

гателях будет поддерживаться неизменным, т. е. таким, который был задан машинистом на контроллере машиниста.

Рассмотрим принцип плавного регулирования напряжения на тяговых двигателях от преобразователя по схеме (рис. 1).

Вначале плавное регулирование напряжения осуществляется от первой секции вторичной обмотки трансформатора. Предположим, что э. д. с. во вторичной обмотке трансформатора (рис. 2) направлена и действует слева направо, и при $\omega t = \alpha_1$ открывается тиристор v_8 , тогда напряжение поступает на тяговые двигатели от части полусинусоиды. Ток протекает по цепи тяговых двигателей и на их индуктивностях происходит накопление электромагнитной энергии. Во второй полупериод, когда $\omega t < \pi + \alpha_1$, тиристор v_7 закрыт и напряжение на тяговые двигатели не поступает. Однако ток в цепи двигателей поддерживается за счет накопленной электромагнитной энергии на индуктивностях тяговых двигателей и протекает через диоды IV, III, V, VI. При этом ток в цепи тяговых двигателей несколько уменьшается за счет потери энергии на сопротивлениях и на диодах.

При $\omega t = \pi + \alpha_1$ открывается тиристор v_7 и напряжение от первой секции вторичной обмотки трансформатора скачком увеличивается и поступает в цепь тяговых двигателей. При этом ток в цепи тяговых двигателей увеличивается и вновь дополнительно происходит накопление электромагнитной энергии на их индуктивностях. При $\omega t > 2\pi$ изменяется направление напряжения во вторичной обмотке трансформатора, но тиристор v_8 закрыт. Поэтому напряжение на тяговые двигатели не поступает, но ток поддерживается за счет накопленной электромагнитной энергии на индуктивностях и проходит через диоды IV, III, V, VI, сглаживающий реактор, тяговые двигатели. При $\omega t = 2\pi + \alpha_1$ вновь открывается тиристор v_8 и далее процесс повторяется.

Для повышения напряжения на тяговых двигателях по мере увеличения скорости движения, чтобы поддерживать во время пуска неизменным пусковой ток, автоматика плавно увеличивает угол регулирования α_1 ($180^\circ - 0^\circ$), и, следовательно, среднее напряжение на тяговых двигателях увеличивается ($0 - 0,9\Delta U_1$, где ΔU_1 — действующее напряжение первой секции вторичной обмотки трансформатора). При $\omega t = \alpha_1 = 0^\circ$ тиристоры VII и VIII работают как диоды, т. к. постоянно открываются в начале каждого полупериода. Для дальнейшего повышения напряжения на тяговых двигателях вступает в работу вторая секция II вторичной обмотки трансформатора (рис. 2, б).

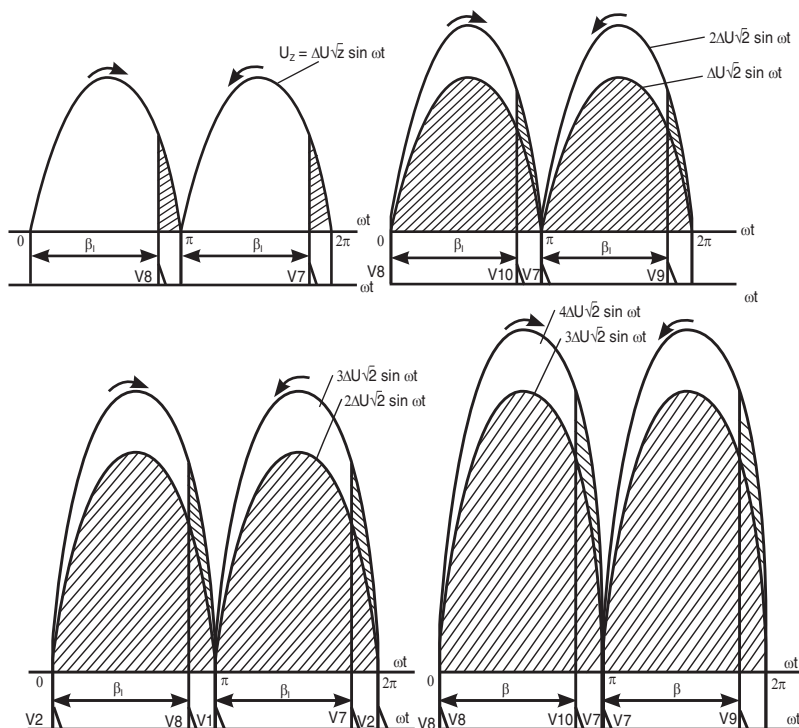


Рис. 2. Диаграммы напряжений и углы открытия тиристоров

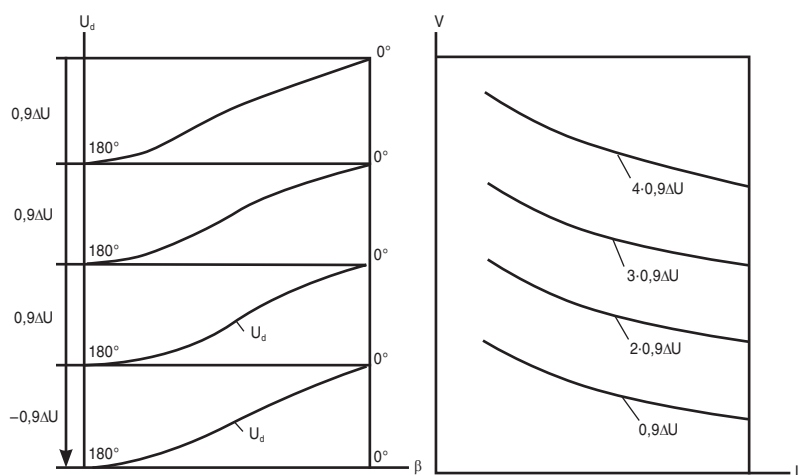
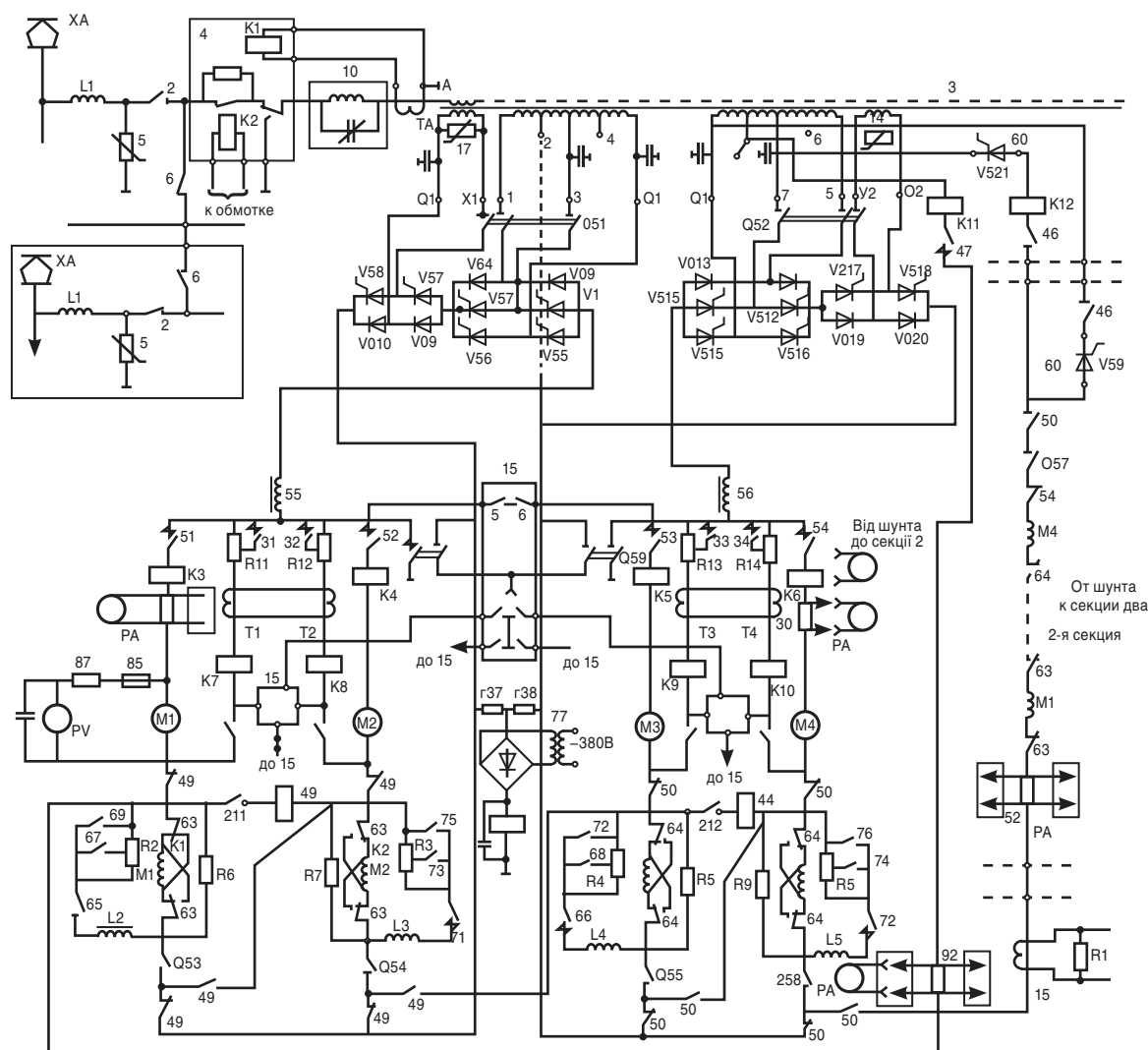


Рис. 3. Диаграммы выходных напряжений по зонам регулирования и скоростные характеристики

При $\omega t = 0^\circ$ открыт тиристор v_8 и напряжение на тяговые двигатели поступает от первой секции вторичной обмотки трансформатора, а при $\omega t = \alpha_1$ открывается тиристор v_{10} и к напряжению первой секции прибавляется часть напряжения от второй секции вторичной обмотки трансформатора. Поэтому среднее напряжение на тяговых двигателях увеличивается. Аналогично во второй полупериод при $\omega t = 2\pi + \alpha_1$ открывается тиристор v_9 , и к напряжению первой секции прибавляется напряже-

ние от части полусинусоиды второй секции трансформатора. Изменяя угол регулирования α_1 от 180° до 0° напряжение на тяговых двигателях увеличивается — $0,9 - 2 \cdot 0,9\Delta U$. При $\omega t = \alpha_1 = 0^\circ$ тиристоры v_{10} и v_9 работают как диоды. Для дальнейшего повышения напряжения (рис. 2, в) автоматически происходит переход с напряжения двух секций вторичной обмотки трансформатора на третью, почти равновеликую по напряжению секцию посредством постепенного закрытия тиристоров v_{10} и v_9 по-

Рис. 4. Силловая схема модернизированного электровоза ВЛ80^Т (ВЛ80^С)

степенного открытия тиристоров v1 и v2 под контролем тока. При $\alpha_{\text{вн}} = 0^\circ$ тиристоры v1 и v2 работают как диоды (соответственно в разные полупериоды).

Затем к напряжению III секции вторичной обмотки трансформатора постепенно будет прибавляться напряжение первой секции путем уменьшения угла регулирования $\alpha_{\text{вн}}$ ($180-0^\circ$) и среднее напряжение на тяговых двигателях увеличится $2 \cdot 0,9 \dots 3 \cdot 0,9 \Delta U$.

Аналогично происходит увеличение напряжения при регулировании напряжения второй секции вторичной обмотки трансформатора посредством изменения угла регулирования $\alpha_{\text{вн}}$ ($180-0^\circ$) (рис. 2, г) и напряжение на тяговых двигателях постепенно увеличится $3 \cdot 0,9 - 4 \cdot 0,9 \Delta U$.

На рис. 3 показаны диаграммы выходных напряжений на тяговых двигателях по зонам регулирования и их скоростные характеристики.

Полная модернизированная схема силовой цепи тяговых двигателей электровозов ВЛ80^Т и ВЛ80^С представлена на рис. 4.

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ (САУ) В РЕЖИМЕ ТЯГИ НА ЭЛЕКТРОВОЗАХ ВЛ80^Т И ВЛ80^С

На рис. 5 представлена функциональная схема САУ в режиме тяги.

Функциональная схема САУ в режиме тяги представляет собой два замкнутых контура регулирования, а именно: контур регулирования тока якоря (внутренний) и контур регулирования скорости движения (внешний), а также токовую защиту путем снятия импульсов управления управляемого выпрямителя.

Оба контура регулирования состоят из: задающего (задатчика тока якоря ЗТ — сельсин и задатчика скорости

ЗС — другой сельсин) контроллера машиниста КМ; блока автоматического управления БАУ (элемент «ИЛИ-min»), регулятора скорости РС, блока выделения минимальной скорости БДС, задатчика интенсивности ЗИ, ограничителя максимального тока «Огр. Iя» регулятора тока якоря РТЯ, согласующего элемента СЭ, блоков выделения избыточного скольжения БВС и защиты от боксования БЗ; блока управления БУУВ; управляемого выпрямителя УВ; тягового трансформатора Т, тягового электродвигателя ТД; звеньев обратной связи — датчика тока ДТЯ и датчика скорости ТГС совместно с блоками измерений БИ-1 и БИ-2. Токовая защита состоит из блоков токовой защиты БТЗ и промежуточных реле БПР.

Контур регулирования тока якоря тяговых электродвигателей работает по принципу стабилизации тока, т. е. на-

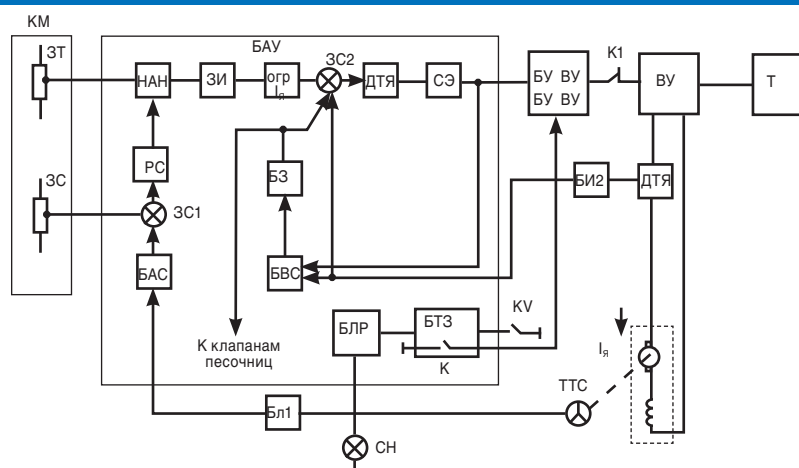


Рис. 5. Функциональная схема САУ в режиме тяги на электровозах ВЛ80Т и ВЛ80С

блюдается незначительное уменьшение тока при увеличении скорости движения. При пуске постоянное напряжение 0–50 В с контроллера машиниста КМ поступает в качестве заданных значений тока якоря и скорости движения в блок БАУ.

Напряжения пропорциональны соответственно току якоря ($0-I_{\max}$) и скорости движения ($0-110$ км/ч).

Сигнал тока якоря в блоке БАУ поступает на один из входов элемента «ИЛИ- $\min$ », на другой вход подается сигнал с выхода регулятора РС, который выполняет функции автоматического задатчика тока якоря для контура тока. На вход элемента «ИЛИ- $\min$ » будет проходить сигнал с наименьшим значением (из этих двух сигналов), которое поступает на вход задатчика интенсивности ЗИ. Задатчик интенсивности преобразует входной сигнал с элемента «ИЛИ- $\min$ » в линейно-зависимый от времени выходной, т. е. обеспечивает плавное нарастание (с заданной интенсивностью) тока якорей тяговых электродвигателей до заданной величины. Напряжение, пропорциональное заданному значению тока якорей тяговых двигателей, с задатчика интенсивности ЗИ поступает на вход ограничителя тока якорей, который ограничивает ток на уровне $I_{\max}$. Сигнал тока якоря с выхода ограничителя поступает на элемент сравнения ЭС2, где сравнивается с сигналом, соответствующим значению максимального тока, поступающим с блока измерений БИ-2.

Блоки измерений БИ-2 совместно с датчиками тока ДТЯ формируют напряжения, пропорциональные токам якорей тяговых электродвигателей, и выделяют напряжение, пропорциональное току наиболее загруженного тягового электродвигателя.

Таким образом, поддержание заданного значения тока якоря ведется по наиболее загруженному тяговому электродвигателю.

Сигнал рассогласования между заданным и фактическим значениями тока с выхода ЭС-2 поступает на регулятор тока якоря РТЯ, выходной сигнал которого является управляющим и через согласующий элемент СЭ поступает к БУВ.

Согласующий элемент СЭ предназначен для согласования уровней выходного сигнала БАУ и уровней входного сигнала БУВ по каналу управления УВ (а БУВ в режиме реостатного торможения). Выходное напряжение БАУ изменяется в пределах от 0 до 50 В по каналу УВ (и от 0 до 10 В по каналу ВУВ).

Блок БУВ предназначен для управления УВ, обеспечения при этом плавного зонного регулирования напряжения на тяговых электродвигателях в режиме тяги, а также для управления выпрямительной установкой возбуждения в режиме реостатного торможения.

При спуске, когда заданное значение скорости выше, чем фактическое, на выход элемента «ИЛИ- $\min$ » будет проходить сигнал заданного значения тока якорей. При этом регулятор РТЯ будет поддерживать ток якорей тяговых электродвигателей на заданном уровне, т. е. обеспечивать разгон электровоза с заданным значением токов якорей тяговых электродвигателей до заданной скорости.

В контуре регулирования скорости на регулятор скорости РС поступает сигнал с элемента сравнения ЭС1, на котором сравниваются заданное значение скорости, поступающее с задатчика скорости ЗС, и реальное значение скорости, поступающее с датчиков скорости ТГС через блоки измерений БИ-1 к блоку датчиков скорости БДС.

В качестве датчиков скорости используются трехфазные синхронные тахогенераторы ТГС, которые установлены на каждой тележке электровоза. Блок измерения БИ-1 предназначен для выпрямления напряжения, поступающего с датчиков скорости. Выпрямленное напряжение, пропорциональное частоте вращения колесных пар, поступает в БАУ на блок датчиков скорости БДС.

Блок БДС предназначен для сглаживания выпрямленного напряжения, поступающего с БИ-1, и выделения напряжения, соответствующего минимальной в режиме тяги и максимальной в режиме реостатного торможения частоте вращения колесных пар.

Таким образом, в режиме тяги поддержание заданного значения скорости движения ведется по минимальному фактическому значению частоты вращения колесных пар, т. к. частота вращения колесной пары, у которой произошел срыв сцепления, будет выше, чем у нормально сцепленной колесной пары.

Регулятор РС по рассогласованию заданного и фактического значений скорости вырабатывает сигнал, пропорциональный заданному значению тока якоря, для поддержания скорости движения состава в соответствии с заданным значением.

При разгоне, когда фактическое значение скорости будет приближаться к заданному, сигнал с выхода регулятора РС начнет уменьшаться, и после того, как его величина станет меньше, чем заданное значение тока якоря, он будет определять величину тока якорей тяговых электродвигателей.

При скорости электровоза, равной заданному значению, сигнал с выхода регулятора РС будет равен нулю. Это приведет к тому, что на выходе элемента «ИЛИ- $\min$ » будет отсутствовать задание тока якоря, и САУ отрегулирует ток до нуля.

В процессе пуска и разгона электровоза может возникать боксование как отдельных колесных пар, так и синхронное. Для защиты от боксования колесных пар в САУ предусмотрено устройство выявления избыточного скольжения (блок БВС), работа которого основана на сравнении интенсивности приращения активной мощности, подведенной к тяговым электродвигателям, и частоты вращения колесных пар. Информацию о подведенной мощности несут сигнал с выхода СЭ и датчики тока ДТЯ, а о частоте вращения — тахогенераторы ТГС. Сигнал с выхода блока БВС поступает непосредственно на исполнительный элемент (блок БЗ), который воздействует по двум каналам:

первый — включение клапанов песочниц, второй — уменьшение заданного значения тока якорей тяговых электродвигателей.

При срыве в буксование колесных пар вначале работает канал подачи песка (как безынерционный), а если восстановления сцепления колесной пары с рельсами не происходит, то в работу вступает канал по току. Уменьшение заданного значения тока якорей тяговых электродвигателей происходит на величину, пропорциональную скорости избыточного скольжения колесных пар до восстановления сцепления. После восстановления сцепления САУ плавно увеличивает ток якорей тяговых электродвигателей до заданного значения, которое было до буксования. При срабатывании защиты от буксования на пульте машиниста загорается сигнальная лампа.

Блок БТЗ предназначен для защиты тяговых электродвигателей от аварийных токов в режиме тяги путем запрета на прохождение импульсов управления с БУУВ на все ВУ электровазона и управления промежуточным реле в блоке БПР, включающем сигнальную лампу «СИ» на пульте машиниста. Входное напряжение с блока измерения БИ-2 поступает на блок БТЗ, где сравнивается с опорным напряжением, определяющим уставку срабатывания токовой защиты. В исходном состоянии, когда опорное напряжение выше, чем напряжение с блока БИ-2, контакт «К» в блоке БТЗ разомкнут и с выхода БУУВ на ВУ подаются импульсы управления согласно алгоритму работы БУУВ. При протекании аварийных токов в цепи тяговых электродвигателей с блока измерений БИ-2 на блок БТЗ будет поступать сигнал, уровень которого выше, чем опорное напряжение. Это приведет к срабатыванию реле в блоке БТЗ. Блок БТЗ даст команду через замкнутый контакт «К» на запрет прохождения импульсов управления с БУУВ, а также создаст цепь питания промежуточного реле в блоке БПР и через его контакты будет осуществлено питание лампы «СИ».

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ В РЕЖИМЕ РЕОСТАТНОГО ТОРМОЖЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОВОЗАХ ВЛ80^т и ВЛ80^с

На рис. 6 представлена функциональная схема САУ в режиме реостатного торможения.

Функциональная схема САУ в режиме реостатного торможения представляет собой три замкнутых контура регулирования, а именно контур регулиро-

вания тока возбуждения, контур регулирования силы (мощности) торможения и контур регулирования скорости движения.

Эти контуры регулирования состоят из задающего элемента (задатчика тока якоря ЗТ и задатчик скорости ЗС); контроллера машиниста КМ; блока автоматического управления БАУ (элемент «ИЛИ- $\min$ », регулятора скорости РС, задатчика интенсивности ЗИ, блока выделения максимальной скорости БДС, ограничителя токов якоря «Огр. I_a », возбуждения «Огр. I_b » и силы торможения, «Огр. СТ» — по условиям коммутации тяговых, электродвигателей, регулятора силы торможения РСТ, нелинейного преобразователя НП, регулятора тока возбуждения РТВ, согласующего элемента СЭ, блоков выделения избыточного скольжения БВС и защиты от юза БЗ); блока управления БУУВ; выпрямительной установки возбуждения ВУВ; тягового трансформатора Т; тягового двигателя ТД; звеньев обратной связи — датчиков тока якоря и возбуждения ДТЛ и ДТВ и датчика скорости ТГС совместно с блоками измерений БИ-1, БИ-2.

Контуры регулирования тока возбуждения и силы (мощности) торможения являются внутренними, а контур регулирования скорости — внешним (рис. 6).

Регулирование в режиме реостатного торможения осуществляется по каналу ВУВ, блок РСТ поддерживает заданное значение тока якоря тяговых электродвигателей с учетом ограничений. При регулировании тока возбуждения от 0 до $I_{\text{час}}$ нелинейный преобразователь работает в зоне нечувствительности и сопротивление тормозного резистора неизменно. Регулирование тока якоря в этом

случае равносильно регулированию тормозной мощности тяговых двигателей. При токе возбуждения, когда $I_b = I_{\text{Я}}(Ч)$, нелинейный преобразователь выходит из зоны нечувствительности и в дальнейшем сила торможения регулируется одноступенчатым изменением тормозного резистора и величиной тока возбуждения. В первом случае контур регулирования тормозной мощности образуют: блоки РСТ, РТВ, БУУВ, выпрямительная установка возбуждения ВУВ и тяговый двигатель ТД. Во втором случае в контур регулирования силы торможения входят: блоки РСТ, БУУВ, тяговый электродвигатель ТД. Контур регулирования тока возбуждения при этом осуществляет стабилизацию тока возбуждений на уровне $I_{\text{ДВ}(Ч)} = I_b$.

Контур регулирования скорости движения вступает в работу тогда, когда фактическая скорость движения станет равной или меньше заданного значения. При торможении постоянные напряжения 0–50 В с контроллера машиниста «КМ» поступают в качестве заданных значений тока якоря и скорости движения в блок БАУ. Напряжения пропорциональны соответственно току якоря 0– I_a и скорости движения 0–110 км/ч.

Заданное значение тока якоря в блоке БАУ поступает на один из входов элемента «ИЛИ- $\min$ », на другой вход подается сигнал с регулятора скорости РС, который выполняет функции автоматического задатчика тока якоря для контуров регулирования тока возбуждения и силы (мощности) торможения. На входе элемента «ИЛИ- $\min$ » будет сигнал с наименьшим значением из этих двух, которое поступает на вход задатчика интенсивности ЗИ, обеспечивающего плавное нарастание силы (мощности) торможения (с заданной

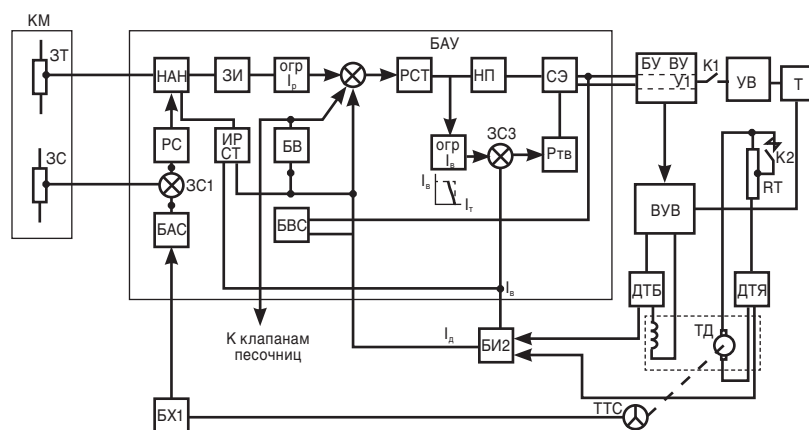


Рис. 6. Функциональная схема САУ в режиме реостатного торможения на электровазонах ВЛ80^т и ВЛ80^с

интенсивностью) во всех режимах реостатного торможения.

Напряжение, пропорциональное заданному значению тока якорей тяговых двигателей, с выхода задатчика интенсивности ЗИ поступает на вход ограничителя «Огр. I_a », который ограничивает ток якоря на уровне $I_{a\text{н}}$. Сигнал тока якоря с ограничителя «Огр. I_a » поступает на элемент сравнения ЭС2, где сравнивается с сигналом, соответствующим фактическому значению максимального тока якоря, поступающему с блока измерений БИ-2. Назначение блока измерений БИ-2 совместно с датчиками тока ДТЯ описано ранее.

Сигнал рассогласования между заданным и фактическим значениями тока якоря поступает на вход регулятора силы торможения РСТ.

Сигнал с выхода регулятора РСТ в качестве заданного значения тока возбуждения поступает на вход ограничителя «Огр. I_b », который ограничивает ток возбуждения тяговых электродвигателей на уровне I_b (ЧАС). С выхода ограничителя «Огр. I_b » сигнал 0–4 В поступает на вход элемента ЭС3, где сравнивается с сигналом, соответствующим фактическому значению тока возбуждения, поступающему с блока измерений БИ-2. Сигнал, соответствующий фактическому току возбуждения тяговых электродвигателей, формируется блоком измерений БИ-2 совместно с датчиком тока возбуждения ДТВ.

Сигнал рассогласования между заданным и фактическим значениями тока возбуждения поступает на вход регулятора тока возбуждения РТВ, выходной сигнал которого через согласующий элемент СЭ и блок БУВВ (канал ВУВ) управляет выпрямительной установкой возбуждения ВУВ.

При торможении, когда фактическая скорость движения на спуске станет равной или меньше заданного значения, вступает в работу внешний контур регулирования скорости. В контуре регулирования скорости движения на регулятор скорости РС поступает сигнал с элемента сравнения ЭС1, в котором сравнивается заданное, поступающее с задатчика скорости ЗС и фактическое значение скорости, поступающее с датчиков скорости ТГС через блоки измерений БИ-1 и БДС (блок датчиков скорости). Поддержание заданного значения скорости движения на спуске ведется по максимальному фактическому значению частоты вращения колесных пар, т. к. частота вращения колесной пары, у которой произошел срыв сцепления, будет ниже, чем у нормальной сцепленной колесной пары. По рассогласованию заданного и факти-

ческого значения скорости движение на спуске регулятор РС вырабатывает сигнал, пропорциональный заданному значению тока якоря, для поддержания этой скорости.

Канал ограничения максимальной силы торможения по условиям коммутации тяговых электродвигателей работает при высоких скоростях движения от 110 до 60 км/ч, если нарушается соотношение $I_b \geq v_{\text{min}} I_a$.

Если это соотношение токов якорей и возбуждения тяговых электродвигателей превышает $1/v_{\text{min}}$, то с блока «Огр. СТ» поступает сигнал, который меньше сигнала с задатчика тока ЗТ или с регулятора скорости РС, в блоке «ИЛИ-мин»; он является задающим током якоря. Ток якоря уменьшается, но уменьшается и ток возбуждения тяговых электродвигателей. Однако уменьшение тока якоря происходит в большей степени, чем тока возбуждения; поэтому соотношение $I_b/I_a > 1/v_{\text{min}}$ и действие блока «Огр. СТ» прекращается.

Режим реостатного торможения начинается с предварительного торможения, а САУ в зависимости от скорости движения на спуске стремится поддерживать заданную величину силы торможения на уровне 6–8 тс.

Для защиты от юза колесных пар в режиме реостатного торможения в САУ предусмотрено устройство выявления избыточного скольжения (блок БВС) и исполнительный элемент (блок БЗ), принцип работы которого описан ранее.

Как и в режиме тяги, защита от юза должна воздействовать по каналам включения клапанов песочниц и уменьшения тока якорей тяговых электродвигателей до восстановления сцепления. При восстановлении сцепления САУ плавно увеличивает ток якорей тяговых электродвигателей до заданного значения, которое предшествовало юзу. При срабатывании защиты от юза на пульте машиниста должна загореться сигнальная лампа.

При модернизации грузовых электровозов ВЛ80^т и ВЛ80^с вместо выпрямительных установок потребуется поставить управляемые выпрямительные установки, которые как показали расчеты, размещаются в тех же габаритах. Необходимо будет изменить контроллер машиниста и соответственно систему управления, выполнить ее аналогичной системе в электровозе ВЛ85.

Механическое и значительное большинство электрического оборудования практически совпадают. В результате модернизации мы получим силовую схему и систему управления, как и на электровозе ВЛ85, но с реостатным торможением единой системой авто-

матического регулирования. Надежность силовой схемы и узлов системы автоматического управления на предлагаемых к модернизации электровозах ВЛ80^т и ВЛ80^с фактически подтверждена эксплуатацией электровозов ВЛ85.

Модернизированные электровозы ВЛ80ТМ и ВЛ80СМ позволяют получить лучшие показатели и некоторые преимущества.

Устраняются групповые переключатели типа ЭКГ-8Ж весом 960 кг и два переходных реактора ПРА-48 общим весом 900 кг, облегчается ремонт и уменьшаются затраты на обслуживание электровоза в эксплуатации.

При плавном бесконтактном автоматическом тиристорном регулировании силы тяги увеличивается масса поезда при ограничении ее по сцеплению на 200–400 т [3], повышается скорость движения на 12%, уменьшается удельный расход электроэнергии на 14% [4].

Повышается надежность работы тяговых двигателей НБ-418К6 из-за отсутствия толчков тока при регулировании напряжения, особенно при асимметрии фаз, и улучшаются потенциальные условия на коллекторе при их работе.

Как показали расчеты, экономический эффект от модернизации одного электровоза ВЛ80^т (ВЛ80^с) составит около 85 тыс. грн в год, а срок окупаемости составит 2,7 года.

По мере освоения электровозов двойного питания с асинхронными тяговыми двигателями можно вполне обновить грузовой парк существующих электровозов ВЛ80^т (ВЛ80^с) по вышеизложенным разработкам кафедры ЭПС ДИИТА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модернизированная схема силовой цепи электровозов ВЛ80^т и ВЛ80^с для осуществления плавного тиристорного автоматического регулирования скорости в режимах тяги и реостатного торможения с единой системой автоматического регулирования напряжения на тяговых двигателях рекомендуется к внедрению в заводских условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тихменев Б. Н. *Подвижной состав электрифицированных железных дорог*. — М.: Транспорт, 1980.
2. Бочаров В. И. *Магистральные электровозы*. — М.: Энергоатомиздат, 1994.
3. Тихменев Б. Н. *Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями*. — М.: Транспорт, 1988.
4. Пыров А. Е. *Электрические схемы электровозов ВЛ40П // Локомотив*. — 2004. — № 7.