



Тайгинское подразделение
Западно-Сибирского учебного центра профессиональных квалификаций-
структурное подразделение Западно-Сибирской железной дороги-филиала
ОАО «РЖД»

Осинцев И.А.
Методическая разработка по теме:
«Режим рекуперативного торможения электровоза ВЛ-10»



Введение

Рекуперативное торможение (от лат. *recuperatio* «обратное получение; возвращение») - вид электрического торможения, при котором электроэнергия, вырабатываемая тяговыми электродвигателями, работающими в генераторном режиме, возвращается в электрическую сеть.

Рекуперативное торможение широко применяется на электровозах, электропоездах, современных трамваях и троллейбусах, где при торможении электродвигатели начинают работать как электрогенераторы, а вырабатываемая электроэнергия передаётся через контактную сеть либо другим электровозам, либо в общую энергосистему через тяговые подстанции.

Аналогичный принцип используется на электромобилях, гибридных автомобилях, где вырабатываемая при торможении электроэнергия используется для подзарядки аккумуляторов. Некоторые контроллеры двигателей электровелосипедов реализуют рекуперативное торможение.

Рекуперативным торможением на железнодорожном транспорте (в частности, на электровозах и электропоездах, оборудованных системой рекуперативного торможения) называется процесс преобразования кинетической энергии движения поезда в электрическую энергию тяговыми электродвигателями (ТЭД), работающими в режиме генераторов. Выработанная электрическая энергия передается в контактную сеть (в отличие от реостатного торможения, при котором выработанная электрическая энергия гасится на тормозных резисторах, то есть преобразовывается в тепло и рассеивается системой охлаждения). Рекуперативное торможение используется для подтормаживания состава в случаях, когда поезд идет по относительно некрутому уклону вниз, и использование воздушного тормоза нерационально. То есть, рекуперативное торможение используется для поддержания заданной скорости при движении поезда по спуску. Данный вид торможения дает ощутимую экономию энергии, так как выработанная электрическая энергия передается в контактную сеть и может быть использована другими локомотивами на данном участке контактной сети.

Рекуперативное торможение имеет следующие проблемы, которые требуют особого учета при разработке схемы электровоза для их решения:

а) тормозной момент пропорционален не скорости, а разности между скоростью и «скоростью нейтрали», зависящей от настройки системы управления электровоза и напряжения контактной сети. Так, при скорости ниже нейтрали ТЭДы будут тянуть, а не тормозить. Таким образом, при скорости вблизи нейтрали даже небольшие (в процентах) скачки напряжения сети сильно меняют упомянутую разность, а с ней и момент, и приводят к рывкам. Правильное проектирование схемы электровоза снижает этот фактор.

б) при параллельном включении якорей рекуперированных ТЭД схема может получиться неустойчивой при боксовании и склонной к «сваливанию» в режим, когда один ТЭД работает в моторном режиме, питаясь от второго ТЭДа, работающего как генератор, что подавляет торможение. Решение: включение обмоток возбуждения крест-накрест от «чужого» ТЭД (см. схему ВЛ10 в приложении).

в) необходимы меры защиты против короткого замыкания контактной сети или на самом электровозе. Для этого используются быстродействующие контакторы, срабатывание которых вызывает в схеме переходный процесс, перемагничивающий обмотки возбуждения ТЭД и ликвидирующий таким образом остаточную намагниченность статора (возбуждения генерации от которой может быть вполне достаточно для перегрева или пожара в случае КЗ в сети).

Ранее рекуперативным торможением оборудовались электровозы постоянного тока ввиду простоты метода переключения ТЭДов в режим генератора (в СССР схема появилась ещё на сурамском поколении электровозов, например, ВЛ22 и с незначительными изменениями применялась до ВЛ11 включительно, в ней решены все три описанные выше проблемы). В электровозах переменного тока существует проблема, которая заключается в преобразовании выработанного постоянного электрического тока в переменный и синхронизация его с частотой тягового тока, эта проблема решается с помощью тиристорных преобразователей^[3]. Электровозы переменного тока, созданные до использования тиристорных инверторов (ВЛ60, ЧС4 и ЧС4Т, а также все поколения ВЛ80, кроме ВЛ80Р) не имели возможности рекуперативного торможения.

Рекуперативное торможение редко используется в пассажирском движении, по крайней мере на «классических» до-тиристорных электровозах вроде ВЛ10 и ВЛ11 из-за возникновения ощутимых рывков при переключении тормозной рукоятки локомотива со ступени на ступень, а также при скачках напряжения контактной сети. Большинство пассажирских локомотивов той поры вовсе не имели этой возможности.

Кроме того, рекуперативное торможение, как и реостатное, сжимает состав и создает удар от сжатия сцепных устройств.

Тем не менее рекуперативное торможение широко применяется на моторвагонном подвижном составе (МВПС) постоянного тока (ЭР2Р, ЭР2Т и более поздние электропоезда). В отличие от поездной работы, в МВПС обычно постоянен вес поезда (его почти никогда не переформируют), а также намного выше тяговооружённость. Это сильно упрощает создание автомата управления рекуперативным торможением. Применяется и в грузовых локомотивах, к примеру на 2ЭС6.

Рекуперативное торможение на постоянном токе требует переоборудования тяговых подстанций. Как минимум возможно рассеяние энергии на стационарных резисторах в случае изменения направления тока в фидерах ПС (при этом сохраняется возможность использования энергии рекуперации

для тяги другого поезда на этом же участке, что важно при тяжелом профиле пути). Как максимум — необходима установка инверторов.

Рекуперативное торможение на железнодорожных локомотивах может использоваться также для подтормаживания в экстренных аварийных случаях при отказе воздушного тормоза.

1 Тяговый электродвигатель ТЛ-2К1

Тяговый электродвигатель постоянного тока ТЛ-2К1 предназначен для преобразования электрической энергии, получаемой из контактной сети, в механическую. Вращающий момент с вала якоря двигателя передается на колесную пару через двустороннюю одноступенчатую цилиндрическую косозубую передачу. При такой передаче подшипники двигателя не получают добавочных нагрузок по аксиальному направлению.

Подвешивание электродвигателя опорно-осевое. С одной стороны он опирается моторно-осевыми подшипниками на ось колесной пары электровоза, а с другой - на раму тележки через шарнирную подвеску и резиновые шайбы. Тяговый электродвигатель имеет высокий коэффициент использования мощности (0,74) при наибольшей скорости электровоза.

Система вентиляции принудительная, аксиальная, с подачей вентилирующего воздуха сверху в коллекторную камеру и выбросом вверх с противоположной стороны вдоль оси двигателя.

Технические данные двигателя ТЛ-2К1 следующие:

Напряжение на зажимах двигателя.....	1500 В
Ток часового режима.....	480 А
Мощность часового режима.....	670 кВт
Частота вращения часового режима.....	790 об/мин
Ток продолжительного режима.....	410 А
Мощность продолжительного режима.....	575 кВт
Частота вращения продолжительного режима.....	830 об/мин
Возбуждение.....	последовательное
Класс изоляции по нагревостойкости обмотки якоря.....	В
Класс изоляции по нагревостойкости полюсной системы.....	F
Наибольшая частота вращения при среднеизношенных бандажах.....	1690 об/мин
Подвешивание двигателя.....	опорно-осевое
Передаточное число.....	88/23-3,826
Сопротивление обмоток главных полюсов при температуре 20 °С.....	0,025 Ом
Сопротивление обмоток дополнительных полюсов и компенсационной обмотки при температуре 20°С.....	0,0366 Ом
Сопротивление обмотки якоря при температуре 20°С.....	0,0317 Ом
Система вентиляции.....	принудительная
Количество вентилирующего воздуха, не менее.....	95 м ³ /мин
К. п. д. в часовом режиме.....	0,931
К. п. д. в продолжительном режиме.....	0,930
Масса без шестерен.....	5000 кг

Тяговый двигатель ТЛ-2К1 (рисунок 53) состоит из остова 40, якоря 29, щеточного аппарата 3 и подшипниковых щитов 22, 43.

Остов 40 двигателя представляет собой отливку из стали марки 25Л-П цилиндрической формы и служит одновременно магнитопроводом. К нему прикреплены шесть главных 34 и шесть дополнительных 61 полюсов, поворотная траверса 3 с шестью щеткодержателями и подшипниковые щиты 22 и 43 с роликовыми подшипниками 9, в которых вращается вал якоря двигателя.

Установку подшипниковых щитов в остов электродвигателя производят в такой последовательности: собранный остов с полюсными и компенсационными катушками ставят стороной, противоположной коллектору, вверх. Индукционным нагревателем нагревают горловину до температуры 100-150°C, вставляют и крепят щит восемью болтами М24 из стали 45. Затем поворачивают остов на 180°, опускают якорь, устанавливают траверсу и аналогично описанному выше вставляют другой щит и крепят его восемью болтами М24. С наружной поверхности остов имеет два прилива для крепления букс моторно-осевых подшипников, прилив и съемный кронштейн для подвешивания двигателя, предохранительные приливы и приливы для транспортировки. Со стороны коллектора имеются три люка, предназначенных для осмотра щеточного аппарата и коллектора. Люки герметично закрываются крышками.

Крышка верхнего коллекторного люка укреплена на остове специальным пружинным замком, крышка нижнего люка 2 - одним болтом М20 и специальным болтом с цилиндрической пружиной, а крышка второго нижнего люка 10 - четырьмя болтами М12.

Для подвода воздуха имеется вентиляционный люк А. Выход вентилирующего воздуха осуществлен со стороны, противоположной коллектору, через специальный кожух 39, укрепленный на подшипниковом щите 43 и остове 40. Выводы из двигателя выполнены кабелем марки ПМУ-4000 площадью сечения 120 мм². Кабели защищены брезентовыми чехлами с комбинированной пропиткой. На кабелях имеются ярлычки из полихлорвиниловых трубок с обозначением Я, ЯЯ, К и КК. Выводные кабели 32,33 Я и ЯЯ соединены с обмотками якоря, дополнительных полюсов и с компенсационной, а выводные кабели 36,37 К и КК соединены с обмотками главных полюсов. Схема соединения обмоток тягового двигателя показана на рисунке 54.

Сердечники главных полюсов 34 набраны из листовой электротехнической стали марки 1312 толщиной 0,5 мм, скреплены заклепками и укреплены на остове четырьмя болтами М24 каждый. Между сердечником главного полюса и остовом имеется одна стальная прокладка 35 толщиной 0,5 мм. Катушка главного полюса 27, имеющая 19 витков, намотана на ребро из мягкой ленточной меди ЛММ размерами 1,95×65 мм, изогнута по радиусу для обеспечения прилегания к внутренней поверхности остова.

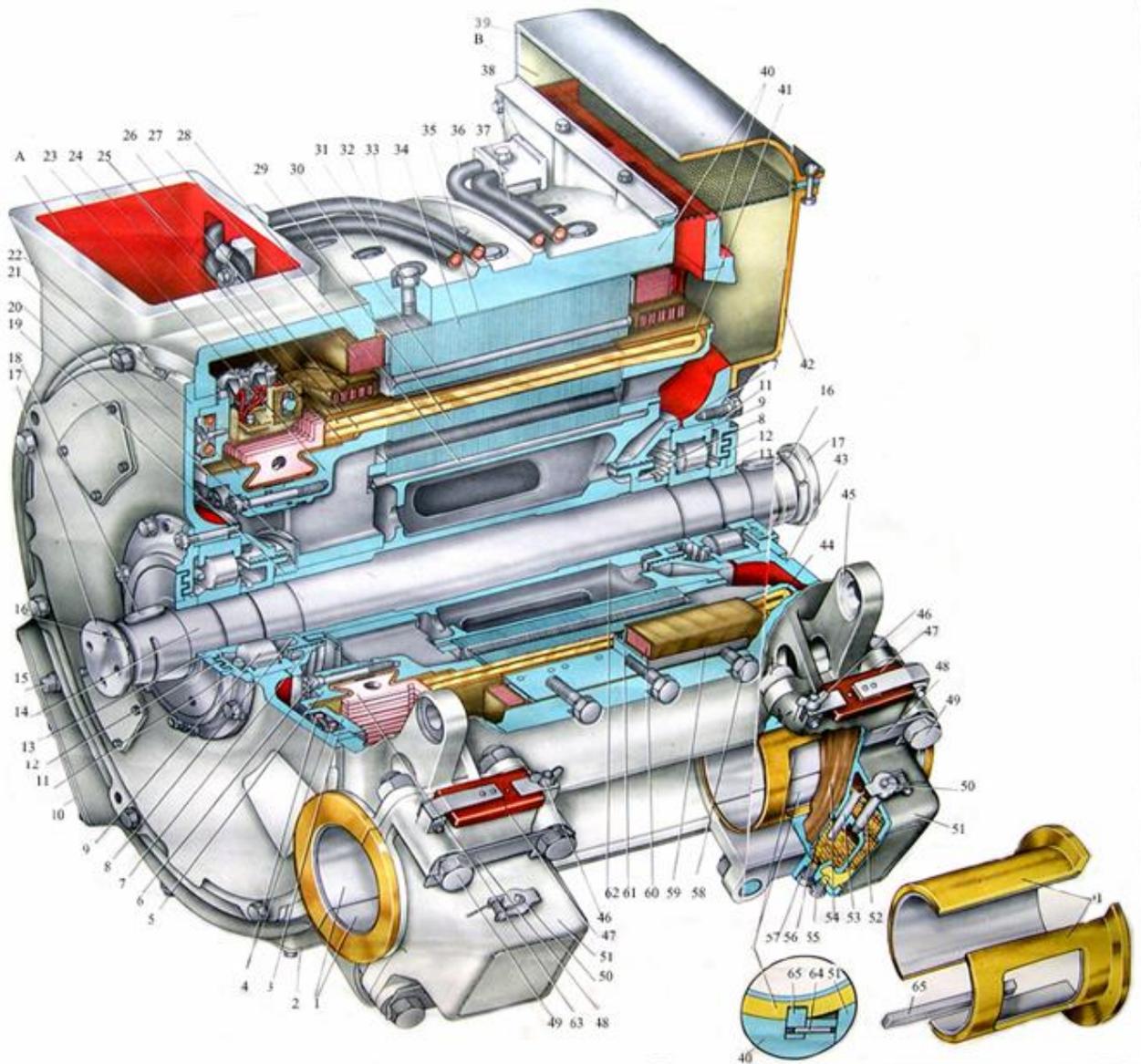


Рисунок 53 – Тяговый электродвигатель ТЛ-2К1

1-вкладыш моторно-осевого подшипника; 2,10-смотровой люк; 3-траверса; 4-кабели соединения кронштейнов траверсы щёткодержателя; 5-нажимной конус; 6-коллекторный болт; 7-задняя крышка подшипника; 8-кольцо; 9-подшипник якоря; 11-передняя крышка подшипника; 12-лабиринтное кольцо; 13-уплотнительное кольцо; 14-вал тягового двигателя; 15-валик шестерни поворота траверсы; 16-пружинная шайба; 17-специальная гайка; 18-шпонка; 19-стопорная гайка; 20-маслоотбойное кольцо; 21-нажимной конус; 22,43-подшипниковый щит; 23-основание коллектора; 24-уравнительное соединение; 25-обмотка якоря; 26-компенсационная обмотка; 27-катушка возбуждения главного полюса; 28-шпонка сердечника якоря; 29-сердечник якоря; 30-заклёпка сердечника главного полюса; 31-болт главного полюса; 32,33,36,37- кабель; 34-сердечник главного полюса; 35-прокладка; 38-клица; 39-выхлопной патрубков; 40-остов; 41-стеклобандаж;

42-кожух вентиляционный; 44-нажимная шайба; 45-кронштейн; 46-гайка барашек; 47-крышка 48-стопорная планка; 49-болт; 50- крышка буксы моторно-осевого подшипника; 51-букса моторно-осевого подшипника; 52-заправочная трубка; 53-нипельная трубка; 54-подбивочная пряжа; 55- пробка слива смазки из запасной камеры; 56-нажимная пластина; 57- пробка слива смазки из рабочей камеры; 58-крепёжный болт дополнительного полюса; 59-диаманитная прокладка дополнительного полюса; 60-катушка возбуждения дополнительного полюса; 61-сердечник дополнительного полюса; 62-втулка якоря; 63-коллектор; 64-штифт; 65-шпонка вкладышей моторно-осевого подшипника.

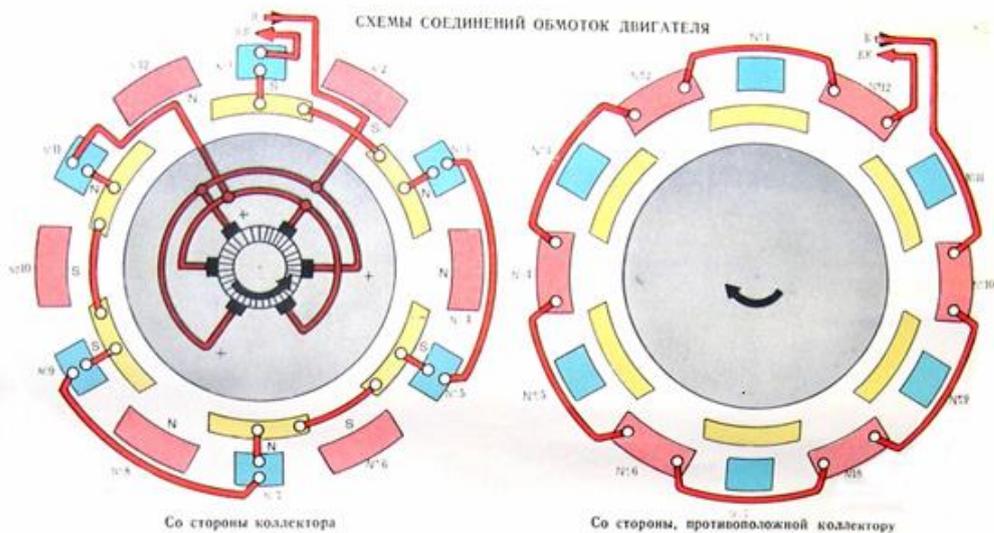


Рисунок 54 – Схема соединения обмоток двигателя

Корпусная изоляция состоит из восьми слоев стеклослюдинитовой ленты с полиэтилентерефталатной пленкой на лаке марки ПЭ-934 и одного слоя ленты технической лавсановой термоусаживающейся толщиной 0,22 мм, наложенных с перекрытием в половину ширины ленты. Межвитковая изоляция выполнена из асбестовой бумаги в два слоя толщиной 0,2 мм и пропитана лаком КО-919.

Для улучшения рабочих характеристик двигателя применена компенсационная обмотка 26, расположенная в пазах, проштампованных в наконечниках главных полюсов, и соединенная с обмоткой якоря последовательно.

Компенсационная обмотка состоит из шести катушек, намотанных из мягкой прямоугольной медной проволоки ПММ и имеет 10 витков. В каждом пазу расположено по два витка. Корпусная изоляция состоит из шести слоев стеклослюдинитовой ленты, одного слоя фторопластовой ленты и одного слоя стеклослюдинитовой ленты ЛЭС, уложенных с перекрытием в половину ширины ленты. Витковая изоляция имеет один слой стеклослюдинитовой ленты, она уложена с перекрытием в половину ширины ленты.

Компенсационная обмотка в пазах закреплена клиньями из текстолита марки Б. Изоляция компенсационных катушек на ТЭВЗ выпекается в приспособлениях, на НЭВЗ - в остове.

Сердечники дополнительных полюсов 61 выполнены из толстолистового проката или поковки и укреплены на остове тремя болтами 58 марки М20. Для уменьшения насыщения дополнительных полюсов между остовом и сердечниками дополнительных полюсов предусмотрены диамагнитные прокладки 59 толщиной 8 мм. Катушки дополнительных полюсов намотаны на ребро из мягкой медной проволоки ПММ и имеют 10 витков каждая.

Корпусная и покровная изоляция этих катушек аналогична изоляции катушек главного полюса. Межвитковая изоляция состоит из асбестовых прокладок, пропитанных лаком КО-919.

Новочеркасский электровозостроительный завод изготавливает тяговый двигатель ТЛ-2К1, полюсная система (катушки главных и дополнительных полюсов) которого выполнена на изоляции системы «Монолит 2». Корпусная изоляция катушек выполнена из стеклослюдинитовой ленты, катушки пропитаны в эпоксидном компаунде ЭМТ-1 или ЭМТ-2, причем катушки дополнительных полюсов пропитаны совместно с сердечниками и представляют собой неразъемный моноблок. На моноблоке закреплена диамагнитная прокладка толщиной 10 мм, которая одновременно служит для закрепления катушки. Катушка главного полюса от перемещений на сердечнике уплотнена двумя клиньями в распор по лобовым частям.

Щеточный аппарат тягового электродвигателя состоит из траверсы 3 разрезного типа с поворотным механизмом, шести кронштейнов и шести щеткодержателей.

Траверса стальная, отливка швеллерного сечения имеет по наружному ободу зубчатый венец, входящий в зацепление с шестерней поворотного механизма. В остове фиксирована и застопорена траверса щеточного аппарата болтом фиксатора, установленным на наружной стенке верхнего коллекторного люка, и прижата к подшипниковому щиту двумя болтами стопорного устройства: один-внизу остова, другой - со стороны подвешивания.

Электрическое соединение кронштейнов траверсы между собой выполнено кабелями ПС-4000 площадью сечения 50 мм². Кронштейны щеткодержателя разъемные (из двух половин), закреплены болтами М20 на двух изоляционных пальцах, установленных на траверсе. Стальные шпильки пальцев опрессованы прессмассой АГ-4В, на них насажены фарфоровые изоляторы.

Щеткодержатель имеет две цилиндрические пружины, работающие на растяжение. Пружины закреплены одним концом на оси, вставленной в отверстие корпуса щеткодержателя, другим - на оси нажимного пальца с помощью винта, которым регулируют натяжение пружины. Кинематика нажимного механизма выбрана так, что в рабочем диапазоне обеспечивает практически постоянное нажатие на щетку. Кроме того, при наибольшем допустимом износе щетки нажатие пальца на щетку автоматически

прекращается. Это позволяет предотвратить повреждение рабочей поверхности коллектора гибкими проводами сработанных щеток. В окна щеткодержателя вставлены две разрезные щетки марки ЭГ-61 размерами 2(8×50×60) мм с резиновыми амортизаторами. Крепление щеткодержателей к кронштейну осуществлено шпилькой и гайкой. Для более надежного крепления и регулировки положения щеткодержателя относительно рабочей поверхности по высоте при износе коллектора на корпусе щеткодержателя и кронштейна предусмотрены гребенки.

Якорь двигателя состоит из коллектора 63, обмотки 25, вложенной в пазы сердечника 29, набранного в пакет из лакированных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, стальной втулки 62, задней 44 и передней 23 нажимных шайб, вала 14. В сердечнике имеется один ряд аксиальных отверстий для прохода вентилирующего воздуха. Передняя нажимная шайба одновременно служит корпусом коллектора. Все детали якоря собраны на общей втулке коробчатой формы, напрессованной на вал якоря, что обеспечивает возможность его замены,

Якорь имеет 75 катушек и 25 секционных уравнильных соединений. Соединение концов обмотки и клиньев с петушками коллекторных пластин выполнено припоем ПСР-2,5 на специальной установке токами высокой частоты.

Каждая катушка имеет 14 отдельных проводников, расположенных по высоте в два ряда, и по семь проводников в ряду. Они изготовлены из медной ленты размерами 0,9×8,0 мм марки ЛММ и изолированы одним слоем с перекрытием в половину ширины стеклослюдинитовой ленты. Каждый пакет из семи проводников изолирован также стеклослюдинитовой лентой с перекрытием в половину ширины ленты. На НЭВЗ изготавливают якорные катушки из изолированного провода ПЭТВСД без дополнительного наложения витковой изоляции. Корпусная изоляция пазовой части катушки состоит из шести слоев стеклослюдинитовой ленты, одного слоя ленты фторопластовой и одного слоя стеклоленты, уложенных с перекрытием в половину ширины ленты.

Уравнители секционные 24 изготавливают из трех проводов размерами 1×2,8 мм марки ПЭТВСД. Изоляция каждого провода состоит из одного слоя стеклослюдинитовой ленты и одного слоя ленты фторопластовой. Вся изоляция уложена с перекрытием в половину ширины ленты. Изолированные провода соединяют в секцию одним слоем стеклоленты, уложенной с перекрытием в половину ширины ленты. В пазовой части обмотку якоря крепят текстолитовыми клиньями, а в лобовой части - стеклобандажом.

Коллектор 63 двигателя с диаметром рабочей поверхности 660 мм набран из медных пластин, изолированных друг от друга миканитовыми прокладками. От нажимного конуса и корпуса коллектор изолирован миканитовыми манжетами и цилиндром.

Обмотка якоря имеет следующие данные: число пазов 75, шаг по пазам 1-13, число коллекторных пластин 525, шаг по коллектору 1-2, шаг уравнителей по коллектору 1-176.

Якорные подшипники двигателя тяжелой серии с цилиндрическими роликами типа 80-42428М обеспечивают разбег якоря в пределах 6,3-8,1 мм. Наружные кольца подшипников запрессованы в подшипниковые щиты, а внутренние — на вал якоря. Подшипниковые камеры для предотвращения воздействия внешней среды и утечки смазки имеют уплотнения. Моторно-осевые подшипники состоят из латунных вкладышей, залитых по внутренней поверхности баббитом Б16, и букс с постоянным уровнем смазки. Буксы имеют окно для подачи смазки. Для предотвращения поворота вкладышей предусмотрено в буксе шпоночное соединение.

2 Характеристики тяговых двигателей в режиме электрического торможения

Для торможения подвижного состава тяговые двигатели переводятся в генераторный режим, при котором они создают тормозной момент. В зависимости от условий, при которых требуется осуществлять торможение, генератор может отдавать электрическую энергию в сеть или гасить ее в реостате. В первом случае торможение называется рекуперативным, во втором - реостатным. На э. п. с. применяют как рекуперативное, так и реостатное торможение. Рекуперативное торможение с энергетической точки зрения является наиболее выгодным, так как отданная в сеть электрическая энергия полезно используется другими электровозами или электропоездами. На тепловозах применять рекуперативное торможение нельзя, так как отсутствует приемник электрической энергии. Реостатное торможение может быть использовано, если оборудовать тепловозы реостатами для гашения электрической энергии.

Преимуществом электрического торможения является значительно меньшая склонность колес к заклиниванию (юз) при больших значениях тормозной силы, чем при механическом торможении, и способность к самозащите колес от юза. В этом случае юз, как правило, проявляется в форме частичного проскальзывания колес по рельсу без резкой потери сцепления, как это имеет место при механическом торможении.

При реостатном торможении тяговые двигатели работают как генераторы с последовательным возбуждением и включаются на тормозные резисторы, в которых электрическая энергия, выработанная генератором во время торможения поезда, превращается в тепловую. В качестве тормозных резисторов используют обычно те же реостаты, что и при пуске двигателя. Реостатное торможение может применяться как при высоких, так и при низких частотах вращения, так как напряжение генератора в этом случае не связано с напряжением сети и может быть установлено таким, какое необходимо для получения требуемой тормозной силы. Для перехода на реостатное торможение двигателя с последовательным возбуждением необходимо отключить его от контактной сети, переключить концы обмотки якоря или обмотки возбуждения двигателя и подключить к обмотке якоря резистор.

Как известно, при переходе машины из двигательного режима в генераторный ток $I_{\text{я}}$ в обмотке якоря изменяет свое направление. Если не переключить концы обмотки якоря или обмотки возбуждения, то при изменении направления тока произошло бы размагничивание машины (исчезновение в ней остаточного магнетизма) и она не смогла бы начать работать в качестве генератора последовательного возбуждения. При переключении направление тока в обмотке возбуждения в генераторном режиме остается таким же, как и при двигательном, благодаря чему обеспечивается самовозбуждение машины за счет остаточного магнетизма.

При уменьшении частоты вращения тягового двигателя в процессе реостатного торможения будет уменьшаться создаваемое им напряжение, а следовательно, ток $I_{\text{я}}$ и развиваемый им тормозной момент (тормозная сила). Чтобы поддержать тормозную силу на определенном уровне по мере уменьшения частоты вращения, необходимо постепенно уменьшать сопротивление тормозного резистора.

Применять реостатное торможение для остановки поезда нельзя, так как при малых частотах вращения тягового двигателя, работающего в генераторном режиме, резко уменьшаются его э. д. с. E , ток $I_{\text{я}}$ и электромагнитный тормозной момент. Поэтому окончательная остановка поезда производится в таких случаях механическим тормозом.

Тяговые двигатели локомотивов и электропоездов при реостатном торможении включаются только параллельно. При включении двигателей последовательно суммарное их напряжение могло бы достичь больших значений, что недопустимо для нормальной работы электрического оборудования. Однако параллельно включенные генераторы с последовательным возбуждением не в состоянии работать устойчиво, т. е. поддерживать постоянство своих токов и э. д. с.

Например, если по какой-то причине увеличится ток I_1 в одном из параллельно включенных тяговых двигателей, работающих в генераторном режиме, это вызовет увеличение его э.д.с. E_1 . Одновременно уменьшатся ток I_2 и э.д.с. E_2 второго двигателя. Этот процесс продолжается до тех пор, пока ток I_2 не упадет до нуля, после чего он изменит свое направление. При этом изменится полярность второй машины и вместо параллельного включения двух генераторов образуется замкнутый контур, в который оба генератора будут включены последовательно без какого-либо внешнего сопротивления. Такое включение генераторов представляет собой, по сути дела, их короткое замыкание, поэтому по замкнутому контуру начнет проходить большой ток $I_{\text{к}}$.

Для получения устойчивой работы нескольких параллельно соединенных генераторов обмотки возбуждения их включают с перекрещиванием. В этом случае ток первого генератора проходит через обмотку возбуждения второго генератора и наоборот. Поэтому всякое случайное возрастание тока в цепи одного из генераторов вызовет усиление магнитного потока, а следовательно, и э. д. с. во втором генераторе, что обеспечивает автоматическое выравнивание э. д.с. и токов этих генераторов.

Режим реостатного торможения на ЭПС постоянного тока наиболее часто применяют при последовательном возбуждении машин, что позволяет наиболее полно использовать для тормозного режима оборудование, необходимое в режиме тяги. Упрощенная схема такой системы представлена на рисунке 14. При переходе в режим торможения тяговые двигатели отключают от контактной сети и замыкают на резистор R_T .

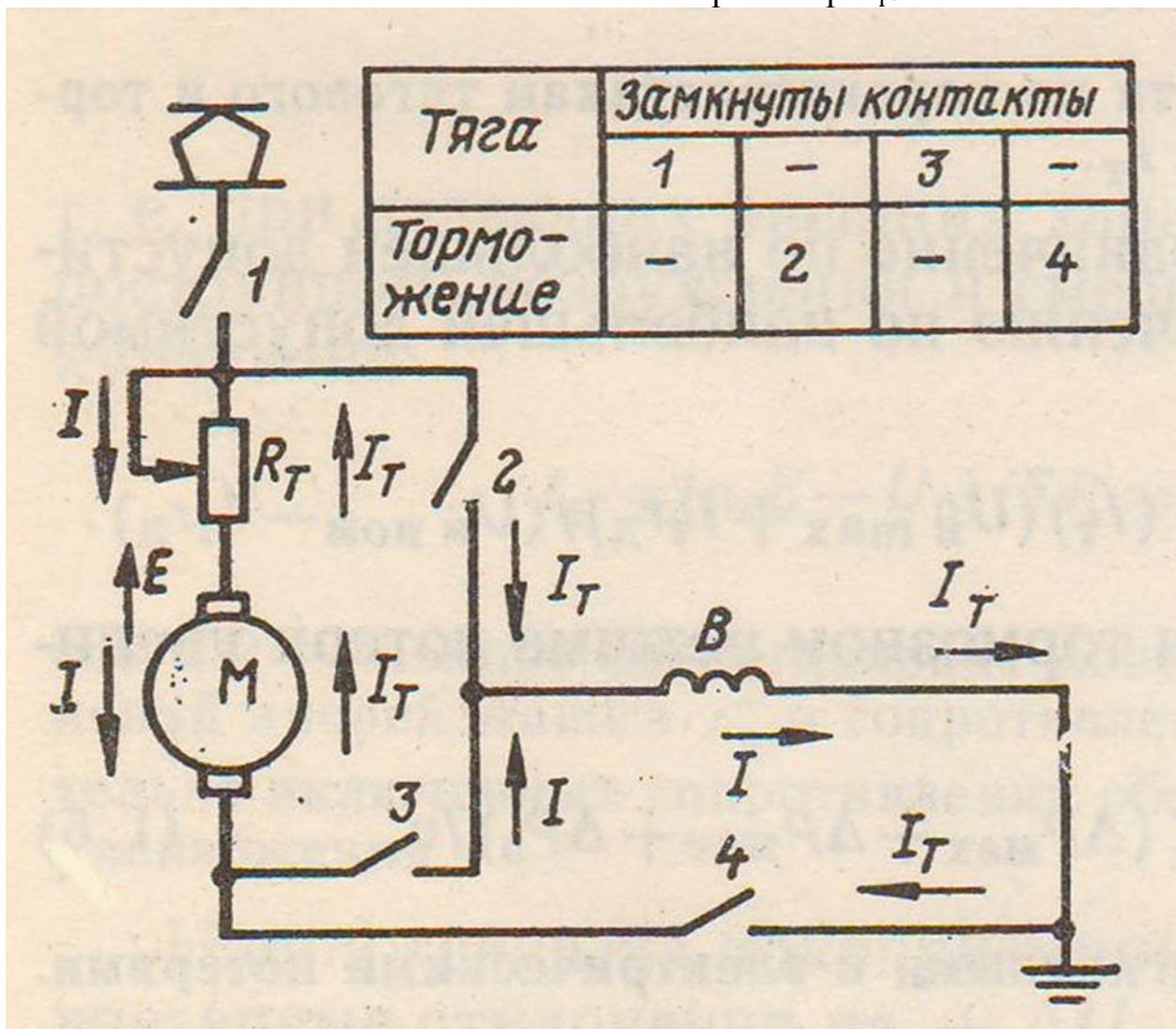


Рисунок 14 - Упрощенная схема системы реостатного торможения с самовозбуждением

Самовозбуждение, т.е. создание первичной ЭДС $E_{ост}$ осуществляется остаточным магнитным потоком $\Phi_{ост}$ в массивных стальных магнитопроводах машины: $E_{ост} = C_v \Phi_{ост} \nu$. Для того чтобы появившийся тормозной ток I_T не размагнитил машину, ее необходимо реверсировать переключением цепи якоря или возбуждения. Если остаточный поток $\Phi_{ост}$ невелик и надо повысить быстродействие тормозов, в двигателях предусматривают специальные обмотки независимого возбуждения, включаемые непосредственно перед торможением. При нарастании ЭДС напряжение на зажимах генератора в зависимости от тока (внешняя характеристика рисунок 15).

$$U_{\text{к}} = E - I_{\text{T}}r_{\text{д}} = C_{\text{v}}\Phi - I_{\text{T}}r_{\text{д}}.$$

Напряжение $U_{\text{к}}$ компенсируется падением напряжения в тормозном резисторе:

$$U_{\text{к}} = I_{\text{T}}R_{\text{T}}.$$

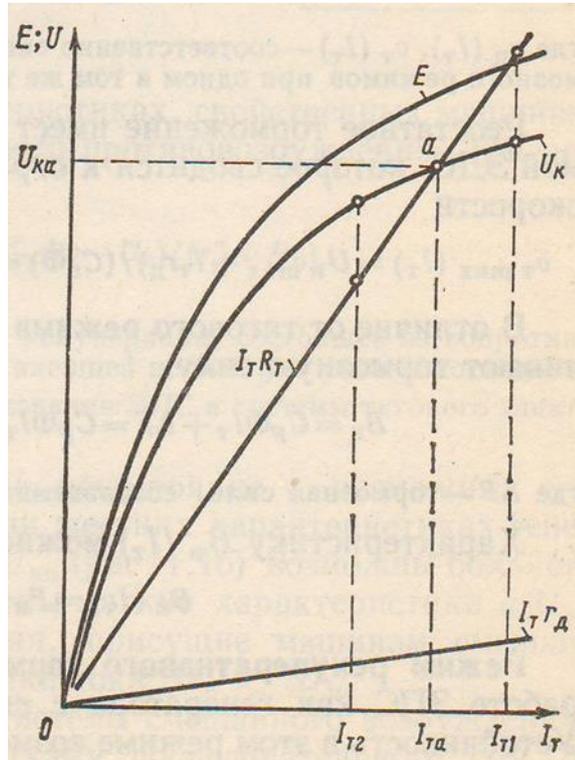


Рисунок 15 – К анализу устойчивости режима реостатного торможения

Устойчивость такой системы торможения определяется ее способностью восстанавливать электрическое равновесие, если оно нарушено, при любом установившемся токе $I_{\text{а}}$. Возникающий переходный процесс описывается уравнением:

$$U_{\text{к}} = I_{\text{T}}r_{\text{д}} + L_{\text{д}}di_{\text{T}}/dt,$$

где $L_{\text{д}}$ – индуктивность обмоток машины.

Из этого уравнения следует, что $di_{\text{T}}/dt = (U_{\text{к}} - I_{\text{T}}r_{\text{д}})/L_{\text{д}}$. Знак переменного члена производной отрицателен, что характеризует противодействие системы изменению равновесного, установившегося состояния (ток $I_{\text{а}}$). Устойчивость системы также можно выявить из анализа ЭДС самоиндукции $E_{\text{и}}$ при изменениях тока до значений $I_{\text{T}1}$, $I_{\text{T}2}$:

$$E_{\text{и}} = -L_{\text{д}}di_{\text{T}}/dt \cong -(I_{\text{T}1,2} - I_{\text{а}})L_{\text{д}}/\Delta t,$$

где Δt – приращение времени процесса.

Накопитель энергии L_d создает ЭДС, противодействующую изменению установившегося состояния – тока I_a .

Скоростные характеристики в режиме реостатного торможения рассчитывают как:

$$v_T = I_T(R_T + r_d)/(C_v \Phi).$$

Их характер зависит от системы возбуждения и магнитных характеристик машины. Эти характеристики строят также, используя скоростные характеристики тягового режима:

$$v_T(I_T) = v_d(I_T) \cdot (R_T + r_d)I_T/(U_k - I_T r_d),$$

где $v_d(I_T)$, $v_T(I_T)$ – соответственно скорости по характеристикам тягового и тормозного режимов при одном и том же токе I_T .

Реостатное торможение имеет ограничение по наибольшей допустимой ЭДС, которое сводится к ограничению по наибольшей допустимой скорости:

$$v_{T \max}(I_T) = (U_{k \max} + I_T r_d)/(C_v \Phi) = v_d(I_T)(U_{k \max} + I_T r_d)/(U_{k \text{ ном}} - I_T r_d).$$

В отличие от тягового режима при тормозном режиме потери увеличивают тормозную силу:

$$B_k = C_F \Phi I_T + \Delta F = C_F \Phi I_T + \xi(\Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_z)/v,$$

где ΔF – тормозная сила, создаваемая магнитными и электрическими потерями.

Характеристику $B_k(I_T)$ можно получить из характеристики $F_k(I)$:

$$B_k(I_T) = F_k(I_T) + 2\Delta F(I_T).$$

Режим рекуперативного торможения соответствует параллельной работе ЭПС как генератора с системой тягового электроснабжения. Устойчивость в этом режиме возможна только при условии $dU_k/dI < 0$, т.е. при падающих внешних характеристиках, свойственных машинам постоянного возбуждения и смешанного противовозбуждения. Ток рекуперации:

$$I_p = (n_c E - U_c)/\Sigma R = (n_c C_v \Phi v - U_c)/(r_d'' + R_p),$$

где $\sum R$ – полное сопротивление контура рекуперации, состоящее из сопротивлений якорей машин r_d'' и сопротивления внешней цепи R_p , с учетом последовательно включенных сопротивлений оборудования ЭПС и системы тягового электроснабжения.

Напряжение на токоприемнике U_c непостоянно и возможны его внезапные отклонения на $\pm \Delta U_c$. При жестких характеристиках генератора постоянного возбуждения $n_c U_{кп}$ (рисунок 16) возможны большие толчки тока $\Delta I_{рп}$.

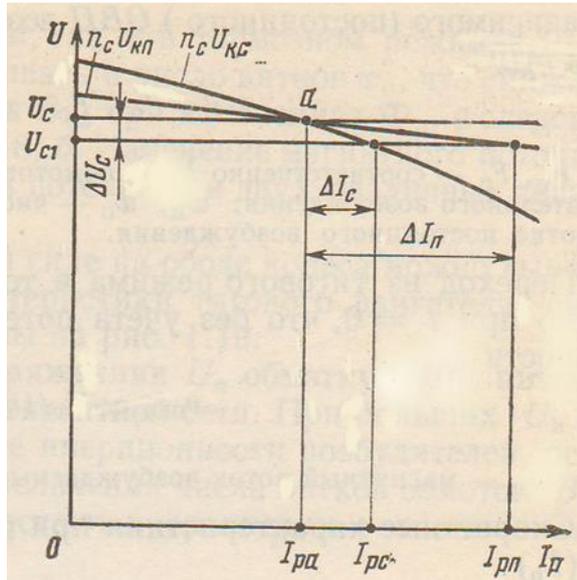


Рисунок 16 – Колебания тока рекуперации при изменении напряжения на токоприемнике

Более благоприятны мягкие характеристики $n_c U_{кв}$ режима рекуперативного торможения, присущие машинам смешанного возбуждения, при которых толчки тока $\Delta I_c < \Delta I_n$. Рисунок 17, а, поясняет действие системы смешанного возбуждения. МДС возбуждения создается обмотками последовательного ОВС и независимого (постоянного) ОВП возбуждения.

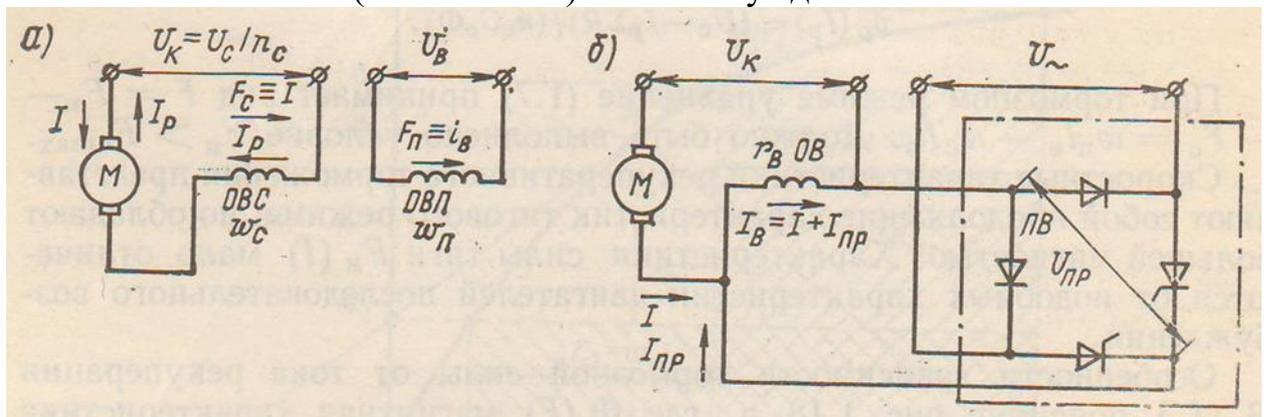


Рисунок 17 – Упрощенные схемы системы смешанного возбуждения (а) и последовательно – параллельного включения обмотки возбуждения двигателя (б)

В тяговом режиме общая МДС определяется по выражению:

$$F = F_{\Pi} + F_c = \varpi_{\Pi} i_{\text{в}} + \varpi_c I,$$

где F_{Π} , F_c – соответственно МДС обмоток независимого (постоянного) и последовательного возбуждения;

ϖ_{Π} , ϖ_c – числа витков этих обмоток;

$i_{\text{в}}$ – ток в обмотке постоянного возбуждения.

Переход из тягового режима в тормозной происходит непосредственно при $I = 0$, что без учета потерь соответствует приблизительно скорости:

$$v_{\text{пер}} \cong U_c / (n_c C_v \Phi_{\Pi}),$$

где Φ_{Π} - магнитный поток возбуждаемый только МДС F_{Π} без F_c

Скоростные характеристики при режиме тяги $v_d(I)$ и рекуперации $v_p(I_p)$:

$$v_d(I) = (U_c / n_c - I r_d) / (C_v \Phi);$$

$$v_p(I_p) = (U_c - I_p \sum R) / (n_c C_v \Phi).$$

При тормозном режиме выражение принимает вид $F = F_{\Pi} - F_c = \varpi_{\Pi} i_{\text{в}} - \varpi_c I_p$. Должно быть выполнено условие $F_{\Pi} > F_{c \text{ max}}$. Скоростные характеристики рекуперативного торможения представляют собой продолжение характеристик тягового режима, но обладают большей мягкостью. Характеристики силы тяги $F_K(I)$ мало отличаются от подобных характеристик двигателей последовательного возбуждения. Особенности зависимости тормозной силы от тока рекуперации $B_K(I_p)$ поясняет рисунок 18, а, где $\Phi(F)$ магнитная характеристика машины.

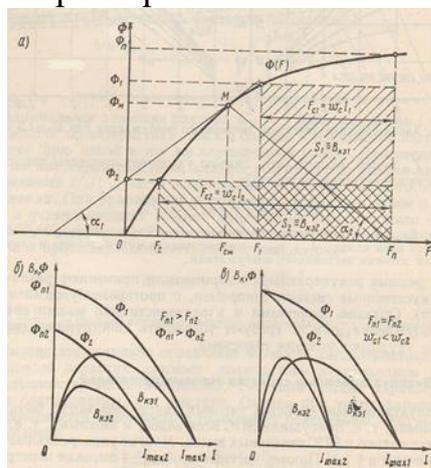


Рисунок 18 – К анализу характеристик тормозной силы машин смешанного противовозбуждения:

а – магнитная характеристика; б – зависимости $\Phi(I)$ и $B_{кэ}(I)$ при различных $F_{п}$; в – те же зависимости при различных значениях ϖ_c

Определенному значению тока возбуждения $i_{в}$ соответствуют МДС $F_{п}$ и магнитный поток $\Phi_{п}$ в режиме холостого хода при $I_p = 0$. Токи рекуперации, например I_1, I_2 , создают МДС F_{c1}, F_{c2} , снижающие общую МДС до F_1, F_2 и магнитные потоки до Φ_1, Φ_2 . Электромагнитная тормозная сила будет равна:

$$B_{кэ} = C_F \Phi I_p.$$

Она пропорциональна площадям S_1, S_2 заштрихованных прямоугольников со сторонами $\Phi_1, F_c \equiv \varpi_c I_1$ или $\Phi_2, F_2 \equiv \varpi_c I_2$. Характеристика $B_{кэ}(I_p)$ определяется изменением этих площадей. Эта функция имеет нулевые значения при $I_p = 0$ и $\Phi = 0$ при $I_{max} = F_{п}/\varpi_c = i_{в}\varpi_{п}/\varpi_c$. Ее максимум соответствует точке M магнитной характеристики, для которой $d\Phi_{м}/dF_{м} = -F_{см}\Phi_{м}$ или $\alpha_1 = \alpha_2$ (здесь α_1 – угол между касательной к магнитной характеристике в точке M и осью абсцисс, α_2 – угол между прямой, соединяющей точку M с точкой $F_{п}$ на оси абсцисс, и этой осью).

Характеристики $v(I)$ и характеристики $B_{кэ}(I_p)$ зависят от отношения значений $F_{п}$ и F_c . Чем больше отношение $F_c/F_{п}$, тем мягче скоростные характеристики как в тяговом, так и в тормозном режимах. Для увеличения F_c необходимо увеличивать и число витков ϖ_c , что снижает ток I_{max} . Характер изменения Φ и $B_{кэ}$ при изменениях $\Phi_{п}$, а следовательно, $F_{п}$ и $i_{в}$ поясняется рисунком 18, б. Изменение магнитного потока и характеристик $B_{кэ}$ при неизменном потоке $\Phi_{п}$ и двух различных значениях ϖ_c поясняется рисунком 18, в. Переход от $B_{кэ}(I_p)$ к тормозной силе на ободу колеса можно выполнить по выражению (1.7). Характеристики тягового двигателя смешанного возбуждения представлены на рисунке 19.

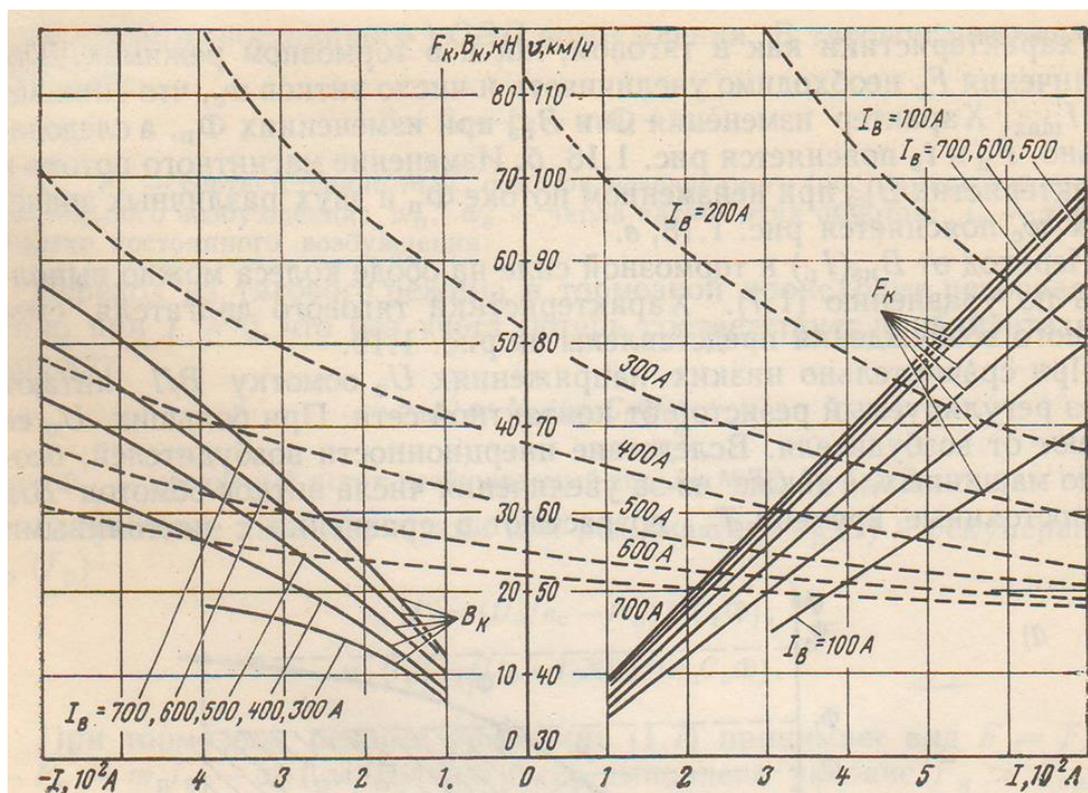


Рисунок 19 – Характеристики двигателя смешанного возбуждения при $U_K = 1,5 \text{ кВ}$

При сравнительно низких напряжениях U_c обмотку ВП питают через регулируемый резистор от контактной сети. При больших U_c ее питают от возбудителя. Вследствие инерционности возбудителей, особенно машинных, а также из-за увеличения числа витков обмоток ВП их постоянные времени $T_{пв}$ возрастают в сравнении с постоянными времени $T_я$ цепей якорей (что сильно ухудшает процессы токосяема при неустановившихся режимах):

$$T_я = \frac{\sum L_я}{\sum r_я} < T_{пв} = L_{вп}/r_{вп},$$

где $\sum L_я$, $\sum r_я$ – соответственно общие индуктивность и активное сопротивление обмоток цепи якоря;

$L_{вп}$, $r_{вп}$ – соответственно индуктивность и сопротивление цепи обмотки постоянного возбуждения.

Для режима рекуперативного торможения применяют различного рода искусственные системы (например, с противовозбуждением возбудителя). Обладая свойствами и характеристиками машин смешанного возбуждения, они не требуют усложнять конструкцию двигателей и не ухудшают условия токосяема.

В режим рекуперативного торможения можно перевести только электродвигатели с независимым, параллельным и смешанным возбуждением. В электродвигателе с независимым (параллельным) возбуждением при уменьшении нагрузочного момента $M_{вн}$, например при

переходе локомотива с подъема на площадку, частота вращения якоря возрастает, при этом увеличивается индуцированная в нем э. д. с., уменьшается ток и создаваемый двигателем электромагнитный момент. При $M_{\text{вн}} = 0$ частота вращения возрастает до значения n_0 (частота вращения при холостом ходе).

Если пренебречь трением и внутренними потерями в машине, то при холостом ходе э. д. с. электродвигателя становится равной напряжению сети, а ток и развиваемый двигателем электромагнитный момент оказывается равным нулю. (В действительности при холостом ходе двигатель потребляет из сети некоторый ток, необходимый для компенсации внутренних потерь мощности в машине.) При изменении направления нагрузочного момента (например, при переходе локомотива на спуск) частота вращения якоря становится больше n_0 , э. д. с. — больше напряжения сети, ток и вращающий момент изменяют свое направление и машина переходит из двигательного режима в генераторный. При этом электромагнитный момент направлен против вращения якоря, а выработанная генератором электрическая энергия отдается в сеть.

Таким образом, двигатель с независимым (параллельным) возбуждением при изменении направления $M_{\text{вн}}$, т. е. при возрастании частоты вращения более n_0 , автоматически переходит в режим рекуперативного торможения.

Двигатель с последовательным возбуждением не может быть переведен в режим рекуперативного торможения, так как при уменьшении внешней нагрузки, т. е. вращающего момента двигателя, частота вращения возрастает и он идет вразнос. Следовательно, не представляется возможным изменить направление вращающего момента двигателя и перейти через промежуточный режим холостого хода, что необходимо для перевода его с двигательного в генераторный режим. Поэтому для осуществления рекуперативного торможения обмотку возбуждения такого электродвигателя необходимо переключить на независимое питание от специального электромашиного или полупроводникового возбудителя. При таком переключении электродвигатель начинает работать как генератор с независимым возбуждением.

Генераторы с независимым возбуждением работают вполне надежно и устойчиво. Однако они имеют пологую внешнюю характеристику и поэтому непригодны для рекуперативного торможения в условиях тяговых сетей, напряжение которых сильно изменяется. При неизбежных колебаниях напряжения в контактной сети ток такого генератора и создаваемый им тормозной момент очень резко изменяются, что не дает возможности обеспечить надежное торможение поезда. Для того чтобы генератор был малочувствителен к колебаниям напряжения в контактной сети, необходимо придать его внешней характеристике крутопадающий характер, как это имеет место у генератора со смешанным возбуждением при встречном включении обмоток возбуждения (встречно-смешанное возбуждение). Для этого можно питать обмотку возбуждения тягового двигателя в режиме рекуперативного торможения от возбудителя со встречно-смешанным возбуждением или

включить в цепь возбудителя так называемый стабилизирующий резистор. Благодаря этим мероприятиям ток, отдаваемый в контактную сеть тяговым двигателем, который работает в генераторном режиме, сохраняется примерно постоянным. Такими способами стабилизируют (поддерживают постоянным) этот ток.

При использовании возбудителя со встречно-смешанным возбуждением уменьшение напряжения в контактной сети и возрастание в связи с этим тока рекуперации $I_{я}$, отдаваемого тяговым двигателем, работающим в генераторном режиме, вызовут размагничивание возбудителя и снижение его напряжения, а следовательно, и магнитного потока обмотки возбуждения двигателя. В результате этого э. д. с. тягового двигателя, работающего в генераторном режиме, будет снижаться и ток рекуперации не будет испытывать сильных колебаний. То же самое будет происходить и при увеличении напряжения в контактной сети.

При использовании стабилизирующего резистора его включают в цепь возбудителя так, что по нему, кроме тока возбуждения $I_{в}$, проходит и ток обмотки якоря $I_{я}$ тягового двигателя, работающего в генераторном режиме. При уменьшении напряжения в контактной сети возрастут ток рекуперации $I_{я}$, отдаваемый тяговым двигателем, и падение напряжения ΔU в стабилизирующем резисторе. Так как падение напряжения ΔU в контуре «стабилизирующий резистор - обмотка якоря возбудителя» действует против напряжения возбудителя $U_{в}$, его увеличение приведет к уменьшению тока $I_{в}$, поступающего в обмотку возбуждения тягового двигателя, и снижению создаваемой в нем э. д. с. В результате будет иметь место такой же стабилизирующий эффект, как и при возбудителе со встречно-смешанным возбуждением.

Применять рекуперативное торможение для остановки поезда нельзя. Получение от двигателя, работающего в генераторном режиме на контактную сеть, необходимой э. д. с. потребовало бы при низких частотах вращения очень сильного увеличения его магнитного потока и тока, отдаваемого возбудителем. Поэтому рекуперативное торможение может применяться только до некоторой минимальной частоты вращения n_{\min} .

Если электродвигатель в режиме рекуперативного торможения отдает энергию не непосредственно в сеть, а через какой-либо преобразователь, то путем уменьшения напряжения, подаваемого от преобразователя на обмотку якоря двигателя, можно существенно уменьшить n_{\min} .

2 Преобразователь НБ-436В

Преобразователь НБ-436В предназначен для питания обмоток возбуждения тяговых электродвигателей в режиме рекуперативного торможения. Преобразователь установлен в машинном отделении каждой секции электровоза.

Технические данные:

	Двигатель	Генератор
Напряжение на коллекторе, В.....	3300	38
Ток якоря, А.....	15	800
Мощность, кВт.....	40,7	30,4
Сопротивление обмотки якоря при 20 °С, Ом.....	6,31	0,00331
Сопротивление всех катушек полюсов обмотки последовательного возбуждения при 20 °С, Ом.....	9,07	0,00493
Сопротивление всех катушек обмотки независимого возбуждения при 20 °С, Ом.....	1,060	0,62
Сопротивление всех катушек дополнительных полюсов при 20 °С, Ом.....	1,698	0,00162
Класс изоляции по нагревостойкости:		
остова.....	F	F
якоря.....	B	B
Частота вращения, об/мин.....	1290	1290
Система вентиляции.....	самовентилирующийся	
Сопротивление демпферного резистора, Ом.....	10	-
К. п. д. без демпферного резистора.....	0,857	0,755
Масса, кг.....	1900	1900

Преобразователь НБ-436В (рисунок 57) состоит из шестиполюсного низковольтного генератора постоянного тока и четырехполюсного высоковольтного электродвигателя, смонтированных на одном валу и представляющих собой однокорпусный двухмашинный агрегат. Неразъемный остов 1 преобразователя цилиндрической формы отлит из стали 25Л-1, он является одновременно магнитопроводом. Остов имеет специальные лапы для крепления преобразователя к фундаменту, а также приливы с отверстиями для транспортировки. Сердечники главных полюсов 2 двигателя и генератора набраны из тонколистовой стали Ст2 толщиной 1,5 мм и скреплены стальными заклепками 32, а сердечники дополнительных полюсов 8 изготовлены из толстолистовой стали Ст2. К остову главные полюсы прикреплены стальными шпильками М16, а дополнительные полюсы - болтами 33 марки М16.

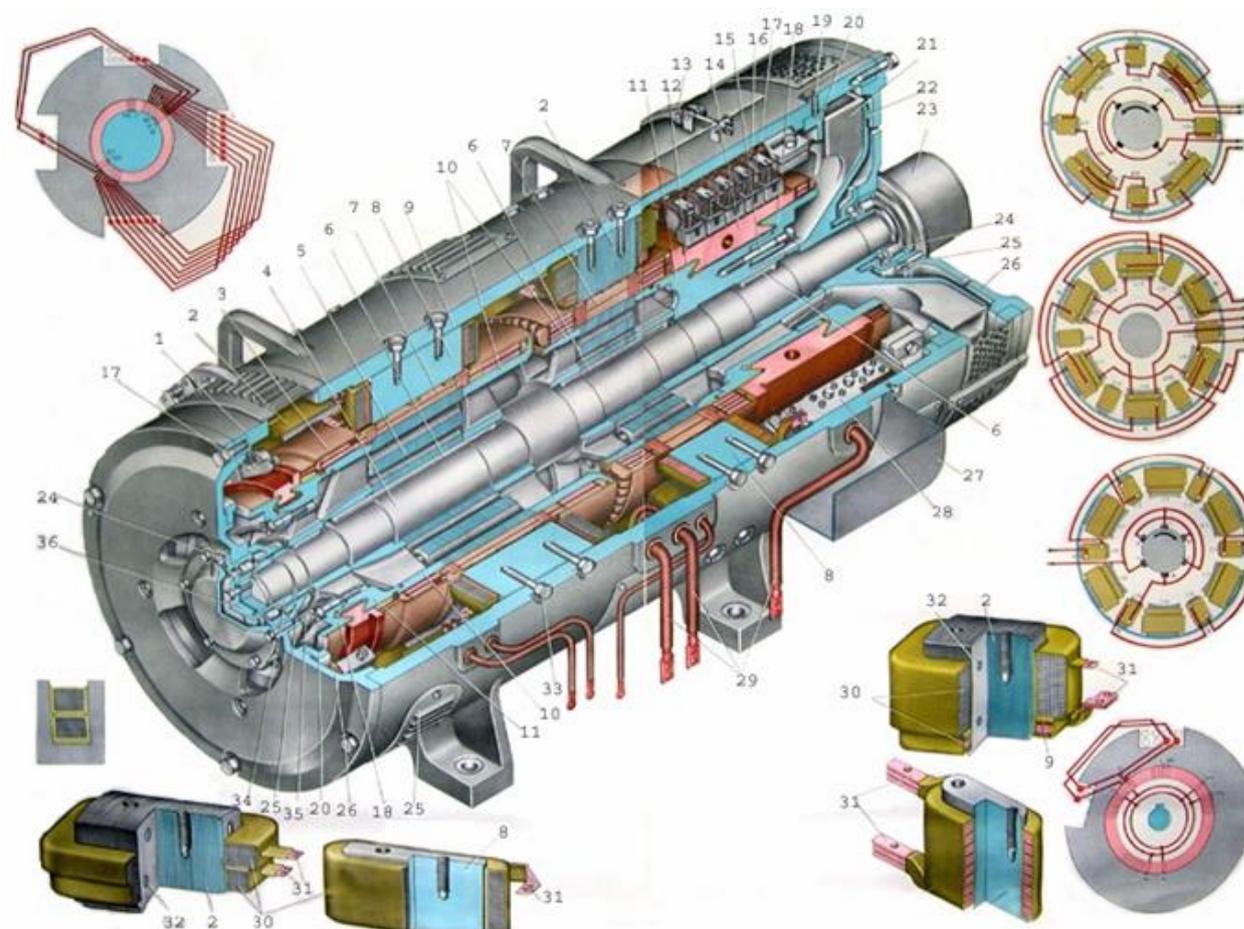


Рисунок 57 - Преобразователь НБ-436В

1-остов; 2-главный полюс; 3-бандаж; 4-вал; 5-сердечник якоря; 6-шпонка; 7-катушка якоря; 8-добавочный полюс; 9-прокладки; 10-нажимная шайба; 11-втулка коллектора; 12-манжета; 13-коллекторная пластина; 14-замок; 15-коллекторный болт; 16- палец щеткодержателя; 17-щеткодержатель; 18-нажимной конус; 19-винт; 20-траверса; 21-вентилятор; 22-балансирующий груз; 23-реле контроля оборотов; 24-подшипник; 25-крышка; 26-подшипниковый щит; 27-кожух; 28-шина; 29-кабель; 30-полюсная катушка; 31-вывод; 32-заклёпочный штифт; 33-болт; 34-фланец; 35-втулка; 36-шайба

Двигатель преобразователя имеет смешанное возбуждение. Катушки главных полюсов 30 последовательного возбуждения имеют по 95 витков. Они изготовлены из прямоугольного провода ПСД размерами 1,6×3,0 мм, а катушки независимого возбуждения имеют по 234 витка и изготовлены из прямоугольного провода ПСД размерами 1,6×2,36 мм. Катушки 30 дополнительных полюсов 8 имеют по 219 витков и изготовлены из прямоугольного провода ПСД размерами 1,6×3,0 мм.

Корпусная изоляция катушек последовательного возбуждения главных полюсов и катушек дополнительных полюсов состоит из шести слоев, а

катушки независимого возбуждения - из трех слоев ленты стеклослюдинитовой ЛС40Ру-ТТ размерами 0,13×25мм, уложенной с перекрытием в половину ширины ленты. Катушки совместно с сердечниками полюсов пропитаны эпоксидным компаундом ЭМТ-1 ГУ ОТН.504.002-73 и представляют собой неразъемный моноблок.

Сердечник якоря 5 набран из электротехнической стали 1312 толщиной 0,5 мм. Он имеет три ряда аксиальных отверстий для прохода вентилирующего воздуха. В пазы сердечника якоря уложена обмотка якоря 7. Обмотка волновая, состоит из 49 катушек, намотанных семью секциями в четыре оборота.

Корпусная изоляция катушек якоря состоит из шести слоев стеклослюдинитовой лепты ЛСЭК-5-СПл толщиной 0,11 мм, уложенной с перекрытием и половину ширины ленты, одного слоя ленты из фторопласта толщиной 0,03 мм, уложенной с перекрытием в 1/4 ширины ленты, и одного слоя ленты стеклянной электроизоляционной толщиной 0,1 мм, уложенной встык.

Генератор преобразователя имеет независимое возбуждение. Магнитная система генератора мало насыщена. На главных полюсах 2 размещены катушки независимого и последовательного возбуждения 30. Катушки получают питание от генератора управления НБ-110 (ДК-405К) и имеют по 230 витков. Они изготовлены из провода ПСД размерами 1,6×4,0 мм. Корпусная изоляция выполнена из ленты стеклослюдинитовой ЛС40Ру-ТТ размерами 0,13×25 мм в три слоя, уложенных с перекрытием в половину ширины ленты. Катушки последовательного возбуждения, обтекаемые током рекуперации тяговых двигателей, обеспечивают необходимые характеристики генератора для устойчивой работы цепи. Они включены в две параллельные цепи по три последовательно. Катушки имеют по одному витку и изготовлены из прямоугольного медного провода размерами 3,8×22 мм марки МГМ. Намотку выполняют в два параллельных провода. Корпусная изоляция стеклослюдинитовая лента ЛС40Ру-ТТ размерами 0,13×25 мм в шесть слоев, уложенных с перекрытием в половину ширины ленты.

Катушки дополнительных полюсов 8 генератора имеют восемь витков и изготовлены из медного провода МГМ размерами 3,55×16 мм. Намотка выполнена в три параллельных провода. Корпусная изоляция - лента стеклослюдинитовая ЛС40Ру-ТТ размерами 0,13×25 мм в три слоя с перекрытием в половину ширины ленты.

Все полюсные катушки совместно с полюсными сердечниками пропитывают эпоксидным компаундом ЭМТ-1 ТУ ОТН.504.002-73. Они представляют собой неразъемный моноблок.

Сердечник якоря генератора набран из электротехнической стали 1312 толщиной 0,5 мм. Сердечник имеет три ряда аксиальных отверстий для прохода вентилирующего воздуха. В пазы сердечника уложена петлевая обмотка якоря 7 с уравнивателями. Она состоит из 57 катушек, каждая из которых имеет восемь отдельных проводников, расположенных по высоте в

два ряда и по четыре проводника в ряду. Обмотка изготовлена из прямоугольного провода ПЭТШД размерами 1,56×8 мм. Изоляция катушек выполнена из стеклослюдинитовой ленты ЛСЭК-5-СПл толщиной 0,11 мм, уложенной и дна слоя с перекрытием и половину ширины ленты, одного слоя ленты из фторопласта толщиной 0,03 мм, уложенного с перекрытием в 1/4 ширины ленты, и одного слоя ленты стеклянной электроизоляционной, уложенной в стык. Число уравнивателей 57. Они изготовлены из провода ПСДК размерами 1,6×5,6 мм и изолированы одним слоем ленты стеклянной электроизоляционной толщиной 0,1мм, уложенной с перекрытием в половину ширины ленты. Соединение концов обмотки и клиньев с петушками выполнено пайкой оловом 03 ГОСТ 860-75 с флюсом КСп ОСТ.160.614.011-71 погружением в ванну.

Щеточный аппарат двигателя унифицирован со щеточным аппаратом электродвигателя ТЛ-110М. Щеточный аппарат генератора состоит из траверсы 20 поворотного типа, на которой закреплены шесть пальцев 16, стержни которых изолированы бакелизированной бумагой. На каждом пальце закреплены пять щеткодержателей 17, в которых установлено по одной щетке марки ЭГ-2а размерами 16×32×32 мм. Траверсу к остову крепят болтами.

Коллектор якоря двигателя унифицирован с коллектором двигателя ТЛ-110М (кроме размеров шлица). Коллектор якоря генератора набран из 228 медных пластин, изолированных друг от друга миканитовыми прокладками, а от корпуса миканитовыми манжетами и цилиндром.

Якорные подшипники 24 преобразователя роликовые. Со стороны двигателя установлен фиксирующий подшипник 80-92317Л1, со стороны генератора - плавающий подшипник 80-32317Л1. Наружные кольца запрессованы в подшипниковые щиты 26 изготовленные из стального литья, а внутренние кольца напрессованы на вал 4 якоря. Конструктивное исполнение подшипникового узла обеспечивает создание в нем камеры для смазки, а также уплотнения для предотвращения утечки смазки из камеры. Подшипниковые щиты запрессованы в остове и прикреплены к нему каждый шестью болтами М20 с пружинными шайбами.

Преобразователь НБ-436В - самовентилирующаяся машина. Вентилятор машины насажен со стороны коллектора генератора на вал. Со стороны генератора на наружной стороне подшипникового щита установлено реле оборотов.

Монтаж преобразователя производят в такой последовательности. На остове преобразователя запрессовывают и закрепляют подшипниковый щит со стороны двигателя. Остов устанавливают на специальном стеллаже напрессованным щитом вниз, затем устанавливают щеточный аппарат двигателя без щеток, опускают якорь преобразователя и устанавливают щеточный аппарат генератора без щеток, запрессовывают и закрепляют подшипниковый щит со стороны генератора. После этого преобразователь поворачивают в рабочее положение и с торца генераторной стороны устанавливают на крышку подшипника корпус реле, а на валу якоря закрепляют

реле оборотов. Со стороны двигателя на валу якоря устанавливают шайбу и крышку подшипникового узла, затем щетки и подсоединяют выводы. Демонтаж ведут в обратном порядке.

4 Режим рекуперативного торможения электровоза ВЛ-10

4.1 Включения двигателей возбuditелей.

При включении кнопки «Возбудители» питание С провода К83 (смотри цепь БВ-1) через замкнутый контакт кнопки питания поступает на провод К83. С провода К83, через замкнутый контакт кнопки возбuditелей на щитке параллельной работы питание поступает на провод К80 от которого образуются следующие цепи:

1) С провода К80, через блокировочный контакт контакторов двигателей преобразователей 40-1 и 40-2 питания поступает на провод К75, К94 от которых запитываются сигнальные лампы двигателей преобразователей П-1 и П-2 – земля.

2) С провода К80 питание поступает на катушку электромагнитного контактора 73-2 – земля. Контактор 73-2 включается и производит следующие переключения в схеме:

2.1) Замыкается блокировочный контакт контактора 73-2 и питание с провода К80 поступает на провод К81, далее через замкнутый контакт реле оборотов РО-1 и РО-2 питание поступает на провод Н157, Н158 от которых запитываются катушки контакторов двигателей преобразователей 40-1, 40-2 – земля. Контактора 40-1 и 40-2 включается и своими контактами производит следующие переключения в схеме:

- размыкается блокировочный контакт 40-1 и 40-2 в цепи проводов К80 - К94, К 80 – К75, вследствие чего на пульте машиниста гаснут лампы П-1 и П-2;
- замыкаются блокировочные контакты электромагнитных контакторов в цепи проводов К72-К73 и Н6-Н7 в цепи удерживающей катушки БВ1;
- замыкаются силовые контакты контакторов 40-1 и 40-2 обеспечивая цепь питания двигателям преобразователем.

2.2) После включения электромагнитного контактора 73-2 замыкается его силовой контакт, при этом питание с плюсовой шины К51 через плавкую вставку 495-2 поступает на провод Н102, далее через замкнутый силовой контакт электромагнитного контактора 73-2 питание поступает на провод К60, от которого запитываются независимые обмотки возбуждения преобразователя, предотвращая выход преобразователя на разносную частоту вращения.

В силовой цепи электровоза образуются две параллельные цепи:

- ✓ Токоприемник 45-1, дроссель радиопомех 21-1, крышевой разъединитель 47-1, рамка дифференциального реле 52-1, силовой контакт БВ1 51-1, силовой контакт электромагнитного контактора двигателя преобразователя 40-1, пусковое сопротивление двигателя

преобразователя Р63-Р65, включающая и удерживающая катушки контактора пусковой панели 55-1, обмотка якоря двигателя преобразователя П1, последовательная обмотка возбуждения двигателя преобразователя, рамка дифференциального реле 52-1, счетчик электроэнергии моторного режима 301-1, счетчик электроэнергии тормозного режима 310-1, токоотводящее устройство, земля.

- ✓ Токоприемник 45-1, дроссель радиопомех 21-1, крышевой разъединитель 47-1, рамка дифференциального реле 52-1, силовой контакт БВ1 51-1, межсекционное соединение 273Б, силовой контакт электромагнитного контактора двигателя преобразователя 40-2, пусковое сопротивление двигателя преобразователя Р55-Р57, включающая и удерживающая катушки контактора пусковой панели 55-2, обмотка якоря двигателя преобразователя П2, последовательная обмотка возбуждения двигателя преобразователя, рамка дифференциального реле 52-1, счетчик электроэнергии моторного режима 301-1, счетчик электроэнергии тормозного режима 310-1, токоотводящее устройство, земля.

4.2 Сбор схемы рекуперативного торможения на параллельном соединении обмоток якорей тяговых двигателей

На этом соединении тяговых двигателей рекуперативное торможение осуществляется при скорости 100 - 55 км/ч. Для сборки цепей рекуперации реверсивно-селективную рукоятку контроллера машиниста устанавливают в положение Вперед П. При этом замыкаются КЭ в цепи проводов 1(2), Н110 (Н111), 7, 4 и 24. От провода Н110 (Н111) напряжение будет подано на провода 4, 7 и 24. Проводом 7 напряжение будет подведено к катушкам вентилей Вкл и Выкл привода группового переключателя КСПО, вал которого установится в положение СП-П.

Проводом 24 напряжение будет подведено к катушкам вентилей Вкл и Выкл приводов переключателей КСП1 и КСП3, валы которых установятся в положение П. Силовые контакты и блокировки групповых переключателей займут положение, соответствующее параллельному соединению тяговых двигателей. Через блокировки КСПО-СП-П, КСП1-П и КСП3-П напряжение от провода 24 подводится к катушкам вентилей ТК1-Т и ТК2-Т приводов тормозных переключателей. По проводу 4 получают питание катушки вентилей реостатных контакторов.

При установке тормозной рукоятки контроллера на позицию 02 замыкаются КЭ контроллера в цепи проводов К63, 26 и 30. Провода К63 и 26 соединяются с корпусом кузова. После возбуждения катушек ТК1-Т и ТК2-Т, валы тормозных переключателей поворачиваются в положение тормозного режима.

При установке главной рукоятки контроллера машиниста на 1-ю позицию от провода Н110 (Н111), как и в тяговом режиме, напряжение получит цепь

проводов 1(2) и 30. По проводу 1 (2) через блокировку Вперед II (Назад II), провод К9 (К10), блокировку ТКП-Т питание будет подано катушкам вентиля 89-2, 139-1 (89-1, 139-2). Включаются вентили нагружающих устройств задних по ходу электровоза колесных пар (при включении контактора 79-2 (19-1) цепи остальных догружающих устройств будут разомкнуты). Проводом 30 через блокировки ТКП-Т, ТКИ-Т, 170-1 напряжение будет подано на катушки вентиля контакторов 18-1, 18-2, 19-1 и 19-2, катушки контактора 74-1 и промежуточных реле 102-1, 103-1. Контактors 18-1, 18-2, 19-1 и 19-2 включаются и замыкают цепи независимого возбуждения тяговых двигателей. Блокировки контакторов 18-1 и 18-2 замыкаются в цепях провода 25 и независимого возбуждения генератора преобразователя.

Промежуточные реле 102-1 и 103-1 включаются и своими блок-контактами соединяют провода 11, 14, 19, 21 с замыкающей блокировкой контактора 4-1 и провода 12, 13, 20, 22 с замыкающей блокировкой контактора 3-2, подготавливая минусовые цепи реостатных контакторов 6-1, 7-1, 10-1, 11-1 и 6-2, 7-2, 10-2 и 11-2, которые должны вывести все пусковые резисторы при подсоединении тяговых двигателей к контактной сети. Контактор 74-1 включается и контакты его замыкаются в цепи независимого возбуждения генераторов преобразователей. Замыкающая блокировка контактора 74-1 замкнется в цепи питания катушек вентиля линейных контакторов. Напряжение будет подведено и к катушкам вентиля линейных контакторов 3-1, 4-1, 3-2, 1-1, 2-1 и 1-2 по цепи: провод 1 (2), блокировки реверсоров Вперед II, Вперед I, замыкающие блокировки 74-1 и 51-1, замыкающая блокировка КСП1-П. Но минусовые цепи катушек вентиля этих контакторов будут разомкнуты контактами реле рекуперации 62-1 и 62-2 и контакторным элементом контроллера машиниста в цепи провода 25, поэтому линейные контакторы, будут отключены. От этой же цепи по проводу К11 напряжение подводится к катушкам вентиля линейных контакторов 2-2 и 17-2, в цепи которых включены блокировки КСП3-П (и параллельно им блокировки ОДП). Катушки вентиля контакторов 2-2 и 17-2 постоянно соединены с корпусом кузова, и поэтому они включаются независимо от положения контактов реле рекуперации 62-1 и 62-2,

При перемещении тормозной рукоятки контроллера машиниста на 1-ю позицию по проводу 25 через замыкающие блокировки контакторов 18-1 и 18-2 цепь со стороны минуса получают катушки вентиля линейных контакторов 3-1, 4-1, 3-2, 1-1, 2-1 и 1-2. По проводу 27 напряжение будет подано в цепь обмоток независимого возбуждения генераторов преобразователей, через замыкающую блокировку контактора 18-1, секции тормозных резисторов, замыкающий контакт 74-1, провод Н45.

При установке тормозной рукоятки на 2-ю позицию напряжение подается по проводу 31 через блокировки реле перегрузки 65-1, 66-1, блокировку реле максимального напряжения 64-1 на катушку контактора 76-1. Контактор 76-1

включается и шунтирует секцию r15-r16 резисторов в цепи независимого возбуждения генераторов возбудителей. Замыкающая блокировка контактора 76-1 создает цепь лигами я собственной катушки от провода 30.

На 3-й позиции тормозной рукоятки контроллера машиниста замыкаются КЭ в цепи проводов 29 и 34 и размыкается цепь провода 31. Проводом 34 шунтируется секция r1- r2 резисторов. От провода 29 напряжение через блокировку ТК1-Т подается на катушки электроблокировочных вентилей 123-1 и 123-2, а через блокировку 19-1 - на катушки вентилей 122-1 и 122-2. Электроблокировочные вентили 122-1 и 122-2 отключают тормозные цилиндры от воздухораспределителей во избежание заклинивания колесных пар при служебном торможении в режиме рекуперации. Вентили 123-1 и 123-2 подготавливают подвод воздуха к тормозным цилиндрам независимо от положения крана машиниста при срыве рекуперации, когда вентили 122-1 и 122-2 отключаются блокировкой контактора 19-1.

На последующих позициях тормозной рукоятки осуществляется постепенный вывод секций резисторов из цепи независимого возбуждения генераторов возбудителей. По мере увеличения возбуждения тяговых двигателей увеличивается э. д. с. в якорях тяговых двигателей и уменьшается напряжение на катушках реле рекуперации 62-1 и 62-2. Якорь каждого из реле рекуперации отпадает, когда суммарная э. д. с. тяговых двигателей будет примерно равна напряжению контактной сети или будет отличаться от него примерно на 100В. Контакты реле 62-1 замкнут минусовую цепь катушек вентилей линейных контакторов 3-1, 4-1, 1-1 и 2-1, а контакты реле 62-2 - цепь катушек вентилей контакторов 3-2 и 1-2. Линейные контакторы подсоединяют цепи тяговых двигателей каждой секции электровоза к контактной сети. Через блокировки контакторов 4-1 и 3-2 получают цепь заземления катушки вентилей реостатных контакторов 6-1, 7-1, 10-1, 11-1, 6-2, 7-2, 10-2 и 11-2, которые включатся и выведут все секции пусковых резисторов из цепей тяговых двигателей. Блокировка контактора 3-1 зашунтирует контакты реле рекуперации 62-1, а блокировка контактора 3-2 - контакты 62-2, чем обеспечивается надежность цепей со стороны минуса катушек вентилей линейных контакторов вне зависимости от положения контактов реле рекуперации.

Цепи возбуждения тяговых двигателей каждой секции электровоза получают питание от генераторов преобразователей. На первой секции электровоза от плюса генератора преобразователя ПГ1 создается две цепи тока:

а) контакты контактора 18-1, обмотка возбуждения двигателя 2, контакты Т8-1, Т9-1 тормозного переключателя, контакты быстродействующего контактора 303-1, контакты Т11-1, Т12-1 тормозного переключателя, шунт 68-1 амперметра, обмотка возбуждения двигателя 3, контакты Т20-1, Т19-1 тормозного переключателя, минус генератора ПГ1;

б) контакты контактора 19-1, обмотка возбуждения двигателя 4, контакты Т29-1, Т28-1 тормозного переключателя, контакты быстродействующего контактора 302-1, контакты Т22-1, Т23-1 тормозного переключателя, обмотка

возбуждения двигателя 1, контакты Т17-1, Т18-1 тормозного переключателя, минус генератора ПГ1.

На второй секции электровоза для тока возбуждения создаются аналогичные цепи.

Ток цепи якорей тяговых двигателей, соединенных в четыре параллельные группы, от плюса якорей каждой пары двигателей проходит через реостатные контакторы, которыми зашунтированы пусковые резисторы, линейные контакторы, дифференциальное реле, быстродействующий выключатель, крышевой разъединитель, токоприемник, контактную сеть, потребитель, рельсы, колесные пары, общую заземляющую шину, счетчик электрической энергии, кабели дифференциального реле и далее распределяется по четырем параллельным ветвям:

а) Контактный элемент группового переключателя 27-1, стабилизирующий резистор Р43-Р44, контакты БК 302-1, контакты Т4-1, Т5-1 тормозного переключателя, контактный элемент 26-1 группового переключателя, ножи ОД1, ОД1-2, индуктивный шунт 71-1; обмотка НЗ-ННЗ генератора преобразователя ПГ1, контакты Т1-1, Т2-1 тормозного переключателя, контакты реверсора 8-9, обмотки якорей тяговых двигателей 2 и 1;

б) секция стабилизирующего резистора Р46-Р47, силовые контакты быстродействующего контактора 303-1, нож ОД2, контактный элемент 33-0, ножи ОД2, ОД3-4, индуктивный шунт 72-1, обмотка Н2-НН2 генератора преобразователя ПГ1, контакты Т15-1, Т14-1 тормозного переключателя, контакты реверсора 2-3, обмотки якорей тяговых двигателей 4 и 3.

На второй секции электровоза ток цепи якорей проходит по аналогичным аппаратам.

4.3 Рекуперативное торможение на последовательно- параллельном соединении якорей тяговых двигателей

Рекуперацию на последовательно-параллельном соединении якорей двигателей применяют при скорости движения от 55 до 30 км/ч. При постановке реверсивно-селективной рукоятки контроллера машиниста в положение Вперед СП замыкаются КЭ контроллера машиниста в проводах 1 (2), Н11О (Н111), 5 и 7.

По проводу 7 питание получают катушки вентиля группового переключателя КСПО и вал его поворачивается в положение СП-П. Валы групповых переключателей КСП1 и КСП3 при этом останутся в положении С-СП. От провода 5 через замкнутые блокировки КСПО-СП-П, КСП1-С-СП и КСП3-С-СП групповых переключателей напряжение подводится к катушкам вентиля тормозных переключателей ТК1-Т и ТК2-Т, двух групп реостатных контакторов (одна из которых получает питание после включения контактора 4-1). В остальном работа цепей управления протекает аналогично работе на параллельном соединении. Исключение составляет

работа цепей управления линейными контакторами. При замыкании контактов реле рекуперации включаются только линейные контакторы 3-1, 4-1 и 3-2, а цепи питания катушек вентилях линейных контакторов 1-1, 2-1 и 1-2 будут разомкнуты блокировками КСП1-П и КСП2-П. Цепи возбуждения тяговых двигателей остаются такими же, как и при рекуперации на параллельном соединении. Ток рекуперации от реле 52-1 замыкается по двум цепям:

- а) стабилизирующий резистор Р47-Р46, контакты быстродействующего контактора 303-1, нож ОД2, контакторный элемент 33-0 группового переключателя, ножи ОД2, ОД3-4, индуктивный шунт 72-1, обмотка Н2-НН2 генератора преобразователя ПГ1, контакты Т15-1, Т14-1 тормозного переключателя, контакты реверсора 2-3, обмотки якорей тяговых двигателей 4 и 3, контакты реверсора 5-6, нож ОД3-4, катушка реле перегрузки 66-1, контакторный элемент 25-1 группового переключателя, нож ОД1-2, индуктивный шунт 71-1, обмотка Н3-НН3 генератора преобразователя ПГ1, контакты Т1-1, Т2-1 тормозного переключателя, контакты реверсора 9-8, обмотки якорей тяговых двигателей 2 и 1;
- б) стабилизирующий резистор Р71-Р70, и далее по аналогичной цепи, что и на первой секции электровоза.

4.4 Рекуперативное торможение на последовательном соединении якорей тяговых двигателей

Рекуперацию на последовательном соединении осуществляют при скорости движения от 30 до 15 км/ч. Для работы на этом соединении реверсивно-селективную рукоятку устанавливают в положение Вперед С, в результате чего напряжение будет подано на провод 6 и получат питание катушки вентилях групп реостатных контакторов, тормозных переключателей ТК1-Т и ТК2-Т.

При установке тормозной рукоятки контроллера на позицию 02 провода 25 и К63 соединяются с корпусом кузова, в результате чего возбуждаются катушки вентилях тормозных переключателей, валы которых установятся в положение тормозного режима. Пропадом К63 с корпусом кузова соединится катушка вентиля линейного контактора 3-2 через блокировки ТК1-Т и КСПО-С. При установке главной рукоятки на первую позицию после включения контактора 74-1 через его блокировку питание будет подано на линейные контакторы 2-2, 17-2 и 3-2, которые включатся. Включение этих линейных контакторов необходимо для возбуждения реле рекуперации.

Цепи возбуждения тяговых двигателей на последовательном соединении их якорей ничем не отличаются от таких же цепей на других видах соединений. При срабатывании реле рекуперации включаются линейные контакторы 3-1 и 4-1, замыкающие цепь тока рекуперации, в которую входят обмотки якорей всех восьми тяговых двигателей, соединенные последовательно. В эту цепь включены обмотки возбуждения генераторов обоих преобразователей, ста-

билизирующие резисторы, а также виток насыщения и контакты одного из быстродействующих контакторов 303-2.

4.5 Циклическая стабилизация токов рекуперации

Из-за разности бандажей колёсных пар токи рекуперации в параллельных ветвях могут быть неодинаковыми. Для выравнивания значения токов в цепи якорей ТЭД включают уравнивательные сопротивления R70 - R71; R48 - R49; R46 - R47; R43 - R44.

Например: 1, 2 колёсные пары имеют диаметр бандажей более чем 3,4, это значит, что якоря 3, 4 ТЭД будут вращаться быстрее. Следовательно, они будут вырабатывать больший ток рекуперации, в результате этого на уравнивательных сопротивлениях R46 - R47 будет происходить большее падение напряжения чем R43 - R44. Следовательно, потенциал на контактах БК 303-1 будет меньше чем на контактах БК 302-1, вследствие этого от точки с большим потенциалом к точке с меньшим потенциалом по двум контурам потечёт уравнивательный ток.

Первый контур: контакт БК 302-1, контакт тормозного переключателя Т28-1, обмотка возбуждения 4 ТЭД, контактор преобразователя 19-1, плюс ПГ-1, контактор преобразователя 18-1, обмотка возбуждения 2 ТЭД, контакт тормозного переключателя Т9-1, контакт БК 303-1.

Второй контур: контакт БК 302-1, контакт тормозного переключателя Т22-1, обмотка возбуждения 1 ТЭД, контакт тормозного переключателя Т18-1, минус ПГ-1, контакт тормозного переключателя Т19-1, обмотка возбуждения 3 ТЭД, шунт амперметра 68-1, контакт тормозного переключателя Т12-1, Т11-1, контакт БК 303-1.

Список литературы

1. Рассел, Джесси Тяговый электродвигатель / Джесси Рассел. - М.: VSD, 2012. - 346 с.
2. Рассел, Джесси Электродвигатель постоянного тока / Джесси Рассел. - М.: VSD, 2012. - 122 с.
3. Алиев, И. Электрические машины: Учебное пособие для студ. Вузов / И. Алиев. - М.: РадиоСофт, 2011. - 448 с.
4. Беспалов, В.Я. Электрические машины: Учебник для студентов учреждений высшего профессионального образования / В.Я. Беспалов, Н.Ф.

- Котеленец.. - М.: ИЦ Академия, 2013. - 320 с.
5. Ванурин, В.Н. Электрические машины: Учебник / В.Н. Ванурин. - СПб.: Лань, 2016. - 352 с.
 6. Епифанов, А.П. Электрические машины: Учебник / А.П. Епифанов, Г.А. Епифанов. - СПб.: Лань, 2017. - 300 с.
 7. Москаленко, В.В. Электрические машины и приводы: Учебник / В.В. Москаленко, М.М. Кацман. - М.: Academia, 2017. - 24 с.
 8. Москаленко, В.В. Электрические машины и приводы: Учебник / В.В. Москаленко. - М.: Академия, 2018. - 128 с.
 9. Шумилов, Р.Н. Электрические машины: Учебник / Р.Н. Шумилов, Ю.И. Толстова, А.Н. Бояршинова. - СПб.: Лань, 2016. - 352 с.
 10. О.А.Кикнадзе. Электровозы ВЛ10 и ВЛ10У - М.: Транспорт, 1981.- 519с.
 11. И.А. Осинцев Устройство и работа электрической схемы электровозов серии ВЛ-10 и Вл-10^У, М.: ФГБОУ «Учебно –методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. – 384с.
 12. Осинцев И.А., Логинов А.А. Электровоз ВЛ-10КРП, М.: ФГБОУ «Учебно –методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. – 410с.
 13. Б.Н.Техменев, Л.М.Трахтман. Подвижной состав электрифицированных железных дорог.- М.: Транспорт, 1980. - 471с.
 14. И.А. Осинцев, А.А. Логинов Токосъём и токоприёмники. М.: ОАО «Российские железные дороги», 2015.- 246с.