

Лекция 4

1. Принципы регулирования, применяемые в САР ЭПС.

2. Типовые функциональные схемы САР ЭПС.

3. Функциональные схемы САР, применяемые на отечественном ЭПС.

1

Функциональные схемы систем автоматического регулирования можно свести к трем основным типам, которые соответствуют различным принципам регулирования – по **возмущению**, по **отклонению** и **комбинированному регулированию**. Кроме того, в последнее время широкое распространение получают **адаптивные САР**.

Принцип регулирования по возмущению был предложен французским ученым Понселе и впервые реализован русским электротехником В.Н. Чиколевым.

В основу этого принципа положено регулирование по разомкнутому циклу, при котором отсутствует контроль исполнения задающего сигнала g , так как не предусмотрена обратная связь по регулируемому показателю y . Для того чтобы устранить возникающее под влиянием возмущений q_1, q_2, \dots, q_n отклонение величины y от его значения y_3 , соответствующего сигналу g , в регулятор подают сигналы, пропорциональные этим возмущениям. Предполагается, что эти сигналы могут корректировать работу регулятора АР, если их прибавлять к сигналу g

(рис. 6.22), т. е. выполняется условие для управляющего сигнала:

$$x(t) = g(t) + q_i^*(t).$$

Таким образом создается инвариантность (независимость) регулируемого показателя y от возмущения q_i . Несмотря на сравнительную простоту, система обычно не в состоянии обеспечить точное регулирование. Без существенного усложнения удастся создать по

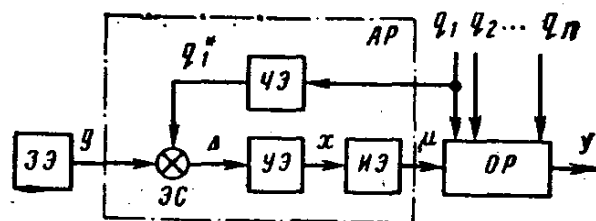


Рис. 6.22

этому принципу САР, компенсирующую действие лишь одного, реже двух возмущений, тогда как их число обычно велико. Наличие неконтролируемых возмущений приводит к тому, что выдержать закон регулирования нельзя. В общем случае закон регулирования такой САР формируется в виде

$$x = f\left(g, q_i, \frac{dq_i}{dt}, \dots, \frac{d^n q_i}{dt^n}\right).$$

Введение в закон регулирования производных позволяет учитывать тенденции изменения возмущений, что несколько улучшает динамические свойства САР.

Отсутствие обратной связи по регулируемому показателю приводит к тому, что на точность регулирования оказывают влияние все отклонения параметров регулятора (например, обусловленные износом или старением). Это приводит к ограниченному применению САР, работающих по разомкнутому циклу, и в том числе САР с регулированием по возмущению. Обычно их применяют только в качестве составной части более совершенных комбинированных систем.

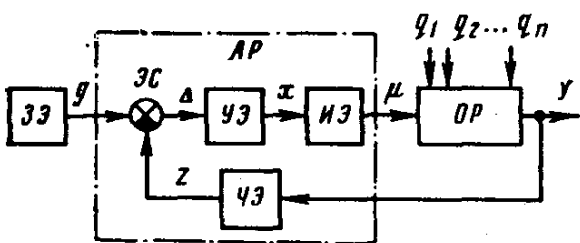


Рис. 6.23

Принцип регулирования по отклонению (по ошибке) был впервые использован И. И. Ползуновым в регуляторе уровня воды, а затем Дж. Уаттом в регуляторе частоты вращения вала паровой машины.

Принцип регулирования по отклонению (рис. 6.23) состоит в том, что регулятор АР по цепи обратной связи воспринимает действительное значение регулируемой величины y , сопоставляет его с сигналом g , пропорциональным заданному ее значению, и в зависимости от отклонения (ошибки) Δ вырабатывает такое управляющее воздействие x , которое сводит эту ошибку к минимуму. Закон регулирования в общем виде выражается уравнением

$$x = f\left(\Delta, \frac{d\Delta}{dt}, \dots, \frac{d^n \Delta}{dt^n}, \int_0^{t_1} \Delta(t) dt, \int_0^t \int_0^t \Delta(t_1, t_2) dt_1 dt_2, \dots\right).$$

В это уравнение в отличие от предыдущего входят интегралы от ошибки, что позволяет получить САР с нулевыми средними ошибками, которые называют **астатическими**.

Основное преимущество САР, работающих по отклонению, заключается в способности выполнять регулирование независимо от возмущающих воздействий. В таких САР нет необходимости измерять и вводить в регулятор показатели возмущений, так как измеряется непосредственно та ошибка, которая вызвана воздействием всех возмущений, $\Delta(t) = g(t) - z(t)$.

Выявив появление ошибки, система ликвидирует ее. Увеличение количества видов возмущений обычно не усложняет системы, так как их действие компенсируется наличием обратной связи по регулируемой величине.

Другое преимущество САР, работающих по отклонению, заключается в отсутствии жестких требований к стабильности характеристик объекта регулирования и элементов автоматического регулятора, кроме чувствительного и задающего, а также элемента сравнения. Это объясняется тем, что изменение параметров регулятора или объекта регулирования приводит лишь к изменению величины ошибки, которая выявляется и ликвидируется самим регулятором. Погрешность работы САР прежде всего зависит от того, насколько точно измеряют регулируемую величину и выделяют сигнал ошибки.

Эти преимущества объясняются тем, что САР, осуществляющие регулирование по ошибке, работают по замкнутому циклу и представляют собой системы с обратной связью. Замкнутые САР имеют и ряд недостатков. Поскольку управляющее воздействие x появляется только при $\Delta \neq 0$, то в начале процесса регулирования, т. е. сразу после включения регулятора, возникает некоторая ошибка, а затем уже автоматический регулятор стремится ее ликвидировать. Кроме того, замкнутые системы склонны к колебаниям, особенно при высоком быстродействии.

Комбинированный принцип обычно позволяет получить более высокое качество регулирования, так как замкнутую САР по отклонению дополняют регулированием по задающему воздействию (рис. 6.24а). При этом регулируемая величина y полностью воспроизводит изменение задающей величины g (в частном случае $z = g$), а отклонения Δ , возникающие под влиянием возмущений q_i , компенсируются регулированием по отклонению. Введи регулирование по задающему воздействию, можно обеспечить инвариантность системы по отношению к этому задающему воздействию.

Комбинированное регулирование выполняется также по разомкнутому циклу, обеспечивает инвариантность регулируемой величины по отношению к одному из основных возмущений, наиболее сильно влияющему на регулируемую

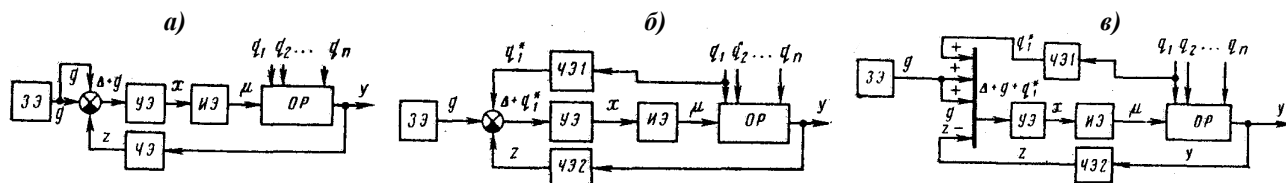


Рис. 6.24

величину. Контур регулирования, работающий по замкнутому циклу, компенсирует отклонения, вызванные другими возмущениями.

Комбинированная САР, выполняющая одновременно регулирование по отклонению, задающему и возмущающим воздействиям и обеспечивающая инвариантность по всем этим воздействиям (рис. 6.24в), может быть применена на ЭПС, где возмущением является напряжение на токоприемнике $U_{кв}$, что дает возможность реализовать заданное значение тока тяговых двигателей или скорости движения независимо от колебаний напряжения на токоприемнике

Адаптивные системы применяют в условиях неопределенности, связанной с незнанием параметров объекта регулирования. Такая неопределенность возникает потому, что реальные параметры каждого объекта отличаются от расчетных из-за отклонений в свойствах исходных материалов. Кроме того, на ЭПС изменения параметров объектов регулирования вызываются изменениями:

- электромагнитных параметров тягового двигателя из-за нелинейности его характеристик и нагрева обмоток в процессе эксплуатации;
- параметров и даже структуры силовых цепей в процессе управления, т. е. при выведении пусковых ступеней, переключении схемы соединения тяговых двигателей, работе тиристорных преобразователей;
- параметров тяговой сети при движении ЭПС по перегону;
- условий сцепления в зависимости от состояния рельсов, массы поезда и загрузки пассажирами вагона.

В связи с этим принципы построения адаптивных систем представляют большой практический интерес и при создании САР ЭПС.

Адаптивные САР подразделяют на три группы:

прямые адаптивные системы (рис. 6.25а), в которых наблюдения используют для непосредственного измерения параметров регулятора. Такие системы применяют в случае, когда свойства объектов регулирования и параметры регулятора полностью определены внешними факторами и доступны прямому измерению. При этом адаптер А полностью определяет настройку Н автоматического регулятора АР;

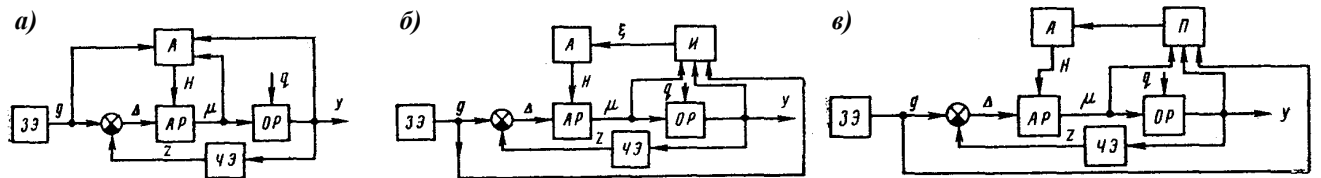
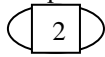


Рис. 6.25

непрямые адаптивные системы, схема которых в дополнении к предыдущей содержит идентификатор И (рис. 6.25б). В этих системах по результатам измерений задающего g и регулирующего μ воздействий, а также реакции y объекта на это воздействие может быть выполнено уточнение параметров ξ ОР и действующих возмущений q — идентификация. В зависимости от найденных параметров ξ адаптер А изменяет настройку автоматического регулятора АР;

квазипрямые адаптивные системы, в которых используют иные возможности, отличные от непосредственного измерения параметров АР и оценивания (идентификации) параметров объекта. Функциональная схема такой системы (рис. 6.25в) содержит предсказатель П и адаптер А. Предсказатель состоит из модели предсказания, которая отличается как от модели объекта, так и от модели регулятора, и алгоритма предсказания, в соответствии с которым находят оценки некоторых вспомогательных параметров, необходимых для работы адаптера А.

Поскольку причины отклонения истинных параметров объектов регулирования ЭПС от их расчетных значений весьма разнообразны, в САР ЭПС могут применяться различные принципы адаптации. Так, например, для учёта массы поезда и загрузки вагона пассажирами может быть использован прямой способ адаптации, а для учета изменения электромагнитных параметров силовых цепей перспективны непрямые адаптивные системы.



Одноконтурные системы стабилизации тока и скорости ЭПС. САР с одноконтурными функциональными схемами относятся к наиболее простым системам, работающим по замкнутому циклу, т.е. с регулированием по отклонению.

Функциональные схемы систем хронометрического регулирования при пуске. Такая система является разомкнутой; в ней исполнительный элемент производит набор или сброс позиций с постоянной скоростью, а машинист лишь дает команды на выполнение этих операций.

Хронометрическое регулирование пуска предусматривает переключение позиций с постоянной скоростью, т.е. с постоянным временем между переключениями $\Delta t = const$ (рис. 6.26). При подаче с

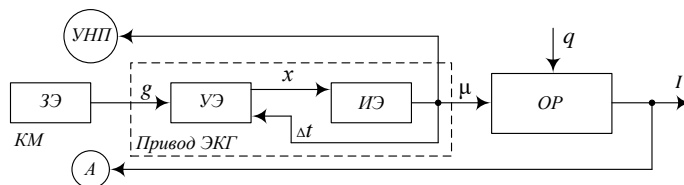


Рис. 6.26

задающего элемента ЗЭ, которым является контроллер машиниста КМ, на элемент управления УЭ привода группового реостатного контроллера ЭКГ сигнала управления g последний преобразуется в сигнал x , поступающий на исполнительный элемент ИЭ, заставляя его переходить на следующую позицию. Из-за непостоянства момента сопротивления ЭКГ (группового контроллера) постоянства скорости вращения можно достичь, только предусмотрев в исполнительном элементе ИЭ обратную связь ОС по времени. Её осуществляют, применяя для включения очередной позиции ЭКГ реле выдержки времени, срабатывающее по истечении периода Δt после включения предыдущей позиции. В случае постоянства среднего ускорения $a = const$ приращение скорости между смежными позициями Δv также примерно постоянно: $\Delta v = a\Delta t \approx const$.

Рабочая информация о работе системы поступает к машинисту в виде показаний амперметра А и указателя номера позиций УНП.

Система хронометрического в предусмотрена на электровозах ВЛ60, ВЛ80, ЧС2 и ЧС4. Для грузовых электровозов вес поезда изменяется в широких пределах, поэтому такая система не вполне оправдала себя в эксплуатации, так как пусковой ток изменяется в очень широких пределах. Более эффективна эта система для электропоездов (первые пусковые позиции, вагонов метрополитена), так как позволяет примерно сохранять заданное значение пускового ускорения при изменяющихся нагрузках.

Функциональные схемы стабилизации тока ЭПС. Одноконтурные системы стабилизации тока наиболее широко применяют для автоматического регулирования пусковых и тормозных режимов ЭПС.

Для условий ступенчатого регулирования тока функциональная схема такой САР пускового регулирования электропоезда была описана ранее. Аналогичной функциональная схема будет и при плавном регулировании тока, поэтому для всех подобных систем можно составить одну обобщенную функциональную схему (рис.6.27а).

В этой схеме задающий элемент представляет собой либо часть реле автоматического пуска

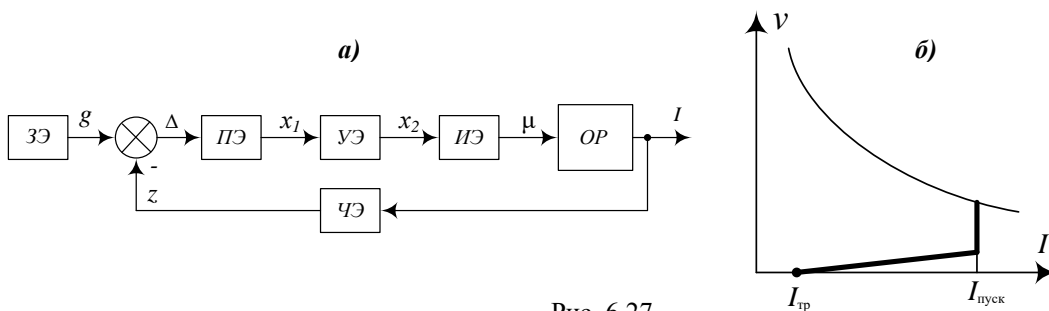


Рис. 6.27

(ускорения), либо контроллер управления или другое подобное устройство. В зависимости от типа локомотив

а исполнительный элемент ИЭ может быть выполнен в виде силового контроллера в комплекте с пусковым реостатом или трансформатором, либо в виде тиристорного преобразователя. Так, тиристорные преобразователи предусмотрены на электропоездах ЭР2И, ЭР12 и ЭР25 (для тормозного режима). Структура промежуточных элементов ПЭ и элементов управления УЭ зависит преимущественно от того, что представляет собой ИЭ. При ступенчатом регулировании обычно исполнительный элемент ИЭ – это групповой переключатель, вырабатывающий дискретные сигналы. При плавном регулировании необходимо получать непрерывные сигналы, и поэтому в качестве ИЭ используют тиристорный регулятор.

Автоматическая стабилизация тока, начиная со скорости $v=0$, неосуществима, так как необходимо сгладить первичный толчок тока. Его начальное значение устанавливают по условиям маневровой работы, а интенсивность нарастания тока – по условиям комфортабельности (рис. рис.6.27б). В начальный период пуска нарастание тока должно обеспечивать интенсивность нарастания ускорения

$$\frac{da}{dt} \leq 0,5...0,7 \text{ м/с}^3.$$

Одна и та же САР ЭПС может оказывать воздействие на несколько идентичных объектов регулирования (тяговых двигателей). Решая большинство задач регулирования, их можно рассматривать как один общий объект. Однако не следует забывать о возможных различиях в характеристиках и параметрах двигателей и диаметрах колесных пар. Поэтому иногда приходится вводить в САР отдельные цепи обратной связи от каждого двигателя, а в некоторых случаях и индивидуальные элементы регулятора. Такие системы называются **многоканальными**.

Многоканальные системы автоматического регулирования. Как правило, одна и та же САР ЭПС оказывает воздействие на несколько идентичных объектов регулирования – тяговых двигателей. Хотя в ряде случаев их можно рассматривать как один общий объект, имеются различия в характеристиках и параметрах двигателей, а так же в диаметрах колесных пар. Поэтому возникает необходимость вводить в систему регулирования отдельные цепи обратной связи от каждого двигателя, а в некоторых случаях и индивидуальные автоматические регуляторы. Такие индивидуальные регуляторы могут обеспечивать

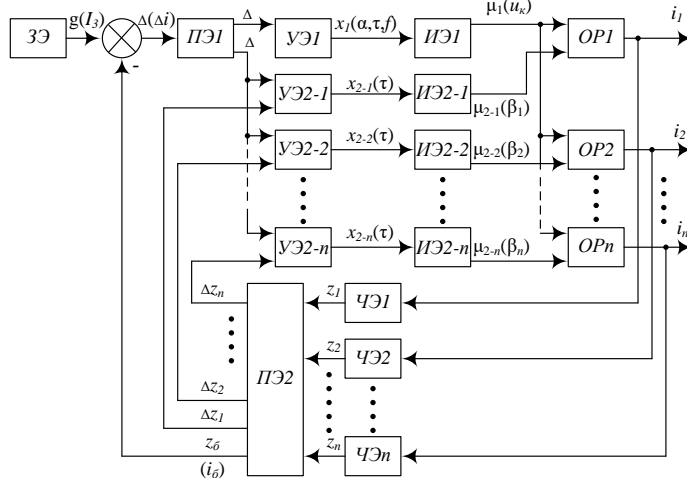


Рис. 6.28

раздельное регулирование тока возбуждения для двигателей последовательного, независимого и смешанного возбуждения.

Рассмотрим для примера функциональную схему многоканальной САР ЭПС с индивидуальным регулированием коэффициента ослабления возбуждения тяговых двигателей последовательного возбуждения (рис. 6.28). На этой схеме исполнительный элемент ИЭ1 регулирует напряжение и на зажимах тяговых двигателей, а элементы ИЭ2-1...ИЭ2-n регулируют раздельно возбуждение двигателей путем изменения коэффициента ослабления возбуждения. Чтобы исключить влияние разброса характеристик колесно-моторных блоков, в цепь каждого из n объектов регулирования

включен отдельный чувствительный элемент ЧЭ1...ЧЭn. Выходные сигналы z_k этих элементов поступают на вход промежуточного элемента ПЭ2, на выходе которого формируются сигнал $z_δ$ пропорциональный большому значению $i_δ$ из токов двигателей, и $Δz_k$ пропорциональные отклонению тока k -того двигателя от

значения величины i_{δ} . Сигнал z_{δ} сравнивается в элементе сравнения с сигналом $g(I_3)$, пропорциональным заданному значению тока.

Сигнал рассогласования с выхода элемента сравнения поступает на промежуточный элемент ПЭ1, определяющий последовательность работы управляющих и исполнительных элементов. Так, при пуске регулирование должно осуществляться вначале с помощью элемента ИЭ1 и только после выхода на автоматическую характеристику с по мощью элементов ИЭ2. Сигналы Δz_k поступают параллельно с сигналом Δ на входы управляющих элементов УЭ2-1...УЭ2- n , обеспечивая выравнивание токов тяговых двигателей. Большую эффективность система выравнивания может обеспечить для двигателей независимого и смешанного возбуждения.

Таким образом, применение многоканальных САР ЭПС обеспечивает равномерное распределение токов между всеми параллельно включенными тяговыми двигателями.

Системы программного регулирования ЭПС. Системы программного регулирования позволяют наиболее полно реализовать мощность тяговых двигателей в соответствии с ограничениями их режимов работы. Применяют такие системы на ЭПС с тиристорными исполнительными элементами. В качестве ограничений обычно учитываются ограничения, налагаемые на скоростную характеристику $v(I)$: по максимальному току двигателя $v(I_{\max})$, по сцеплению $v(I_{cu})$, по коммутации $v(e_k)$, по реактивной ЭДС $v(e_p)$ для тяговых двигателей без компенсационной обмотки, по конструкционной скорости движения v_k , а также по максимальному току возбуждения $v(I_{\theta \max})$ в режиме рекуперативного торможения (рис. 6.29).

В этой системе в зависимости от сигнала, пропорционального скорости движения v и поступающего на вход программного элемента ПрЭ от чувствительного элемента ЧЭ2, программный элемент определяет значение тока $I_{зпр}$, которое может быть реализовано системой стабилизации в соответствии с ограничениями на скоростную характеристику. Промежуточный элемент ПЭ сравнивает заданное значение тока, выбранное машинистом, с программным значением, выбирает наименьшее из них и вводит его в качестве задания в систему стабилизации.

Система программного регулирования одноконтурная, в ней регулирование осуществляется только по одному показателю – току тяговых двигателей, измеряемому чувствительным элементом ЧЭ1. Сигнал z_2 , пропорциональный скорости v , вводится в ПрЭ только для реализации ограничений на скоростную характеристику и не является отдельным сигналом обратной связи в цепи регулирования двигателей.

Меньшее распространение на ЭПС получили системы программного регулирования, в которых

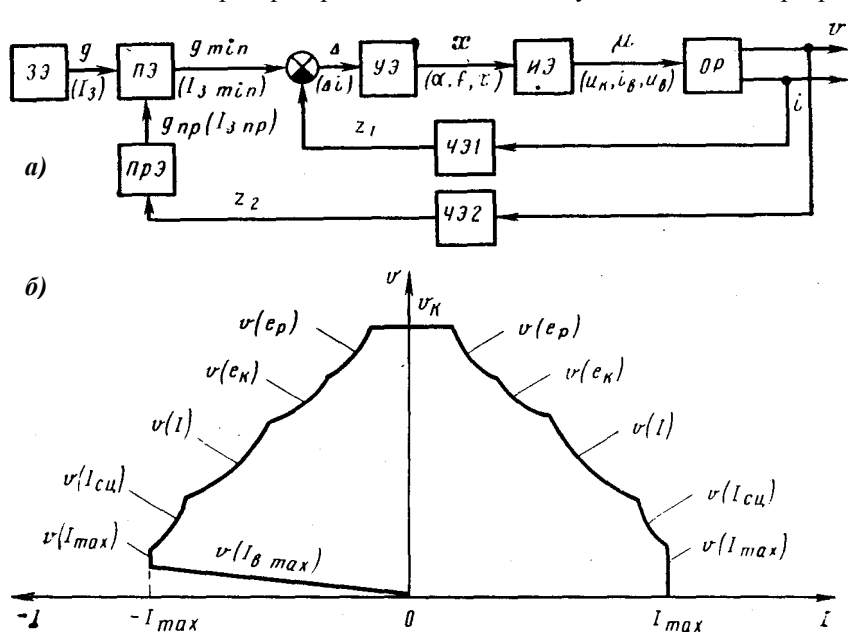


Рис. 6.29

заданное значение регулируемой величины – сигнал g меняется в функции пути. Такие САР применяют в метрополитенах, где изменяют величину g (в том числе отключают тяговые двигатели) по сигналам датчиков, установленных на путевой структуре.

Системы программного регулирования не исключают необходимости применения эффективной противобуксовочной защиты, поскольку изменение силы тяги может осуществляться на границе сил сцепления, подверженных случайным изменениям. Восстановление режима программного регулирования после срабатывания защиты должно

происходить с некоторой выдержкой времени или при пониженном токе.

Системы программного регулирования ЭПС, как и системы стабилизации, целесообразно выполнять многоканальными, поскольку желательно изменять напряжение в цепи каждого двигателя, регулировать его возбуждение, а также контролировать величину протекающего по нему тока.

Функциональные схемы многоканальных систем автоматического регулирования.

Повышенные требования к точности соблюдения ограничений по скорости движения поезда и улучшения регулировочных свойств тягового электрооборудования приводят к тому, что на подвижном составе предусматривают автоматическое регулирование не только тока, но и скорости. При этом датчик скорости

6.31a). На этой схеме составные части автоматического регулятора изображены в виде функциональных элементов, а силовые цепи электровоза для режима реостатного торможения показаны полностью. Тяговые двигатели включены по схеме независимого возбуждения, в которой ток обмоток $OB1...OB4$ регулируют исполнительным элементом ИЭ – управляемым выпрямителем. Якоря двигателей $M1...M4$ подключены к индивидуальным тормозным резисторам $R1...R4$.

Режимом реостатного торможения машинист управляет с помощью специальной (тормозной) рукоятки главного контроллера, которая имеет следующие положения: 0 – нулевое, П – подготовительное, ПТ – предварительное торможение и Т – торможение. При работе электровоза в режимах тяги или выбега, а также при пневматическом торможении и на стоянке эта рукоятка должна находиться в нулевом положении. Для перехода в режим реостатного торможения машинист устанавливает рукоятку сначала в подготовительное положение. При этом собирается схема, соответствующая рис. 6.31a, но ток возбуждения ещё не протекает.

Тормозная система приходит в действие в положении ПТ с небольшим тормозным усилием (около 100 кН на электровоз), чтобы сжать поезд. Положению Т соответствует определенная зона возможных позиций рукоятки, которая выполняет функции задатчика скорости поезда ЗЭ1. Выходной сигнал g_1 этого задатчика пропорционален заданной скорости. Система регулирования позволяет реализовать режим поддержания заданной скорости поезда на спуске, а также режим остановочного торможения. В последнем случае машинист устанавливает тормозную рукоятку ЗЭ1 в зоне Т в положение, соответствующее минимальной заданной скорости $v_{3\text{ мин}}$.

Во внешнем контуре регулирования скорости вычислительным элементом ВЭ осуществляется косвенное автоматическое задание силы торможения в функции рассогласования по скорости через ток якоря и ток возбуждения, заданные значения которых в виде сигналов $g_3 \equiv I_{яб}$ и $g_4 \equiv I_{вб}$ вводятся во внутренний контур регулирования. Максимальное тормозное усилие, пропорциональное $I_{яб}$ и $I_{вб}$, задается машинистом с помощью 12-типозиционного переключателя ЗЭ2. Это позволяет вводить в систему различные предельные значения тормозного усилия (от 150 до 550 кН) в виде сигнала g_2 , с учётом условий сцепления и веса поезда.

В случае превышения заданной скорости система реализует предельную тормозную силу, стремясь снизить скорость поезда. Если скорость поезда стала ниже заданной v_3 (например, при уменьшении уклона), то система уменьшит тормозную силу, стремясь задержать снижение скорости.

Значение тормозной силы, заданное внешним контуром, реализуется во внутреннем контуре следующим образом. В момент включения реостатного тормоза все рассогласования во внутреннем контуре положительны. Поэтому исполнительный элемент ИЭ по сигналам управляющего элемента УЭ постепенно увеличивает ток возбуждения до тех пор, пока не будет зафиксировано превышение одного из предельных значений для двух регулируемых величин – тока якоря или тока возбуждения, а, следовательно, и тормозной силы.

В зоне низких скоростей (до 25 км/ч) первым будет достигнуто ограничение по току возбуждения (рис. 6.31б). При этом канал стабилизации тока возбуждения (рис. 6.32a) станет поддерживать ток возбуждения на постоянном уровне, соответствующем ограничению по нагреву при длительном режиме. В

зоне средних скоростей (25...65 км/ч) действует ограничение по сцеплению колес с рельсами, которое можно было бы реализовать с помощью чувствительного элемента, измеряющего тормозную силу. Так как непосредственно измерить эту силу трудно, то на электровозе ВЛ80Г ограничение по сцеплению $V_{сц}(v)$ реализуется косвенным путем. Зависимость предельной тормозной силы от скорости (см. рис. 6.31б) пересчитана для постоянного сопротивления тормозного реостата в зависимость $I'_{яз}(I_{в})$, которая реализована нелинейным функциональным преобразователем ФП, подключённым к датчику тока возбуждения ЧЭ5 (рис. 6.32б). При этом система работает в режиме ограничения тока якоря в

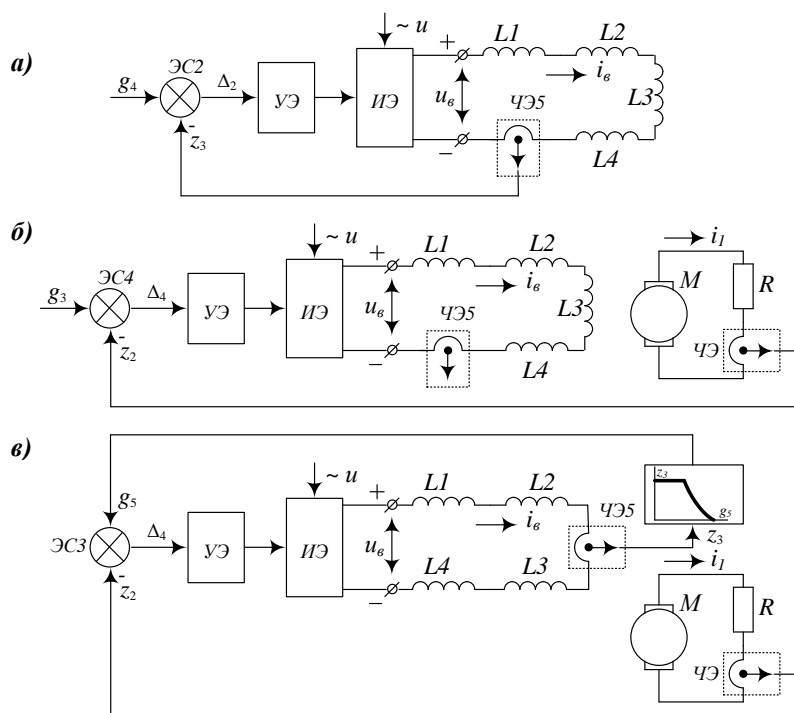
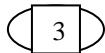


Рис. 6.32

соответствии со значением $I'_{яз}$ от блока ФП.

При скоростях выше 65 км/ч система обеспечивает ограничение тока якоря на заданном постоянном уровне – предельное значение 950 А (рис. 6.32в), а другие каналы регулирования не работают, так как при этом ограничения по току возбуждения и по сцеплению не достигаются. Величина $I_{яз}$ устанавливается по перегрузочной способности машины.



САР скорости ЭПС с релейно-контакторной системой управления. Регулирование скорости ЭПС может быть осуществлено с использованием широко распространенных групповых переключателей (рис. 6.33). Здесь УЭ преобразует рассогласование $\Delta = g - z_1 + z_2$ в номер позиции N группового переключателя. Введение в цепь обратной связи этой функциональной схемы, помимо ЧЭ1, измеряющего

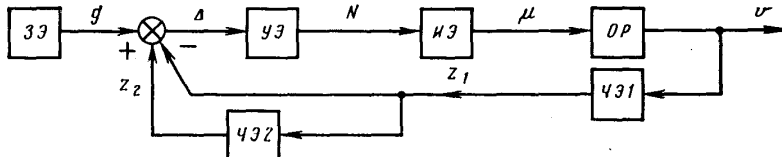


Рис. 6.33

еще одного чувствительного элемента ЧЭ2, сигнал z_2 на выходе которого пропорционален ускорению, позволяет улучшить работу схемы при управлении таким инерционным объектом, как поезд. Данная схема разработана для эксплуатируемого

ЭПС с резисторно-контакторными системами управления. Ей присущи следующие недостатки:

- отсутствие контроля тока тяговых двигателей;
- снижение значения реализованной силы тяги;
- повышение расхода энергии на тягу вследствие появления дополнительных потерь энергии на коммутацию.

САР ЭПС с тиристорными преобразователями. Наиболее перспективными системами автоматического регулирования ЭПС являются многоконтурные САР с использованием в качестве исполнительного элемента тиристорного преобразователя.

Функциональная схема системы автоматического управления электровоза ВЛ85, реализованная в виде блока автоматического управления типа БАУ-250, представляет собой систему автоматического регулирования режимов тяги и рекуперативного торможения и позволяет выполнять управление электровозами по системе многих единиц. Она выполнена как многоконтурная система подчинённого регулирования, причем в режиме тяги она работает как двухконтурная с контурами регулирования скорости и тока, а в режиме рекуперации – как трехконтурная с контурами регулирования скорости v , силы тяги F_k (торможения B_k) и тока возбуждения i_b .

В режиме тяги функциональная схема (рис. 6.34а) включает в себя задатчики тока ЗТ и скорости ЗС контроллера машиниста КМ, регулятор скорости РС, промежуточный элемент ИЛИ1-*min*, элемент ограничения тока якоря ОТЯ, задатчик интенсивности ЗИ1, регулятор тока якоря РТЯ, согласующий элемент СЭ1, исполнительный элемент ИЭ1 – четырёхзонный выпрямительно-инверторный

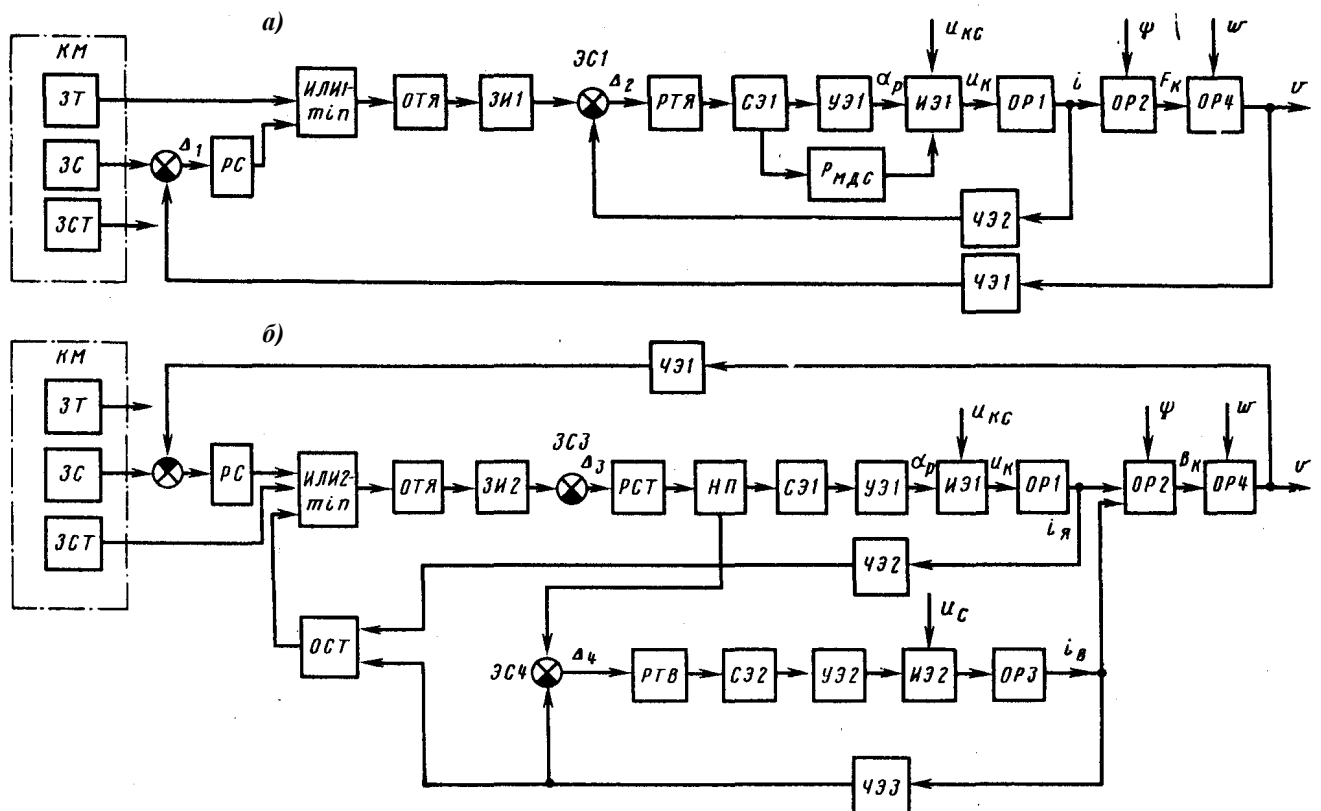


Рис. 6.34

преобразователь типа ВИП-4000, объекты регулирования – ОР1, представляющий собой цепь выпрямленного тока электровоза, ОР2, выполняющий преобразование тока в силу тяги электровоза, и ОР4, отображающий механическую часть электровоза и поезда.

При пуске заданное значение тока якоря i_a через элементы ИЛИ1–*min*, ОТЯ и ЗИ1 поступает на элемент сравнения ЭС1. Элемент ЗИ1 обеспечивает плавное увеличение заданного значения тока до значения, соответствующего положению рукоятки ЭТ. Рассогласование Δ_2 между сигналами, пропорциональными заданному и текущему значениям тока двигателя, обрабатывается регулятором РТЯ, работающим в режиме стабилизации. Такая структура системы обеспечивает разгон электровоза с заданным ЗТ значением тока тяговых двигателей до заданного ЗС значения скорости движения. После этого САР переходит в режим стабилизации скорости. В этом режиме задание тока якоря определяется регулятором скорости РС, что обеспечено включением в схему элемента ИЛИ1–*min*, пропускающего на свой выход минимальный из входных сигналов. Поскольку при пуске фактическое значение скорости всегда меньше заданного, сигнал на выходе РС всегда больше, чем сигнал на выходе ЗТ. Поэтому в режиме пуска эта САР работает как одноконтурная система стабилизации тока. После достижения заданной скорости движения сигнал на выходе РС становится меньше сигнала на выходе ЗТ и САР начинает работать как двухконтурная.

Элемент СЭ1 обеспечивает согласование сигналов РТЯ и управляющего элемента УЭ1, в качестве которого использованы соответствующие элементы блока управления выпрямительно-инверторным преобразователем типа БУВИП-133. При увеличении угла регулирования α_r и, следовательно, повышении напряжения u_k до максимального значения и при наличии положительного рассогласования по скорости $\Delta_2 > 0$ согласующий элемент СЭ1 формирует сигнал на включение регулятора магнитодвижущей силы $P_{мдс}$, который выполняет ступенчатое шунтирование обмотки возбуждения тягового двигателя с помощью включения соответствующих контакторов. Элемент ОТЯ ограничивает ток якоря допустимым максимальным значением $I_{макс}$.

В режиме рекуперативного торможения в ВАУ-250 применена трёхконтурная САР, осуществляющая регулирование скорости движения v электровоза, силы торможения B_k и тока возбуждения i_b (рис. 6.34б). В её состав входят задатчики силы торможения ЗСТ и скорости ЗС контроллера машиниста КМ, регулятор скорости РС, элемент ИЛИ2–*min*, ограничитель тока якоря ОТЯ, задатчик интенсивности ЗИ2, регулятор силы торможения РСТ, нелинейный преобразователь НП, регулятор тока возбуждения РТВ, элемент ограничения силы торможения по коммутации ОСТ, исполнительные элементы ИЭ1, ИЭ2 и объекты регулирования ОР1...ОР4. В качестве ИЭ2 использована выпрямительная установка возбуждения типа ВУВ-001.

Контур регулирования тока возбуждения и силы торможения являются внутренними, а контур регулирования скорости – внешним. Нелинейный преобразователь НП осуществляет разделение каналов управления током якоря i_a и током возбуждения i_b следующим образом: до значения тока возбуждения тяговых двигателей, равного 880 А, регулирование тормозной силы осуществляется изменением тока возбуждения тяговых двигателей, а при токе возбуждения, равном 880 А, регулирование осуществляется путем изменения ЭДС силового трансформатора при постоянстве тока возбуждения. Управление исполнительными элементами ИЭ1 и ИЭ2 осуществляется через согласующие элементы СЭ1, СЭ2 и управляющие элементы УЭ1 и УЭ2. В качестве последних также использованы элементы БУВИП-133.

Элемент ОСТ выполняет простейший алгоритм ограничения по коммутации на основе соотношения $i_b/i_a = 0,43$. Сигнал с выхода ОСТ вместе с сигналами с выхода РС и ЗСТ поступают на вход ИЛИ2–*min*, который пропускает на свой выход минимальный из этих трёх сигналов. Это обеспечивает реализацию наименьшего значения тормозной силы, необходимой в данных условиях движения.

Таким образом, САР электровоза ВЛ85 частично выполняет и функции программной системы (см. рис. 6.29), осуществляя ограничения по максимальному току якоря и по коммутации. Отметим, что последнее ограничение реализовано упрощенно без учета зависимости ЭДС e_k от скорости движения.

В целом блок автоматического управления электровозом ВЛ85 обеспечивает в тяговом режиме стабилизацию тока тяговых двигателей и скорости движения электровоза, а в рекуперативном режиме остановочное торможение с заданным значением тормозной силы, плавное нарастание тормозной силы, изменение значения силы предварительного торможения в зависимости от скорости движения электровоза.

САР угла запаса инвертора. Важным узлом системы управления электровозов ВЛ80^Р и ВЛ85 является система автоматического регулирования угла запаса инвертора типа БРУЗ. Эта система обеспечивает регулирование угла запаса инвертора по условию $\delta \geq \delta_3$ (δ_3 – минимально допустимое значение угла запаса).

Увеличение δ_3 ухудшает коэффициент мощности электровоза. Для повышения коэффициента мощности стремятся уменьшить δ_3 , однако при этом снижается устойчивость инвертора от опрокидывания. В связи с этим система БРУЗ должна быть достаточно совершенной, чтобы обеспечить одновременное выполнение этих противоречивых требований.

Известно, что в процессе рекуперативного торможения величина δ зависит от угла коммутации γ (рис. 6.35):

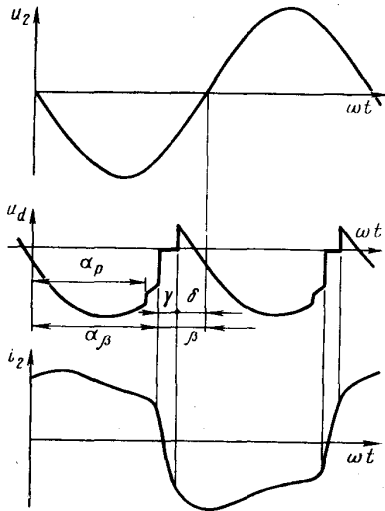


Рис. 6.35

$$\delta = \pi - \alpha_\beta - \gamma,$$

где α_β – угол отпирания вентилей.

Угол γ связан следующими соотношениями с током рекуперации I_p , амплитудой напряжения на вторичной обмотке трансформатора U_m индуктивным сопротивлением контура коммутации выпрямителя X_T и углом α_β :

$$\gamma = \arccos\left(\cos \alpha_\beta - 2 \frac{X_T I_p}{U_m}\right) - \alpha_\beta.$$

При изменении любого из аргументов X_T , I_p , U_m или α_β величина γ , а следовательно, и δ будут меняться. В системах автоматики типа БРУЗ реализовано регулирование по разомкнутому циклу, при котором управляющий сигнал α_β формируется по закону:

$$\alpha_{\beta n} = \pi - \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \gamma_i - \delta_3, \quad (6.1)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$ – номер полупериода питающего напряжения.

Здесь суммирование заменяет операцию интегрирования, так как сигнал γ_i является дискретным и характеризует длительность процесса коммутации выпрямителя в каждый полупериод. При этом введение в закон управления операции суммирования эквивалентно управлению по среднему значению угла γ .

Автоматическое регулирование выпрямителя по закону (6.1) в режиме рекуперации выполняется в дополнение к регулированию угла α_p . Для этого функциональную схему (см. рис. 6.34б) необходимо дополнить регулированием по углу α_β . Следует иметь в виду, что объектом регулирования в данном случае является выпрямительно-инверторный преобразователь, т.е. исполнительный элемент ИЭ1 функциональной схемы, приведенной на рис. 6.34б. Таким образом, на исполнительный элемент ИЭ (рис. 6.35а) в режиме рекуперации поступают два управляющих сигнала: α_p регулирующий значения выпрямленного напряжения

u_d и напряжения на зажимах двигателя $u_k = \int_0^\pi u_d dt$, и α_β , обеспечивающий регулирование по закону (6.1).

Чувствительный элемент ЧЭ $_\gamma$ выделяет из кривой тока i_2 вторичной обмотки трансформатора импульс напряжения $u(\gamma)$, длительность которого пропорциональна углу коммутации. Этот сигнал в регуляторе P_γ складывается в соответствии с законом (6.1) с сигналами $u(\gamma)$, полученными в предыдущие полупериоды, а затем в элементе сравнения ЭС5 образуется сигнал $u(\alpha_\beta)$. Преобразование последнего в импульс отпирания тиристоров, формируемый в момент t_{α_β} , выполняется специальным управляющим элементом УЭ3, входящим в состав БУВИП.

Как видно из рис. 6.36а, регулируемая величина – угол запаса непосредственно не измеряется и цепь обратной связи по нему отсутствует, поэтому такая САР является разомкнутой. В последнее время появились замкнутые системы регулирования выпрямителя по углу запаса δ , так называемой, вольт-секундной величине запаса:

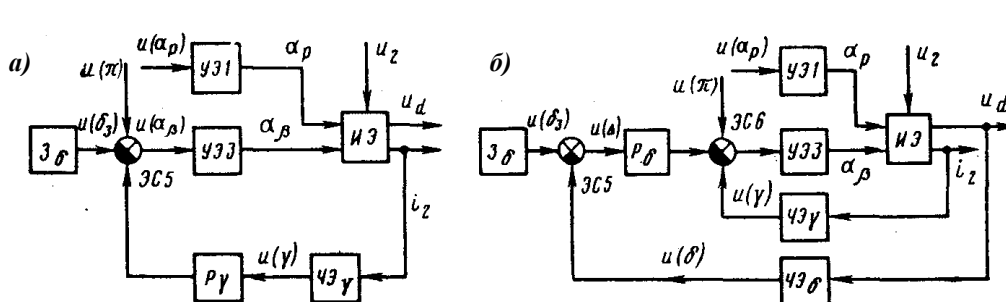


Рис. 6.36

$$u\delta = \int_{\alpha_\beta + \gamma}^\pi u_d d\omega t,$$

а также по энергии за время коммутации и запаса. В функциональной схеме простейшей из таких систем –

замкнутой САР стабилизации угла запаса (рис. 6.36б) применены два чувствительных элемента, выделяющих сигналы, пропорциональные углам γ и δ , а также регулятор угла запаса P_δ работающий по отклонению $\Delta = \delta_3 - \delta$.

Аналогичная многоконтурная система использована на электровозах ВЛ80^Г и ВЛ80^С для регулирования реостатного торможения (рис. 6.37). Поскольку конкретная реализация этой системы на

указанных электровозов имеет некоторые отличия, обусловленные, на пример, режимом многих единиц на электровозе ВЛ80С, то далее эта система рассмотрена применительно к ВЛ80С.

Машинист управляет процессом реостатного торможения с помощью следующих задающих

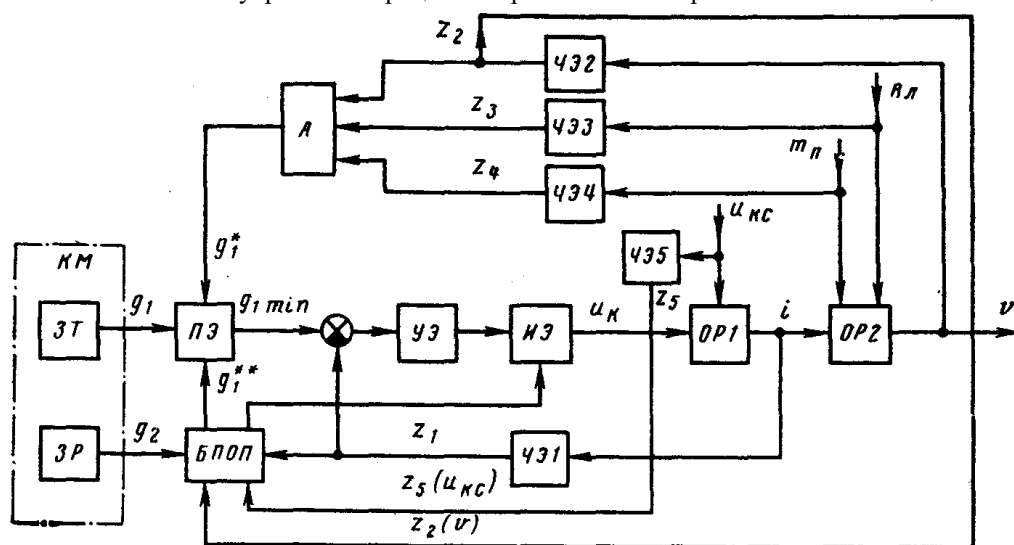


Рис. 6.39

элементов контроллера машиниста КМ: задатчи ков скорости ЗС и тормозной силы ЗТС. Последний имеет четыре положения: 0 – нулевое, П – подготовка тормозной схемы к включению, ПТ – предварительное торможение с усилием 98 кН, Т – торможение

с максимальным тормозным усилием.

В системе использованы сигналы обратной связи по току возбуждения i_b от ЧЭЗ, по току якорных обмоток i_a от ЧЭ2 и по скорости движения v от ЧЭ1. Таким образом, нормально система работает как трёхконтурная с подчиненным регулированием. Тяговые двигатели включены по схеме независимого возбуждения: якорная обмотка каждого двигателя нагружена на свой тормозной резистор, а все обмотки возбуждения соединены последовательно и питаются от ИЭ – управляемого выпрямителя ВУВ. Контур возбуждения может рассматриваться как объект регулирования ОР1, контур с якорными обмотками и тормозными резисторами – как ОР2. Электровоз с поездом образуют ОР3, выходной параметр – скорость v .

Элемент сравнения ЭС1 определяет рассогласование Δ_1 по скорости, поступающее в регулятор скорости РС, который работает совместно с блоком ограничений токов якоря и возбуждения БОТ. Последний реализует функции программного ограничения.

При $\Delta_1 > 0$, если ЗТС находится в положении Т, реализуется максимально возможный в данных условиях режим торможения. В диапазоне скоростей 90...110 км/ч тормозная сила ограничивается потенциальными условиями на коллекторе тягового двигателя. При этом БОТ задает в функции v программу изменения $I_{яз}$ и $I_{вз}$. Поскольку сопротивление тормозных резисторов постоянно, достаточно задать только программу $I_{яз}(v)$.

В диапазоне 60...90 км/ч действует ограничение по мощности рассеиваемой на тормозном резисторе теплоты. При этом БОТ ограничивает ток $I_{яз}$ на уровне 830А. При скорости ниже 60 км/ч действует ограничение по току возбуждения 1100 А. Это значение может быть выдержано двигателями не более 20 мин, что достаточно для режима остановочного торможения поезда.

Таким образом, РС совместно с БОТ реализует функции программного регулирования в случае, если $\Delta_1 > 0$. При $\Delta_1 \leq 0$, т. е. при снижении скорости ниже заданной, что имеет место в результате интенсивного торможения, РС переводит систему в режим подтормаживания с усилием 98 кН, чтобы избежать толчков в поезде. Такой же режим реализуется при установке рукоятки ЗТС в положение ПТ.

Функции РС и БОТ сводятся к тому, чтобы задать значения $I_{яз}$ и $I_{вз}$, поступающие на элементы сравнения ЭС2 и ЭС3. Соответствующие рассогласования являются входными сигналами для регулятора Р, в качестве которого используется функциональный преобразователь с решающим устройством. Последний формирует управляющий сигнал x в зависимости от сигналов Δ_2 и Δ_3 , а также выполняет функции датчика интенсивности. Управляющий элемент УЭ осуществляет включение тиристоров в выпрямителе ВУВ, который питает обмотки возбуждения.

Предусмотрен ещё ряд блоков, имеющих вспомогательное назначение. В частности, по мере снижения скорости до 35 км/ч происходит переключение тормозных резисторов с уменьшением сопротивления с 1 до 0,54 Ом. При отказе реостатного тормоза, т.е. при $i_a = 0$, автоматически происходит включение пневматического тормоза.

Многоконтурные САР ЭПС с тяговыми двигателями независимого возбуждения. Применение независимого возбуждения тяговых двигателей приводит к появлению в составе САР трех контуров регулирования: скорости движения (внешний), токов якоря и возбуждения (внутренние). Взаимодействие между этими внутренними контурами может быть организовано по-разному. Так, на рис. 6.38а показана

функциональная схема, согласно которой соотношение между заданными сигналами, пропорциональными токам якоря g_2 и возбуждения g_3 , определяется регулятором скорости РС. Это соотношение может обеспечивать минимальный расход энергии на тягу поездов или максимум КПД тягового двигателя. Первое условие реализуется, если при пуске сигнал g_3 пропорционален наибольшему возможному току возбуждения, а сигнал g_2 плавно увеличивается от нуля до наибольшего допустимого значения g_6 , поступающего от задатчика тока ЗТ.

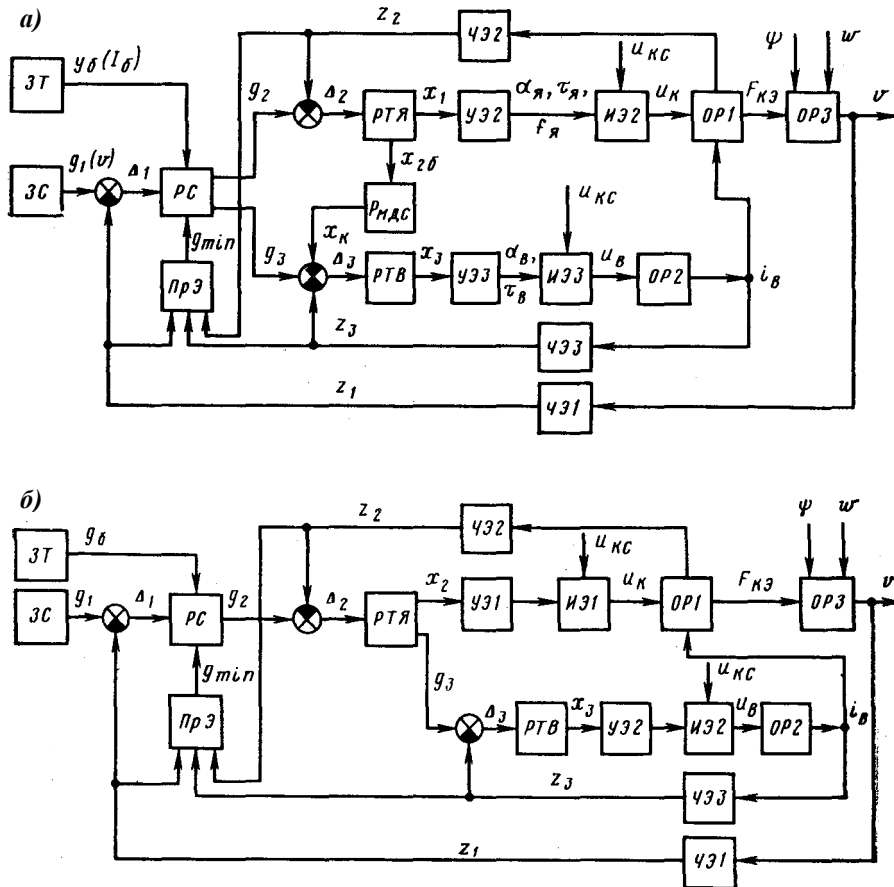


Рис. 6.38

После того, как в процессе работы к тяговому двигателю будет приложено максимальное напряжение $u_{к6}$, на другом выходе РТЯ появится сигнал x_{26} . Дальнейшее регулирование будет выполняться регулятором магнитодвижущей силы $P_{мдс}$, уменьшающим сигнал на величину сигнала коррекции $x_к$.

Другой принцип управления реализован в функциональной схеме, приведенной на рис. 6.38б. В соответствии с этой схемой заданное значение тока возбуждения формируется регулятором тока якоря и при пуске может соответствовать максимальному значению тока возбуждения. После

того, как в процессе регулирования к тяговому двигателю будет приложено максимальное напряжение $u_{к6}$, происходит изменение структуры САР. Канал воздействия на УЭ1 отключается и РТЯ начинает уменьшать сигнал g_3 , пропорциональный заданному значению тока якоря, так, чтобы обеспечить уменьшение м.д.с. обмотки возбуждения. При этом контур регулирования тока возбуждения оказывается внутренним по отношению к контуру регулирования тока якоря, так как изменение $i_в$ происходит так, чтобы выровнять его с током якоря. Таким образом, САР будет иметь три последовательно подчиненных контура регулирования.

В схемах, приведенных на рис. 6.38, программный элемент ПрЭ обеспечивает реализацию ограничений скоростной характеристики тягового двигателя. Кроме того, в этих схемах вместо задатчика тока ЗТ могут быть использованы задатчики силы тяги ЗСТ, массы поезда ЗМ и режима работы ЗР, с помощью которых машинист может вводить наибольшую допустимую силу тяги $F_{к6}$, значение массы поезда m из натурного листа и выбирать в зависимости от профиля пути момент перехода из режима тяги в режим рекуперации. В этом случае интенсивность изменения задающих сигналов g_2 и g_3 определяется непосредственно РС в зависимости от значений величин $F_{к6}$ и m .

Адаптивные САР электропоездов. Изменение загрузки вагона электропоезда пассажирами ведёт к изменению условий сцепления и повышает вероятность возникновения аварийных режимов: буксования и юза. Для предупреждения возникновения аварийных режимов САР электропоездов целесообразно выполнять с адаптацией к условиям сцепления. Такие САР выполнены одноконтурными с регулированием по току двигателя (рис. 6.39). Помимо чувствительного элемента ЧЭ1, измеряющего этот ток, они оборудованы элементами ЧЭ2...ЧЭ5, измеряющими соответственно скорость движения v , влажность окружающего воздуха $Вл$, загрузку вагона пассажирами $m_п$, определяемую по прогибу второй ступени рессорного подвешивания, и напряжение $u_к$ на зажимах двигателя.

Адаптер А на основе заложенных в его память зависимостей вычисляет значение коэффициента сцепления Ψ_k по значениям скорости (сигнал z_2) и влажности (сигнал z_3). Затем он определяет допустимую силу тяги $F_{к6} = m_{п} \Psi_k$ и по электротяговой характеристике находит минимально допустимый ток, которому соответствует сигнал g_1^* . Промежуточный элемент ПЭ пропускает на свой выход минимальный $g_{1 \min}$ из входных сигналов. Этот сигнал является задающим для контура регулирования тока тягового двигателя, выполненного по типовой схеме системы стабилизации. При этом в качестве исполнительного элемента ИЭ на электропоезде ЭР2Р используется реостатный контроллер.

В тормозном режиме функции регулирования усложняются. Для их реализации предусмотрен блок программных ограничений и переключений БПОП. Этот блок воздействует на ПЭ и ИЭ, в качестве которого используют либо реостатный контроллер, либо выпрямитель питания цепей возбуждения. На БПОП поступают сигналы z_1 , z_2 и z_5 , пропорциональные соответственно величинам i , v и u_k , а так же сигнал g_2 от датчика режимов ЗР, характеризующий режим работы электропоезда (тяга или торможение). В зоне высоких скоростей с помощью БПОП реализуется рекуперативное торможение, а при отсутствии потребителя энергии и в зоне низких скоростей – реостатное. Кроме того, по сигналу БПОП выполняется переход от реостатного торможения к механическому (электропневматическому).

На отечественных электропоездах ЭР2Р, ЭР12, ЭР29, ЭР30 используется вариант схемы, приведенной на рис. 6.39, с адаптацией только по загрузке вагона без учета влажности окружающего воздуха.

Адаптация САР к меняющимся условиям сцепления может быть выполнена по принципу самообучающихся систем. Для этого при каждом i -том пуске мотор-вагонного поезда регистрируют количество n_i срывов сцепления, например, по срабатываниям реле буксования на моторных вагонах. Затем перед следующим ($i+1$) пуском анализируется полученное значение n_i , сравнивается с фиксированными значениями n_1 , n_2 . Если $n_i < n_1$, то увеличивают $I_{3 i+1}$ на некоторое заданное значение ΔI . При $n_i > n_1$ уменьшают $I_{3 i+1}$ на ΔI , а при $n_1 < n_i < n_2$ не меняют $I_{3 i+1}$.

Могут быть использованы и более сложные алгоритмы адаптации, учитывающие не только i -тый, но и несколько предыдущих пусков.

Большое значение для обеспечения надежной работы тяговых двигателей имеют системы автоматизации, применяемые на электровозах постоянного тока, работающих в рекуперативном режиме. Если в качестве исполнительного элемента использован статический преобразователь для питания обмоток возбуждения (электровозы ВЛ11, ВЛ15), выполняемый обычно по схеме «автономный инвертор – трансформатор – управляемый выпрямитель», то система рекуперации нуждается в быстродействующем регуляторе для стабилизации тормозного тока при скачках напряжения в контактной сети. Этот же регулятор выполняет функции программного ограничения тока во всем диапазоне скоростей, в котором применяют рекуперацию. Такой регулятор обычно выполняется по одноконтурной схеме с обратной связью по току рекуперации. На входе элемента сравнения установлен блок программного ограничения $I_3(v)$. Этот блок реализует зависимость предельно допустимого тока якорных обмоток двигателей от скорости. Соответствующую зависимость рассчитывают заранее, принимая во внимание ограничение по потенциальным условиям на коллекторе (в зоне высоких скоростей) и ограничение по сцеплению (в зоне средних скоростей). Наряду с характеристикой $I_3(v)$ в блок программного ограничения закладывается и ряд частных характеристик для пониженного коэффициента сцепления. Машинист выбирает нужную характеристику с помощью рукоятки контроллера.

По сравнению с классической схемой одноконтурной системы программного регулирования (см. рис. 6.29а) схема, применяемая на электровозах, выполняет еще и функцию отключения рекуперативного тормоза при достижении предельного значения тока возбуждения, что имеет место при снижении скорости до 25...20 км/ч. При дальнейшем снижении скорости электровоза, например, на горизонтальном участке пути ток возбуждения может лишь ограничиваться на максимально допустимом уровне, а ток якорных обмоток ввиду большой жесткости характеристик независимого возбуждения будет резко спадать, вызывая переход двигателя в тяговый режим. Поэтому при $I_v = I_{v \max}$ срабатывает защита, осуществляющая плавный переход на пневматическое торможение.

Еще одна особенность рассматриваемого регулятора связана с наличием нескольких параллельных цепей тяговых двигателей. Эти цепи, каждая из которых имеет свой независимый регулятор, связаны между собой через источник питания. Например, увеличение тока в любой цепи вызывает повышение напряжения на токоприемнике и соответственно уменьшение тока в остальных цепях. При этом система может оказаться неустойчивой и склонной к автоколебаниям. По этому регуляторы параллельных цепей дополняются системой выравнивания токов. Она выполняется по принципу выделения экстремального значения тока с регулированием по этому экстремальному значению, т.е. токи других цепей выравнивают по отношению к экстремальному значению. При этом одноконтурная система дополняется элементами, которые выбирают максимальное или минимальное значение тока.