



ОПЫТНЫЙ ЭЛЕКТРОПОЕЗД ЭР29

Опытный шестивагонный электропоезд ЭР29 переменного тока с рекуперативным торможением и длиной вагонов 21,5 м изготовлен в 1985 г. Первоначально он был оборудован тиристорными преобразователями с импульсно-фазовым регулированием напряжения на тяговых двигателях (РИФ). В 1987 г. специалисты Рижского филиала ВНИИ вагоностроения (РФ ВНИИВ) в условиях Прибалтийской дороги провели предварительные тягово-энергетические испытания поезда. В 1988—1989гг. ученые ВНИИЖТа и РФ ВНИИВ при участии конструкторов заводов РВЗ и ПО РЭЗ организовали предварительные эксплуатационные испытания и контрольные испытания для определения энергетических показателей и внешней характеристики преобразователей системы РИФ.

В связи с наблюдавшейся при испытаниях электропоезда неустойчивой работой преобразователей РИФ во II квартале 1989 г. в депо Фастов Юго-Западной дороги силами специалистов ПО РЭЗ и РФ ВНИИВ на поезде были установлены вы-прямительно-инверторные преобразователи (ВИП) с компенсаторами реактивной мощности (КРМ). Разработка новой схемы проводилась в РФ ВНИИВ с учетом испытаний ВИП с КРМ на электровозах ВЛ85.

После завершения на Юго-Западной дороге наладочных работ, проведения предварительных энергетических испытаний электропоезда с измененными узлами в марте 1990 г. он поступил на Экспериментальное кольцо ВНИИЖТа для тягово-энергетических испытаний.

Силовая схема и схема цепей управления электропоезда обеспечивают следующие режимы работы: пуск и разгон на

маневровом и одном тяговом положениях с регулируемой интенсивностью тяги; изменение направления движения; служебное рекуперативное торможение с максимальной скорости движения до скорости 5—10 км/ч с регулируемой интенсивностью торможения; дотормаживание электропневматическим тормозом со скорости 5—10 км/ч до полной остановки поезда; рекуперативное торможение моторными вагонами и электропневматическое торможение немоторными; служебное и экстренное электропневматическое торможение всеми вагонами независимо от рекуперативного торможения; автоматическое замещение электропневматическим тормозом в случаях неисправности электрического тормоза.

Управление режимами тяги, электрическим торможением и электрическим совместно с электропневматическим торможением сосредоточено на контроллере машиниста. Штурвал контроллера машиниста имеет десять положений (нулевое, два тяговых и семь тормозных): нулевое — пуск и электрическое торможение отсутствуют; маневровое — маневровый режим в тяге; пусковое (тяговое) — автоматический пуск с различными уставками и разгон с минимальным коэффициентом регулирования возбуждения тяговых двигателей (0,4); первое, второе, третье, четвертое, пятое тормозное — рекуперативное торможение соответственно с минимальной, тремя пониженными и номинальной уставкой тока якоря тяговых двигателей; шестое тормозное — рекуперативное торможение моторными вагонами с номинальной уставкой тока двигателей и электропневматическое торможение немоторными вагонами; седьмое тормозное — рекуперативное торможение моторными и электропневматическое торможение всеми (моторными и немоторными) вагонами.

Уставка пускового тока задается переключателем, установленным на пульте в кабине машиниста, а тормозного тока — контроллером машиниста. Реализованный на электропоезде двухзонный ВИП и трехступенчатый КРМ состоят из следующих основных элементов: самого ВИП, блока конденсаторов, блока формирователей импульсов, блока управления (рис. 1).

К тяговым обмоткам силового трансформатора Т1М подключен шестиплечий мост двухзонного преобразователя с тиристорными плечами А1 — А6 (рис. 2). Плавное регулирование (ослабление) тока возбуждения тяговых двигателей М1 — М4 осуществляется тиристорными плечами А7, А10. Шунтирующие резисторы $R_{ш}$ предназначены для снижения пульсации возбуждения. Резисторы $R_{н}$ ограничивают минимально допустимый коэффициент ослабления возбуждения тяговых двигателей в режиме тяги.

Параллельно тяговой обмотке 1—0 подключен через тиристорное плечо А11 индуктивно-емкостный компенсатор 1-2 — С2, параллельно обмотке 0—2 через тиристорное плечо А12 — конденсатор L_a — С3. Параметры индуктивно-емкостных контуров: $L_1=L_2=L_3=2,2$ мГн; $C_2=C_3=640$ мкФ. Последовательно-параллельные цепи тяговых двигателей подключены к выходу преобразователя через сглаживающий реактор L_d . ВИП и КРМ размещены на моторном вагоне, а силовой трансформатор, воздушный выключатель Q1M и токоприемник — на прицепном или головном.

В начале пуска, после включения контакторных аппаратов, размещается включение первого компенсатора и начинается автоматическое регулирование тока тяговых двигателей в первой зоне тиристорными плечами А1, А2, А4, А5. При этом фазовое регулирование осуществляется плечами А1, А2, а нулевой контур образуется поочередно плечами А1, А4 и А2, А5.

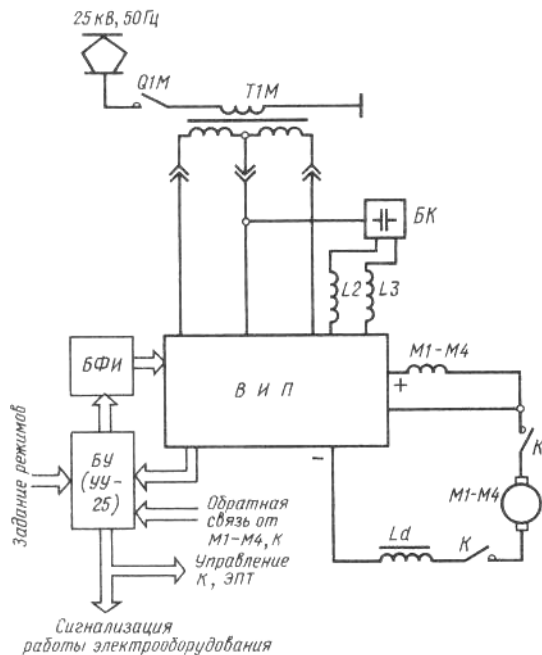


Рис. 1. Структурно-блочная схема компенсированного ВИП: БК — блок конденсаторов; ВИП — выпрямительно-инверторный преобразователь; БФИ — блок формирователей импульсов; БУ — блок управления движением; К — линейные и защитные контакторы, реверсор, тормозной переключатель

По мере разгона поезда при достижении минимально допустимого угла включения тиристорных плеч A1, A2, регулирование напряжения и тока тяговых двигателей обеспечивается фазовым управлением тиристорами плеч A1, A2 (первая зона). При переходе с первой на вторую зону регулирования плечом A12 дополнительно подключается компенсатор La — Ct. После достижения полного выпрямленного напряжения в работе находятся главные тиристорные плечи A1, A3, A4, A6 и разделительные диоды V1, V2.

Плавное ослабление возбуждения тяговых двигателей осуществляется фазовым управлением плеч A7 — A10 в интервалах соответствующих полупериодов питающего напряжения. Управление тиристорами плеч A7, A8 разрешается в полупериоды проводящего состояния плеча A4, а управление тиристорами плеч A9, A10 — в другой полупериод, когда включено плечо A6 или A5. Выключение плеч A7 — A10 происходит практически одновременно с моментом выключения плеч A4 или A6 соответственно, т. е. после окончания коммутации тока в основных плечах преобразователя.

При движении в маневровом режиме компенсаторы не подключаются из-за перекомпенсации. При рекуперативном торможении после переключения цепей тяговых двигателей и включения линейных контакторов включаются оба компенсатора и преобразователь переводится в режим инвертирования. При этом для обеспечения плавности самовозбуждения тяговых двигателей регулирование тока начинают с минимального коэффициента ослабления поля, а инвертор переводят в режим противотока.

Когда общий ток двигателей достигает 150—200 А, преобразователь автоматически переводится в нормальный режим инвертирования с увеличением коэффициента ослабления поля. В инверторном режиме ВИП работает с постоянным углом запаса δ 18—20°. В зоне высокой скорости движения ток якорей изменяется, в основном, плавным регулированием коэффициента ослабления поля, а при полном поле — двухзонным преобразователем: вначале изменением угла регулирования плеч A2, A3 (вторая зона), затем — A1, A2 (первая зона).

Преобразователь смонтирован в камере, размещенной под вагоном, имеет принудительную систему воздушного охлаждения на испарительных тепловых трубках, выполнен на тиристорах T453 с предельным током 800 А и повторяющимся напряжением 3600 В. Общее число тиристоров в ВИП — 28, диодов — 2.

Для защиты последовательно включенных тиристоров от коммутационных перенапряжений параллельно каждому тиристорному плечу подключены лавинные ограничители перенапряжений, содержащие встречно включенные лавинные диоды типа ДЛ 123 — 350 12-го класса. Ограничение скорости нарастания напряжения на тиристорах обеспечивается R—C-цепями.

Блок управления движением (контроллер УУ25) включает следующие ячейки: регулирования, контроля коммутации, формирования импульсов, распределения импульсов, электропневматического торможения, управления фильтрами, дешифраторов, дотормаживания, индикации, входных реле, управления переключателями, датчиков тока, уставки, синхронизации, разрешения, защиты, выхода защит, выходных реле, управления линейными контакторами, питания.

На электропоезде предусмотрена разработанная в Рижском филиале ЛИИЖТа система диагностики работоспособности ВИП. Она включает в себя встроенное и съемно-встроенное устройства диагностики, а также прибор проверки тиристоров по току утечки.

Встроенное устройство диагностики предназначено для функционального контроля состояния блока управления движением и силовой схемы ВИП. Оно состоит из двух субблоков и размещается в конструктиве контроллера УУ25 (см. рис. 1). Устройство обеспечивает: прием, нормализацию и логическую обработку сигналов датчиков, силовой схемы и контроллера; регистрацию фактов возникновения отказов ВИП (неотпирание какого-либо тиристора, срыв инвертирования, сбой по напряжению контактной сети, исчезновение импульсов управления с выходных преусилителей УУ25, исчезновение напряжения синхронизации); формирование обобщенного сигнала «отказ ВИП» для передачи в кабину

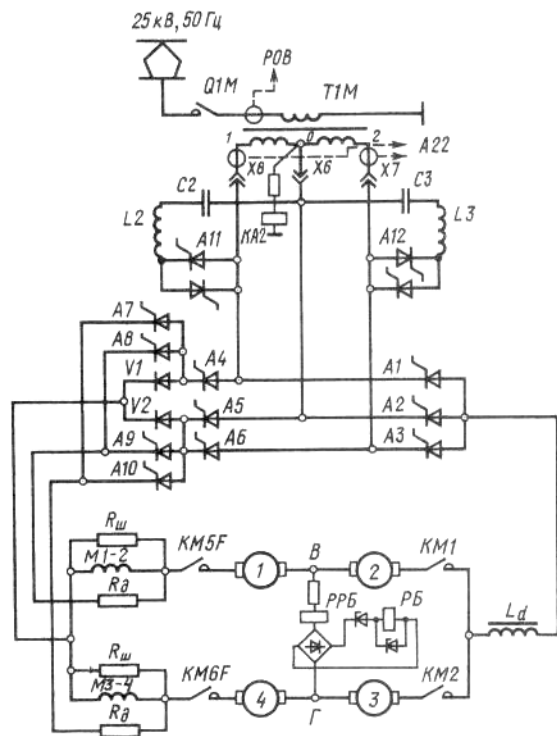


Рис. 2. Упрощенная схема силовых цепей

машиниста; хранение числа возникших отказов (до 16) по важнейшим типам.

Съемно-встроенное устройство диагностики предназначено для проверки работоспособности и поиска дефектов контроллера УУ25 при опущенных токоприемниках без демонтажа его с электропоезда. Диагностирование контроллера при помощи этого устройства осуществляется путем подачи тестовых воздействий с кнопок передней панели устройства на поездные линии управления электропоездом (вперед, назад, пуск, тормоз, маневровая позиция, реле боксования, разносное боксование). Реакции контроллера на тест, отображаемые на передней панели контроллера и устройства диагностики, сравнивают с эталонными значениями.

Диагностические параметры высвечиваются на передней панели при помощи светодиодов и цифровых семисегментных индикаторов.

Прибор проверки тиристоров предназначен для оперативной комплексной проверки технического состояния элементов тиристорной ячейки ВИП. Прибор измеряет напряжение загиба вольт-амперной характеристики тиристоров и обеспечивает в одном цикле измерения проверку тиристора на управляемость. Длительность цикла измерения — не более Юс.

Программа тягово-энергетических испытаний предусматривала, в частности, оценку функциональной работоспособности схем и оборудования поезда, определение его основных технических характеристик и энергетических показателей преобразователя, испытания тягового электрооборудования. Тягово-энергетические параметры электропоезда оценены как в расчетном режиме его движения, так и в условиях, близких к эксплуатационным.

Показатели расчетного режима испытаний: длина перегона 3,5 км, техническая скорость 74 км/ч, коэффициент загрузки пассажирами $K_3=1,5$, длина участка обращения 59,5 км, время промежуточной стоянки 30 с, время отстоя после пробега 59,5 км—15 мин. Параметры средневзвешенного для условий эксплуатации электропоездов в Киевском пригородном узле режима (эксплуатационного режима); длина перегона 4,5 км, техническая скорость 62,8 км/ч,

коэффициент загрузки пассажирами $K_3=0,5$, время промежуточной стоянки 30 с.

Имитировали неисправности двух моторных вагонов полного состава поезда путем отключения из тяги и рекуперативного торможения одной секции шестивагонного электропоезда. При испытаниях использовали комплект современных высокоэффективных средств измерений и обработки их результатов.

Разгонные и тормозные характеристики, определенные при испытаниях, показаны на рис. 3 и 4. На рис. 5 для различных уставок тока якоря при пуске и торможении приведены зависимости удельного расхода и возврата электроэнергии от технической скорости, полученные расчетом на персональной ЭВМ по разгонным и тормозным характеристикам, а также по экспериментальным зависимостям удельного расхода и возврата электроэнергии в функции скорости.

Как следует из рис. 5, общий удельный расход электроэнергии секции из головного (Г) и моторного (М) вагонов при $V_T=74$ км/ч равен 28,8 Вт·ч/т·км, в том числе расход на тягу — 44,7, возврат при рекуперации — 17,2, расход на собственные нужды — 1,3 Вт·ч/т·км.

По зависимостям удельного расхода и возврата электроэнергии в функции скорости, расходу электроэнергии на собственные нужды и зафиксированным измерительно-вычислительным комплексом параметрам движения электропоезда ЭР29 в эксплуатационном режиме был определен общий удельный расход электроэнергии в этом режиме движения.

Он составил 19,7 Вт·ч/т·км, в том числе расход на тягу — 24,1, возврат при рекуперации — 6,0, расход на собственные нужды — 1,6 Вт·ч/т·км. Возврат электроэнергии при рекуперативном торможении составил примерно 23 % расхода на тягу и собственные нужды.

Отличительной особенностью новой машины являются ее лучшие по сравнению с серийными электропоездами переменного тока энергетические показатели. Это важно в связи с введением с 1991 г. надбавок к цене киловатт-часа электроэнергии за потребление реактивной мощности и энергии.

В процессе испытаний были определены энергетические характеристики ВИП электропоезда при регулировании и полном напряжении на тяговых двигателях, внешние характеристики, средний коэффициент мощности и баланс реактивной энергии. Интегральные энергетические параметры ВИП для расчетного и эксплуатационного режимов движения приведены в таблице.

Как видно из приведенных данных, средний коэффициент мощности электропоезда ЭР29 в расчетном режиме движения составляет 0,92 при разгоне, 0,75 при торможении и 0,83 за перегон. При отсутствии КРМ этот показатель уменьшается соответственно до 0,76; 0,52; 0,65. Для сравнения: средний коэффициент мощности при разгоне в расчетном режиме движения электропоезда ЭР9М с традиционным ступенчатым регулированием напряжения на тяговых двигателях составляет 0,81.

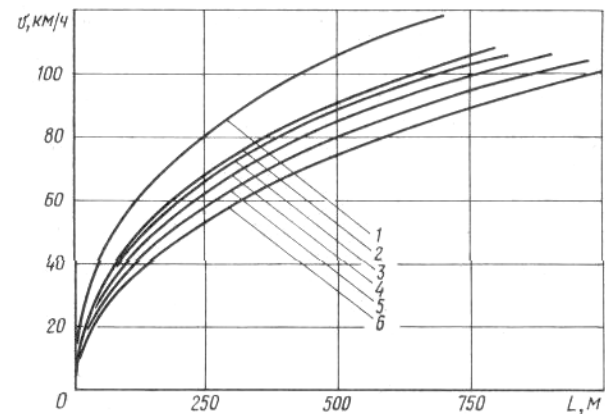
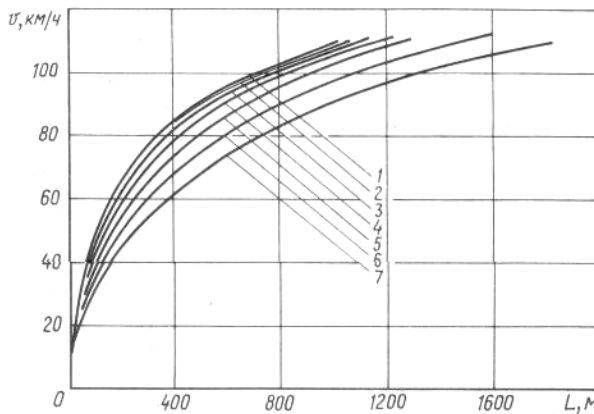
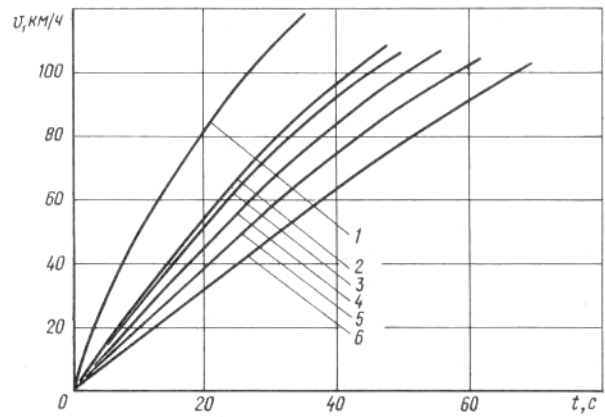
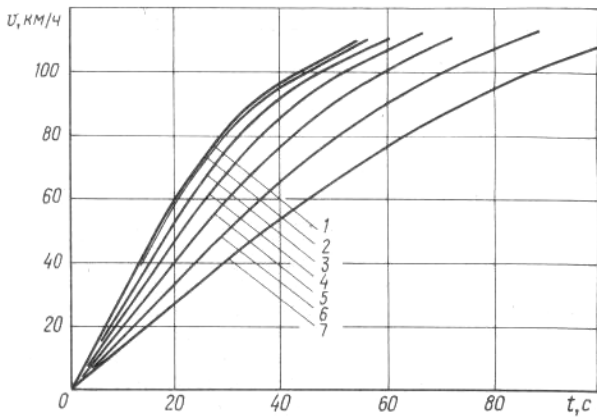


Рис. 3. Разгонные характеристики груженой секции Г+М (масса секции 128,3 т, максимальная уставка тока якоря тяговых двигателей 520 А, напряжение в контактной сети 27 кВ):

- 1 — уставка тока якоря при пуске ($I_{яп}$) — 520 А, среднее ускорение секции от 0 до 60 км/ч (a_{60}) — 0,83 м/с²;
 2 — $I_{яп}$ = 514 А, a_{60} = 0,80 м/с²; 3 — $I_{яп}$ = 473 А, a_{60} = 0,73 м/с²;
 4 — $I_{яп}$ = 421 А, a_{60} = 0,64 м/с²; 5 — $I_{яп}$ = 366 А, a_{60} = 0,55 м/с²;
 6 — $I_{яп}$ = 315 А, a_{60} = 0,46 м/с²; 7 — $I_{яп}$ = 260 А, a_{60} = 0,37 м/с²

Рис. 4. Тормозные характеристики груженой секции Г+М (масса секции 128,3 т, максимальная уставка тока якоря тяговых двигателей 456 А, напряжение в контактной сети 27 кВ):

- 1 — уставка тока якоря при торможении ($I_{ят}$) — 456 А плюс ЭПТ головным вагоном, среднее замедление с 80 до 0 км/ч (b_{80}) — 1,15 м/с²;
 2 — $I_{ят}$ = 456 А, b_{80} = 0,71 м/с²; 3 — $I_{ят}$ = 419 А, b_{80} = 0,67 м/с²;
 4 — $I_{ят}$ = 380 А, b_{80} = 0,59 м/с²; 5 — $I_{ят}$ = 337 А, b_{80} = 0,51 м/с²;
 6 — $I_{ят}$ = 285 А, b_{80} = 0,43 м/с²

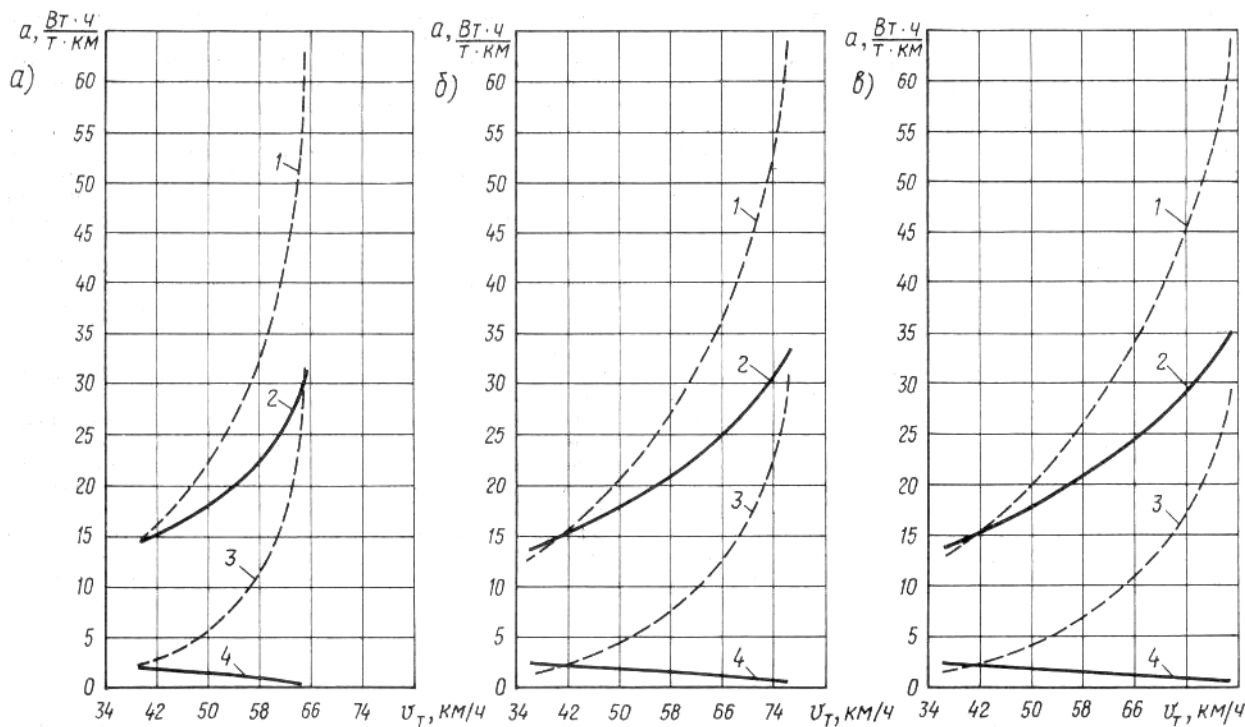


Рис. 5. Удельный расход электроэнергии грузовой секцией Г+М (масса секции 128,3 т) на расчетном перегоне 3,5 км:
а — $I_{ЯТ}=260$ А, $I_{ЯТ}=285$ А; б — $I_{ЯТ}=421$ А, $I_{ЯТ}=380$ А; в — $I_{ЯТ}=520$ А, $I_{ЯТ}=456$ А;
1 — расход на тягу; 2 — общий расход; 3 — возврат при рекуперации; 4 — расход на собственные нужды при выбеге и на стоянке

Тем не менее, испытания показали, что при штатной схеме и параметрах КРАЛ полной компенсации реактивной энергии не достигается. Это происходит, главным образом, из-за отсутствия компенсации в фазах выбега и стоянки, которые составляют для эксплуатационного режима около 80 % общего времени движения по перегону.

Нагрев обмоток тяговых двигателей, сглаживающего реактора, тяговой обмотки силового трансформатора, обмотки дросселя КРМ, силовых тиристоров ВИП и конденсаторов КРМ не превысил допустимых значений.

Испытания защиты силовой цепи от перегрузок и коротких замыканий показали ее достаточную эффективность. Замечания должны быть устранены на этапе опытной эксплуатации поезда. Испытания проводили в следующих аварийных режимах: короткое замыкание на корпус (пробой изоляции); короткое замыкание секций трансформатора, соответствующее двойному короткому замыканию на корпус; перегрузка по току тяговых двигателей в тяговом и тормозном режимах; нарушение алгоритма управления тиристорами ВИП.

Одна из особенностей электропоезда ЭР29 — наличие двойного контроля за боксованием колесных пар моторного вагона: по разности частоты вращения колесных пар и по разности токов в параллельных цепях тяговых двигателей в традиционной системе с реле боксования, срабатывание которого определяется разностью потенциалов между точками В и Г силовой схемы (см. рис. 2).

Исполнительным звеном в выборе информации о боксовании в обоих случаях является блок управления движением.

Он воздействует на регулятор тока якоря, меняет величину тока якоря тяговых двигателей и воздействует на цепи сигнальных ламп в кабине машиниста.

Контроль по разности частоты вращения колесных пар осуществляется с помощью универсальной дискретной системы защиты от избыточного скольжения колесных пар типа ДУКС-110-4. Эта система предназначена для автоматического быстрого обнаружения боксования колесных пар и выдачи рабочих команд в исполнительные органы моторного вагона.

Один комплект системы ДУКС состоит из электронного блока, четырех датчиков скорости, соединительных кабелей. Датчики скорости установлены на буксах колесных пар моторных вагонов и выдают сигналы синусоидальной формы (100 периодов за один оборот) с частотой, пропорциональной частоте вращения колесной пары. Система выдает один общий сигнал независимо от количества буксующих осей.

Характерный вид процессов при работе системы ДУКС иллюстрирует осциллограмма на рис. 6. Зафиксированные на ней напряжения U_{Br} при срабатывании системы ДУКС составили 619, 950, 460, 288, 57, 360 В. Как видно из приведенной осциллограммы, срабатывание системы ДУКС сопровождается уменьшением тока якоря $I_{я}$ с последующим восстановлением первоначального значения тока.

Установлено, что в системе ДУКС для исключения ложных срабатываний устройства сознательно введена «мертвая зона» ее функционирования до скорости движения примерно 10 км/ч. Учитывая, что вероятность возникновения боксова-

Энергетические параметры выпрямительно-инверторного преобразователя электропоезда ЭР29

Режим движения	Наличие КРМ	Средний коэффициент мощности		
		разгон	торможение	за перегон
Расчетный	есть	0,92	0,75	0,83
	нет	0,76	0,52	0,65
Эксплуатационный	есть	0,93	0,76	0,76
	нет	0,76	0,47	0,61

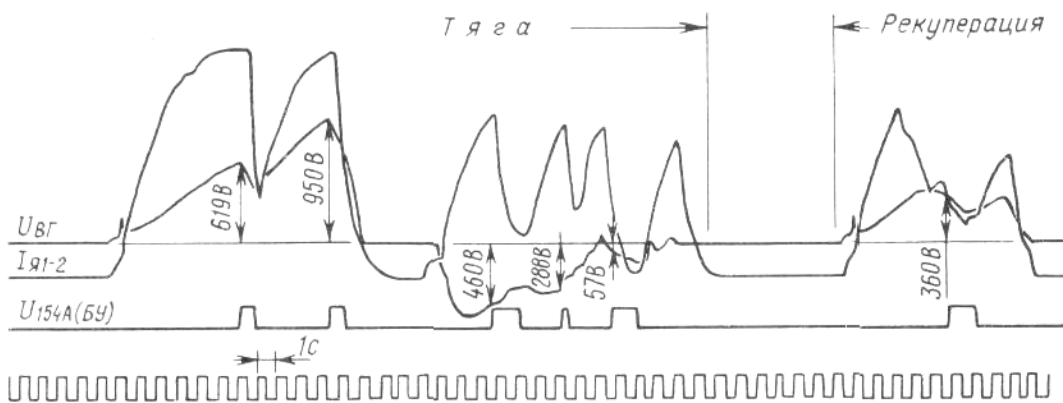


Рис. 6. Осциллограмма, иллюстрирующая процессы при срабатывании системы ДУКС

ния достаточно велика в начальный момент пуска, предложенный разработчиками этой системы способ ликвидации ее ложных срабатываний забракован. В начале 1991 г. на поезде смонтирована новая усовершенствованная система ДУКС-110-4М, испытания которой впереди.

Во время тягово-энергетических испытаний, включавших 22 поездки с общим пробегом более 2300 км, серьезных нарушений работоспособности поезда не зафиксировано. ВИП и КРМ работали устойчиво. Испытаниями подтверждена функциональная работоспособность основных систем поезда.

В середине этого года электропоезд ЭР29 введен в опытную эксплуатацию с пассажирами на участках Киевского пригородного узла. Предстоит оценить работоспособность, показатели надежности и ремонтпригодность электро- и пневмооборудования,

определить эффективность нового поезда в реальных условиях эксплуатации. Серийный выпуск электропоездов переменного тока нового поколения предполагается начать в 1994 г.

Канд. техн. наук **Б. И. ХОМЯКОВ**,
инженеры **С. И. МЕРКУШЕВ**, **О. Н. НАЗАРОВ**,
ВНИИЖТ;

инж. **А. П. САВЕЛЬЕВ**,
РВЗ;

инж. **А. В. ШИЛАКИН**,
ПО РЭЗ;

канд. техн. наук **А. К. ЯГОЛКОВСКИЙ**,
РФ ВНИИВ

