

Лекция 4

1. Основные принципы построения систем автоматического регулирования.
2. Структурные схемы непрерывного и дискретного регулирования преобразователей постоянного и переменного тока.

1) Рассмотрим классификацию систем автоматического управления (САУ) по некоторым основным признакам (рис. 14).

Один из важнейших признаков – однородность управляемых объектов в системе. Если в САУ можно включить объект лишь одного вида (например, локомотив), то такую систему называют **индивидуальной** (автономной), а для транспортных объектов – бортовой. Системы **сопряженного управления** применяют для совместного управления разнородными объектами, например, для управления движением локомотивов и работой железнодорожных станций по приему и отправлению поездов.

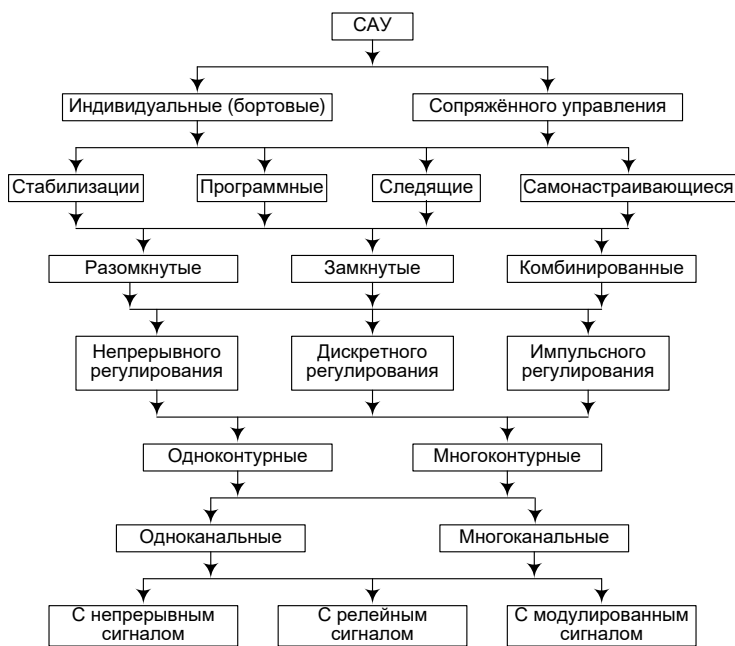


Рис. 14

Особую область применения имеют **следящие системы**, которые обеспечивают исключение (нейтрализацию) какого-либо случайного воздействия на процесс, протекающий в системе. На ЭПС они применяются, например, в системах задания или указания номера позиции группового переключателя.

Более совершенны **самонастраивающиеся**, или адаптивные системы, способные автоматически приспосабливаться к условиям работы и осуществлять автоматическую оптимизацию процессов.

В зависимости от принципа действия различают системы автоматики, работающие по разомкнутому, замкнутому или комбинированному циклу. Наибольшее распространение получили две последние разновидности автоматических систем.

По способу воздействия на объект регулирования системы автоматики подразделяют на три группы. К первой относят системы **плавного** (непрерывного) регулирования. При этом регулирующее воздействие изменяется во времени плавно и непрерывно (рис. 15а).

Возможно также периодическое воздействие САУ на объект регулирования, при котором возникают отклонения от зависимости $\mu_{cp}(t)$. При таком – **ступенчатом** регулировании (рис. 15б) предполагается, что за достаточно большой промежуток времени T среднее значение $\mu_{cp}(t) = \mu_a(t)$ и отклонения $\Delta(t)$ от регулируемого показателя $\mu_{cp}(t)$ взаимно компенсируются, т. е.

$$\int_0^T \Delta(t) dt = 0.$$

Все более широко применяют **импульсное** регулирование, при котором управляющее воздействие изменяется чередующимися

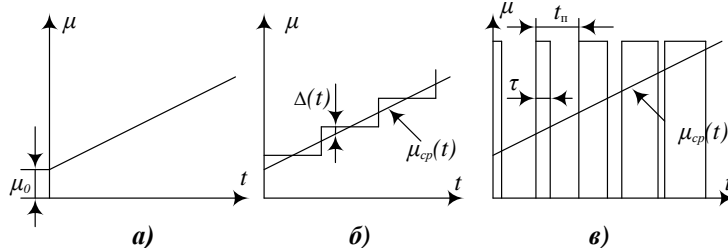


Рис. 15.

импульсами и паузами (рис. 15в), а его мгновенные значения $\mu(t)$ изменяются прерывисто в пределах $0 \leq \mu(t) \leq \mu_6$, (здесь μ_6 – наибольшее значение управляющего воздействия). Соответственно $\mu(t) \approx \mu_{cp}(t) = \mu_6 t / t_n$.

В зависимости от количества контуров регулирования рассмотренные САР могут быть одно- и многоконтурными. **Одноконтурные** САР имеют один контур регулирования одной регулируемой величины (рис. 16а), а **многоконтурные** — несколько контуров регулирования соответствующих регулируемых величин. Например, система регулирования с двумя независимыми контурами (рис. 16б) на ЭПС может выполнять регулирование токов якоря и возбуждения тягового двигателя независимого возбуждения (объект регулирования ОР). В таких САР реализуют селективную (избирательную) связь между контурами, которая устанавливает очередность их работы. Многоконтурная САР может иметь подчиненные контуры

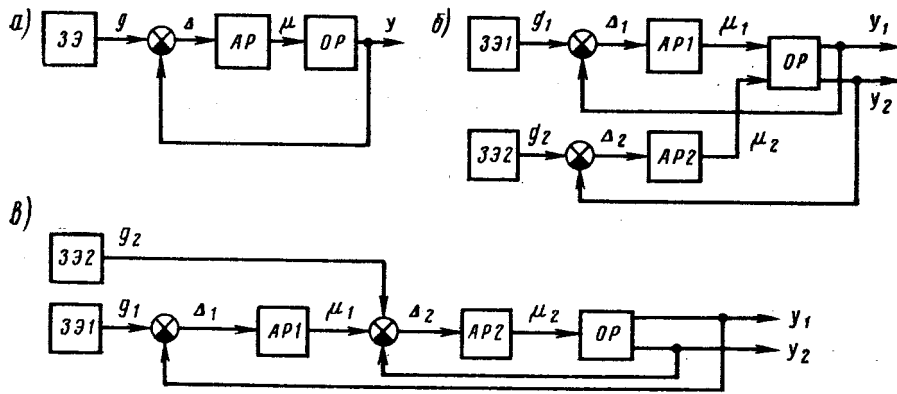


Рис. 16

(рис. 16в), например, внешний основной, а внутренний — вспомогательный. По такой схеме выполняют САР ЭПС с тяговыми двигателями последовательного возбуждения, у которых внешний контур регулирует скорость, а внутренний — ток якоря. При большом количестве контуров применяют, помимо рассмотренных, системы, включающие

как независимые, так и подчиненные контуры регулирования.

И наконец, в зависимости от количества каналов регулирования САР подразделяют на **одно-** и **многоканальные**. При этом под каналом регулирования понимают цепь воздействия на один объект регулирования.

При наличии нескольких цепей воздействия и (или) нескольких объектов САР будет многоканальной. На ЭПС всегда имеется несколько тяговых двигателей и на каждый из них можно воздействовать, изменяя напряжение на зажимах двигателя и пусковое сопротивление R или ток возбуждения i_b . Поэтому САР ЭПС всегда являются многоканальными.

Распорядительные сигналы систем управления имеют малую мощность и легко искажаются различными возмущениями — помехами. Характер вводимой рабочей информации в значительной степени определяет помехоустойчивость системы, т. е. ее неподверженность воздействию помех (особенно электромагнитных). Поэтому существенное значение имеет подразделение систем по характеру вводимой информации. По этому признаку различают системы с **непрерывным** вводом сигналов рабочей информации

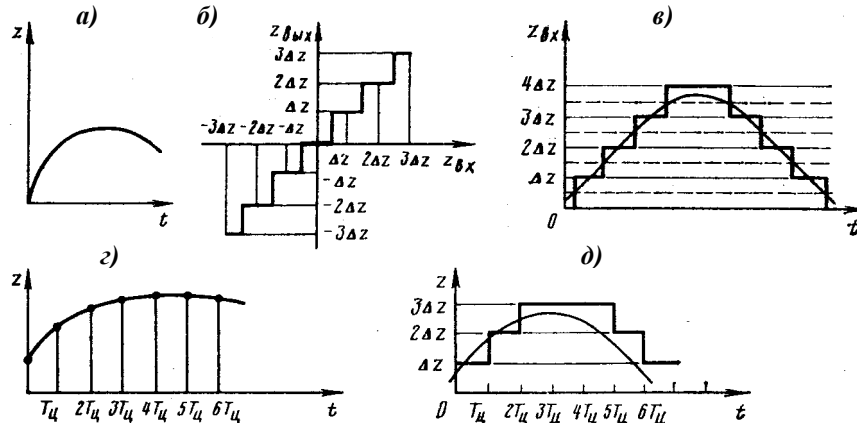


Рис. 17

(рис. 17а), **релейные** системы и системы с **модуляцией сигналов**.

Релейный сигнал отличается тем, что имеет два уровня, соответствующих двум значениям вводимой информации. Модуляцией называют наложение информационного сигнала на сигнал-переносчик.

Информационный сигнал называют модулирующей функцией. При гармоническом переносчике результирующий сигнал будет непрерывный. Если переносчиком является

последовательность импульсов, различают амплитудно-, частотно- и фазоимпульсную модуляции. При этом информационный сигнал изменяет соответственно амплитуду, частоту, длительность или положение импульса относительно тактовых отметок.

В цифровых системах управления аналоговый информационный сигнал преобразуется в цифровую форму. Технические средства, реализующие это преобразование, называют аналого-цифровым

преобразователем (АЦП). По иной терминологии АЦП реализует кодово-импульсную модуляцию сигнала. При этом выполняются квантование информационного сигнала и его временная дискретизация.

Преобразование аналогового (непрерывного) сигнала, имеющего бесконечное множество значений, в сигнал с конечным множеством значений называют квантованием по уровню. Очевидно, что операция квантования связана с округлением непрерывной величины. Идеальная операция квантования описывается статической характеристикой нелинейного элемента (НЭ) (рис. 17б), на вход которого подается аналоговый сигнал, а на выходе получается квантованный сигнал (рис. 17в).

Процесс преобразования аналогового сигнала нелинейным элементом показан на рис. 17в. Очевидно, что операция квантования в соответствии с приведенным определением нелинейна.

Преобразование сигнала, описываемого функцией непрерывного аргумента (времени), в сигнал, представляемый функцией дискретного аргумента, называют временной дискретизацией (рис. 17а). Результат дискретизации представляется как $z_{д}[nT_{ц}]$, где $n = 0, 1, 2, \dots$; $T_{ц}$ – шаг временной дискретизации.

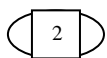
В цифровых системах управления квантование по уровню и времени дискретизация осуществляются аналого-цифровым преобразователем одновременно (точки на рис. 17д).

С целью получения сигнала на выходе цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), определенного во все моменты времени, необходимо функцию дискретного аргумента $z_{дк}[nT_{ц}]$ преобразовать в функцию непрерывного аргумента, т.е. тем или иным способом выполнить аппроксимацию $z_{дк}[nT_{ц}]$. Эту процедуру называют восстановлением.

САУ объекта, как правило, отслеживает его состояние сразу по нескольким признакам, регулируя их параметры. Каналы регулирования параметров образуют систему регулирования (САР) состояния объекта по этому признаку. В зависимости от объекта этими признаками могут быть: механические (скорость, ускорение, масса и т.д.), электрические (напряжение, ток, мощность, КПД и т.д.), тепловые (температура объекта, его частей, выходного продукта технологического процесса и т.д.) и другие.

Независимо от объекта регулирования САР строится в соответствии с рядом принципов, позволяющих обеспечить функционирование объекта в заданном режиме при выявлении сигнала рассогласования:

- по возмущению;
- по отклонению;
- комбинированному регулированию;
- адаптивные САР (прямые, не прямые и квазипрямые).



Система управления преобразователем предназначена для:

- обработки поступающей информации от датчиков и задатчиков уставок (тока, напряжения, температуры и т.д.), контролирующих состояние электрического оборудования и режимов движения подвижного состава;
- выработки сигналов управления полупроводниковыми ключами достаточной длительности и мощности;
- обеспечения нормального функционирования и защиты элементов преобразователей и потребителей от нештатных ситуаций путём подачи и снятия импульсов управления с полупроводниковых ключей в строго определённой последовательности;
- сигнализации о состоянии элементов преобразователя и самой системы управления.

Рассмотрим принцип разработки САР преобразователем на примере подвижного состава.

Поскольку система управления, как правило, не может быть выполнена в едином блоке (датчики и распределители импульсов расположены в силовом блоке преобразователя, задатчики уставок – в кабине водителя и т.д.), то она должна удовлетворять требованиям, предъявляемым к преобразователям (см. лекцию 1). Кроме того, к системе управления предъявляются дополнительные требования:

- система должна обеспечивать гальваническую развязку высоковольтных цепей преобразователя и низковольтных цепей управления;
- система управления должна обладать высокой степенью помехозащищённости;
- система управления преобразователем должна быть совместимой с цепями управления остальным оборудованием подвижного состава, а также с аналогичными системами управления других единиц подвижного состава (для работы по системе многих единиц).

Элементной базой цепей системы управления преобразователем являются, как правило, серийно выпускаемые функционально законченные элементы – микросхемы, транзисторы, резисторы, конденсаторы, дроссели, трансформаторы и т.д. Однако в последнее время наметилась тенденция на сокращение внешних электрических связей между узлами системы управления путём разработки специализированных больших интегральных микросхем (промышленных контроллеров), на входы которых подаются сигналы от датчиков и задатчиков, а с выхода сигналы управления соответствующими ключами преобразователя.

Независимо от элементной базы силовых цепей преобразователей, количества фаз, типа подвижного состава и т.д., все без исключения системы управления должны содержать определённый набор

функционально законченных блоков. Вместе с тем, нельзя не отметить, что структура системы управления преобразователем существенно зависит от схемного решения конкретного преобразователя. Поэтому разработка структурной схемы системы управления начинается с анализа режимов работы силовых цепей преобразователя.

В качестве примера рассмотрим принципы разработки структурной схемы двухфазного широтно-импульсного преобразователя с общим узлом емкостной коммутации на *SCR*-тиристорах, работающего на раздельную (пофазную) нагрузку (см рис. 18). Диаграммы электромагнитных процессов в цепях преобразователя, приведённые там же, отражают характер процесса перезаряда коммутирующего конденсатора *C*, токов фаз и времена подачи отпирающих импульсов на управляющие электроды тиристоров. Схема не содержит целого ряда электрических и электронных аппаратов, необходимых для нормального функционирования преобразователя. Так, в частности, отсутствуют датчики тока, напряжения, температуры и т.д., необходимые для сбора информации о состоянии цепей всего подвижного состава и элементов самого преобразователя. Однако, при разработке структурной схемы они будут учтены. Преобразователь не содержит цепей ослабления поля электрических двигателей в целях упрощения изложения принципов разработки структурной схемы управления и может быть дополнен студентом самостоятельно.

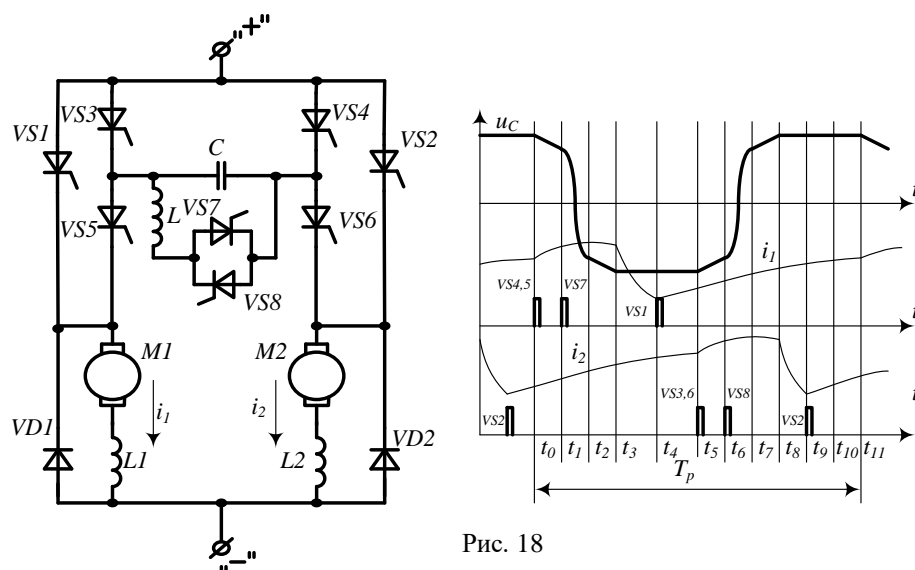


Рис. 18

Источником питания ИП1 системы управления преобразователем (см. рис. 19) должен служить автономный источник, в качестве которого целесообразно использовать аккумуляторную батарею. Поскольку элементы системы управления требуют в большинстве своём различные уровни питающего напряжения, то возникает необходимость согласования напряжения источника

питания с их напряжением, для чего в системе управления используются маломощные преобразователи, питающие конкретных потребителей. В схеме они сведены в один блок ИП2.

Поскольку основное назначение структурных схем заключается в обозначении путей информационных каналов, то связи ИП2 с блоками системы управления условно не показаны.

Работу системы управления необходимо привязать к опорному генератору временного интервала, которым в преобразователях с широтной модуляцией является длительность периода регулирования, а в частотных – диапазон изменения частоты регулирования. Длительность периода регулирования в широтно-импульсных преобразователях и максимальная частота в частотно-импульсных определяются параметрами силовых полупроводниковых приборов, используемых в качестве ключей силовых цепей преобразователя. Обычно генератором временного интервала является генератор прямоугольных импульсов, называемый генератором тактовых импульсов (ГТИ) или задающим генератором (ЗГ). Выполнение одного из основных требований, предъявляемых к системе управления – стабильности выходных параметров, однозначно определило элементную базу ЗГ: кварцевый резонатор. Так как частоты генерации импульсов кварцевых резонаторов лежит в пределах десятков килогерц ... сотен мегагерц, а рабочая частота тиристоров не превышает 1...2 кГц, то в задающем генераторе предусматривается применение делителей частоты, понижающих выходную частоту ЗГ до приемлемого значения.

Для обеспечения жёсткой фиксации периода регулирования по фазам со сдвигом друг относительно друга на 180° эл. в схеме предусмотрено формирование импульсов на гасящие тиристоры *VS4* и *VS5* первой фазы и *VS3* и *VS6* второй фазы по переднему и заднему фронтам тактовых импульсов соответственно. При формировании переднего фронта тактового импульса сигнал поступает на формирователь импульсов *ФИ*, где вырабатывается сигнал оптимальной для наилучшего отпираания тиристоров формы и длительности, откуда он поступает на усилитель мощности *УМ* и блок задержки. Усилитель необходим для того, чтобы сформировать мощный сигнал, достаточный для отпираания нескольких тиристоров (например, при работе по системе многих единиц – СМЕ, либо при последовательном включении нескольких тиристоров).

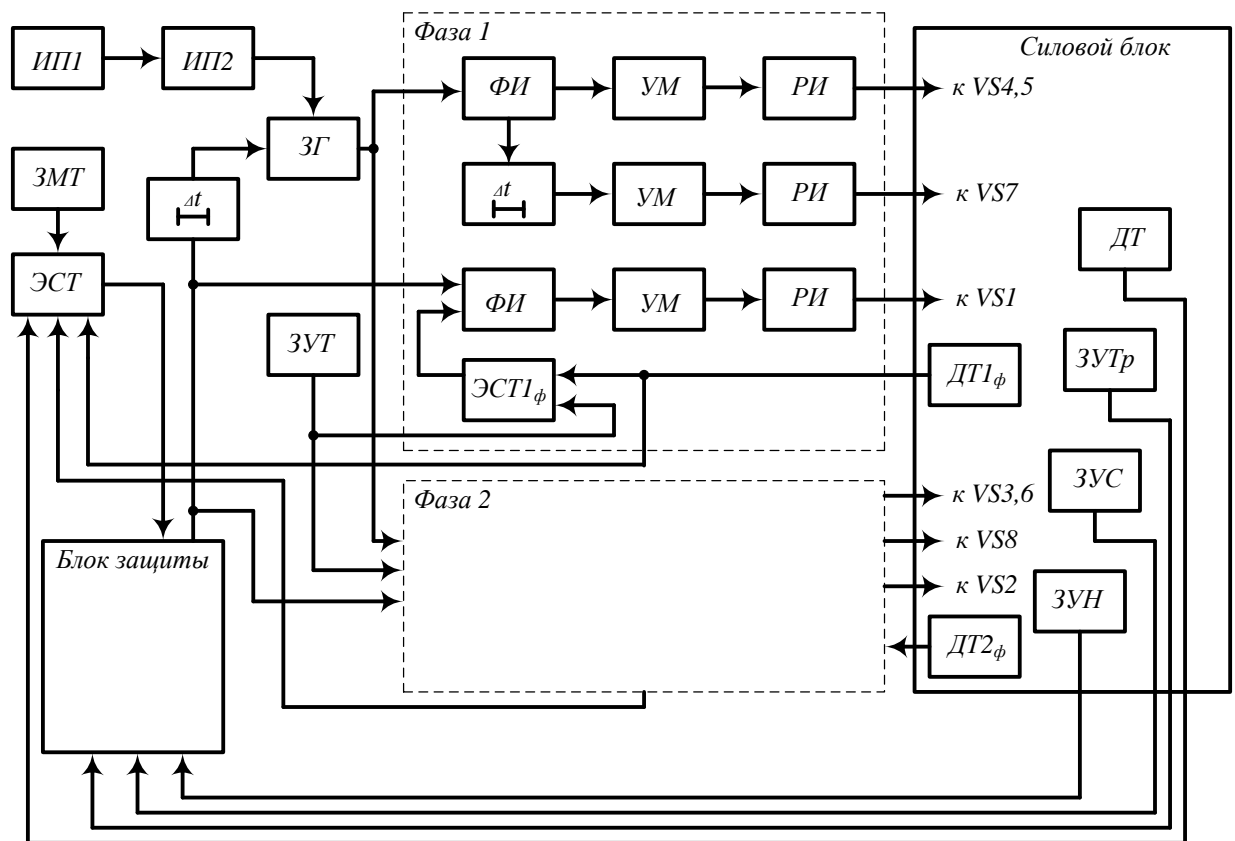


Рис. 19

В целях обеспечения гальванической развязки низковольтных цепей системы управления и высоковольтных – преобразователя, подача отпирающих импульсов на управляющие электроды тиристоров осуществляется через распределитель импульсов *РИ*, откуда – на тиристоры *VS4* и *VS5* первой фазы.

Применение блока задержки вызвано необходимостью стабилизации времени импульса. Для этого поступивший с формирователя импульс задерживается на период времени $\Delta t = t_{cx}$ (на диаграмме рис. 18 – интервал $t_0 - t_1$), в течение которого тиристор *VS1* предоставлено время для запираения. По истечении времени задержки усиленный отпирающий импульс через распределитель поступает на управляющий электрод тиристора *VS7* цепи ускоренного перезаряда. Если конденсатор *C* в этот момент сохранил заряд, то с этого момента начинается принудительный его перезаряд по контуру конденсатор *C* – дроссель *L* – тиристор *VS7* – конденсатор *C*. К моменту времени t_3 процесс перезаряда заканчивается и гасящие тиристоры запираются, отключая тяговый двигатель от источника питания. Для поддержания в двигателе средней за период регулирования величины тока в момент времени t_4 отпирается главный тиристор *VS1*. Для определения времени отпираания тиристора в системе управления используется элемент сравнения тока первой фазы *ЭСТ1_φ* (называемый иногда нуль-органом). На него поступают сигналы от датчика тока фазы *ДТ1_φ* и задатчика уставки тока (контроллера водителя) *ЗУТ*. В момент равенства нулю разности сигналов с датчика и задатчика (например, в момент времени t_4 с элемента сравнения поступает сигнал на формирователь импульса канала главного тиристора, он вырабатывает импульс, который после усиления через распределитель поступает на тиристор *VS1*. Увеличение тока уставки приводит к более раннему появлению импульса управления (момент времени t_4 на диаграмме сдвигается влево). Уменьшение тока уставки, либо возрастание тока двигателя приводит к уменьшению периода проводящего состояния главного тиристора, т.е. – к смещению момента времени t_4 на диаграмме вправо.

Аналогично устроен блок управления тиристорами второй фазы с той лишь разницей, что сигнал на запуск формирователя второй фазы поступает не по переднему, а по заднему фронту тактового импульса *ЗГ*.

Система управления преобразователем, как известно, должна выполнять и защитные функции. Защите подлежат, как элементы собственно преобразователя, так и аппараты силовых цепей подвижного состава. Особое значение на транспорте имеет приоритетность режимов движения: в любых ситуациях режим торможения является приоритетным по отношению к пуску и выбегу. Поэтому при нажатии на педали «Пуск» и «Торможение» должна собираться только схема торможения.

Электрооборудование подвижного состава необходимо защищать от:

- чрезмерных токов перегрузки ($I_{макс}$);
- повышения напряжения сверх допустимой величины ($U_{макс}$);
- чрезмерного понижения напряжения ($U_{мин}$);

- превышения скорости движения ($v_{констр}$);
- перегрева (t°).

На некоторых видах подвижного состава необходима защита от повышения давления, понижения уровня жидкости и т.д.

Сигналы от датчиков контролируемых величин заводятся в блок защиты, в котором расположены датчики соответствующих эталонных сигналов: датчик максимальной величины тока поезда ($ЗМТ$), датчик уставки скорости ($ЗУС$), датчик уставки напряжения контактной сети ($ЗУН$), датчик уставки температуры ($ЗУТр$). На рисунке они условно вынесены в силовой блок. При отклонении контролируемых величин от эталонных блоком защиты вырабатывается запрет сначала на формирование отпирающих импульсов в каналах главных тиристоров фаз, а по истечении одного...двух периодов регулирования – на работу $ЗГ$.

При разработке принципиальной электрической схемы цепей управления электрооборудования всего подвижного состава система управления преобразователем интегрируется с блоками управления другого электрооборудования. Поэтому возникает возможность перекрёстной блокировки несовместимых режимов работы. Например, блокировочные контакты контакторов, замыкающиеся в цепях, собираемых для пуска и торможения, могут быть включены в каналы системы управления.

Структурная схема системы управления однофазным преобразователем получается путём исключения каналов управления фазами, начиная со второго.

Для разработки структурной схемы системы управления преобразователем, питающим трёхфазный асинхронный двигатель, воспользуемся принципиальной электрической схемой цепей серийно выпускаемого модуля на $IGBT$ -транзисторах, отличительной особенностью исполнения которого является наличие встроенных датчиков фазных токов и устройства, управляющего отпиранием транзисторов (*driver*). В качестве прототипа используем модуль фирмы *Semikron* с шестью $IGBT$ -транзисторами. Схема цепей преобразователя с подключённым к его выходу тяговым двигателем приведена на рис. 20.

Применение в качестве электронных ключей транзисторов позволяет осуществлять широтную модуляцию напряжения, подаваемого на двигатель, что очень важно при осуществлении частотного пуска, когда необходимо соблюдать известное соотношение между величинами питающего двигатель напряжения и его частотой (закон Костенко). Один из вариантов реализации широтно-импульсной модуляции напряжения, питающего асинхронный двигатель, приведён на рис. 20. Изменением длительности импульса и момента его появления можно регулировать амплитуду и частоту выходного напряжения инвертора.

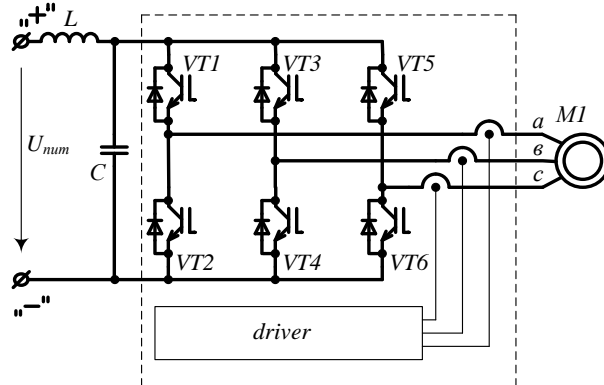


Рис. 20

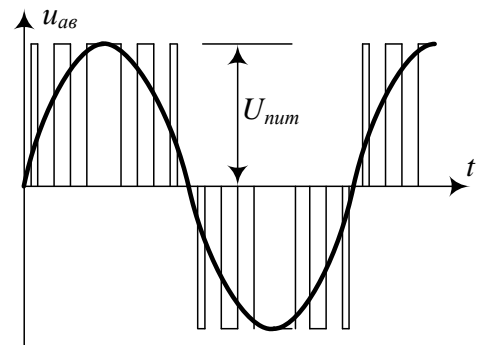


Рис. 21

Структурная схема системы управления преобразователем приведена на рис. 21. Назначение элементов системы такое же, как и в предыдущих. Однако $ЗГ$ выполнен по другой схеме: он имеет 3 выходных канала. Первый из них (верхний на схеме) обеспечивает подачу тактовых импульсов сначала на формирователь фазы a , затем – b , после чего – на фазу c электродвигателя. При осуществлении пуска такая последовательность обеспечивает вращение ротора электродвигателя в одном направлении (например, вперёд). По среднему каналу тактовые импульсы поступают на формирователи фаз в последовательности: фаза b , фаза a , фаза c , что обеспечивает вращение ротора в обратном направлении. По нижнему каналу подаются тактовые импульсы только на формирователи фаз a и b , причём только на транзисторы $VT1$ и $VT4$, что обеспечивает режим электрического торможения. Запуск формирователя импульсов, например, в фазе a начинается при поступлении первого тактового импульса с $ЗГ$. Запуск формирователя импульсов фазы b начинается при поступлении второго тактового импульса с $ЗГ$, а в фазе c – третьего. Причём, отпирающие импульсы во всех фазах поступают на транзисторы верхних плеч инвертора, т.е. на $VT1$, $VT3$ и $VT5$. Четвёртый тактовый импульс приходит на формирователь фазы a , что приводит к снятию управляющего импульса с транзистора $VT1$ и отпиранию транзистора $VT2$ этой фазы. Пятый тактовый импульс приходит на формирователь фазы b , что приводит к снятию управляющего импульса с транзистора $VT3$ и отпиранию транзистора $VT4$ этой фазы. С приходом шестого тактового импульса (на фазу c) запирается $VT5$ и отпирается $VT6$. Седьмой тактовый импульс поступает на формирователь фазы a и процессы в системе управления повторяются.

Управление работой $ЗГ$ осуществляется по скорости, а длительность (ширина) импульсов регулируется по уровню напряжения (на схеме не показано). При превышении токами фаз предельных величин корректировку в длительность проводящего состояния транзисторов вносит сигнал ограничения по току (например, в фазе a – элемент сравнения токов 1-ой фазы ЭСТ1 $_{\phi}$).

При отклонении параметров контролируемых сигналов, поступающих с соответствующих датчиков в блок защиты, из него поступает запрет на формирование отпирающих сигналов всех каналов.

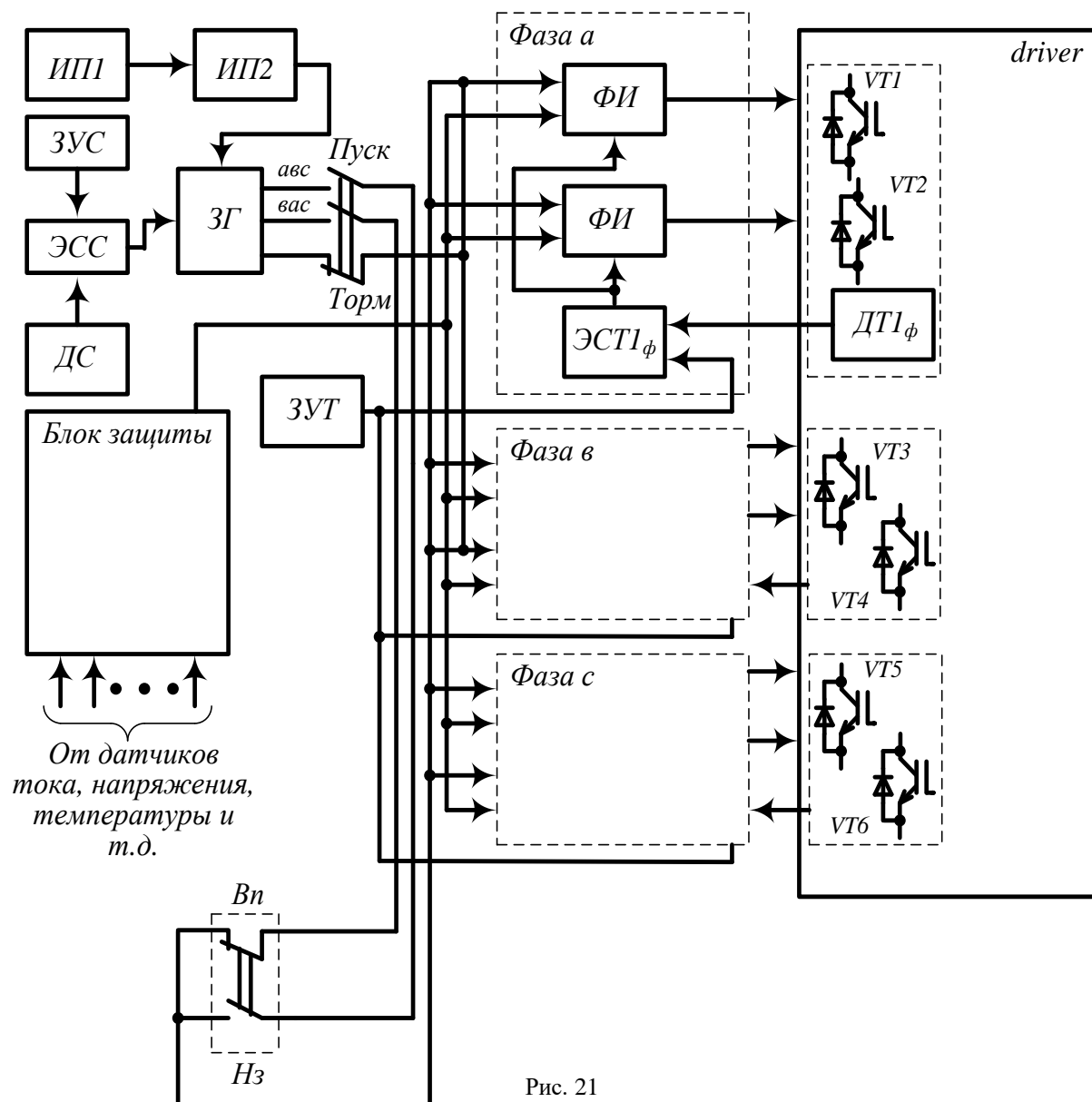


Рис. 21

Для дискретного регулирования характерным является не точное поддержание какого-либо контролируемого параметра, а удержание его в некотором интервале, в котором функционирование объекта считается допустимым. Поддержание параметра осуществляется на пороговых элементах, обеспечивающих переключения преобразователей в релейном режиме. В качестве исполнительных элементов в САР используются, например, электрические аппараты (реле тока, напряжения, мощности, температуры и т.д.), которым присущ гистерезис.

В качестве примера на рис. 22 приведены: принципиальная электрическая схема силовой цепи двигателя постоянного тока последовательного возбуждения с резисторно-контакторным регулятором; пусковая диаграмма; принципиальная схема системы управления двигателем, где в качестве регулируемого признака выступает ток электрической машины и развёртка барабана контроллера управления.

На ЭПС городского транспорта получили значительное распространение групповые автоматические системы с серводвигательным приводом реостатного контроллера. В качестве серводвигателя обычно применяется электродвигатель постоянного тока мощностью 100...150 Вт с параллельным возбуждением. Серводвигатель соединен с валом контроллера двухступенчатой зубчатой передачей с передаточным числом порядка $\mu = 30...50$.

Упрощенная схема управления серводвигателем $M1$ и схема развертки блокировочного барабана реостатного контроллера приведены на рис. 22. На рис. 22 *б* показан $M1$ с двумя обмотками возбуждения, одна из которых – $L2$ – работает при движении вала «Вперед», а другая – $L1$ – для возврата вала контроллера «Назад» в первое положение. Направление вращения $M1$ изменяется при помощи реверсивного реле $K3$, катушка которого включается вместе с линейным контактором $K2$. Цепь якоря $M1$ получает через контакты $K4.1$ стоп-реле. Если имеются свободные блок-контакты у $K2$, то реле $K3$ можно не ставить и вместо контактов $K3$ использовать блок-контакты $K2$. Скорость поворота вала реостатного контроллера при пуске регулируется реле ускорения. Силовая катушка реле ускорения включена в цепь тяговых двигателей, а подъемная катушка $K5$ – в цепь якоря $M1$. Кроме того, реле ускорения обычно имеет еще регулировочную катушку (в схеме не показанную) для изменения уставки срабатывания.

При установке контроллера хода SA в положение 1 на позиции 1 реостатного контроллера происходит включение $K2$ и $K3$. Это положение контроллера хода используется для маневровой работы и кратковременных перемещений подвижного состава с малой скоростью.

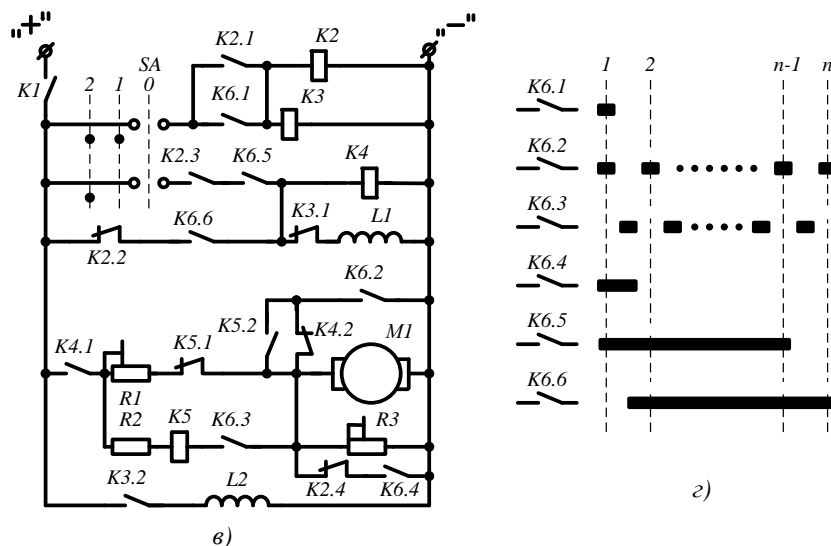
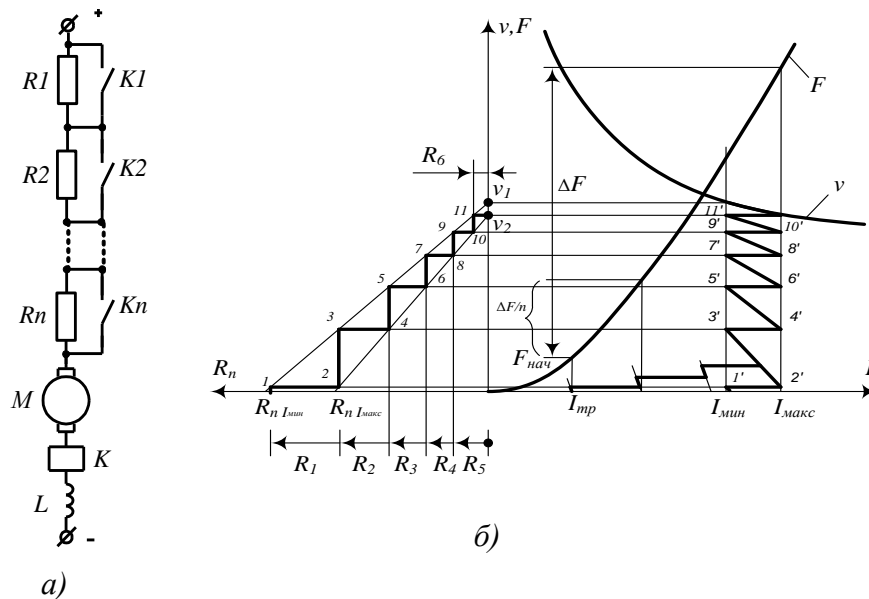


Рис. 22

В положении 2 контроллера хода после включения линейного контактора получает питание катушка $K4$ стоп-реле, которое контактами $K4.2$ раскорачивает цепь якоря $M1$, а контактами $K4.1$ подаёт на неё питание. При повороте вала реостатного контроллера с 1 на 2 позицию контакты $K6.3$, замыкающиеся в промежутке между позициями, включают цепь подъемной катушки $K5$, что приводит к срабатыванию реле ускорения. Через некоторое время, определяемое собственным временем поворота вала реостатного контроллера, после размыкания $K6.2$ и замыкания $K6.3$ происходит замыкание силовых контактов контроллера, включающих первую ступень пускового реостата. При этом ток в ТЭД возрастает. В зоне фиксации вала реостатного контроллера на 2-ой его позиции размыкаются контакты $K6.3$ и замыкаются контакты $K6.2$. Если при этом ток в ТЭД превысит ток уставки реле ускорения, то

якорь его не отпадет и цепь якоря MI окажется замкнутой накоротко контактами реле ускорения и $K6.2$, в результате чего MI будет заторможен.

При росте скорости ЭПС ток ТЭД в пределах достигнутой пусковой ступени снижается. Когда он станет меньше тока, на который отрегулировано реле ускорения, якорь реле ускорения отпадает и MI включится, после чего вал реостатного контроллера поворачивается на следующую позицию. В дальнейшем все процессы протекают в таком же порядке, как это было описано ранее. При повороте вала реостатного контроллера с предпоследней $(n-1)$ на последнюю (n) позицию контакты $K6.5$ размыкаются и питание катушки $K4$ прекращается. Вслед за этим отпадает якорь стоп-реле, замыкая накоротко якорь MI , и вал реостатного контроллера затормаживается. Этим заканчивается процесс пуска электроподвижного состава.

Порядок замыкания блокировочных контактов реостатного контроллера показан на рис. 22г. На рисунке даны только две первых и две последних позиции реостатного контроллера. Между позициями 2 и $(n - 1)$ порядок замыкания контактов цепи управления не меняется.