

**Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Московский государственный университет  
путей сообщения»**

---

**Институт транспортной техники и систем управления**

**Кафедра «Электрическая тяга»**

**А.С. Алексеев, О.Е. Пудовиков, А.А. Чучин**

**Аналоговая система автоматического управления  
электровоза однофазно-постоянного тока**

**Рекомендовано редакционно-издательским советом  
университета в качестве методических  
указаний к лабораторным работам  
для студентов специальности 190300  
«Подвижной состав железных дорог»**

**Москва – 2013**

А47

Алексеев, А.С. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Теория систем автоматического управления» «Аналоговая система автоматического управления электрова однофазно-постоянного тока»/А.С. Алексеев, О.Е. Пудовиков, А.А. Чучин. – М.:МИИТ, 2013. – 28 с.

Настоящие указания предусматривают изучение студентами блока автоматического управления типа БАУ – 002 электровазов ВЛ65 и ВЛ85. Указания соответствуют программе курса «Теория систем автоматического управления» всех специализаций специальности «Подвижной состав железных дорог»

## СОДЕРЖАНИЕ

1 Конструкция и принцип действия блока автоматического управления БАУ-002 .....	5
2 Функциональная схема двухконтурной системы автоматического управления скоростью и током в режиме тяги.....	20
3 Функциональная схема трёхконтурной системы автоматического управления скоростью, силой торможения и тока возбуждения в режиме рекуперативного торможения .....	22
4 Расчёт параметров законов управления .....	25
5 Порядок выполнения работы .....	28
Список литературы.....	28
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ....	29

## 1 Конструкция и принцип действия блока автоматического управления БАУ-002

Блок автоматического управления БАУ – 002 предназначен для формирования сигналов управления БУВИП, а также электропневматическими клапанами песочниц в режиме автоматического управления. БАУ – 002 представляет собой металлический шкаф с легкоъемными кассетами. Основа элементной базы — микросхемы средней степени интеграции (операционные усилители, компараторы и цифровые микросхемы); кассетные блоки – функционально законченные устройства. На лицевой стороне каркаса кассет размещены выводы контрольных точек. Электрическое соединение кассет с блоком осуществляют с помощью разъемов Р1П4. Межкассетные связи блока выполнены неэкранированным проводом. Соединение шкафа БАУ-002 с общелектровозными цепями происходит через разъемы типа СШР48П26ЭШ8 и СШР32П10ЭШ4.

В основу принципа работы БАУ-002 положено подчиненное регулирование параметров объекта в режимах тяги и рекуперативного торможения. Внешний вид БАУ-002 показан на рисунке 1.1.

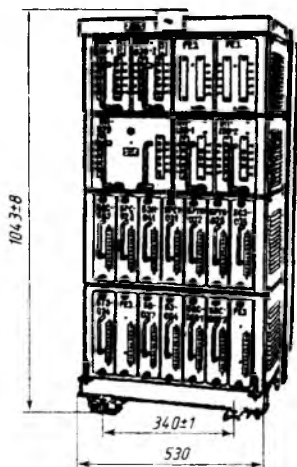


Рисунок 1.1 – Внешний вид блока автоматического управления электровоза ВЛ85 БАУ-002

Структурные схемы БАУ-002 в режимах тяги и торможения, поясняющие взаимосвязь между блоками, представлены на рисунках 1.2 и 1.3.

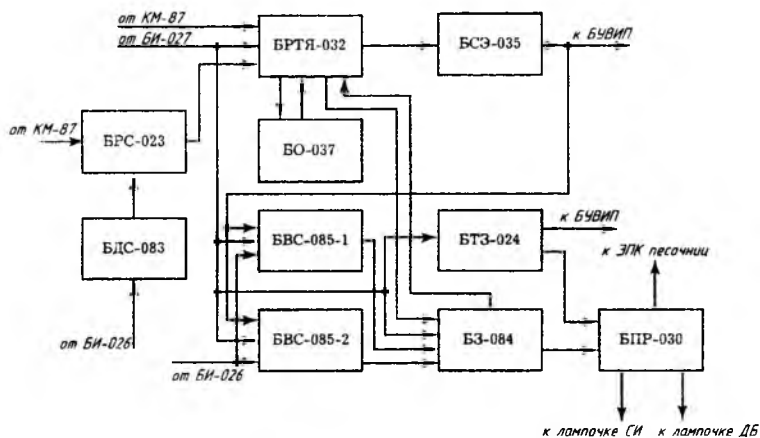


Рисунок 1.2 – Структурная схема БАУ-002 в режиме тяги

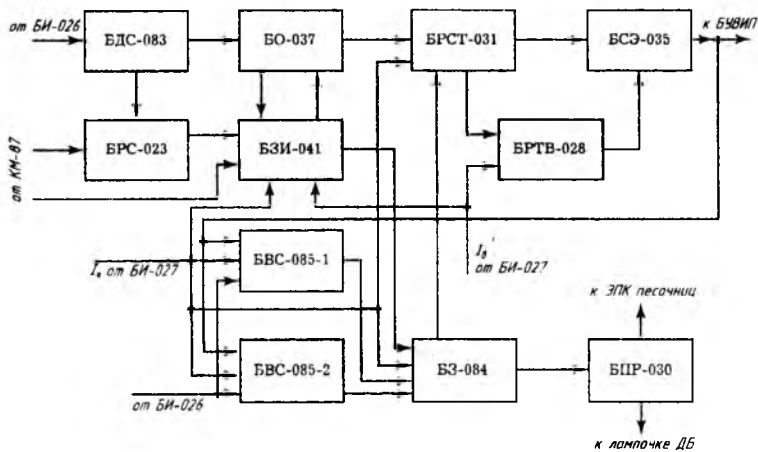


Рисунок 1.3 – Структурная схема БАУ-002 в режиме рекуперативного торможения

В режиме тяги работают следующие функциональные блоки БДС-083, БРС-023, БРТЯ-032, БСЭ-035, БТЗ-024, БПР-030, БВС-085 (1-й и 2-й), БЗ-084, БО-037 (рисунок 1.2). В режиме рекуперативного торможения работают блоки БДС-083, БРС-023, БЗИ-041, БРСТ-031, БО-037, БРТВ-028, БСЭ-035, БВС-085 (1-й и 2-й), БЗ-084, БПР-030 (рисунок 1.3).

Назначение блоков следующее:

*блок питания БП-029* — для размещения силового трансформатора, питающего БАУ – 002 и переключателя источников питания с +12,6 В на –12,6 В для режимов тяги и рекуперативного торможения;

*блоки питания БП-158* — для получения стабилизированных напряжений +12,6 В и –12,6 В;

*блок согласующего элемента БСЭ-035* — для согласования уровней выходного сигнала БАУ – 002 и уровней входного сигнала БУВИП-133 по каналу управления ВИП и ВУВ;

*блок регулятора тока якоря БРТЯ-032* — для регулирования токов якорей тяговых двигателей в соответствии с заданными значениями и интенсивностью нарастания, а также сигналами о фактическом токе якоря от блока измерений БИ-027

*блок регулятора силы торможения БРСТ-031* — для регулирования силы торможения в соответствии с заданным значением по отдельным каналам в режиме рекуперативного торможения и разделения управления ВИП и ВУВ;

*блок задатчика интенсивности БЗИ-041* — для задания интенсивности нарастания силы торможения, ограничения силы торможения по коммутации тяговых двигателей и обеспечения нулевых начальных условий регуляторов силы торможения РСТ и тока возбуждения РТВ, работающих в режиме рекуперативного торможения, и регулятора тока якоря РТЯ в режиме тяги;

*блок ограничения БО-037* — для реализации зависимости силы предварительного торможения от скорости движения и разделения цепей управления при управлении одиночным локомотивом и по СМЕ;

*блок промежуточных реле БПР-030-1* — предназначен

для включения лампочек сигнализации СИ снятия импульсов управления ВИПа при срабатывании токовой защиты и для включения электропневматических клапанов песочниц и лампочки сигнализации ДВ, при срабатывании защиты от боксования и юза колесных пар.

*блок регуляторов скорости БРС-023* — для регулирования скорости движения электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения;

*блок датчиков скорости БДС-083* — служит для обработки сигналов с тахогенераторов, сглаживания и формирования сигналов, пропорциональных наименьшей и наибольшей скоростям вращения колесных пар, которые необходимы для регулирования скорости в режиме тяги и рекуперативного торможения;

*блок токовой защиты БТЗ-024* — для обеспечения токовой отсечки при КЗ якоря тягового двигателя путем снятия импульсов управления со всех преобразователей электровоза к режиму тяги и управления промежуточным реле, включающим лампочку сигнализации при срабатывании защиты при перегрузках;

*блок регулятора тока возбуждения БРТВ-028* — для регулирования тока возбуждения в соответствии с заданным значением, а также фактическим значением тока возбуждения от блока измерений БИ-027;

*блок выявления скольжения БВС-085* — служит для выявления избыточного скольжения при боксовании и юзе колесных пар путем выдачи сигнала, пропорционального дифференциалу  $I, U, P$ .

*блок защиты от боксования и юза БЗ-084* — для управления промежуточными реле, включающими песочницы и лампочку сигнализации при боксовании или юзе колесных пар, а также для уменьшения заданного тока якоря на значение, пропорциональное скорости скольжения колесных пар до восстановления сцепления.

Рассмотрим подробнее работу некоторых из этих блоков.

### **Блок регуляторов скорости БРС-023**

Предназначен для регулирования скорости движения электровозов в режимах тяги и рекуперативного торможения. Он содержит два регулятора скорости, которые работают один в тяге, другой в рекуперативном торможении, и инвертор знака заданного значения скорости в рекуперативном торможении. Электрическая схема блока БРС-023 приведена на рисунке. 1.4.

Регулятор скорости собран на основе операционного усилителя *DA2 (DA3)*, и представляет собой апериодическое звено со сглаживанием. Как в тяге, так и в рекуперации, регулятор скорости сравнивает заданное значение с истинным и по рассогласованию автоматически вырабатывает сигнал, задающий необходимый ток якоря тяговых двигателей (силу торможения) для поддержания скорости электровоза, равной заданной. Заданное значение скорости поступает на фильтр *C1* (к. т. *X3—X8*) в тяге и рекуперативном торможении. Резистором *R4* выставляется уровень входного сигнала, необходимый для нормальной работы регулятора скорости (к. т. *X3—X9*).

Сигнал истинного значения скорости с выхода БДС-083 (к. т. *X3—X10* — тяга, *X3—X4* — рекуперация) поступает на вход регуляторов скорости; сигнал с выхода *DA2* (к. т. *X3—X7*) — в блок БРТЯ - 032, а с выхода *DA3* (к.т. *X3—X6*) — в блок БЗИ-041. Инвертор знака заданного значения скорости собран на операционном усилителе *DA1* типа 140УД7 и предназначен для изменения знака заданного значения скорости при рекуперации, необходимого для нормальной работы регулятора скорости на *DA3*.

Назначение других элементов схемы:

*C2, C3* — для сглаживания пульсаций напряжения, пропорционального истинному значению скорости;

*C4, C5, C7, C8, C10, C11* — для сглаживания пульсаций напряжения источников плюс 12 В и минус 12В;

*V1, V2* — для ограничения уровня выходного напряжения операционных усилителей *A1, A2*;

*R5, R16, R17* — для балансировки нуля операционных усилителей.



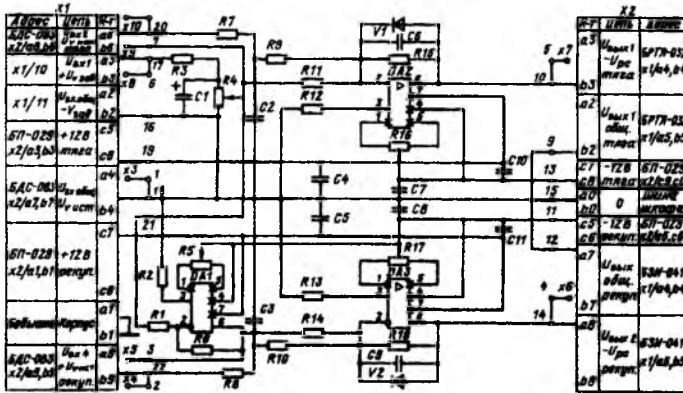


Рисунок 1.4 – Принципиальная схема блока регулятора скорости БРС - 023

### Блок регулятора тока якоря БРТЯ-032

Блок регулятора тока якоря БРТЯ-032 (рисунки 1.5, 1.6) служит для регулирования тока тяговых двигателей в соответствии с заданным значением и интенсивностью и состоит из инвертора знака заданного значения тока якоря; задатчика интенсивности ЗИ; инвертора знака тока якоря; логического элемента *ИЛИ-min*; ограничителя и регулятора тока якоря; реле нулевых начальных условий.

Инвертор знака заданного значения тока якоря собран на операционном усилителе *DA1* типа 140УД7.

Напряжение, пропорциональное заданному значению тока якоря с делителя на резисторах *R1* и *R3* (к. т. *X3—X5*), поступает на вход 2 операционного усилителя *OU DA1*, меняет знак и подается на вход

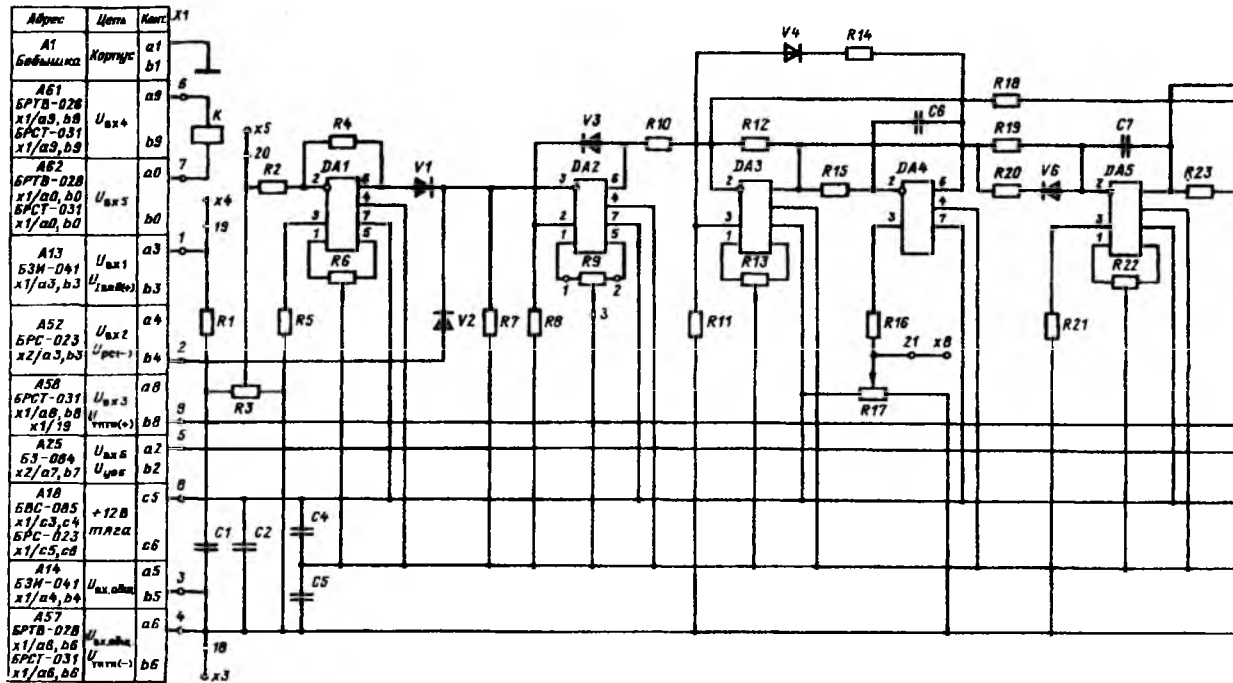


Рисунок 1.5 – Принципиальная схема блока регулятора тока якоря БРТЯ-032

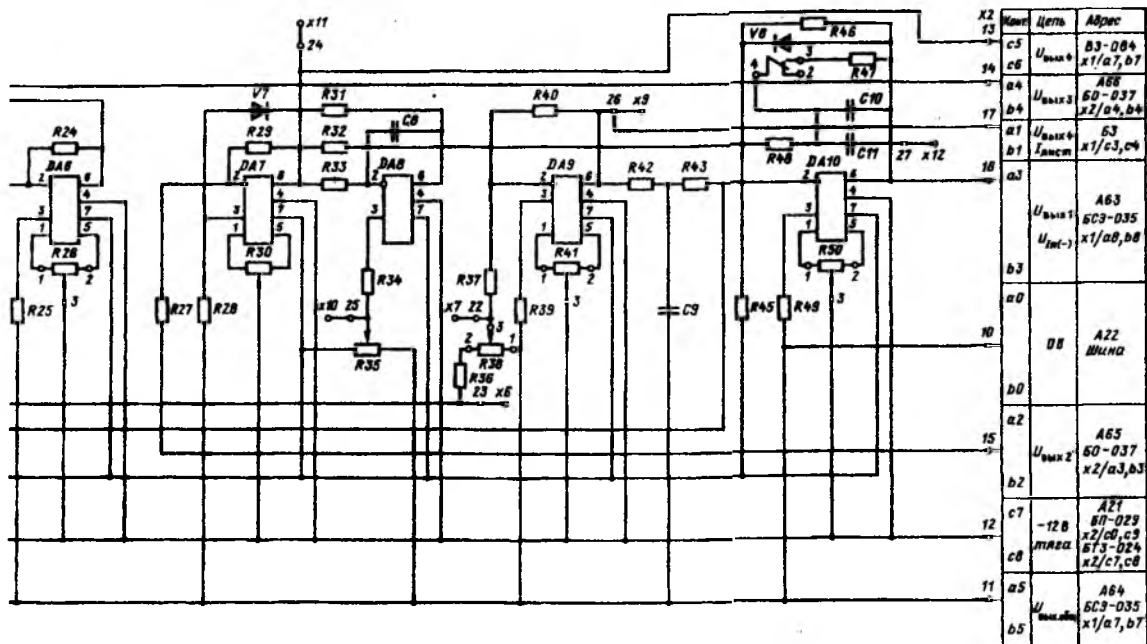


Рисунок 1.6 – Принципиальная схема блока регулятора тока якоря БРТЯ-032 (продолжение)

логического элемента *ИЛИ—min*. ЗИ собран на операционных усилителях  $DA3 \square DA6$  типа 140УД7. Операционный усилитель  $DA3$ , в обратную связь которого включен операционный усилитель  $DA4$ , является ограничителем напряжения.

В исходном состоянии, когда входной сигнал (к. т.  $X3—X5$ ) на  $DA3$  меньше опорного напряжения, на выходе 6 усилителя  $DA4$  имеется большой положительный потенциал, который запирает диод  $V4$ . Опорное напряжение равно уровню ограничения входного сигнала.

По мере увеличения входного сигнала на выходе 6 усилителя  $DA2$  появляется напряжение, и, как только оно сравнивается с опорным, операционный усилитель  $DA4$  переключается в другое состояние, т. е. на выходе 6 усилителя  $DA4$  появляется отрицательный потенциал и диод  $V4$  открывается. Через  $V4$  подключается обратная связь на  $DA3$ , ограничивается выходное напряжение на уровне опорного (к. т.  $X3—X8$ ), от которого зависит скорость изменения выходного напряжения ЗИ.

Операционный усилитель  $DA5$ , в обратную связь которого включена емкость  $C7$ , является интегратором выходного напряжения, поступающего с ограничителя. Операционный усилитель  $DA6$  представляет собой инвертор, необходимый для осуществления отрицательной обратной связи, т. е. как только напряжение на выходе ЗИ достигнет уровня входного сигнала, вступает в работу обратная связь через  $R18$ , напряжение на выходе ограничителя падает и процесс интегрирования прекращается.

Таким образом, задатчик интенсивности преобразует входной сигнал в линейно-зависимый от времени. Инвертор знака тока якоря собран на операционном усилителе  $DA9$  типа 140УД7. Информация о величине тока якоря с блока измерений БИ-027 (к.т.  $X3—X6$ ) поступает на делитель  $R36, R38$  (к.т.  $X3—X7$ ), который необходим для согласования уровня выходного сигнала инвертора. Напряжение, пропорциональное истинному значению тока якоря, с выхода инвертора (к.т.  $X3—X9$ ) подается на вход регулятора.

Логический элемент *ИЛИ—min* собран на диодах  $V1, V2$  и резисторе  $R7$  с использованием операционного усилителя  $DA2$ . Диод  $V3$  и резистор  $R8$  служат для компенсации падения напря-

жения на диодах  $V1$ ,  $V2$  схемы *ИЛИ-min*. Усилитель  $DA2$  включен по схеме повторителя напряжения с высоким входным сопротивлением, что необходимо для нормальной работы схемы *ИЛИ*.

Ограничитель тока якоря собран на операционном усилителе  $DA7$ , в обратную связь которого включен усилитель  $DA8$ . Работа ограничителя аналогична работе ограничителя в ЗИ и отличается лишь тем, что ограничивает напряжение отрицательного потенциала (к.т.  $X3-X11$ ). Опорное напряжение ограничителя задается резистором  $R35$  (к.т.  $X3-X10$ ).

Регулятор тока якоря выполнен на операционном усилителе ОУ  $DA10$  типа 140УД7 как пропорционально-интегрирующий регулятор, в обратную связь которого включен резистор  $R48$  и конденсаторы  $C10$ ,  $C11$ .

Регулятор РТЯ сравнивает заданное значение тока якоря, поступающее с ограничителя напряжения, с его истинным значением, поступающим с инвертора знака, и по сигналу рассогласования автоматически регулирует заданное значение тока якоря.

Реле  $K$  служит для установления нулевых начальных условий регулятора тока якоря при отсутствии заданного значения тока. Оно срабатывает по сигналу, поступающему с блока БЗИ-041. При отсутствии задания реле  $K$ , включая контактами 3-4 резистор  $R47$ , необходимый для ограничения тока разряда конденсаторов  $C10$ ,  $C11$ , шунтирует эти конденсаторы. В этом случае регулятор РТЯ переходит в режим повторителя напряжения и резистором  $R50$  выставляется напряжение на выходе  $DA10$ , равное нулю (к.т.  $X3-X12$ ). Назначение других элементов схемы:  $R6$ ,  $R9$ ,  $R13$ ,  $R22$ ,  $R26$ ,  $R30$ ,  $R41$ ,  $R50$  служат для балансировки операционных усилителей.

### ***Блок регулятора тока возбуждения БРТВ-028***

Блок регулятора тока возбуждения БРТВ-028 (рисунок 1.7) предназначен для регулирования тока возбуждения в соответствии с заданным значением в режиме рекуперативного торможения и состоит из ограничителя входного напряжения, регулятора тока возбуждения, реле нулевых начальных условий.

Операционный усилитель *DA11* типа 140УД7, в обратную связь которого включен операционный усилитель *DA2* с разомкнутой обратной связью, представляет ограничитель входного напряжения. Принцип работы аналогичен описанному в блоке БРТЯ-032.

Входной сигнал (к. т. *X3—X4*) с выхода блока БРСТ-031 поступает на вход 2 усилителя *DA1*. На выходе 6 последнего (к. т. *X3—X6*) максимальный сигнал будет на уровне опорного напряжения (к. т. *X3—X5*). Уровень опорного напряжения выбирается таким, чтобы регулятор РТВ отработал максимально допустимое значение тока возбуждения, а в блоке БРСТ-031 вступил в работу нелинейный элемент.

Выходной сигнал с ограничителя поступает на вход регулятора РТВ, сюда же через Т-образный фильтр *R17, R13, C6* подается истинное значение тока возбуждения. Последнее с блока БИ-027 (к. т. *X3—X8*) через масштабирующий потенциометр *R19, R18* поступает на регулятор РТВ. Конденсатор *C1* служит для сглаживания пульсаций.

Регулятор РТВ выполнен на операционном усилителе *DA3* типа 140УД7 как пропорционально-интегрирующий регулятор (ПИ-регулятор). В обратную связь этого регулятора включены резистор *R10* и конденсаторы *C7—C9*. На входе регулятора РТВ происходит алгебраическое сложение заданного и истинного значений тока возбуждения и по сигналу рассогласования автоматически регулируется ток возбуждения в соответствии с заданным значением (к. т. *X3—X9*).

Реле нулевых начальных условий *K* типа РПГ-3 управляется транзисторным усилителем, расположенным в блоке БЗИ-041. Через нормально разомкнутые контакты 3—4 реле *K* и резистор *R11* шунтируются конденсаторы *C7—C9* при нулевом значении входного напряжения. Резистор *R11* служит для ограничения тока через контакты 3—4 реле *K*. Напряжение питания схемы составляет +12 В.

Назначение остальных элементов: конденсаторы *C2 - C4* — для сглаживания напряжений питания +12 и -12 В; резисторы *R7, R16* — для балансировки нуля операционных усилителей *DA1* и *DA3*.

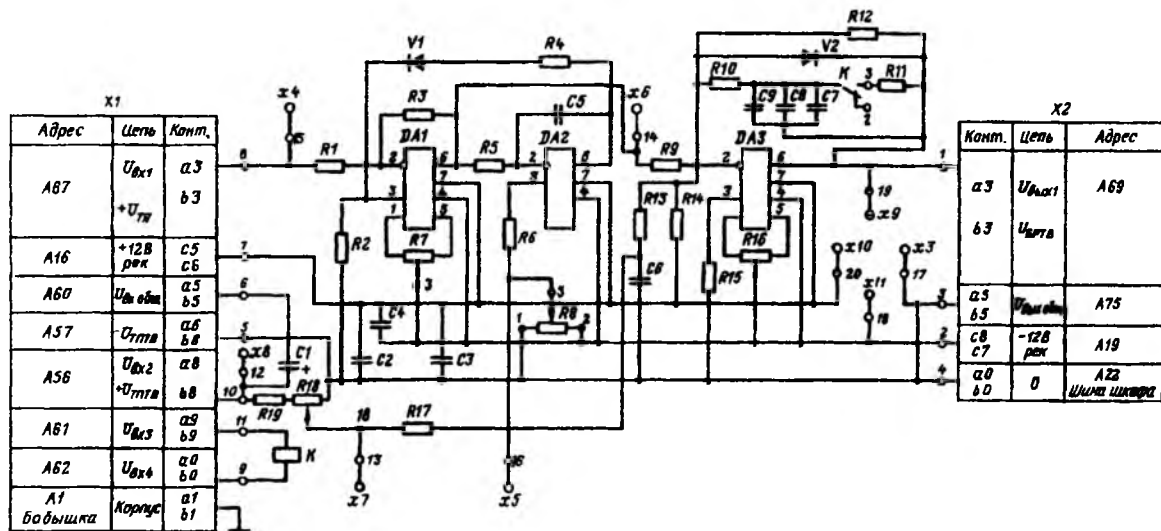


Рисунок 1.7 – Принципиальная схема блока регулятора тока возбуждения БРТВ-028

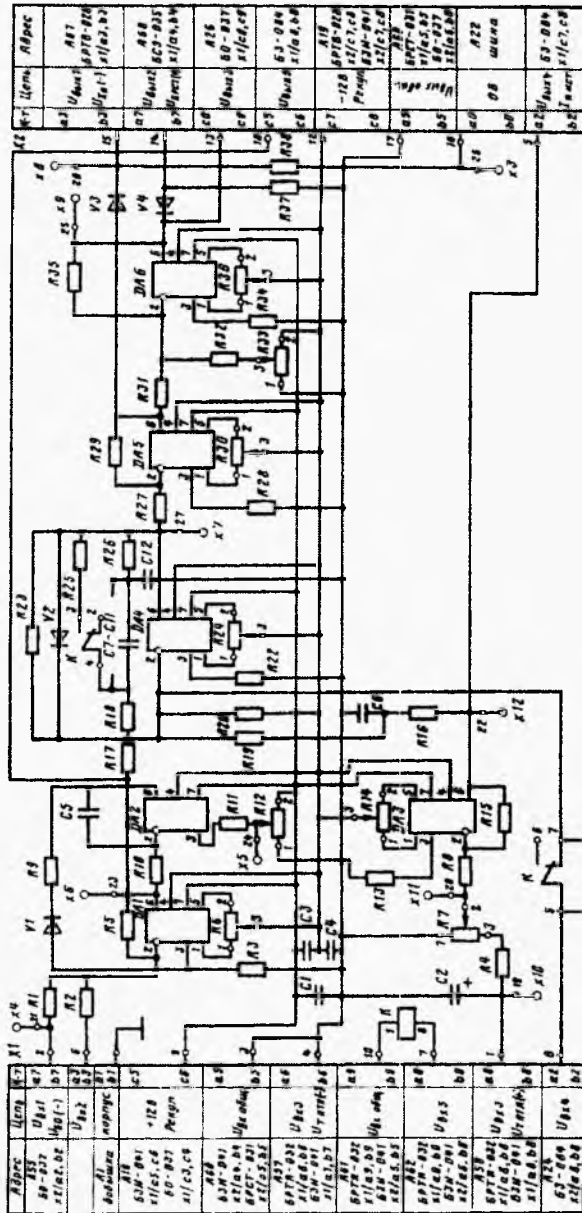
### **Блок регулятора силы торможения БРСТ-031**

Блок регулятора силы торможения (рисунок 1.8) предназначен для регулирования силы торможения в соответствии с заданным значением, разделение каналов управления ВИП и ВУВ и состоит из ограничителя напряжения; регулятора силы торможения; инвертора знака тока якоря и выходного сигнала регулятора РСТ; нелинейного элемента; реле нулевых начальных условий. Операционный усилитель  $DA1$ , в обратную связь которого включён операционный усилитель  $DA2$ , представляет собой ограничитель значения входного сигнала (к.т.  $X3 - X4$ ), поступающего с блока ограничений БО-037. Работа ограничителя аналогична работе ограничителя блока БРТЯ-032.

Резистором  $R12$  выставляется опорное напряжение (к.т.  $X3 - X5$ ), которое задаёт уровень напряжения ограничения на входе  $DA1$  (к.т.  $X3 - X6$ ). Входной сигнал отрицательной полярности ограничивается на уровне опорного напряжения. Регулятор силы торможения выполнен на операционном усилителе  $DA4$  как пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор (ПИД-регулятор), в обратную связь которого включены резисторы  $R18, R26$  и конденсаторы  $C7 - C11$ .

Регулятор РСТ сравнивает заданное значение, поступающее с ограничителя напряжения, с истинным значением тока якоря, поступающего с инвертора знака (к.т.  $X3 - X12$ ), и по сигналу рассогласования, автоматически регулирует заданное значение силы торможения. Операционный усилитель  $DA3$  представляет собой схему инвертора знака входного сигнала (к.т.  $X3 - X11$ ), поступающего с блока измерений (к.т.  $X3 - X10$ ). Делитель  $R4, R7$  необходим для согласования уровня входного сигнала инвертора  $DA2$ . Напряжение,





пропорциональное истинному значению тока якоря, поступает на вход регулятора РСТ. Операционный усилитель  $DA5$  служит для разделения сигналов управления ВИП и ВУВ и представляет собой схему инвертора с коэффициентом усиления, равным 1. С выхода  $DA5$  сигнал поступает через  $V3$  и  $R38$  в блок БРТВ, а через  $R31$  на вход нелинейного элемента. Такое построение схемы позволяет управлять поочередно, вначале каналом ВУВ, а затем ВИП. Нелинейный элемент выполнен на операционном усилителе  $DA6$  типа 140УД7 и управляет каналом ВИП.

Резистором  $R33$  выставляется зона нечувствительности, при которой на выходе 6  $DA6$  (к.т.  $X3 - X9$ ) появляется положительный потенциал и диод  $V4$  заперт. Этот диод будет заперт до тех пор, пока сигнал с выхода инвертора  $DA5$  будет меньше, чем сигнал с резистора  $R33$ , при этом будет работать только канал ВУВ. При равенстве этих сигналов на выходе  $DA6$  меняется потенциал, и диод  $V4$  открывается, осуществляя управление по каналу ВИП. Зона нечувствительности выбирается такой, чтобы в ней работал только канал ВУВ, и при достижении током возбуждения максимального значения, начинал работать канал ВИП. Реле  $K$  служит для установления нулевых начальных условий регулятора РСТ. Реле  $K$  срабатывает по сигналу, поступающему с блока БЗИ-041. При отсутствии сигнала на входе ограничителя напряжения, реле срабатывает и своими контактами 3-4 переключает конденсаторы  $C7 - C11$ . При этом регулятор РСТ становится как повторитель напряжения. При заданном значении порядка 140 мВ реле  $K$  обесточено, и конденсаторы  $C7 - C11$  раскорачиваются.

Назначение других элементов схемы:  $R4, R7, C2$  – фильтр напряжения с блока измерений БИ-027;  $R6, R14, R24, R30, R36$  – служат для балансировки операционных усилителей  $DA1, DA3, DA4, DA5, DA6$ .

Наиболее перспективными системами автоматического управления э. п. с. являются многоконтурные САУ. Функциональная схема системы автоматического управления электровоза ВЛ85, реализованная в виде блока автоматического управления (БАУ-002), представляет собой систему автоматического управления в режимах тяги и рекуперативного торможения и

позволяет выполнять управление электровозами по системе многих единиц. Она выполнена как многоконтурная система подчинённого регулирования, причём в режиме тяги она работает как двухконтурная с контурами регулирования скорости и тока, а в режиме рекуперации – как трёхконтурная с контурами регулирования скорости, силы торможения и тока возбуждения.

## **2 Функциональная схема двухконтурной системы автоматического управления скоростью и током в режиме тяги**

В режиме тяги функциональная схема САУ (рисунок 2.1) включает в себя задающие устройства по току  $ЗУI$  и скорости  $ЗУv$ , конструктивно реализованные в виде контроллера машиниста КМ, устройство управления внешнего контура регулирования скорости  $УУv$ , промежуточное устройство ИЛИ  $1-min$ , устройство ограничения тока якоря УОТЯ, сглаживающее устройство, определяющее интенсивность нарастания сигнала ПУ1, устройство управления внутреннего контура регулирования тока  $УУI$ , согласующее устройство СУ1, исполнительное устройство ИсУ1 – четырёхзонный выпрямительно-инверторный преобразователь, объекты управления ОУ1, представляющий собой цепь выпрямленного тока электровоза, ОУ2, выполняющий преобразование тока в силу тяги электровоза, и ОУ4, соответствующий механической части электровоза и поезда.

При пуске заданное значение тока якоря  $i_a$  через элементы ИЛИ  $1-min$ , УОТЯ и ПУ1 поступает на устройство сравнения УС2. Устройство ПУ1 обеспечивает плавное увеличение заданного значения тока до значения, соответствующего положению рукоятки  $ЗУI$ . Рассогласование  $\square_2$  между сигналами, пропорциональными заданному и текущему значениям тока двигателя, отрабатывается устройством управления  $УУI$ , работающим в режиме стабилизации. Такая структура системы обеспечивает разгон электровоза с заданным  $ЗУI$  значением тока тяговых двигателей до заданного при помощи  $ЗУv$  значения скорости движения. После этого САУ переходит в режим стабилизации скорости. В этом режиме задание тока определяется устройством управления  $УУv$ , что обеспечено включением в схему элемента

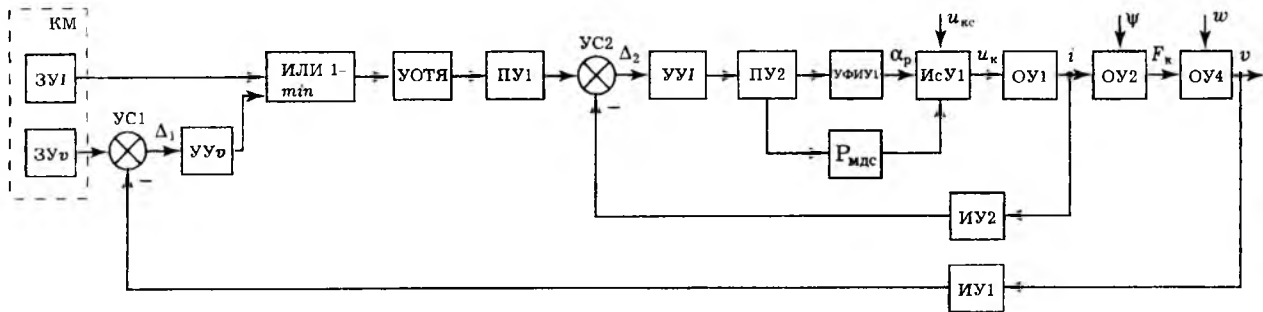


Рисунок 2.1 – Функциональная схема системы автоматического управления электровоза ВЛ85 в режиме тяги

ИЛИ 1-*min*, пропускающего на свой выход минимальный из входных сигналов. Поскольку при пуске фактическое значение скорости всегда меньше заданного, сигнал на выходе УУ $\nu$  всегда больше, чем сигнал на выходе УУ $I$ . Поэтому в режиме пуска эта САУ работает как одноконтурная система стабилизации тока. После достижения заданной скорости движения сигнал на выходе УУ $\nu$  становится меньше сигнала на выходе УУ $I$  и САУ начинает работать как двухконтурная.

Промежуточное устройство ПУ2 обеспечивает согласование уровней выходного сигнала УУ $I$  и входного сигнала устройства формирования импульсов управления УФИУ1 выпрямительно-инверторного преобразователя в качестве которого использованы соответствующие элементы блока управления выпрямительно-инверторным преобразователем типа БУВИП-133. При увеличении угла регулирования  $\alpha_p$  и, следовательно, повышении напряжения  $u_k$  до максимального значения и при наличии положительного рассогласования по скорости  $\Omega_1 - \Omega_0$  промежуточное устройство ПУ2 формирует сигнал на включение регулятора магнитодвижущей силы  $P_{\text{мдс}}$ , который выполняет ступенчатое шунтирование обмотки возбуждения тягового двигателя с помощью включения соответствующих контактов. Устройство УОТЯ ограничивает ток якоря допустимым максимальным значением  $I_{\text{max}}$ .

### **3 Функциональная схема трёхконтурной системы автоматического управления скоростью, силой торможения и тока возбуждения в режиме рекуперативного торможения**

В режиме рекуперативного торможения в БАУ-002 применена трёхконтурная САУ, осуществляющая регулирование скорости движения электровоза, силы торможения и тока возбуждения (рисунок 3.1). В её состав входят задающее устройство силы торможения ЗУВ и скорости ЗУ $\nu$ , устройство управления УУ $\nu$ , устройства ИЛИ 2-*min*, ограничитель тока якоря УОТЯ, сглаживающее устройство ПУ3, устройство управления УУВ, устройство ограничения силы торможения по коммутации УОСТ, исполнительные устройства ИсУ1, ИсУ2 и объекты управления

ОУ1 – ОУ4. В качестве ИсУ2 использована выпрямительная установка возбуждения типа ВУВ-001.

Контуры регулирования тока возбуждения и силы торможения являются внутренними, и контур регулирования скорости – внешним. Промежуточное устройство ПУ5 выполняет функцию разделения 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 путём изменения э. д. с. силового трансформатора при постоянстве тока возбуждения. Управление исполнительными устройствами ИсУ1 и ИсУ2 осуществляется через промежуточные устройства ПУ2 и ПУ4 и устройства формирования импульсов управления УФИУ1 и УФИУ2. В качестве последних также использованы элементы БУВИП-133.

Программное устройство ПрУ выполняет простейший алгоритм ограничения по коммутации на основе соотношения  $i_b/i_a = 0,43$ . Сигнал с выхода УОСТ вместе с сигналами с выхода УУч и ЗУВ поступают на вход ИЛИ 2-*min*, который пропускает на свой выход минимальный из этих трёх сигналов. Это обеспечивает реализацию наименьшего значения тормозной силы, необходимой для данных условий движения. Назначение остальных функциональных устройств, изображённых на рисунке 3.1, соответствует устройствам, изображённым на рисунке 2.1.

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

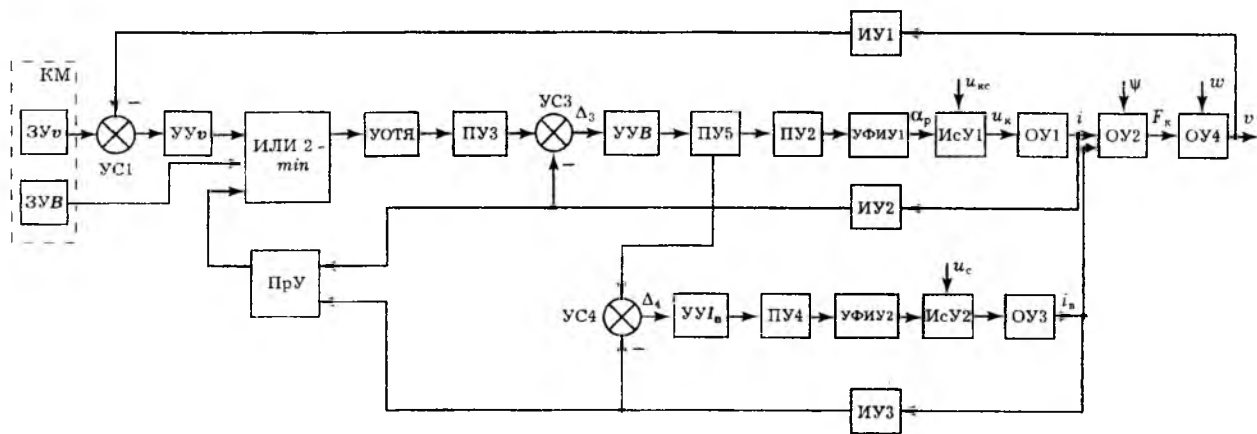


Рисунок 3.1 – Функциональная схема системы автоматического управления электровоза ВЛ85 в режиме рекуперативного торможения

#### 4 Расчёт параметров законов управления

Используемые в блоке автоматического управления законы управления реализованы следующим образом:

- закон управления скоростью (в режимах тяги и рекуперации) — инерционный;
- закон управления током якоря (в режиме тяги) — пропорционально-интегрирующий;
- закон управления током возбуждения (в режиме рекуперации) — пропорционально-интегрально-дифференцирующий;
- закон управления током возбуждения (в режиме рекуперации) — пропорционально-интегрирующий.

На рисунке 4.1 *а – в* представлены принципиальные схемы звеньев, реализующих указанные законы управления в САУ электровоза ВЛ85, соответственно инерционное апериодическое звено I порядка, издромное звено и пропорционально-интегрально-дифференцирующее звено.

Передаточные функции указанных звеньев, реализующих:

- инерционный закон (рисунок 4.1, *а*):

$$W_{\text{пер}}(p) = - \frac{k_{1\text{пер}}}{1 + T_{1\text{пер}}p}, \quad (1)$$

где  $k_{1\text{пер}} = \frac{R_0}{R_1}$ ,  $T_{1\text{пер}} = R_1 C_0$ .

- ПИ закон управления (рисунок 4.1, *б*):

$$W_{\text{пер}}(p) = - \left( k_{1\text{пер}} + \frac{1}{T_{1\text{пер}}p} \right), \quad (2)$$

где  $k_{1\text{пер}} = \frac{R_0}{R_1}$ ,  $T_{1\text{пер}} = R_1 C_0$ .

- ПИД закон управления (рисунок 4.1, *в*):



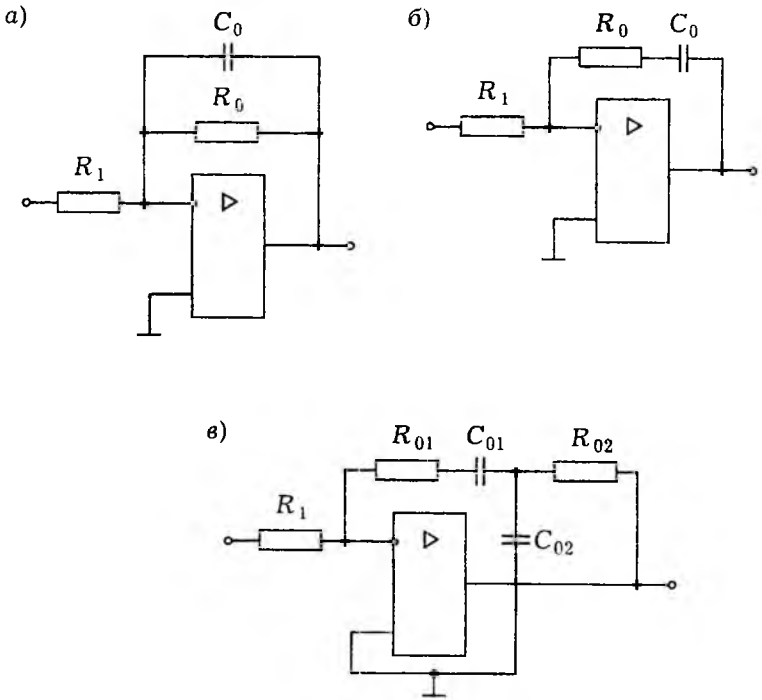


Рисунок 4.1 – Принципиальные схемы звеньев, реализующих законы управления в САУ электровоза ВЛ85:

*a* – аperiodическое звено первого порядка;

*б* – ПИ закон управления;

*в* – ПИД закон управления.

$$W_{\text{пер}}(p) = \frac{(1 + T_{1\text{пер}}p) \cdot (1 + T_{2\text{пер}}p)}{T_{3\text{пер}}p}, \quad (3)$$

где величины  $T_{1\text{пер}}$ ,  $T_{2\text{пер}}$  и  $T_{3\text{пер}}$  определяются следующими соотношениями:

$$\begin{cases} T_{1\text{пер}} \cdot T_{2\text{пер}} = R_{01} R_{02} \cdot C_{01} C_{02}; \\ T_{1\text{пер}} + T_{2\text{пер}} = R_{01} C_{01} + R_{02} C_{02} + R_{02} C_{01}; \\ T_{3\text{пер}} = R_1 C_{01}. \end{cases} \quad (4)$$

Обычно передаточную функцию звена, реализующего ПИД закон записывают в виде:

$$W_{\text{пер}}(p) = k_{\text{пер}} + \frac{1}{T_{3\text{пер}} p} + T_{4\text{пер}} p = \frac{k_{\text{пер}} T_{3\text{пер}} p + 1 + T_{3\text{пер}} T_{4\text{пер}} p^2}{T_{3\text{пер}} p}.$$

Если числитель представить в виде произведения как и в (3), то

$$(1 + T_{1\text{пер}} p) \cdot (1 + T_{2\text{пер}} p) = 1 + (T_{1\text{пер}} + T_{2\text{пер}}) p + T_{1\text{пер}} T_{2\text{пер}} p^2,$$

откуда:

$$\begin{cases} T_{1\text{пер}} + T_{2\text{пер}} = k_{\text{пер}} T_{3\text{пер}} & \text{и} & k_{\text{пер}} = \frac{T_{1\text{пер}} + T_{2\text{пер}}}{T_{3\text{пер}}}; \\ T_{1\text{пер}} \cdot T_{2\text{пер}} = T_{3\text{пер}} \cdot T_{4\text{пер}} & \text{и} & T_{4\text{пер}} = \frac{T_{1\text{пер}} \cdot T_{2\text{пер}}}{T_{3\text{пер}}}. \end{cases}$$

Таблица 4.1 – Исходные данные для вычисления параметров законов управления

Регулятор Элемент	БРС- 023	БРТЯ-032	БРТВ-028	БРСТ- 031
$C_0 (C_{01})$	C6	C10, C11	C7 – C9	C7 – C11
$R_0 (R_{01})$	R15	R48	R10	R18
$C_{02}$	–	–	–	C12
$R_{02}$	–	–	–	R26
$R_1$	R11	R43	R9	R17

## 5 Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с назначением, устройством и принципом действия блока автоматического управления электровоза ВЛ-85.
2. Воспользовавшись формулами (1) – (3), рисунком 4.1, таблицей 4.1 и приложением 1, заполнить таблицу 5.1
3. На рисунках 1.4 – 1.8 выделить элементы, реализующие функции устройств управления в режимах тяги и рекуперации. Обосновать выбор типов звеньев для реализации соответствующих законов управления.
4. На рисунках 2.1 и 3.1 поименовать связи, соединяющие блоки функциональных схем в зависимости от вида передаваемых по ним сигналов.

Таблица 5.1 – Результаты расчёта параметров законов Управления

Ре- жим ра- боты	Регулятор	Значения сопротивлений и ёмкостей					$k_{\text{пер}}$	$T_{1 \text{ пер}}$	$T_{2 \text{ пер}}$	$T_{3 \text{ пер}}$
		$R_{01}$	$R_{02}$	$C_{01}$	$C_{02}$	$R_1$				
Тяга	Скорости									
	Тока									
Рекупера- ция	Скорости									
	Силы тормо- жения									
	Тока воз- буждения									

### Список литературы

1. Автоматизация электроподвижного состава: Учебник для вузов ж.-д. трансп./А.Н. Савоськин, Л.А. Баранов, В.П. Феоктистов; Под ред. А.Н. Савоськина. М.: Транспорт, 1990. 311 с.

2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования – М.: Наука, 1975
3. Системы автоматического и телемеханического управления электроподвижным составом/ Л.А. Баранов, Е.В. Ерофеев, В.И. Астрахан и др.; Под ред. Л.А. Баранова. М. Транспорт, 1984. 311 с.
4. Тулупов В. Д. Автоматическое регулирование сил тяги и торможения электроподвижного состава. – М: Транспорт, 1976. 368 с.
5. Винер Н. Кибернетика, или управление и связь в животном и машине. 2-е изд. М. Наука, 1983. 340 с.
6. Грузовые электровозы переменного тока: Справочник/ З.М. Дубровский, В.И. Попов, Б.А. Тушканов. – М.: Транспорт, 1991. – 471 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица П1.1 – Номиналы некоторых элементов блоков БАУ-002

Наименование блока	Элемент	Величина
Блок регуляторов скорости БРС-023	R11, R14	10 кОм
	R15, R18	200 кОм
	C6, C9	1 мкФ
Блок регулятора тока якоря БРТЯ-032	R48	2,8 кОм
	R43	5,11 кОм
	C10, C11	22 мкФ
Блок регулятора тока возбуждения БРТВ-028	R9, R10	10 кОм
	C7	10 мкФ
	C8, C9	22 мкФ
Блок регулятора силы торможения БРСТ-031	R17	20 кОм
	R18	10 кОм
	R26	5,11 кОм
	C7 – C11	22 мкФ
	C12	10 мкФ

Учебно-методическое издание

Алексеев Алексей Сергеевич  
Пудовиков Олег Евгеньевич  
Чучин Антон Александрович

Аналоговая система автоматического управления электровоза  
однофазно-постоянного тока

Методические указания к лабораторным работам

---

Подписано в печать	Заказ №	Изд. № 14-13
Усл. печ. л.	Формат	Тираж 200 экз.

---