

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П.О. Сухого»

Кафедра «Автоматизированный электропривод»

СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ КОМПЛЕКТНЫХ ТИРИСТОРНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТИПА ЭПУ, БТУ, ЭТУ, ЭТ

**ПРАКТИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
по дисциплине «Наладка и диагностика
автоматизированного электропривода»
для студентов специальности 1-53 01 05
«Автоматизированные электроприводы»
дневной и заочной форм обучения**

Гомель 2006

УДК 662.61(075.8)
ББК 31.291я73
С34

*Рекомендовано научно-методическим советом
факультета автоматизированных и информационных систем
ГГТУ им. П. О. Сухого*

Автор-составитель: *В. А. Савельев*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого
О. Г. Широков

С34 **Система** регулирования комплектных тиристорных электроприводов типа ЭПУ, БТУ, ЭТУ, ЭТ : практ. пособие по дисциплине «Наладка и диагностика автоматизированного электропривода для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» дневной и заочной форм обучений / авт.-сост.: В. А. Савельев. – Гомель : ГГТУ им. П.О. Сухого, 2006. – 31 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://gstu.local/lib>. – Загл. с титул. экрана.

Настоящее практическое пособие содержит техническое описание типовой системы регулирования комплектных тиристорных электроприводов типа ЭПУ, БТУ, ЭТУ, ЭТ, задание и программу проведения одноименной лабораторной работы по разделу «Системы регулирования электроприводов постоянного тока» дисциплины «Наладка и диагностика автоматизированного электропривода».

Для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы».

УДК 662.61(075.8)
ББК 31.291я73

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П.О. Сухого», 2006

Введение

Сегодня среди комплектных тиристорных электроприводов отечественного производства можно встретить следующие серии: ЭПУ, БТУ, ЭТУ, ЭТ. Несмотря на различные названия, все указанные электроприводы построены примерно по одной и той же принципиальной схеме. Таким образом, чтобы получить представление о функционировании данной группы электроприводов, достаточно рассмотреть устройство, принцип действия и особенности наладки приводов какой-либо одной серии.

Наладка систем регулирования большинства электроприводов постоянного тока подразумевает выполнения ряда стандартных операций. Однако, чтобы четко представлять последствия действий, выполняемых в ходе наладочных работ необходимо прежде всего подробно ознакомиться с устройством, принципом действия и рекомендациями по эксплуатации конкретного электропривода.

Настоящее методическое пособие на примере комплектного тиристорного электропривода ЭТУ2-2...Д рассматривает устройство, принцип действия и методику проведения наладочных работ электроприводов серий ЭПУ, БТУ, ЭТУ, ЭТ. При работе с пособием рекомендуется пользоваться набором оригинальных принципиальных схем, прилагаемым к техническому описанию и инструкции по эксплуатации рассматриваемых электроприводов.



1. Цель работы

1. Подробное изучение устройства и принципа действия типовой системы регулирования комплектных тиристорных электроприводов типа ЭПУ, БТУ, ЭТУ, ЭТ.

2. Изучение типовой методики проведения работ по наладке систем регулирования комплектных тиристорных электроприводов постоянного тока.

2. Указания мер безопасности

1. К выполнению практической части лабораторной работы допускаются студенты, прошедшие специальный технический инструктаж и изучившие техническое описание и инструкцию по эксплуатации.

2. Электродвигатель, блок управления, сглаживающий и сетевой реакторы, трансформатор, а также контрольно-измерительная аппаратура должны быть заземлены.

3. Категорически запрещается вставлять и вынимать панели управления под напряжением. Любые действия, связанные с внесением схемных изменений, должны производиться только после отключения электропривода от питающей сети.

4. Приступать к выполнению практической части лабораторной работы студенты могут только с разрешения преподавателя.

3. Техническое описание системы регулирования

Электроприводы *главного движения* предназначены для реверсивных и нереверсивных широкорегулируемых приводов с двухзонным и однозонным регулированием скорости; в том числе для механизмов главного движения станков с ЧПУ и других механизмов.

Электроприводы главного движения обеспечивают перегрузку по току до 2, и в зависимости от вида управления (по якорю, по полю двигателя, обратной связи и диапазона регулирования скорости двигателя) подразделяются на:

ЭТУ2...Д - двухзонный, с обратной связью по скорости двигателя и диапазоном регулирования скорости двигателя до 1000;

ЭТУ2...Е - однозонный (управление по якорю двигателя), с обратной связью по ЭДС, диапазоном регулирования скорости двигателя до 20;

ЭТУ2...М - однозонный, с обратной связью по скорости двигателя, диапазоном регулирования скорости двигателя до 1000.

Электроприводы *подачи* ЭТУ2-2...П предназначены для реверсивных быстродействующих широкорегулируемых приводов с однозонным регулированием скорости, в том числе для механизмов подачи станков с ЧПУ, промышленных манипуляторов и других механизмов. Данные электроприводы могут работать как внутренний контур в САУ с обратной связью (ОС) по положению с замыканием через систему ЧПУ. Обеспечивают перегрузку по моменту до 6 (для высокомоментных двигателей) и имеют диапазон регулирования до 10000 с обратной связью по скорости.

3.1. Система регулирования электропривода ЭТУ2-2...Д

3.1.1. Функциональная схема

ЭТУ2-2...Д - двухзонный электропривод с реверсом тока якоря и обратной связью по скорости, обеспечивает регулирование и стабилизацию скорости электродвигателя постоянного тока в диапазоне до 1000.

На рис.1 приведена функциональная схема двухзонного электропривода ЭТУ2-2...Д.

Электропривод состоит из блока преобразователя БС3402...Д, электродвигателя постоянного тока М с обмоткой возбуждения ОВМ и со встроенным тахогенератором ВР, блока предохранителей U1, коммутационного реактора L1, блока ввода U3, задатчика скорости R1.

Силовая часть блока преобразователя БС3402...Д включает тиристорный преобразователь якоря ТПЯ, выполненный по трехфазной мостовой реверсивной схеме и тиристорный преобразователь возбуждения ТПВ, выполненный по однофазной мостовой нереверсивной схеме.

Управление ТПЯ осуществляется от трехканальной системы управления, содержащей формирователи импульсов ФИ1...ФИ3.

С целью обеспечения высокого быстродействия и универсальности для реверсивного двухзонного электропривода принята схема с реверсом тока якоря и нереверсивным однофазным возбудителем. Система регулирования содержит канал регулирования напряжения якоря и канал регулирования потока и ЭДС двигателя.

Канал регулирования напряжения якоря выполнен по одноконтурной схеме с ПИ - регулятором скорости РС. Для улучшения динамических характеристик электропривода на вход УО введена отрицательная обратная связь по току якоря двигателя, уровень которой можно изменять сменным сопротивлением R97*.

Управляющий орган УО служит для согласования выхода системы регулирования со входом системы управления и позволяет переменными сопротивлениями R26, R39, R40 установить соответственно начальный, максимальный и минимальный углы отпираания тиристоров.

Переключение импульсов управления между комплектами вентилях «Вперед» и «Назад» ТПЯ производится блоком логического устройства ЛУ, которое работает в функции сигнала заданного направления тока (с выхода нелинейного звена НЗ) и сигнала, поступающего с датчика проводимости ДП вентилях.

Нелинейное звено и функциональный преобразователь ЭДС (ФПЭ) с резистором R39 образуют устройство линеаризации характеристик электропривода в режиме прерывистого тока.

Коэффициент передачи НЗ обратно пропорционален коэффициенту передачи ТПЯ. Коэффициенту передачи ФПЭ имеет зависимость $y = \arcsin E$ (E – относительная ЭДС двигателя) и компенсирует внутреннюю отрицательную обратную связь по ЭДС двигателя. С помощью устройства линеаризации осуществляется поддержание примерно одинакового коэффициента усиления линеаризованного таким образом преобразователя.

Для согласования реверсивного (двуполярного) сигнала на выходе НЗ с нереверсивной регулировочной характеристикой УО служит переключатель характеристик ПХ, управляемый логическим устройством ЛУ (ключи «В» и «Н»).

Канал регулирования потока и ЭДС двигателя содержит задатчик тока возбуждения – сопротивление R78, ПИ-регулятор тока возбуждения РТВ, ПИ-регулятор ЭДС РЭ с задатчиком ЭДС R82, формирователь импульсов возбуждения ФИВ. Элементы коррекции РТВ R85*, C24* и элементы коррекции РЭ R87*, C23* можно менять в процессе наладки.

Сигнал задания тока возбуждения ($i_{в.зад.}$) с переменного сопротивления R78 через резистор R80 поступает на регулятор тока возбуждения. Сигнал отрицательной обратной связи по току возбуждения снимают с датчика тока ДТВ через сопротивления R63 и R81.

Управляющий сигнал с выхода РТВ поступает на формирователь импульсов возбуждения, где происходит его сравнение с пилообразным опорным напряжением, поступающим с одного из каналов фазового управления цепи якоря (с ФИ1).

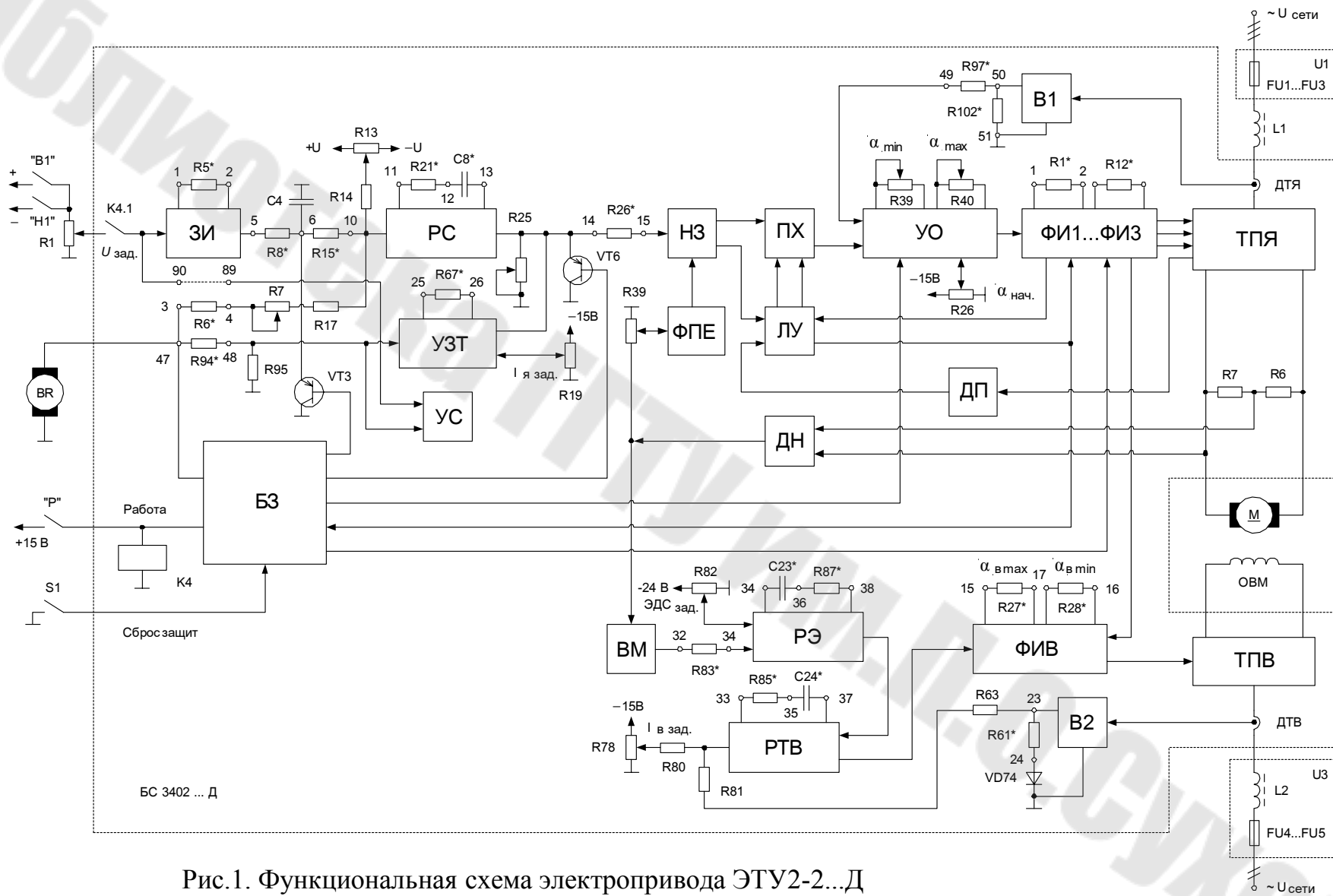


Рис.1. Функциональная схема электропривода ЭТУ2-2...Д

Сопротивлениями $R27^*$ и $R28^*$ устанавливают соответственно максимальный и минимальный углы отпирания тиристоров возбуждения.

На входе РЭ сравниваются сигнал задания ЭДС ($E_{зад.}$) и сигнал отрицательной обратной связи по напряжению двигателя, поступающий с выхода ДН через выпрямитель В. Электропривод выполнен по зависимому от напряжения на якоре принципу регулирования скорости. Сопротивлением $R79$ на входе РТВ задается величина минимального тока возбуждения двигателя.

Блок защиты БЗ осуществляет блокировку сигнала на выходе РС, задающего сигнала на входе РС, управляющих импульсов. Блокировка задающего сигнала на входе РС осуществляется транзистором VT3 при превышении скоростью значения n_{max} . Управление транзистором VT6, включенным на выходе РС, осуществляется в функции скорости и состояния контактов в цепи «Работа». При равенстве нулю скорости двигателя и отключении «Р» происходит закорачивание выхода РС через открытый транзистор VT6.

3.1.2. Задатчик интенсивности

Задающий сигнал $U_{зад.}$ с задатчика скорости R1 (рис.1) поступает на вход регулятора скорости РС через задатчик интенсивности ЗИ разгона электропривода. Задатчик интенсивности (рис.2) предназначен для формирования необходимого темпа нарастания сигнала задания скорости и позволяет регулировать длительность разгона и торможения электропривода в пределах 0,5...3 с.

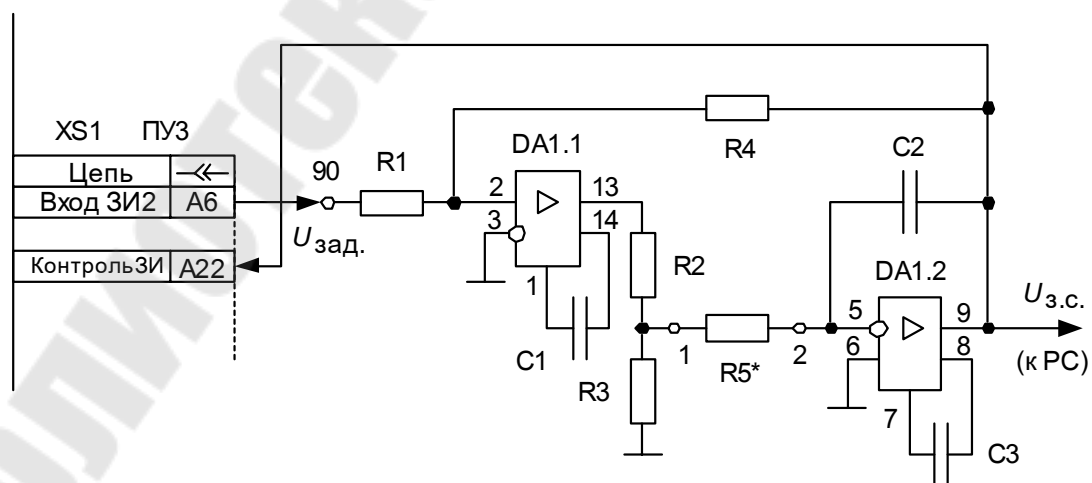


Рис.2. Принципиальная схема задатчика интенсивности

Задатчик интенсивности выполнен на двух операционных усилителях DA1.1 и DA1.2, охваченных общей отрицательной обратной связью (сопротивление R4). При скачкообразном изменении задающего сигнала, поступающего через резистор R1 на прямой вход усилителя DA1.1, последний входит в насыщение. При этом напряжение задания скорости $U_{з.с.}$ на выходе 9 усилителя DA1.2, включенного по схеме интегратора, линейно изменяется в соответствии с выражением

$$U_{з.с.} = \frac{U_{нас. DA1.1} \cdot \frac{R3}{R2 + R3}}{R5^* \cdot C2} \cdot t, \quad (1)$$

где $U_{нас. DA1.1}$ - напряжение насыщения компаратора DA1.1;

t - время, в течении которого напряжение $U_{з.с.}$ достигнет величины напряжения $U_{зад.}$

Как видно из (1) скорость нарастания напряжения $U_{з.с.}$ определяется емкостью конденсатора C2 и величиной сменного сопротивления $R5^*$, которое подбирается при наладке.

При равных величинах R1 и R4 коэффициент передачи по напряжению ЗИ равен 1. Следовательно, когда напряжение $U_{з.с.}$ на выходе ЗИ достигнет величины напряжения $U_{зад.}$ на его входе, усилитель DA1.1 выйдет из насыщения, обратная связь через сопротивление R4 замкнется и, далее будет поддерживаться равенство $U_{з.с.} = U_{зад.}$

В линейном режиме работы для входных цепей регулятора скорости можно записать

$$\frac{U_{з.с.}}{R8^* + R15^*} \approx \frac{U_{о.с.}}{R6^* + R7 + R17} = \frac{\omega \cdot k_{д.с.}}{R6^* + R7 + R17}, \quad (2)$$

где $U_{о.с.}$ - напряжение на выходе датчика скорости;

ω - угловая скорость вращения вала двигателя;

$k_{д.с.}$ - коэффициент передачи датчика скорости.

Продифференцировав левые и правые части (1) и (2) и приравняв в полученных выражениях производные сигнала задания скорости $dU_{з.с.}/dt$ получим

$$\frac{U_{нас. DA1.1} \cdot \frac{R3}{R2 + R3}}{R5^* \cdot C2} = \frac{k_{д.с.} \cdot (R8^* + R15^*)}{R6^* + R7 + R17} \cdot \frac{d\omega}{dt}.$$

Задаваясь величиной необходимого ускорения $d\omega/dt$ при разгоне привода, а также величинами сопротивлений и емкостью конденсатора $C2$, рассчитывают величину сопротивления $R5^*$.

Ускорение при разгоне и торможении двигателя должно быть выбрано так, чтобы при известном характере зависимости момента нагрузки M_c от скорости якорный ток $I_{я}$, определенный из выражения

$$c \cdot \Phi \cdot I_{я} - M_c = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt},$$

где c - конструктивная постоянная двигателя;

Φ - магнитный поток;

J_{Σ} - суммарный, приведенный к валу двигателя, момент инерции механизма, не превышал допустимого значения.

Вместо задающего сопротивления $R1$ вход задатчика интенсивности может подключаться к аналоговому выходу системы с ЧПУ.

3.1.3. Регулятор скорости

Пропорционально-интегрирующий регулятор скорости РС (рис.3) выполнен на операционном усилителе DA2. На входе регулятора скорости суммируются сигнал задания скорости $U_{з.с.}$, поступающий с задатчика интенсивности через сопротивления $R8^*$, $R15^*$, и сигнал отрицательной обратной связи по скорости, поступающий с тахогенератора через резисторы $R6^*$, $R7$, $R17$.

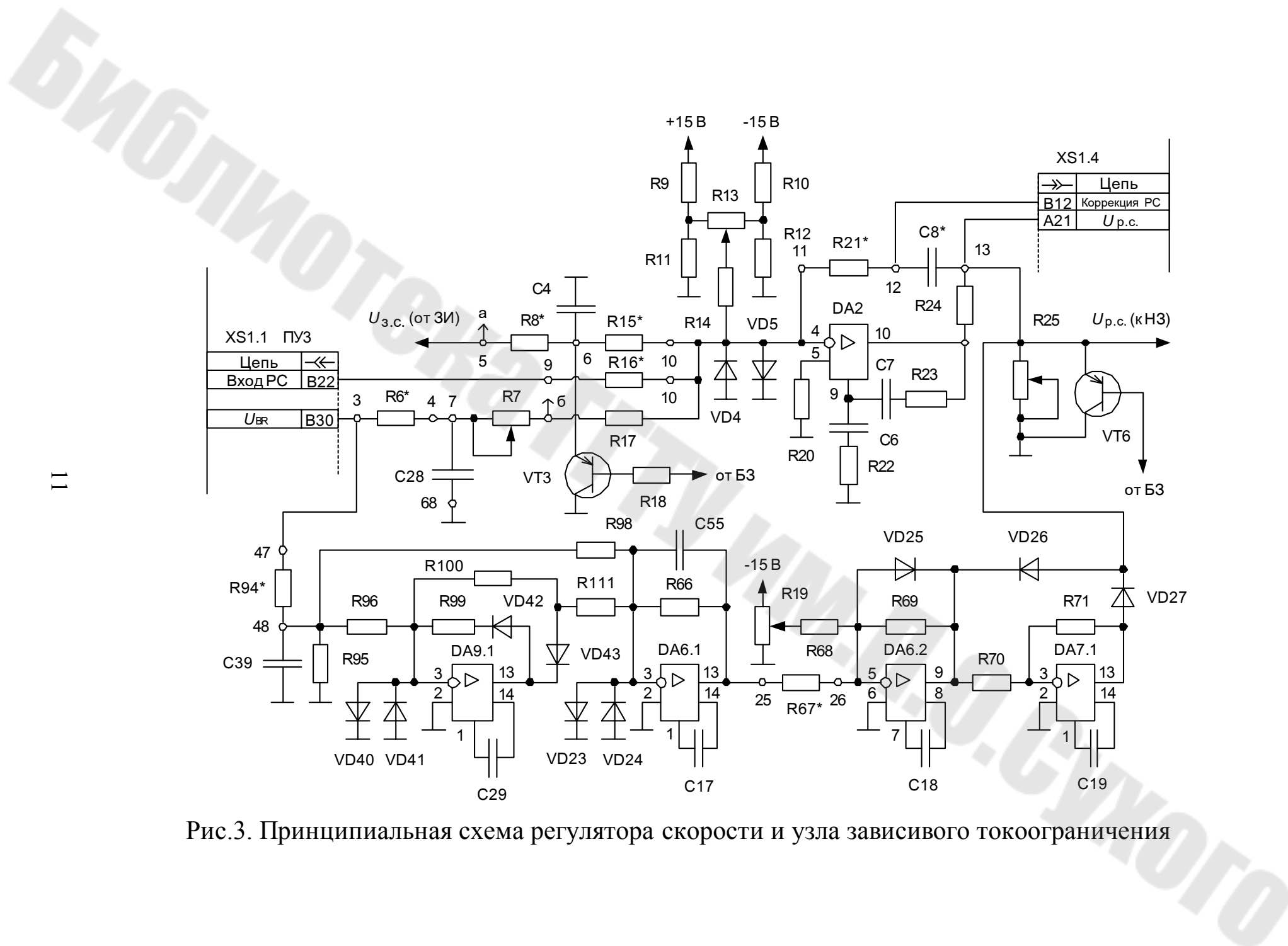
Уровень сигнала подбирается при наладке привода сменными сопротивлениями $R8^*$, $R15^*$, причем по величине сопротивления целесообразно иметь равными.

При работе регулятора скорости в линейном режиме (не насыщен) напряжение в точке 13 ($U_{п.с.}$) изменяется в соответствии с выражением

$$U_{п.с.} = \left(\frac{U_{з.с.}}{R8^* + R15^*} - \frac{\omega \cdot k_{д.с.}}{R6^* + R7 + R17} \right) \cdot \frac{R21^* \cdot C8^* \cdot p + 1}{C8^* \cdot p} \text{ или}$$

$$U_{п.с.} = \left(U_{з.с.} - \frac{\omega \cdot k_{д.с.} \cdot (R8^* + R15^*)}{R6^* + R7 + R17} \right) \cdot \frac{R21^* \cdot C8^* \cdot p + 1}{(R8^* + R15^*) \cdot C8^* \cdot p} =$$

$$= (U_{з.с.} - \omega \cdot k_{о.с.}) \cdot W_{п.с.}$$



11

Рис.3. Принципиальная схема регулятора скорости и узла независимого токоограничения

откуда видно, что передаточная функция РС имеет вид

$$W_{p.c.}(p) = \frac{R21^* \cdot C8^* \cdot p + 1}{(R8^* + R15^*) \cdot C8^* \cdot p},$$

а величина коэффициента передачи канала обратной связи по скорости определяется как

$$k_{o.c.} = \frac{k_{д.с.} \cdot (R8^* + R15^*)}{R6^* + R7 + R17}.$$

Таким образом, необходимая величина $k_{o.c.}$ устанавливается сменным резистором $R6^*$ (грубо) и переменным сопротивлением $R7$ (точно).

Для возможного изменения параметров коррекции регулятора скорости элементы $R21^*$, $C8^*$ установлены на лепестках. Вынесение точек «Коррекция РС» и « $U_{p.c.}$ » на разъем блока дает возможность дистанционного изменения коррекции регулятора скорости.

С помощью переменного сопротивлением $R13$ обеспечивается компенсация напряжения смещения операционного усилителя DA2 и, как следствие, установка нулевой скорости при нулевом значении сигнала задания $U_{з.с.}$ и разблокированном выходе РС.

Включенные встречно-параллельно диоды VD4 и VD5 защищают вход РС от перенапряжения.

РС-цепочки R23-C7 и R22-C6 являются элементами коррекции АЧХ операционного усилителя DA2.

Сопротивление R20 введено для уменьшения изменения выходного напряжения РС под действием временных или температурных колебаний входных токов.

Сопротивление R24 ограничивает величину выходного тока усилителя DA2.

3.1.4. Ограничение тока якоря

В переходных режимах пуска и торможения, когда имеет место скачкообразное изменение напряжения задания скорости, в виду наличия момента инерции двигателя, напряжение обратной связи по скорости в течении некоторого времени будет существенно отличаться-

ся от напряжения задания. Следствием этого станет относительно высокое значение входного дифференциального напряжения регулятора скорости, и он окажется в режиме насыщения. Контур стабилизации скорости при этом окажется разомкнутым, и привод перейдет в режим стабилизации тока якоря.

Поскольку $U_{p.c.}$ является задающим сигналом для контура тока, то максимальное значение тока якоря $I_{я.max}$ в режиме его стабилизации определяется величиной напряжения насыщения РС. Для регулировки уставки ограничения тока якоря, при работе привода в первой зоне, предусмотрено переменное сопротивление R25, которое изменяет величину напряжения насыщения РС. При этом сопротивление R25 никак не влияет на передаточную функцию РС в линейном режиме его работы.

Ограничение максимально допустимого тока также может выполняться от внешнего устройства через контакт « $U_{p.c.}$ » разъема блока.

3.1.5. Узел зависимого токоограничения

Узел зависимого токоограничения УЗТ (см. рис.3) осуществляет изменение уставки токоограничения в зависимости от скорости вращения вала двигателя. Это необходимо для улучшения коммутации двигателя в режиме ослабления поля. Принцип действия УЗТ основан на ограничении (по модулю) выходного напряжения регулятора скорости. Узел выполнен на операционных усилителях DA6.1, DA6.2, DA7.1, DA9.1.

Реверсивный сигнал U_{BR} , пропорциональный скорости вращения вала двигателя, через делитель R94*, R95 поступает на вход прецизионного двухполупериодного выпрямителя, выполненного на микросхемах DA9.1, DA6.1. Положительный сигнал с выхода DA6.1 через сопротивление R67* поступает на вход усилителя DA6.2.

Отрицательное напряжение смещения, подаваемое на вход DA6.2 через сопротивление R68 с потенциометра R19, определяет максимальное значение напряжения на выходе УЗТ и максимальную уставку токоограничения при постоянном потоке $\Phi = const$ и при полностью введенном сопротивлении R25.

На инвертирующем входе усилителя DA6.2 происходит сложение отрицательного напряжения смещения, поступающего через сопротивление R68 с положительным напряжением, поступающим с выпрямителя через сопротивление R67*. По мере увеличения скоро-

сти вращения вала двигателя положительное напряжение на выходе 9 DA6.2 уменьшается, а отрицательное напряжение на выходе 13 DA7.1 увеличивается (уменьшается по модулю).

Поскольку потенциал катода диода VD26 становится меньше, а потенциал анода диода VD27 возрастает, то указанные диоды начнут отпираться при более низких значениях напряжения на выходе регулятора скорости. Например, если потенциал на выходе РС будет иметь положительную полярность и превысит примерно на 0,7В величину потенциала на катоде VD26, последний откроется и напряжение на выходе регулятора скорости будет ограничено напряжением поступающим с выхода 9 DA6.2. При этом диод VD27 останется закрытым.

Таким образом, величина сменного сопротивления $R67^*$ определяет минимальное напряжение УЗТ при скорости $n > n_{НОМ}$ и $\Phi = var$.

3.1.6. Узел соответствия

Узел соответствия предназначен для выявления соответствия скорости вращения вала двигателя заданному значению. Узел выполнен на операционных усилителях DA5.1, DA5.2 и транзисторе VT18 (рис.4), а также реле К3 платы ПУ1.

На вход усилителя DA5.1 поступают два сигнала: сигнал задания скорости вращения и сигнал обратной связи по скорости.

Сигнал задания поступает со входа задатчика R1, через контакт А6 разъема XS1.1 платы ПУ3 и установленную на этой плате переключку между точками 90 и 89. Нормированный сигнал обратной связи по скорости поступает с делителя $R94^*$, R95.

При отсутствии задающего сигнала в приводе (скорость вращения вала двигателя равна нулю) транзистор VT18 закрыт положительным напряжением, поступающим на его базу с выпрямителя, выполненного на усилителе DA5.2.

При подаче сигнала задания схема не изменяет своего состояния до момента достижения приводом скорости вращения, соответствующей заданию. При достижении скоростью заданного значения сигнал на выходе выпрямителя DA5.2 снижается до нуля и транзистор VT18 открывается. При этом срабатывает реле К3, замыкая контакт, управляющий приводом подачи.

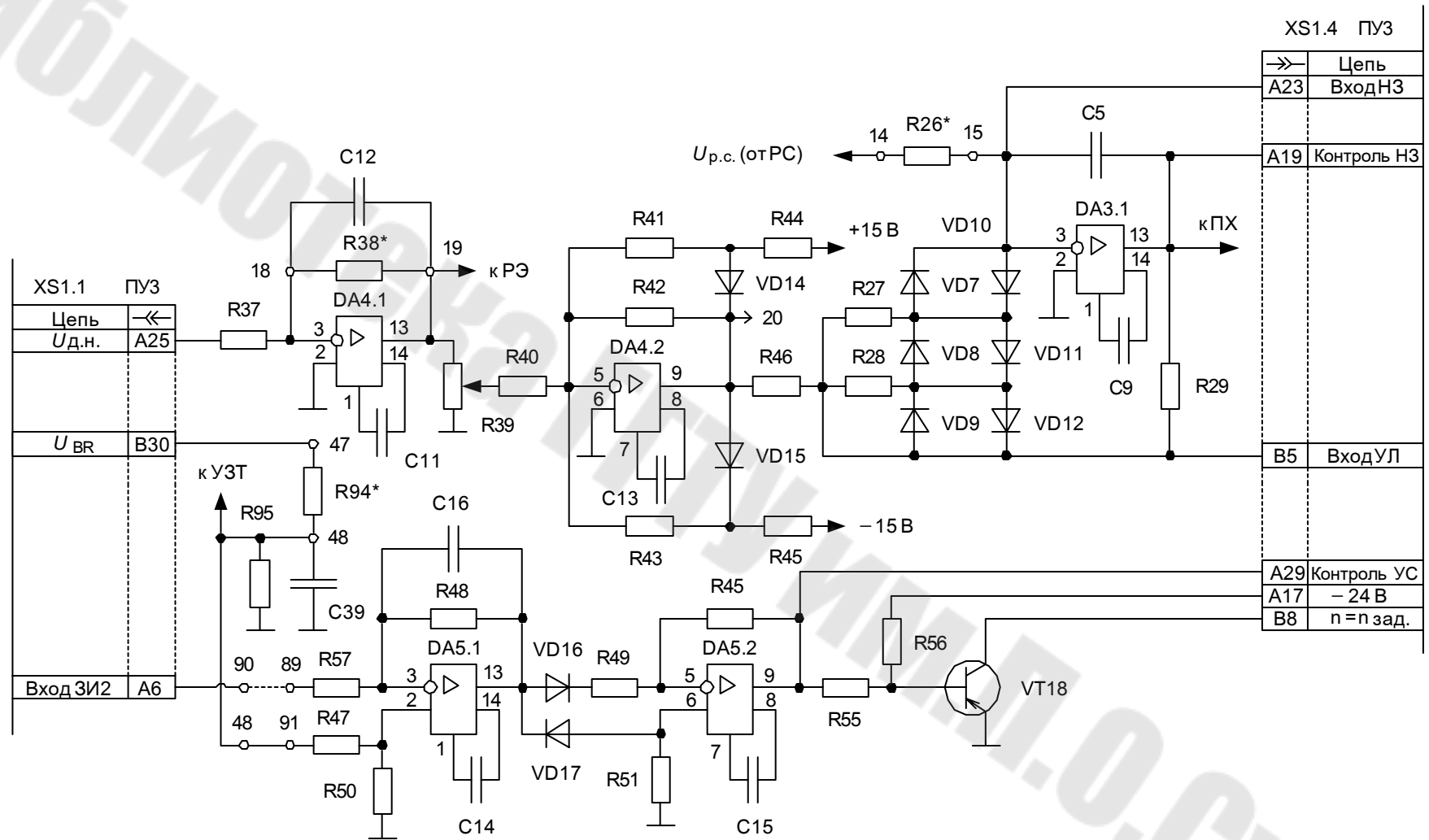


Рис.4. Принципиальная схема функционального преобразователя ЭДС, нелинейного звена и узла соответствия

3.1.7. Функциональный преобразователь ЭДС

В [6] показано, что суммарное управляющее напряжение U_y на входе системы управления можно считать состоящим из двух частей $U_y = U_e + U_i$.

Первая составляющая U_e напряжения управления обеспечивает ЭДС преобразователя, равную ЭДС двигателя. Вторая составляющая U_i - обеспечивает дополнительную ЭДС преобразователя, необходимую для компенсации падения напряжения в якорной цепи от протекающего по ней тока.

Составляющая U_e вводится на вход системы управления в виде положительной обратной связи от отдельного источника сигнала. Для компенсации нелинейности управляемого выпрямителя $u_d = f(\alpha)$ необходима арксинусная зависимость сигнала U_e от ЭДС $E_{я}$ двигателя, которая для режима непрерывного тока преобразователя может быть определена как

$$U_e = \frac{U_{оп. max}}{\pi} \cdot \arcsin \frac{E_{я}}{E_{до}},$$

где $U_{оп. max}$ - размах «пилы» опорного напряжения системы управления;

$E_{я}$ - величина ЭДС преобразователя, равная ЭДС двигателя;

$E_{до}$ - максимальное значение выпрямленной ЭДС преобразователя.

Для формирования такой зависимости используется функциональный преобразователь ЭДС, имеющий арксинусную передаточную характеристику. Преобразователь выполнен на операционном усилителе DA4.2 (см. рис.4), охваченном нелинейной обратной связью, аппроксимирующей арксинусную зависимость U_e от ЭДС двигателя ломаной линией с одной точкой излома для каждой полярности сигнала. Для положительной полярности точка излома определяется соотношением сопротивлений R41 и R44, а для отрицательной полярности – R43 и R45.

Сигнал на вход ФПЭ поступает с усилителя DA4.1, который является инвертором. Конденсатор C12 в обратной связи выполняет функцию фильтра низких частот и на величину коэффициента передачи усилителя в пределах полосы пропускания практически не влияет.

Величина сигнала U_e выставляется с помощью сопротивления R39 таким образом, чтобы среднее значение выходного напряжения регулятора скорости $U_{p.c.}$ при номинальной скорости двигателя на холостом ходу, было близким к нулю. При такой настройке сигнал $U_{p.c.}$ становится пропорциональным только току якоря двигателя. Поэтому ограничение уровня сигнала $U_{p.c.}$ с помощью сопротивления R25 обеспечивает ограничение максимальной величины составляющей выпрямленного напряжения $U_d - E_{я} = I_d \cdot R_{я.ц.}$, которая определяет ток якоря двигателя. Таким образом осуществляется ограничение максимально возможного тока якоря двигателя.

Проверка правильности регулировки сигнала U_e (сопротивлением R39) дополнительно контролируется по диаграмме тока якоря при пуске (реверсе) двигателя. При правильной настройке, когда сигнал U_e компенсирует действие внутренней отрицательной обратной связи по ЭДС двигателя, форма диаграммы тока близка к прямоугольной. При недокомпенсации (U_e мало) по мере возрастания скорости в процессе разгона двигателя ток якоря уменьшается; при перекомпенсации (U_e велико) по мере разгона пусковой ток возрастает.

Функциональный преобразователь ЭДС подключен через развязку ДН (см. рис.1) к датчику напряжения R6, R7 якорю двигателя. Это обусловлено тем, что в двухзонных приводах (в отличие от однозонных) величина ЭДС зависит как от скорости, так и от потока двигателя. В однозонном же приводе при $\Phi = \text{const}$ величина ЭДС пропорциональна напряжению тахогенератора. Следует заметить, что более строго на вход ФПЭ следовало бы подать сигнал ЭДС, например, с выхода тахометрического моста. Однако, с учетом обратной связи по току якоря, эквивалентный сигнал на входе системы управления содержит составляющую, пропорциональную ЭДС. Такое решение упрощает схему.

3.1.8. Нелинейное звено

Нелинейное звено выполнено на усилителе DA3.1 с нелинейной обратной связью на диодах VD7 – VD12 и резисторах R27, R28 и R29. Через сопротивление R26* НЗ подключается к выходу регулятора скорости, а через R46 - к выходу ФПЭ. Нелинейное звено имеет характеристику обратную регулировочной характеристике управляемо-

го выпрямителя в режиме прерывистого тока. Это обеспечивает постоянный коэффициент передачи преобразователя как в режиме прерывистого, так и в режиме непрерывного тока.

3.1.9. Регулятор тока возбуждения

Регулятор тока возбуждения РТВ предназначен для задания и поддержания на заданном уровне (стабилизации) тока возбуждения двигателя. Пропорционально-интегрирующий регулятор тока возбуждения выполнен на операционном усилителе DA8.2 (рис.5). Задание тока возбуждения осуществляется резистором R78. Сигнал обратной связи по току возбуждения поступает через контакты B29 и A31 разъема XS1.1 панели ПУЗ на выпрямительный мост VD22 и далее через последовательно включенные сопротивления R63 и R81 на вход регулятора. Для возможного изменения параметров коррекции регулятора элементы обратной связи R85*, C24* установлены на лепестках.

В качестве датчика тока ДТВ (см. рис.1) использован трансформатор тока Т4, включенный в разрыв одного из проводов сети переменного напряжения, питающего управляемый возбудитель ТПВ.

Сопротивлением R79 производится установка минимального потока возбуждения при отсутствии задающего сигнала на входе DA8.2.

Параллельно выходу РТВ включен регулятор ЭДС, выполненный на транзисторе VT32 и относящихся к нему элементах. Регулятор ЭДС обеспечивает постоянство ЭДС двигателя при регулировании скорости выше номинальной.

Задание ЭДС устанавливается с помощью сопротивления R82. Через сопротивление R83* на базу транзистора поступает сигнал с выпрямителя, выполненного на операционных усилителях DA7.2 и DA8.1. Задатчик ЭДС настраивается таким образом, чтобы при номинальной скорости двигателя транзистор VT32 начал открываться. Это ведет к снижению напряжения на выходе РТВ и, следовательно, к уменьшению тока обмотки возбуждения двигателя. С увеличением скорости происходит дальнейшее уменьшение тока возбуждения, таким образом, ЭДС двигателя поддерживается постоянной.

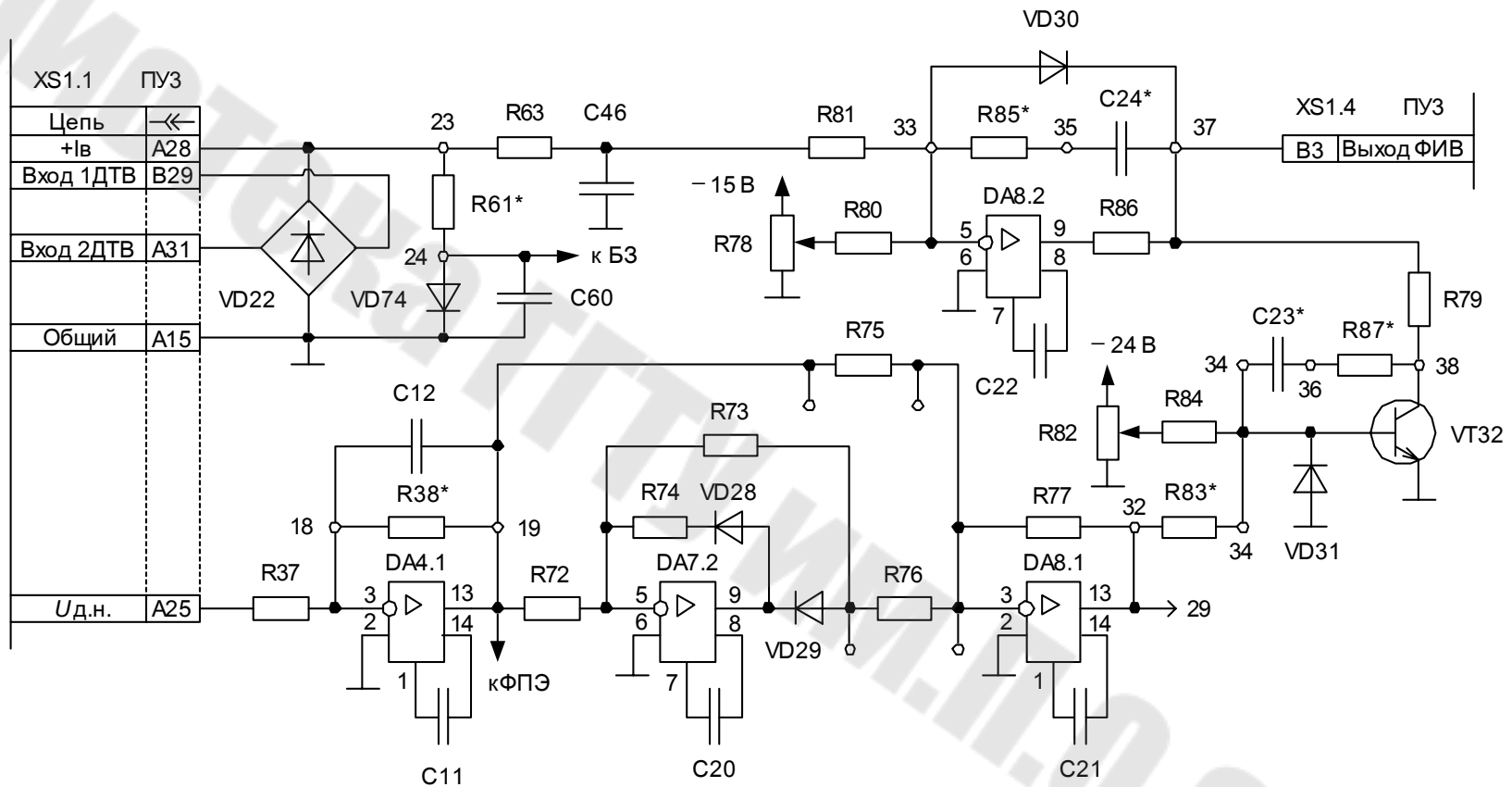


Рис.5. Принципиальная схема канала регулирования тока возбуждения

3.2. Расчет параметров и настройка регуляторов электропривода ЭТУ2-2...Д¹

3.2.1. Расчет параметров элементов входных цепей регулятора скорости

По известной крутизне тахогенератора и максимальной скорости вращения n_{\max} , (об/мин), двигателя определяют максимальное напряжение тахогенератора

$$U_{\text{т.г. max}} = S_{\text{т.г.}} \cdot n_{\max}, \text{ (В)},$$

где $S_{\text{т.г.}}$ - крутизна тахогенератора, (В/(об/мин)).

Суммарное сопротивление в цепи тахогенератора (см. рис.3)

$$R_{\Sigma \text{т.г.}} = R6^* + R7 + R17 = \frac{U_{\text{т.г. max}}}{U_{\text{з.с. max}}} \cdot (R8^* + R15^*), \text{ (кОм)},$$

где $U_{\text{з.с. max}}$ - значение сигнала задания скорости, соответствующее максимальной скорости двигателя.

Рекомендованные значения: $U_{\text{з.с. max}} = 10 \text{ В}$; $R8^* = R15^* = 3,3 \text{ кОм}$.

Сопротивление резистора $R6^*$

$$R6^* = R_{\Sigma \text{т.г.}} - \frac{1}{2} \cdot R7 - R17, \text{ (кОм)},$$

где величина $1/2 \cdot R7$ принята из-за необходимости обеспечить запас регулирования коэффициента передачи обратной связи по скорости, а величина сопротивления $R17 = 2,7 \text{ кОм}$.

3.2.2. Расчет параметров якорной цепи привода

Номинальный фазный ток трансформатора

$$I_{\text{ф. ном.}} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{2\text{л}}}, \text{ (А)},$$

где S - полная мощность трансформатора, (В · А);

$U_{2\text{л}}$ - линейное напряжение вторичной обмотки трансформатора, (В).

¹ Приведена методика расчета, изложенная в техническом описании электроприводов ЭТУ2-2

Активное сопротивление фазы обмотки трансформатора, определенное по результатам опыта короткого замыкания

$$R_{\phi} = \frac{P_{к.з.}}{3 \cdot I_{к.з.}^2}, \text{ (Ом)},$$

где $P_{к.з.}$ - мощность короткого замыкания трансформатора, (Вт);

$I_{к.з.} = I_{\phi.ном.}$ - ток короткого замыкания трансформатора, (А).

Для электроприводов, выполненных по реакторной схеме, фазное сопротивление R_{ϕ} равно сопротивлению реактора.

Полное сопротивление фазы обмотки трансформатора

$$Z_{\phi} = \frac{U_{2л} \cdot u_{к, \%}}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{\phi.ном.}}, \text{ (Ом)},$$

где $u_{к, \%}$ - напряжение короткого замыкания (для трансформаторов ТС и ТСТ находится в пределах 2...6% от номинального).

Индуктивность фазы обмотки трансформатора

$$L_{\phi} = \frac{\sqrt{Z_{\phi}^2 - R_{\phi}^2}}{\omega_0}, \text{ (Гн)},$$

где $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_c$ - круговая частота напряжения сети.

Для электроприводов, выполненных по реакторной схеме фазная индуктивность L_{ϕ} равна индуктивности реактора.

Сопротивление якорной цепи привода²

$$R_{я.ц.} = R_{я.д.} + R_{д.п.} + R_{др.} + 2 \cdot R_{\phi} + \frac{m \cdot \omega_0 \cdot L_{\phi}}{\pi}$$

где $R_{я.д.}$ и $R_{д.п.}$ - соответственно сопротивления якорной обмотки и обмотки добавочных полюсов (из справочных данных на двигатель);

² Здесь и далее все активные сопротивления должны быть приведены к рабочей температуре.

$R_{др.}$ - сопротивление дросселя в цепи выпрямленного тока (в приводах главного движения дроссель отсутствует).

m - число фаз эквивалентной схемы замещения преобразователя (пульсность).

Индуктивность якорной цепи привода

$$L_{я.ц.} = L_{дв.} + L_{др.} + 2 \cdot L_{ф.}$$

где $L_{др.}$ - индуктивность дросселя в цепи выпрямленного тока (в приводах главного движения дроссель отсутствует).

3.2.3. Расчет постоянных времени и коэффициентов передачи преобразователя

Номинальная угловая скорость вращения вала двигателя

$$\omega_{ном.} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{ном.}}{60}, (с^{-1}).$$

Произведение конструктивной постоянной времени двигателя на номинальный поток возбуждения

$$с \cdot \Phi_{ном.} = \frac{(U_{я.ном.} - I_{я.ном.} \cdot (R_{я.д.} + R_{д.п.}))}{\omega_{ном.}}, (В \cdot с),$$

где $U_{я.ном.}$ и $I_{я.ном.}$ - номинальные значения напряжения и тока якоря двигателя.

Суммарный приведенный к валу двигателя момент инерции привода

$$J_{\Sigma} = J_{дв.} + J_{мех.}, (кг \cdot м^2),$$

где $J_{дв.}$ - момент инерции якоря двигателя;

$J_{мех.}$ - приведенный к валу двигателя момент инерции механизма.

Электромеханическая постоянная времени привода

$$T_M = \frac{R_{я.ц.} \cdot J_{\Sigma}}{(с \cdot \Phi_{ном.})^2}, (с).$$

Электромагнитная постоянная времени якорной цепи привода

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я.ц.}}}{R_{\text{я.ц.}}}, \text{ (с)},$$

Коэффициент передачи нелинейного звена

$$k_{\text{н.з.}} = \frac{R_{29}}{R_{26}^*} = \frac{3,3 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} = 0,33.$$

ЭДС якоря двигателя при номинальной скорости

$$E_{\text{я. ном.}} = 0,9 \cdot U_{\text{я. ном.}}, \text{ (В)}.$$

Коэффициент передачи канала обратной связи, равный отношению напряжения тахогенератора к ЭДС двигателя, для заданной скорости, например, номинальной

$$k_{\text{о.с.}}^* = \frac{S_{\text{т.г.}} \cdot n_{\text{ном.}}}{E_{\text{я. ном.}}}.$$

Максимальное значение выпрямленной ЭДС преобразователя, собранного по трехфазной мостовой схеме

$$E_{\text{до}} = 2,34 \cdot U_{2\phi}, \text{ (В)},$$

где $U_{2\phi}$ - действующее значение фазного напряжения, питающего преобразователь.

Динамический коэффициент передачи тиристорного преобразователя в режиме непрерывного тока (для наилучшего режима)

$$k_{\text{т.п.}} = \left. \frac{\partial e_d}{\partial u_y} \right|_{u_y = U_{\text{у.нач.}}} = E_{\text{до}} \cdot \frac{\pi}{U_{\text{оп.мах}}} \cdot \cos \left(\frac{\pi \cdot U_{\text{у.нач.}}}{U_{\text{оп.мах}}} \right),$$

где $U_{\text{оп.мах}}$ - размах пилообразного опорного напряжения, (В), рекомендованное значение (8...9) В;

$U_{у.нач.}$ - начальное значение напряжения управления, (В), принимается равным 0В, что соответствует $\alpha_{нач.} = 90^\circ$.

Коэффициент передачи управляющего органа

$$k_{у.о.} = \frac{R35}{R30} = \frac{27 \cdot 10^3}{27 \cdot 10^3} = 1,$$

где R35 и R30 – сопротивления, установленные на плате ПУ1.

3.2.4. Расчет параметров элементов цепей обратных связей регуляторов

Величина сопротивления в цепи обратной связи регулятора скорости

$$R21^* = \frac{1,65 \cdot T_\theta \cdot T_M \cdot \omega_p^2 \cdot R_{\Sigma Т.Г.}}{k_{н.з.} \cdot k_{о.с.}^* \cdot k_{т.п.} \cdot k_{у.о.}}, \text{ (кОм)},$$

где ω_p - резонансная частота привода (граница полосы пропускания), рекомендуется принимать $\omega_p = 100 \dots 130 \text{ с}^{-1}$.

Емкость конденсатора в цепи обратной связи регулятора скорости

$$C8^* = \frac{T_{р.с.}}{R21^*} = \frac{2 \cdot D \cdot 10^3}{R21^* \cdot \omega_p}, \text{ (мкФ)},$$

где $T_{р.с.}$ - постоянная времени регулятора скорости, (с);

$$D = \frac{n_{max}}{n_{ном.}} - \text{диапазон изменения потока.}$$

Сопротивление в цепи обратной связи по току (см. рис.1)

$$R97^* = \frac{27 \cdot k_{т.п.} \cdot k_{у.о.} \cdot k_{д.т.}}{(R_{я.д.} + R_{д.п.} + R_{др.}) \cdot (1,43 \cdot \omega_p \cdot T_\theta + 1)}, \text{ (кОм)},$$

где $k_{д.т.} = \frac{U_{д.т.}}{I_{я.ном.}}$ - коэффициент передачи датчика тока;

$U_{д.т.}$ - падение напряжения на сопротивлении R102*, при номинальном токе должно составлять 2...3 В.

Величина сопротивления R_{102}^* выбирается в зависимости от номинального тока привода: при токе 25 А – 100 Ом; 50 А – 47 Ом; 100 А – 24 Ом.

Следует учесть, что значения устанавливаемых элементов, полученные расчетным путем, не могут учесть таких факторов как разброс параметров трансформатора, двигателя, дросселя, механизма, соединительных проводов, контактов, отклонений от номинальных значений параметров элементов, установленных на платах, погрешностей при наладке и т.д. Поэтому более точным способом является экспериментальный.

3.2.5. Экспериментальное определение постоянных времени

Значение электромеханической постоянной времени T_M привода определяют по диаграммам скорости и тока. Для этого производят пуск двигателя на холостом ходу ($I_c \approx 0$) на заданную скорость с приблизительно прямоугольной диаграммой тока якоря.

Считая, что при таком пуске имеет место равноускоренное движение и переходя от момента к току двигателя, уравнение движения привода можно представить как

$$I_{\Pi} = I_{\text{я}} - I_c = \frac{J_{\Sigma}}{(c \cdot \Phi_{\text{НОМ.}})^2} \cdot \frac{E_{\text{я}}}{t_{\Pi}},$$

где I_{Π} - величина среднего значения пускового (динамического) тока;
 t_{Π} - время пуска до установившейся скорости.

Учитывая, что на холостом ходу напряжение якоря $U_{\text{я.0}}$ примерно равно ЭДС $E_{\text{я}}$ можно определить электромеханическую постоянную времени

$$T_M = \frac{I_{\Pi} \cdot R_{\text{н}} \cdot t_{\Pi}}{U_{\text{я.0}}}, \text{ (с)},$$

Для экспериментального определения величины сопротивления $R_{\text{н}}$ необходимо с помощью нагрузочного устройства создать номинальный ток двигателя, тогда

$$R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{я.0}} - U_{\text{я.}I_{\text{НОМ.}}}}{I_{\text{НОМ.}}}, \text{ (Ом)},$$

где $U_{\text{я.}I_{\text{НОМ.}}}$ - напряжение на якоре двигателя при номинальном токе якоря.

Электромагнитную постоянную времени $T_{\text{я}}$ находят, создав при помощи нагрузочного устройства двигателя гранично-непрерывный ток нагрузки с амплитудой I_m , тогда

$$T_{\text{я}} = \frac{0,19 \cdot U_{2\text{л}}}{\omega_0 \cdot I_m \cdot R_{\text{H}}}, \text{ (с)}.$$

Коэффициент обратной связи по току определяют как

$$k_{\text{о.с.}} = \frac{\Delta U_{\text{т.г.}}}{\Delta E_{\text{я}}} = \frac{U_{\text{т.г.}}}{0,9 \cdot U_{\text{я}}},$$

измеряя $U_{\text{т.г.}}$ и $U_{\text{я}}$ производится на холостом ходу двигателя для заданной скорости, например, максимальной.

По определенным экспериментально параметрам $T_{\text{м}}$, $T_{\text{я}}$, R_{H} , $k_{\text{о.с.}}$ рассчитывают величины $R21^*$, $C8^*$ и $R97^*$.

4. Порядок выполнения работы

1. Подать отдельным автоматом напряжения питания на систему управления и цепь возбуждения. При этом на плате управления ПУЗ должны загореться светодиоды: VD34 - «Система управления включена»; VD52 - « Σ »; VD70 - «Исчезновение силовой сети».

Проконтролировать ток возбудителя и, при необходимости, отрегулировать его сопротивлением R78 на плате ПУЗ.

2. Подать напряжение питания на силовую часть. При этом на плате ПУЗ должны погаснуть светодиоды VD52 и VD70.

Установить на выходе задатчика скорости сигнал $U_{\text{зад.}} = 0$.

3. Подать сигнал «Работа». При правильной полярности подключения тахогенератора скорость двигателя останется равной нулю. При неправильной полярности - скорость начнет возрастать до максимального значения. В последнем случае необходимо отключить привод и поменять полярность подключения тахогенератора.

4. Подключить потенциальный вход осциллографа к выходу датчика тока (контрольная точка 50), а корпусной вход - к общей точке 51 (см. рис.1) платы ПУЗ.

Зафиксировать на экране осциллографа наличие тока в якорной цепи двигателя. Если на осциллограмме тока якоря наблюдаются значительные выбросы, имеют место «рывки» двигателя, то необходимо

подстроить начальный угол отпирания тиристоров $\alpha_{\text{нач}}$ резистором R26 на плате ПУ1.

Осциллограмму тока привести в отчете.

5. Обеспечить максимальную скорость привода при максимальном задающем сигнале $U_{\text{зад.}} = 10\text{В}$ резисторами в цепи тахогенератора R6* и R7. При этом напряжение в контрольной точке 25 (УЗТ) должно составлять около 10В. При необходимости это значение корректируется сопротивлением R94.

Предварительно наладочным задатчиком скорости установить напряжение на якоре двигателя ориентировочно 150В для исполнения привода, рассчитанного на 230В или 350В – для исполнения на 460В. Контролируя ток якоря амперметром и по осциллографу осуществить реверс двигателя.

Сопротивлением R39 (ФПЭ) платы ПУ3 необходимо добиться близкой к прямоугольной формы тока якоря в режимах реверса при зашунтированном сопротивлении R5* (исключается влияние ЗИ).

Осциллограмму тока якоря двигателя при реверсе привести в отчете.

6. Установить по двигателю требуемый ток отсечки (для электродвигателей 4ПФ - $(1,5...2,0) \cdot I_{\text{я.ном.}}$) сопротивлением R25 платы ПУ3, контролируя сигнал с датчика тока якоря осциллографом в режиме реверса на скоростях, несколько меньших номинальной. Например, для исполнения, рассчитанного на 460В реверсировать двигатель при $U_{\text{я}} = 350\text{В}$.

Задатчиком скорости плавно разгонять двигатель. Для исполнения на 230В, при напряжении на якоре 220В должно начаться снижение тока возбуждения (переход во вторую зону регулирования).

Для исполнения на 460В снижение тока возбуждения должно начаться при 390...400В. При необходимости, отрегулировать переход во вторую зону сопротивлением R82 (РЭ) платы ПУ3. Скорость двигателя при этом будет близка к номинальной.

7. Разогнать двигатель до скорости примерно $2 \cdot n_{\text{ном.}}$ и, переключив осциллограф в точку 13, проконтролировать форму напряжения на выходе регулятора скорости РС в режиме реверса.

При необходимости, добиться снижения напряжения на выходе РС сопротивлением R19 платы ПУ3 (регулируется момент вступление УЗТ в работу).

Осциллограмму напряжения на выходе регулятора скорости привести в отчете.

8. Установить задатчик скорости в положение «0» и отрегулировать «настройку нуля» сопротивлением R13, добиваясь исключения самохода двигателя.

Снять шунтирующую перемычку с сопротивления R5* платы ПУЗ и установить требуемый темп разгона привода, подбирая величину сопротивления R5* в пределах до 470 кОм.

Параметры корректирующих элементов (C8*, R21*, R97*) подбираются из условий оптимизации переходных процессов электропривода как показано в п.3.2.4. При этом увеличение сопротивления R97* приводит к возрастанию токовой отсечки, и наоборот.

Увеличение сопротивления R21* до 100...200 кОм повышает быстродействие системы регулирования там, где требуется повышенное быстродействие главного привода.

При наличии в двигателе встроенного терморезистора перемычку 61-44 на плате ПУЗ следует снять.

5. Содержание отчета

В отчете необходимо привести наименование и цель работы, чертежи принципиальных схем наиболее значимых элементов системы регулирования, результаты расчета параметров элементов системы регулирования для выданного преподавателем варианта, осциллограммы сигналов, указанные в п.5 работы. Сделать выводы по работе.

6. Контрольные вопросы

1. Объяснить различие способов подключения функционального преобразователя ЭДС в однозонном и двухзонном вариантах исполнения приводов ЭТУ.

2. Как осуществляется ограничение тока якоря двигателя в режимах пуска, торможения и реверса?

3. Какой вид имеют передаточные характеристики функционального преобразователя ЭДС и нелинейного звена? Чем это объясняется?

4. Объяснить каким образом обеспечивается постоянство ускорения при использовании задатчика интенсивности.

5. Как обеспечить необходимый коэффициент передачи канала обратной связи за счет входных сопротивлений регулятора?

6. Пояснить назначение элементов обвязки регулятора скорости (по рис.3).

7. Объяснить необходимость применения узла зависимого токоограничения. Пояснить назначение сменных и подстроечных элементов УЗТ.

8. Чем объясняется наличие узла соответствия в приводе с индексом «Д» и отсутствие этого узла в приводе с индексом «П»?

9. Каким образом осуществляется регулирование тока возбуждения в первой и во второй зонах?

10. Чем определяется сопротивление якорной цепи привода?

11. Какие передаточные функции соответствуют узлам системы регулирования?

12. Как определить параметры элементов обратных связей регуляторов?

13. Пояснить принцип действия системы регулирования на примере пуска привода на максимальную скорость.

14. Объяснить, как произвести экспериментальное определение постоянных времени привода.

15. Как влияют величины сопротивлений R_{97}^* и R_{21}^* на работу привода? Почему?

16. Описать порядок операций при настройке системы регулирования.

17. Как влияет наличие положительной обратной связи по ЭДС (ФПЭ) на учет влияния внутренней обратной связи по ЭДС двигателя?

Литература

1. Электроприводы тиристорные унифицированные трехфазные типа ЭТУ2-2...Д УХЛ4 (04): Техническое описание и инструкция по эксплуатации ИГЕВ.654515.002 ТО.
2. Электроприводы тиристорные унифицированные трехфазные типа ЭТУ2-2...П УХЛ4 (04): Техническое описание и инструкция по эксплуатации ИГЕВ.654515.003 ТО.
3. Электроприводы тиристорные унифицированные трехфазные типа ЭПУ1-2...Д УХЛ4 (04): Техническое описание и инструкция по эксплуатации ИГЕВ.654515.004 ТО.
4. Устройство управления БТУ3001 и электроприводы: Техническое описание и инструкция по эксплуатации ОЛХ.463.276. ОБК.468.54. Издание 08.
5. Электроприводы комплектные типа ЭТУ3601Д: Техническое описание и инструкция по эксплуатации ИГЕВ.656442.027 ТО.
6. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. - Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Цель работы	4
2. Указания мер безопасности.....	4
3. Техническое описание системы регулирования	4
3.1. Система регулирования электропривода ЭТУ2-2...Д.....	5
3.1.1. Функциональная схема.....	5
3.1.2. Задатчик интенсивности.....	8
3.1.3. Регулятор скорости	10
3.1.4. Ограничение тока якоря	12
3.1.5. Узел зависимого токоограничения.....	13
3.1.6. Узел соответствия	14
3.1.7. Функциональный преобразователь ЭДС.....	16
3.1.8. Нелинейное звено.....	17
3.1.9. Регулятор тока возбуждения.....	18
3.2. Расчет параметров и настройка регуляторов электропривода ЭТУ2-2...Д	20
3.2.1. Расчет параметров элементов входных цепей регулятора скорости.....	20
3.2.2. Расчет параметров якорной цепи привода	20
3.2.3. Расчет постоянных времени и коэффициентов передачи преобразователя.....	22
3.2.4. Расчет параметров элементов цепей обратных связей регуляторов	24
3.2.5. Экспериментальное определение постоянных времени	25
4. Порядок выполнения работы	26
5. Содержание отчета.....	28
6. Контрольные вопросы	28
Литература	30

СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ КОМПЛЕКТНЫХ ТИРИСТОРНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТИПА ЭПУ, БТУ, ЭТУ, ЭТ

**Практическое пособие
по дисциплине «Наладка и диагностика
автоматизированного электропривода»
для студентов специальности 1-53 01 05
«Автоматизированные электроприводы»
дневной и заочной форм обучения**

Автор-составитель: **Савельев** Вадим Алексеевич

Подписано в печать 24.03.06.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Цифровая печать. Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 2,0.

Изд. № 19.

E-mail: ic@gstu.gomel.by

<http://www.gstu.gomel.by>

Отпечатано на МФУ XEROX WorkCentre 35 DADF
с макета оригинала авторского для внутреннего использования.
Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого».
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.