, направлен встречно по отношению к потоку обмотки ОIⅣ. Поэтому с увеличением тока в якорной цепи M2 будет увеличиваться поток обмотки ОП и уменьшаться результирующий поток ЭМУ. Это в свою очередь будет приводить к уменьшению ЭДС ЭМУ. При скорости якоря M2, равной нулю, ток в якорной цепи M2 будет равен току стопорения.

2. Порядок выполнения экспериментальной части работы.

2.1. В процессе подготовки к проведению лабораторной работы изучить принципиальную электрическую схему установки. С ее помощью: разобрать все режимы работы и механические характеристики M2, получаемые как в разомкнутой, так и в замкнутой системе П-Д; принцип действия ЭМУ и нагрузочного агрегата (см. разд. 3).

2.2. В начале лабораторной работы выяснить расположение основных элементов системы П-Д.

2.3. Собрать измерительную часть схемы, включающую в себя амперметры РА1÷РА5, вольтметры PV1÷PV2, резисторы R1÷R8, переключатели S1÷S2, выпрямители на диодах VD1÷VD10. Рукоятки переключателей S1, S2 должны находиться в положении «0».

2.4. Замкнуть рубильник Q1. С помощью R7 установить номинальное значение тока в обмотке LM2.

2.5. Нажать на кнопочный переключатель SB3 и включить контактор КМ2. Определить направление перемещения ползунка R1, при котором ток в обмотке 0IV возрастает. Перевести ползунок R1 в крайнее положение данного направления и с помощью R2 установить ток в обмотке 0IV равным 0,8А. Затем ползунок R1 перевести в противоположное направление.

2.6. Включить автоматический выключатель QF1. Нажать на кнопочный переключатель SB1 и запустить двигатель М1.

2.7. Снять верхнюю ветвь характеристики холостого хода ЭМУ $E_{ЭМУ}=f(I_{0IV})$. С помощью резистора R1 увеличивать ток в обмотке 0IV, и через каждые 0,025А регистрировать показания PV1 до значения 250В. По окончании опыта ползунок R1 вернуть в исходное состояние.

2.8. Снять нижнюю ветвь характеристики холостого хода ЭМУ, для чего нажать на кнопочный переключатель SB4, а затем повторить опыт по п.4.7. По окончании опыта ползунок R1 вернуть в исходное состояние.

2.9. Снять электромеханическую характеристику М2 в разомкнутой системе П-Д. Для чего в якорную цепь G2 полностью ввести резистор R8. Переключатель S3 в цепи питания LG2 разомкнуть. Включить автоматический выключатель QF2. Увеличивая с помощью R1 ток в обмотке 0IV, установить напряжение на якоре М2 равным 220В. Зафиксировать показания PA1 и PV2. Замкнуть S3 и вновь зафиксировать показания PA1 и PV2. Уменьшая величину R8, через каждые 2-3А фиксировать показания PA1 и PV2. Ток в якорной цепи М2 увеличивать до 15А. По окончании опыта ползунок R1 и рукоятку R8 вернуть в исходное состояние, S3 разомкнуть.

2.10. Снять электромеханическую характеристику М2 в разомкнутой системе П-Д при другом значении задающего сигнала. Для этого, увеличивая с помощью R1 ток в обмотке 0IV, установить напряжение на якоре М2 равным 110В. Зафиксировать показания PA1 и PV2. Повторить опыт по п.4.9. По окончании опыта ползунок R1 и рукоятку R8 вернуть в исходное состояние, S3 разомкнуть.

2.11. Снять электромеханическую характеристику М2 в разомкнутой системе П-Д при ослабленном потоке, для чего с помощью R7 установить в обмотке LM2 ток, равный 0,5 от номинального значения. Затем с помощью R1 установить напряжение на якоре М2, равное 220В. Повторить опыт по п.4.9. По окончании опыта ползунки R7, R1 и рукоятку R8 вернуть в исходное состояние, S3 разомкнуть.

2.12. Снять естественную электромеханическую характеристику М2, для чего с помощью R1 установить напряжение на якоре М2 равным 220В. Зафиксировать показания PA1 и PV2. S3 замкнуть. При этом будут уменьшаться и показания PV1. С помощью R1 установить показания PV1 равными 220В. После этого зафиксировать показания PA1, PV2. Опыт повторить, уменьшая величину R8 так, чтобы показания PA1 увеличились на 3-4А. Ток в якорной цепи М2 увеличивать до 15А. По окончании опыта ползунков R1 и рукоятку R8 вернуть в исходное состояние, S3 разомкнуть.

2.13. Снять электромеханическую характеристику М2 в замкнутой системе П-Д с отрицательной обратной связью по напряжению. Для этого рукоятку S1 перевести в положение «1». С помощью R1 установить напряжение на якоре М2 равным 220В. Зафиксировать показания PA1 и PV2. Повторить опыт по п.4.9. По окончании опыта ползунков R1 и рукоятку R8 вернуть в исходное состояние, S3 разомкнуть.

2.14. Снять электромеханическую характеристику М2 в замкнутой системе П-Д с отрицательной обратной связью по напряжению и с задержанной отрицательной обратной связью по току двигателя М2. Для этого рукоятку S2 перевести в положение «1». С помощью R1 установить показания PV1 равными 220В. Зафиксировать показания PA1, PV2. Замкнуть S3. Уменьшая R8, по показаниям PA4 определить ток отсечки. Зафиксировать показания PA1 и PV2. Увеличивать якорный ток М2 на 2-3А и фиксировать показания PA1, PV2. По окончании опыта ползунков R1 и рукоятку R8 вернуть в исходное состояние.

2.15. Проверить действие максимально-токового реле КА в разомкнутой системе П-Д. Для этого рукоятки S1, S2 перевести в положение «0». С

помощью R1 установить на якоре M2 напряжение в 220В. Плавно уменьшая величину R8, увеличивать ток в якорной цепи M2 до момента срабатывания реле КА.

3. Указания по оформлению отчета.

3.1. Построить характеристику холостого хода ЭМУ и механические характеристики двигателя в разомкнутой и замкнутой системе П-Д.

3.2. Определить величину статического падения скорости M2 на естественной характеристике в разомкнутой и замкнутой системе П-Д.

Вопросы для самопроверки

1. Объясните работу системы П-Д при пуске.
2. Объясните работу системы П-Д в тормозных режимах.
3. Чем определяется величина статического падения скорости в разомкнутой системе П-Д?
4. Объясните работу замкнутой системы П-Д с отрицательной обратной связью по напряжению преобразователя.
5. Объясните работу замкнутой системы П-Д с отрицательной обратной связью по скорости двигателя.
6. В каком случае в замкнутой системе П-Д с отрицательной обратной связью по напряжению будет получена минимальная величина статического падения скорости?
7. Объясните работу замкнутой системы П-Д с задержанной отрицательной обратной связью по току якоря M2.

Лабораторная работа № 2

Исследование системы П-Д с обратной связью по скорости

1. Описание лабораторной установки системы П-Д с обратной связью по скорости.

Функциональная схема лабораторной установки приведена на рис.6, а электрическая принципиальная на рис.7. В ее основу положено однофазное непереворсивное устройство управления серии БУ 3509. Оно предназначено для питания якорных цепей двигателей постоянного тока мощностью до 11кВт., используемых в системах автоматизированного электропривода металлорежущих станков и других технологических механизмов.

Устройство управления состоит из силовой части и системы управления и представляет собой конструкцию открытого исполнения с односторонним обслуживанием. Элементы силовой части смонтированы на вертикальной панели, а элементы системы управления размещены на поворотной передней плате с печатным монтажом. Для удобства наладки и проверки работы системы управления на плате предусмотрены контрольные выводы для индикации состояния отдельных узлов. Плата управления соединяется с элементами силовой части гибким жгутом при помощи разъемного соединения Ш2.

Питание устройства управления осуществляется через контакты 1, 2 клеммой колодки Ш1 от сети 380В частотой 50Гц. Допустимые отклонения параметров сети по напряжению - $\pm 10\%$, по частоте - $\pm 2\%$. Автоматический выключатель QF1, магнитный пускатель KM1 и кнопки SB1, SB2 обеспечивают возможность дистанционного управления подачей напряжения.

В силовой части устройства в качестве управляемого преобразователя используется выпрямитель, собранный по однофазной мостовой схеме на тиристорах VS1, VS2 и диодах VD3, VD4. К выходу преобразователя (контакты 3, 7 Ш1) подключен якорь двигателя M1. В якорную цепь двигателя M1 включен дроссель L, ограничивающий пульсации якорного тока. Предохранители Пр1, Пр2 обеспечивают защиту тиристоров и диодов от

коротких замыканий, а RC - цепи C3,R3; C2,R2; C6,R4; C7,R5 – от сетевых и коммутационных перенапряжений. Предохранитель Пр3 защищает от коротких замыканий источник напряжения для обмотки возбуждения LM1 двигателя, который выполнен на диодах VD27÷VD29 и тиристоре VS13 и расположен на плате системы управления. Подключение LM1 к напряжению источника осуществляется через контакты 8, 9 Ш1.

Система управления построена по замкнутому принципу. Она состоит (см. рис. 6) из астатического интегро-пропорционального регулятора скорости А, главной обратной связи по скорости и гибкой обратной связи по току якоря, объединенных в узел обратных связей (УОС), узла токоограничения (УТО), системы импульсно-фазового управления (СИФУ), источника питания (ИП) и источника питания для обмотки возбуждения машины (ИВМ).

Регулятор скорости А выполнен на операционном усилителе. На инверсном входе усилителя осуществляется алгебраическое суммирование тока задания i_z и токов обратных связей по скорости i_c и току якоря i_m . Выход регулятора А соединен с входом СИФУ через эмитерный повторитель на VT2, повышающий нагрузочную способность регулятора. Для получения астатического закона регулирования скорости регулятор охвачен активно-емкостной обратной связью, выполненной с помощью резисторов R15, R16 и емкости C4.

Величина тока задания регулируется с помощью задающего потенциометра R28, подключаемого к контактам 11, 12, 5 Ш1. Контакт 5 является общей точкой схемы.

В качестве датчика скорости используется тахогенератор BR. Поскольку с R28 снимается отрицательное напряжение, то тахогенератор подключен к БУ 3509 таким образом, что к контакту 10 Ш1 прикладывается положительное, а к контакту 5 Ш1 – отрицательное напряжение.

Датчик тока состоит из трансформатора тока ТА, выпрямителя на диодах VD1÷VD4 и резистора R26. При увеличении якорного тока двигателя увеличивается и ток, потребляемый преобразователем из сети. Поэтому

напряжение, снимаемое с R26, будет пропорционально якорному току М. Как и датчик скорости, датчик тока подключен к БУ 3509 таким образом, чтобы к контакту 4 Ш1 прикладывалось положительное, а к контакту 5 Ш1 – отрицательное напряжение.

В узел обратных связей напряжение с датчика тока прикладывается через конденсатор С2 и резистор R9. Поэтому сигнал обратной связи по току i_m будет поступать в УОС только в переходных режимах, когда изменяется ток якоря М и конденсатор С2 перезаряжается.

Узел токоограничения играет роль задержанной обратной связи по току двигателя. Он выполнен на транзисторе VT1, который включен параллельно выходу регулятора скорости. В исходном состоянии VT1 заперт отрицательным напряжением, снимаемым с резистора R20. Величина этого напряжения определяет значение тока уставки.

На базу VT1 через резистор R23 подается положительное напряжение с выхода датчика тока. При увеличении тока якоря М увеличивается и напряжение, снимаемое с R26. Когда ток якоря М превысит ток уставки, положительное напряжение датчика тока превысит отрицательное, снимаемое с R20, транзистор VT1 откроется и зашунтирует выход регулятора скорости.

Регулирование величины ЭДС преобразователя E_n осуществляется с помощью СИФУ. В состав СИФУ входят: генератор пилообразного напряжения, синхронизирующее устройство, нуль-орган, распределитель и усилитель импульсов. Диаграммы напряжений, поясняющие работу СИФУ, приведены на рис.8.

На рис.8а приведена синусоида напряжения U_c , поступающего на преобразователь силовой части БУ 3509. Верхние полупериоды синусоиды являются проводящими для VS1 и VD4, а нижние – для VS2 и VD3. В обоих случаях ток протекает от катодов VS1, VD3 через дроссель L и якорь М к анодам VS2, VD4. Поэтому контакт 3 Ш1 обозначен как «+Выход силовой», а контакт 7 Ш1 – как «-Выход силовой». Напряжение между этими контактами является выпрямленным напряжением преобразователя U . Регулирование его

величины осуществляется за счет изменения положения по фазе управляющих импульсов для VS1, VS2 относительно точек естественной коммутации тиристоров. На рис.8а эти точки обозначены буквой А. Количественно положение управляющих импульсов характеризуется величиной угла управления α .

На рис.8б изображено пилообразное напряжение U_m , вырабатываемое генератором, собранном на транзисторе VT3 и конденсаторе C10. Конденсатор C10 заряжается до напряжения источника на стабилитронах VD10, VD11 током, протекающим через переход база-коллектор VT3. Время заряда C10 зависит от величины тока заряда, который, в свою очередь, определяется величиной сигнала управления на выходе регулятора скорости. Этот сигнал прикладывается к переходу база-эмиттер VT3. При его увеличении ток заряда C12 также увеличивается, а время заряда – уменьшается.

Совпадение во времени (синхронизацию) полупериодов питающего напряжения с пилообразным напряжением обеспечивает синхронизирующее устройство, выполненное на транзисторе VT4 и трансформаторе Tr1.

Вывод 022 вторичной обмотки H2-K2 Tr1 соединен с эмиттером, а выводы 021 и 023 – с базой VT4. Напряжения на выводах 021, 023 по отношению к выводу 022 находятся в противофазе. Отрицательные полупериоды этих напряжений через диоды VD13, VD14 прикладываются к базе VT4 и запирают его. Однако в момент перехода напряжения сети через нуль запирающее напряжение на базе VT4 также равно нулю. Поэтому VT4 в конце каждого полупериода открывается положительным напряжением с делителя R30, R31 и разряжает C10.

В качестве нуль-органа или порогового элемента в СИФУ используется однопереходный транзистор (двухбазовый диод) VT5. В общем случае на входе нуль-органа сравниваются два сигнала. При равенстве этих сигналов по величине появляется сигнал на выходе нуль-органа.

К базе 2 (Б2) VT5 через резистор R32 от источников на стабилитронах VD7, VD10, VD11 прикладывается напряжение в 20В, которое и определяет

величину одного из входных напряжений нуль-органа – напряжение включения $U_{вкл}$ VT5. Вторым входным напряжением нуль-органа является пилообразное напряжение с C10, прикладываемое к эмиттеру VT5. До тех пор, пока пилообразное напряжение меньше напряжения включения, VT5 заперт. В момент достижения пилообразным напряжением величины напряжения включения VT5 открывается и через переход эмиттер-база 1 VT5 и резистор R33 начинает протекать ток. Одновременно с этим заряжается конденсатор C12. Напряжение на нем суммируется с напряжением включения VT5, равенство величин сравниваемых напряжений нарушается и VT5 закрывается. На резисторе R33 формируется импульс (см. рис.5в), который и является импульсом управления для VS1, VS2. Как и C10, конденсатор C12 разряжается через VT4 в конце каждого полупериода питающего напряжения.

На тиристор, для которого данный полупериод питающего напряжения является проводящим (к аноду тиристора прикладывается положительный потенциал), управляющий импульс подается с помощью распределителя импульсов, выполненного на транзисторах VT6, VT7. Поэтому будет открыт тот из транзисторов, к базе которого прикладывается положительный потенциал. Через переход эмиттер-коллектор этого транзистора импульс управления с R33 поступает на один из усилителей, выполненных на VT8, VT9. Нагрузкой усилителей импульсов являются первичные обмотки импульсных трансформаторов Tr2 и Tr3. Трансформаторы служат для потенциального разделения главных цепей и цепей системы управления. Со вторичных обмоток трансформаторов управляющие импульсы подаются на переход «управляющий электрод – катод тиристор».

На рис.8г приведена диаграмма выпрямленного напряжения преобразователя. Заштрихованные части полупериодов соответствуют включенному состоянию тиристоров. Полупериоды I и II получаются при угле управления α_1 . С увеличением сигнала на выходе регулятора скорости увеличится ток заряда C10. Поэтому пилообразное напряжение достигнет величины напряжения включения $U_{вкл}$ VT5 за меньший промежуток времени.

Угол управления тиристорами также уменьшится и станет равным α_2 . Время включенного состояния тиристорov, а следовательно, и величина выпрямленного напряжения преобразователя увеличатся. На диаграмме выпрямленного напряжения полупериоды III и IV соответствуют углу управления α_2 .

Источник питания системы управления подключен к выводам H2, 021 вторичной обмотки Tr1. Первичная обмотка Tr1 подключена к сети через фазосдвигающую цепь R1, C1, необходимую для уменьшения влияния нелинейных искажений сети на работу СИФУ.

Питание регулятора и СИФУ осуществляется стабилизированным двуполярным напряжением, которое относительно общей точки схемы (контрольная точка 12) имеет величину $\pm 15\text{В}$, а контрольная точка 23 – потенциал -15В . Соответствующий узел собран на стабилитронах VD6, VD7, VD10, VD11, конденсаторах C8, C9 и резисторе R27.

Источником напряжения для задающего потенциометра R28 служит стабилитрон VD10. Относительно точки 12 напряжение источника имеет потенциал -10В . Резистор R28 системы управления, включенный последовательно с задающим потенциометром R28, ограничивает максимальную величину тока задания, т.е. ограничивает максимальную скорость двигателя.

Усилители импульсов VT8 и VT9 питаются нестабилизированным напряжением $+5\text{В}$, -15В . Соответствующие источники собраны на элементах VD15, VD16, C13 и VD13, VD14, VD18, C14.

Источник напряжения для обмотки возбуждения выполнен стабилизированным и обеспечивает изменение напряжения на нагрузке не более $\pm 2\%$ при колебаниях напряжения сети в пределах $-15\% \div +10\%$ номинального значения.

Силовая часть ИВМ (см. рис.6) выполнена на однофазной мостовой схеме на тиристоре VS13 и диодах VD27..... VD29.

Система импульсно-фазового управления для VS13 включена параллельно переходу «катод – управляемый электрод тиристора». Принцип ее действия аналогичен рассмотренному выше: конденсатор C18 заряжается до напряжения включения порогового элемента – однопереходного транзистора VT12 с последующим разрядом через резистор R50 на управляющий переход VS13. Уровень срабатывания VT12 определяется величиной напряжения на базе 2, которое подается со стабилизированного источника на резисторах R47, R48 и стабилитронах VD25, VD26.

Изменяя ток заряда C18, можно регулировать угол управления VS13. Величина тока заряда C18 определяется током коллектора VT10. В свою очередь, управление током коллектора VT10 осуществляется с помощью транзистора VT11. Резистор R40 выполнен сменным и выбирается таким образом, чтобы напряжение на обмотке возбуждения было равным номинальному.

Стабилизация напряжения обеспечивается благодаря наличию обратной связи по напряжению преобразователя, которая выполнена на элементах R41, R51, C17.

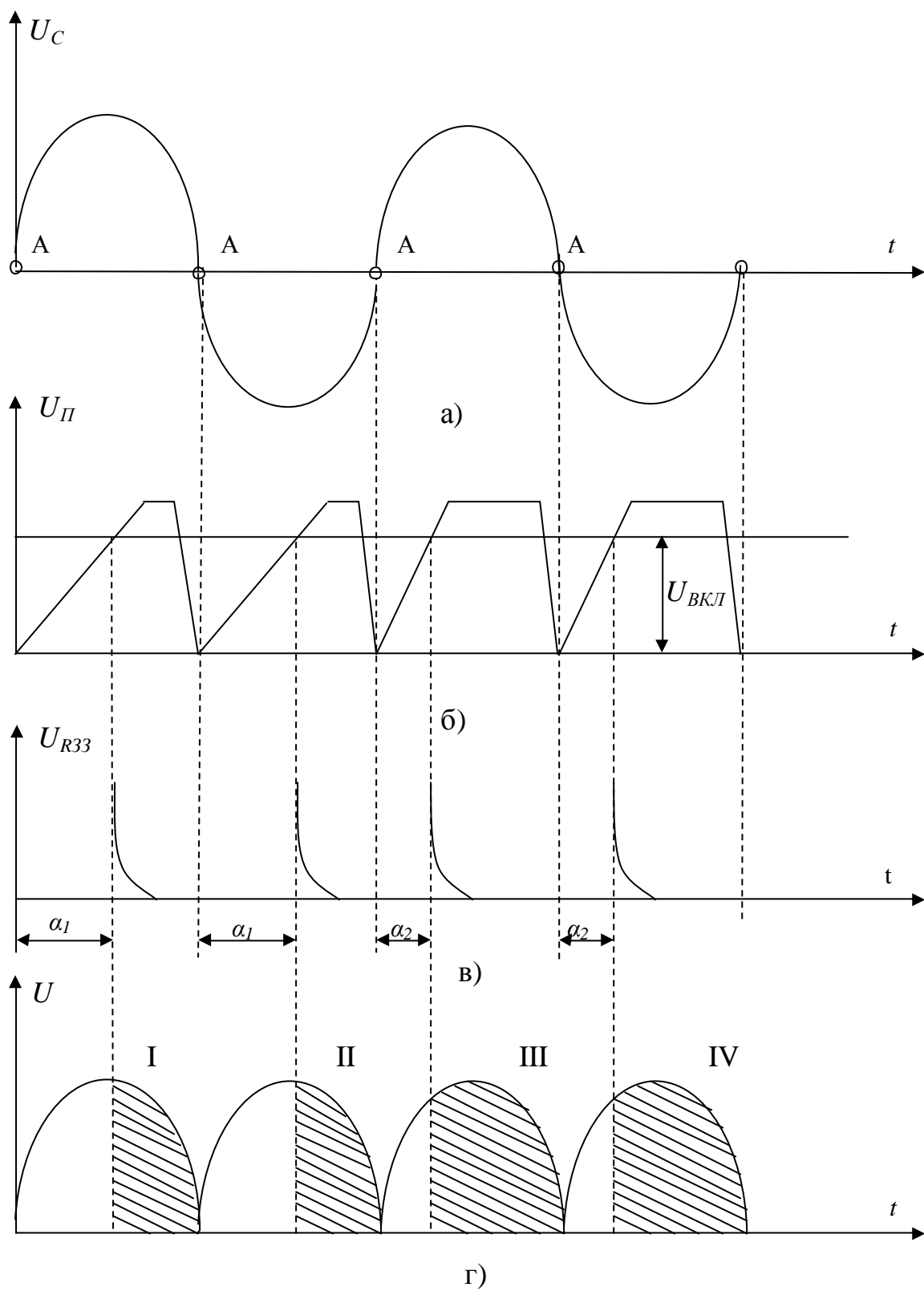


Рис. 8: а) входное напряжение преобразователя;
 б) пилообразное напряжение генератора;
 в) управляющие импульсы тиристорov;
 г) выпрямленное напряжение преобразователя

2. Порядок выполнения экспериментальной части работы.

2.1. В процессе подготовки к проведению лабораторной работы изучить принципиальную электрическую схему установки. С ее помощью разобрать состав и принцип действия устройства БУ 3509, режимы работы и характеристики М1.

2.2. В начале лабораторной работы выяснить расположение элементов главной цепи, цепей управления и элементов измерительной части установки. Рукоятки автоматических выключателей QF1, QF2 должны находиться в положении «0», задающий потенциометр R28 – в крайнем левом положении.

2.3. В соответствии с принципиальной схемой установки на рис.6 проверить правильность подключения внешних цепей к клеммной колодке Ш1 БУ 3509.

2.4. Проверить напряжения источников питания и исправность СИФУ. Для этого при отключенном выключателе QF1 удалить плавкие вставки предохранителей Пр1, Пр2, Пр3. Плату системы управления с удлинителя расположить на столе лабораторной установки.

Затем включить QF1 и магнитный пускатель КМ1 и на контрольных точках платы системы управления измерить напряжения источников питания. Напряжение в точке 21 по отношению к точке 12 должно быть положительным и равным +15В. При этом оба напряжения не должны отличаться от номинальных значений на +10% и -25%.

Напряжение на контрольных точках 23, 24 должно быть равным +15В и не отличаться от номинального значения на +30% и -10%.

Для проверки исправности СИФУ с помощью электронного осциллографа проверить наличие управляющих импульсов тиристоров VS1, VS2. Осциллограф подключают к точкам 23, 25 и 23, 26 при среднем положении движка задающего потенциометра R28.

2.5. По окончании этих проверок отключить QF1, установить плавкие вставки Пр1, Пр2, Пр3 и плату системы управления на БУ 3509. Отключить якорную цепь М1 от выхода преобразователя. Для этого от контакта 3 или 7 клеммной колодки Ш1 необходимо отсоединить внешний проводник. Затем

включить QF1 и KM1 и измерить напряжение на обмотке возбуждения M1. Подбором резистора R40 добиться требуемого значения напряжения.

2.6. Для установки требуемого токоограничения отключить от источника напряжения обмотку возбуждения M1. Для этого от контакта 8 или 9 клеммной колодки Ш1 необходимо отсоединить внешний проводник. С помощью резистора R20 на плате системы управления установить минимально возможную величину напряжения, запирающего VT1. Для этого перевести R20 в крайнее правое положение. Задающий потенциометр R28 перевести в крайнее левое положение. Включить QF1 и KM1. Потенциометр R28 перевести в среднее положение. С помощью R20 увеличивать напряжение, запирающее VT1, и , контролируя по амперметру PA1 величину якорного тока M1, установить его равным номинальному. Перевести R28 в крайнее левое положение, отключить QF1 и подключить обмотку возбуждения к источнику напряжения, подключив внешние проводники к контактам Ш1.

2.7. Произвести регулировку системы управления при включении всего устройства в целом. Для этого включить QF1 и KM1 и с помощью R28 задать минимальную скорость вращения M1. При наличии автоколебаний установить перемычку между контрольными точками 6-7 на плате управления. Тем самым резисторы R7, R8 окажутся включенными параллельно, что изменит параметры корректирующей гибкой обратной связи по току. Кроме этого, устранение автоколебаний возможно с помощью изменения параметров обратной связи, охватывающей регулятор скорости. Для устройства БУ 3509 с номинальным током 25А сопротивление резистора R16 может изменяться от 10 до 120кОм, а емкость конденсатора C4 – от 0,47 до 1,5мкФ.

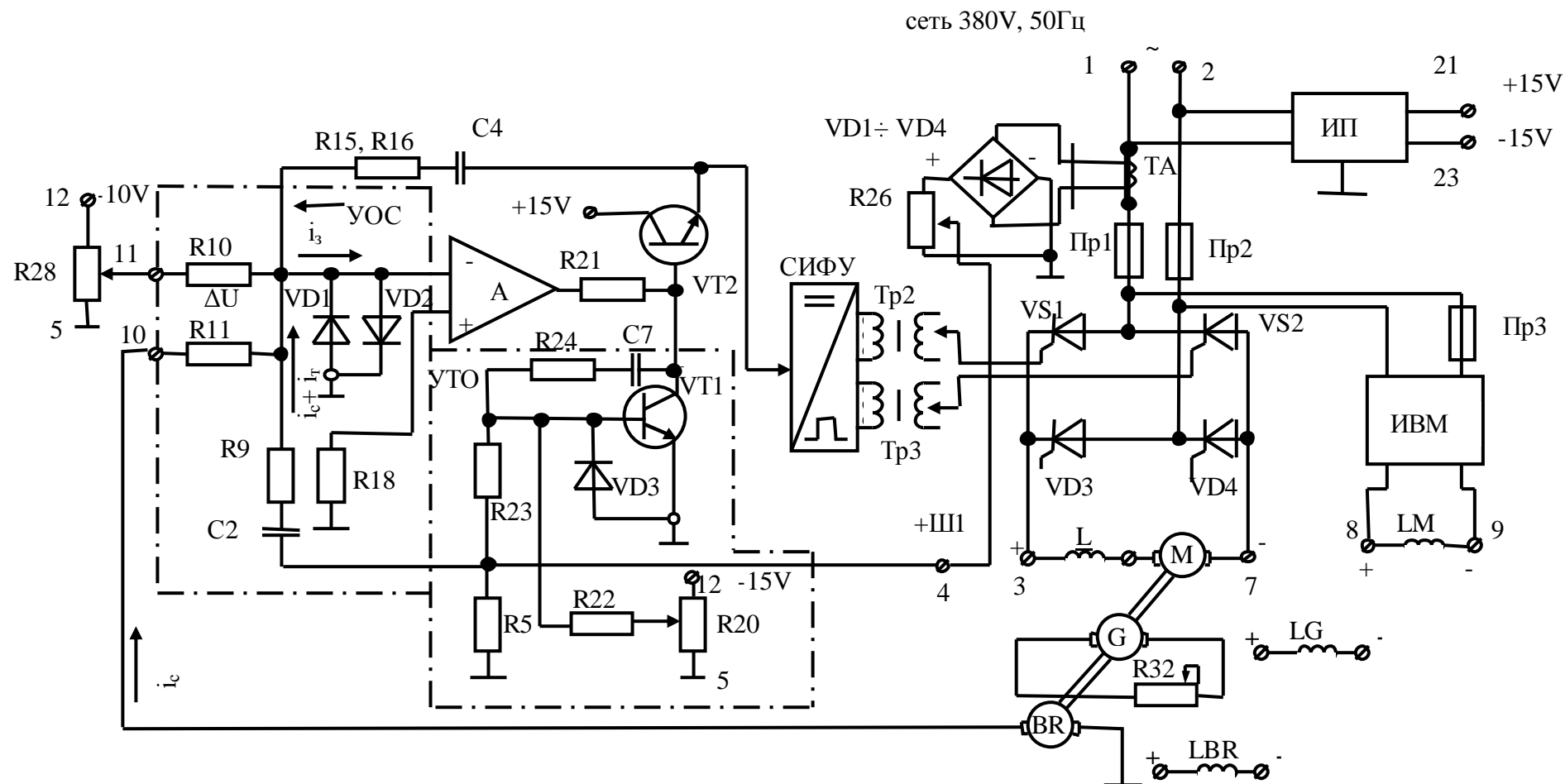


Рис. 8 - Функциональная схема установки

2.8. Снять электромеханические характеристики двигателя при различных значениях сигнала задания. Для этого подключить к якору генератора нагрузочный реостат R32 и полностью ввести его. Увеличивая сигнал задания, установить по вольтметру PV1 напряжение на якоре М равным 220В. Зафиксировать показания амперметра PA1 и вольтметра PV2. Включить QF2 и вновь зафиксировать показания PA1 и PV2. Уменьшая сопротивление нагрузочного реостата R32 и, увеличивая якорный ток М до 15А, измерить ток и скорость М еще в 3-4 точках. По окончании опыта рукоятку R32 перевести в исходное положение и выключить QF2.

Повторить опыты при напряжении на якоре М, равном 100В и 50В.

2.9. По окончании лабораторной работы перевести R28 в крайнее левое положение, отключить QF1 и QF2.

2. Указания по оформлению отчета.

3.1. На основании полученных экспериментальных данных построить электромеханические характеристики двигателя.

3.2. Определить диапазон регулирования скорости двигателя и рассмотреть возможности его расширения.

Вопросы для самопроверки.

1. Объясните устройство и принцип действия двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.
2. Назовите способы регулирования скорости двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.
3. Объясните устройство, и принцип действия силовой части БУ 3509.
4. Объясните устройство и принцип действия СИФУ.
5. Объясните работу разомкнутой системы П-Д.
6. Объясните работу замкнутой системы П-Д с главной обратной связью по скорости и статическим регулятором скорости.
7. Объясните принцип действия астатического регулятора скорости.
8. Объясните назначение и принцип действия гибкой обратной связи по току якоря.
9. Объясните назначение и принцип действия токовой отсечки.

Список литературы

1. Москаленко В.В, Автоматизированный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Зимин Е.Н., Яковлев В.И. Автоматическое управление электроприводами. – М.: Высшая школа, 1979.

Навчальне видання

Андрійченко Володимир Павлович,

Фатєєв Віктор Миколайович

**«ПРОЕКТУВАННЯ
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ ТА СИСТЕМ»**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт (для студентів 4 курсу всіх форм навчання напряму підготовки 6.050702 (0922) «Електромеханіка» спеціальності «Електромеханічні системи автоматизації та електроприводу»)

Редактор *З.І. Зайцева*

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2009, поз. 206 М

Підп. до друку 25.03.2010г.	Формат 60х84/16.	Папір офісний
Друк на ризографі	Ум. друк. арк. 1,0	Зам. №
Тираж 50 пр.		

Видавець і виготовлювач:

Харківська національна академія міського господарства,

вул. Революції, 12, Харків 61002

Електронна адреса: rectorat@ksame.kharkov.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи: ДК № 731 від 19.12.2001