

УДК 621.331

Д. С. БЕЛУХИН - к.т.н, доцент, каф. «Электроподвижной состав железных дорог»,
Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика
В. Лазаряна, comandor04@mail.ru, ORCID 0000-0002-2791-617X

СОХРАНЕНИЕ ГРУППИРОВОК ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ НАПРЯЖЕНИЯ

Введение

В настоящее время на железных дорогах Украины эксплуатируются электровозы и электропоезда постоянного тока номинального напряжения 3000 В, у которых пусковой режим и регулирование скорости движения осуществляется способом, включающим операции переключения пусковых резисторов контакторами, трехкратное переключение схемы соединения тяговых двигателей, уменьшение тока через обмотки главных полюсов тяговых двигателей шунтированием их резисторами с помощью контакторов. При этом в переходном режиме пуска и регулирования скорости движения электроподвижного состава (ЭПС) затрачивается значительная доля потребляемой на тягу электроэнергии. При частых пусках потери электроэнергии значительно возрастают.

Многократное переключение большого количества пусковых и шунтирующих резисторов электропневматическими контакторами при больших токах обуславливает их износ и увеличение эксплуатационных расходов на обслуживание и ремонт.

Указанные выше недостатки ЭПС могут быть устранены при оборудовании его импульсным преобразователем для регулирования напряжения на тяговых двигателях [1]. Такой преобразователь содержит преобразователь на основе тиристоров, диод, LC-фильтр переменной составляющей тока на входе и сглаживающий реактор в цепи якоря тягового двигателя. Коммутационная способность полупроводниковых приборов импульсного преобразователя должна быть

рассчитана на полное рабочее напряжение и максимальный суммарный ток двигателей, что обуславливает высокие динамические характеристики тиристоров и диодов.

Обзор научных исследований

К настоящему времени проблема импульсного регулирования исследована в теоретическом плане достаточно полно, особенно в части изучения электромагнитных процессов в силовых цепях, синтеза схем преобразователей, взаимодействия системы импульсного регулирования с питающей сетью. Однако, большинство исследований посвящены внедрению импульсного регулирования на электропоездах постоянного тока [2]. Эти попытки внедрения оправдываются существенным экономическим эффектом по сравнению с электровозной тягой, где отсутствуют частые остановки. Но очевидные преимущества импульсного регулирования могут быть приемлемы и для оборудования электровозов такими системами. Так или иначе, а электровозы, которые выпущены относительно недавно (например ДЕ1, ВЛ11) имеют систему реостатного пуска, что создает предпосылки для их возможной модернизации.

Несмотря на то, что на ЭПС современной постройки с асинхронными тяговыми двигателями применяются тяговые статические преобразователи 4-го и 5-го поколений [2], в которых выполняется преобразование энергии для питания тяговых асинхронных двигателей, интерес к импульсному регулированию напряжения на тяговых двигателях постоянного тока сохраняется.

Так в работе [3] рассматриваются специфические особенности управления тяговыми преобразователями электроподвижного состава на основе тиристоров, раскрываются новые сведения о появлении дополнительных частот, инвариантных к частотам переключения тиристоров, их взаимодействие с системами безопасности движения поездов, раскрывается реальное число позиций регулирования цифровой системы управления в зависимости от времени коммутации силовых тиристоров преобразователя. В статье [4] рассматриваются вопросы повышения надежности многофазных систем тиристорного импульсного регулирования напряжения на электроподвижном составе постоянного тока. Таким образом, напрашивается логичный вывод, что тиристорное импульсное регулирование еще представляет некоторый научный и практический интерес.

В настоящее время новый электроподвижной состав создается на основе бесколлекторных тяговых двигателей с прямым частотно-импульсным регулированием напряжения без промежуточных регуляторов при питании от контактной сети постоянного тока и с применением неуправляемых выпрямителей с широтно-импульсным регулированием при питании от контактной сети переменного тока. Поэтому применение импульсного регулирования напряжения ЭПС постоянного тока на данном этапе может быть интересным в целях модернизации. Направлений внедрения широтно-импульсного регулирования в цепях находящегося в эксплуатации ЭПС не так уж и много. Это внедрение импульсного регулирования в цепях тяговых и собственных нужд. В тяговых цепях более перспективно, т. к. дает больший экономический эффект.

По условиям электромагнитной совместимости в тяговых электроприводах используют широтно-импульсное регулирование (ШИР) [1]. Рабочую частоту f стабилизируют на уровне, определяемом из сле-

дующих условий: для сглаживания пульсации первичного тока и тока двигателя следует повышать f ; повышение f ограничено частотными свойствами тиристорно-импульсного преобразователя, т. е. его быстродействием; частота f должна удовлетворять требованиям электромагнитной совместимости тягового электропривода с устройствами железнодорожной автоматики и связи.

Одним из общепринятых способов сглаживания пульсаций тока двигателя, если нет возможности повышения частоты, является увеличение расчетных параметров фильтров, что влечет за собой увеличение массы и габаритов. Рассмотрим влияние сохранения группировок соединения тяговых двигателей на параметры сглаживающего реактора.

В работе [5] рассматривается возможность сохранения группировок тяговых двигателей при внедрении импульсного регулирования для двух электропоездов: 6-осный (ЧС2) и 8-осный (ВЛ8). Оба электропоезда считаются достаточно устаревшими, однако большая часть грузовых и пассажирских перевозок на железных дорогах электрифицированных постоянным током осуществляется именно этими электропоездами. Известна модернизация электропоезда ЧС2, которая осуществлялась на Ярославском электропоездостроительном заводе [6]. Суть модернизации заключалась в замене группового контроллера на индивидуальные электропневматические контакторы и микропроцессорную систему управления. Однако, реостатный способ регулирования сохранен.

Методика

В качестве схемы преобразователя выбираем общеизвестную схему ключа постоянного тока на основе силовых тиристоров с коммутацией напряжением. Причиной такого выбора является наличие проверенных временем методик расчета элементов

таких преобразователей [7, 8]. Расчетная схема преобразователя представлена на рис. 1.

Схема имеет ряд недостатков, которые ограничивают ее применение, но целью работы является не выбор наиболее рациональной схемы силового преобразователя, а оценка ряда энергетических показателей при сохранении ступенчатого регулирования напряжения.

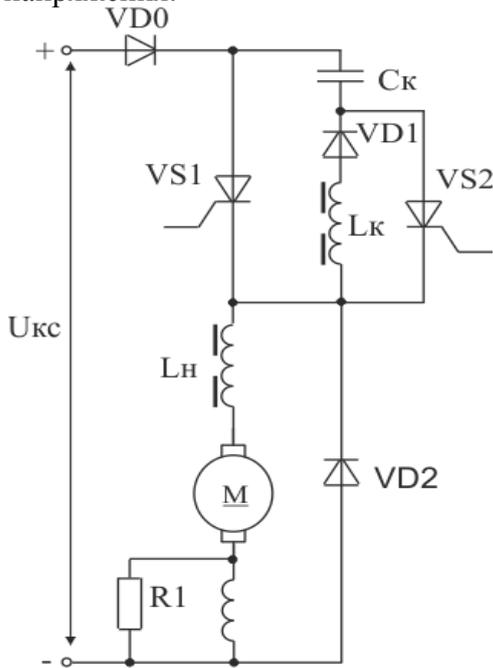


Рис. 1. Расчетная схема тиристорного преобразователя

Такие преобразователи предлагается делать многофазными [1]. Принимаем для расчета два параллельно включенных преобразователя на основе тиристорov, работающих на общую нагрузку в виде сглаживающего реактора и группы двигателей, а во входной цепи общий фильтр. Это позволяет повысить общую частоту, которую принимаем 800 Гц, а частота одной ветви преобразователя 400 Гц, что позволяет использовать современные силовые тиристоры.

Определимся с исходными данными для расчета плеча преобразователя. На электровозе ЧС2 установлены 6 тяговых двигателей типа АЛ-4846еТ номинальным

напряжением 1500 В, мощностью часовой режима 700 кВт, током часовой режима 495 А. На параллельном соединении часовой ток трех параллельных ветвей составляет 1485 А. На электровозе ВЛ8 установлены 8 тяговых двигателей типа НБ-406Б номинальным напряжением 1500 В, мощностью часовой режима 525 кВт, током часовой режима 380 А. На параллельном соединении часовой ток четырех параллельных ветвей составляет 1520 А. В одной фазе преобразователя принимаем расчетное значение тока 760 А в целях унификации преобразователя для указанных электровозов. Напряжение контактной сети 2400...4000 В. Результаты расчетов группового соединения полупроводниковых приборов в одной фазе плеча (см. рис. 1) преобразователя по методике [8] представлены в таблице 1. Полупроводниковые приборы для импульсного преобразователя выбраны доступные, т. е., выпускаемые электротехнической промышленностью. С целью снижения габаритных размеров преобразователя и количества элементов приняты в расчете приборы, которые исключают параллельное соединение – одна параллель тиристорov. Сам расчет элементов преобразователя не приводится, т. к. является типовым.

Системы импульсного регулирования предполагают разгон электровоза без перегруппировок двигателей. На электровозах постоянного тока принято ступенчатое реостатное регулирование с перегруппировкой тяговых двигателей. Рассмотрим влияние наличия группировок тяговых двигателей на такие параметры как потери мощности в преобразователи и коэффициент пульсаций во время пуска. Вполне очевидно, что сохранение группировок позволяет иметь промежуточные ходовые позиции, характерные для последовательного и последовательно-параллельного соединений. Сохранение таких позиций позволяет выполнять работу электровозом в случае наличия ограничений скорости или при стационарной работе.

Для выполнения качественного сравнения выполним анализ потерь энергии в реостатах и в элементах преобразователя. В качестве исходных данных принимаем два поезда под управлением электровозов. Первый поезд пассажирский, например № 63 Днепр – Одесса (17 вагонов в составе) под управлением электровоза ЧС2. Отправление в направлении станции Горяиново. Второй поезд грузовой под управление электровоза ВЛ8, состав 36 полувагонов, вес 3400 т. Оба электровоза имеют три типовых соединения тяговых двигателей: С – серийное, СП – серийно-параллельное, П – параллельное.

Для определения потерь в реостатах выполнен стандартный тяговый расчет по методике МПС [9, 10]. Детали расчета не приводим. На рис. 2 показаны зависимости скорости движения $V(S)$, тока электровоза $I(S)$ и времени движения $t(S)$ от пройденного пути до момента времени, когда выводится последний реостат. Рис. 2 построен для электровоза ЧС2. При скорости 28 км/ч происходит переход с С-соединения на СП-соединение. Этот момент происходит через 0,7 мин от начала движения, ток изменяется от 495 А до 990А. Переход с СП к П соединению через 2 мин от начала движения при скорости 59,5 км/ч и изменением тока до 1485 А. Вывод последней реостатной ступени параллельного соединения осуществляется при скорости 90 км/ч. Это происходит через 4 минуты после начала движения. Аналогичные расчеты графоаналитическим методом по методике МПС были проведены для электровоза ВЛ8. Процесс разгона до вывода последней реостатной ступени имеет следующие характерные моменты: переход с С на СП, скорость 10 км/ч, 1,1 мин, ток от 380 А до 760А; переход с СП к П через 2,4 мин при скорости 20,5 км/ч и изменением тока до 1520 А. Вывод последней реостатной ступени параллельного соединения осуществ-

ляется при скорости 43,3 км/ч через 5,9 минуты после начала движения.

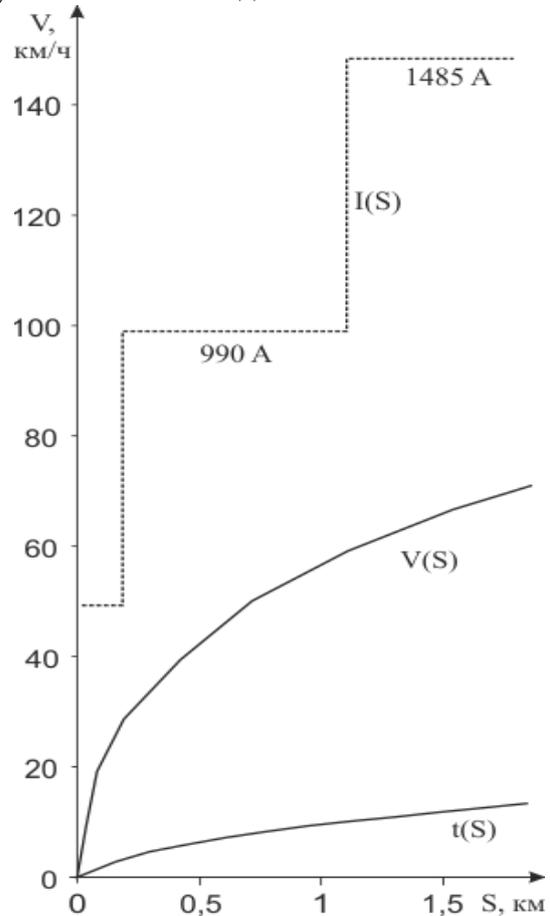


Рис. 2. Зависимости скорости, тока, времени движения электровоза ЧС2 с расчетным поездом в режиме пуска

Потребленная энергия на участке пуска электровозом [9]

$$A = \frac{\sum U_3 I_3 \Delta t}{60 \cdot 1000}, \quad (1)$$

где Δt – время, мин.; U_3 – напряжение на токоприемнике. Принимаем 3000 В; I_3 – средний ток электровоза в течение времени Δt .

В результате расчетов получено для электровоза ВЛ8 – 336,3 кВт·ч, для электровоза ЧС2 – 230 кВт·ч при пуске с поездами принятыми в расчете.

Таблица 1

Групповое соединение полупроводниковых приборов одного плеча преобразователя

Схемное обозначение (см. рис. 1)	VS1	VS2	VD1	VD2
Тип прибора	ТБ153-1000-24	ТБ151-50-12	ДЛ131-80-15	ДЛ1243-1000-28
Последовательно	4	6	3	4
Параллельно	1	1	1	1

Рассмотрим потери энергии в цепях преобразователя при безреостатном пуске. Основные элементы преобразователя, которые ощутимо влияют на потери энергии в цепях преобразователя, показаны на рис. 3.

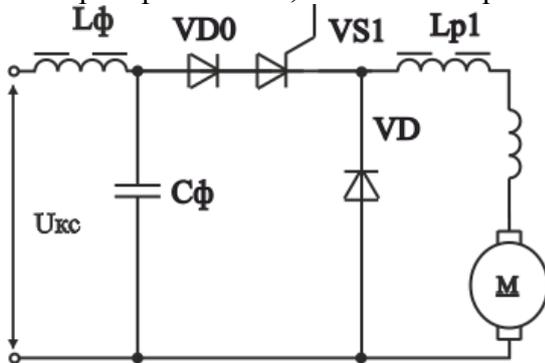


Рис. 3. Расчетная схема определения потерь энергии в цепях преобразователя

Потери мощности в элементах преобразователя определяются

$$\sum \Delta P = 2 \cdot (P_{F(AV)} + P_{T(AV)} + P'_{T(AV)} + P'_y + P_{L_k} + P_{L_p}) + P_{L_\phi}, \quad (2)$$

где $P_{F(AV)}$, $P_{T(AV)}$ – потери в цепях диодов и главного тиристора соответственно; $P'_{T(AV)}$ – потери в контуре коммутации; P'_y – потери в цепи управления; P_{L_k} – потери в коммутирующем реакторе; P_{L_p} – потери в реакторе входного фильтра; P_{L_ϕ} – потери в реакторе выходного фильтра.

Расчет перечисленных составляющих потерь выполнен по методике, предлагаемой в [11] и, в дальнейшем, не детализируется. Анализ потерь велся при разных ко-

эффициентах заполнения импульсной последовательности работы полупроводникового ключа λ . Результаты расчетов представлены на рис. 4 для электровоза ЧС2. Расчеты проведены исходя из того что, в одной фазе преобразователя на С-соединении коэффициент заполнения изменяется в диапазоне $0,01 \leq \lambda_{1\phi} \leq 0,5$, для СП-соединения $0,25 \leq \lambda_{1\phi} \leq 0,5$, для П-соединения $0,33 \leq \lambda_{1\phi} \leq 0,5$. Штриховой линией для П-соединения показан случай разгона электровоза только на П-соединении, т. е при изменении $0,01 \leq \lambda_{1\phi} \leq 0,5$.

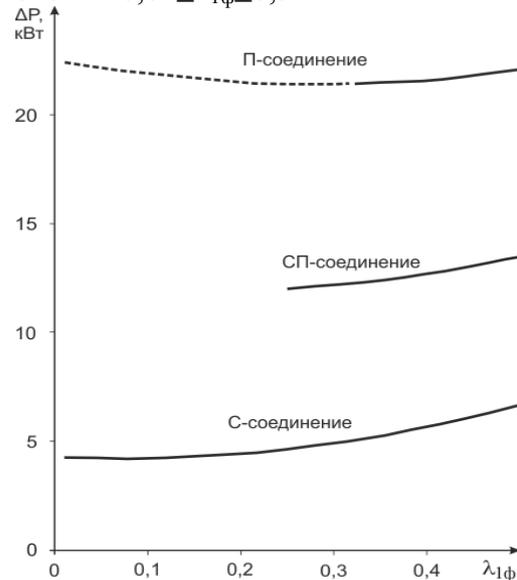


Рис. 4. Потери мощности в элементах преобразователя для электровоза ЧС2

Полагая, что время выхода на ходовую позицию П-соединения электровоза совпадает со временем реостатного пуска можно определить потери пуска при импульсном регулировании

$$A_p = \frac{\sum \Delta P_{cp} \cdot \Delta t}{60}, \quad (3)$$

где ΔP_{cp} – среднее значение потерь мощности преобразователя при работе на отдельном соединении двигателей.

Так для электровоза ЧС2 при наличии перегруппировок тяговых двигателей потери в цепях преобразователя составляют ≈ 1 кВт·ч, а в случае пуска только на П-соединении – $\approx 1,4$ кВт·ч. Для электровоза ВЛ8 в аналогичном случае 2 и 2,4 кВт·ч соответственно. Расчет подтверждает существенную экономию энергии при импульсном регулировании. Сохранение группировок дает дальнейшую экономию энергии и позволяет выполнять работу на промежуточных позициях с шунтированным преобразователем. Кроме того, в процессе пуска снижается интенсивность нагрева преобразователя за счет малой токовой нагрузки на С и СП соединениях.

Следующим аспектом, на который следует обратить внимание это размах пульсаций тока в цепях тяговых двигателей. Общеизвестно [1, 2, 8, 9, 11], что размах пульсаций в цепях тяговых двигателей при импульсном регулировании достигает максимума при коэффициенте заполнения $\lambda=0,5$. В общем случае пульсация тока определяется выражением

$$\Delta I = \frac{U_H \lambda (1-\lambda)}{Lf}, \quad (4)$$

где U_H – напряжение соединения; L – общая индуктивность цепи; f – частота работы ключа.

На рис. 5 показаны максимальные пульсации тока 6-осного электровоза в зависимости от λ , рассчитанные для параметров электровоза ЧС2. Сплошной линией показан возможный коэффициент заполнения при сохранении группировок тяговых двигателей. Наибольший максимум пульсации возможен на П-соединении при коэффициенте заполнения $\lambda=0,66$, что на 11% ниже,

чем при $\lambda=0,5$. Это позволяет уменьшить массу и габариты входных и выходных фильтров, либо при сохранении этих показателей снизить амплитуды пульсаций в цепях тяговых двигателей и воздействие на контактную сеть.

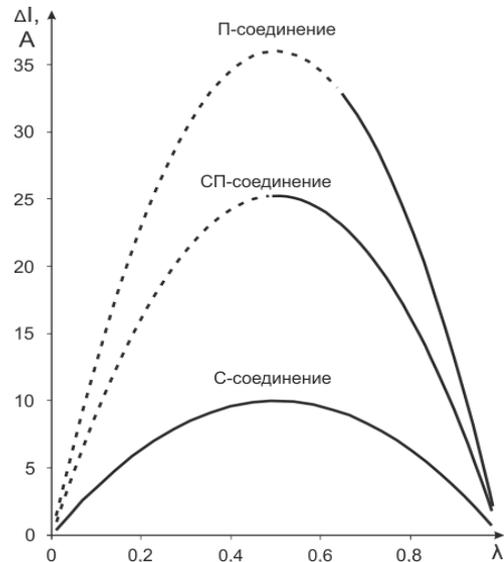


Рис. 5. Пульсации тока в цепи тяговых двигателей 6-осного электровоза

Для 8-осных электровозов, как показал расчет для электровоза ВЛ8, такого эффекта не наблюдается.

Выводы

Мировая практика имеет существенный опыт внедрения систем импульсного регулирования в цепях тяговых двигателей постоянного тока для электроподвижного состава. Себестоимость силовых полупроводниковых приборов снижается, что при росте тарифов на электрическую энергию позволяет сократить темпы окупаемости таких устройств при модернизации.

Выполненный в работе анализ для внедрения импульсного регулирования на электровозах ЧС2 и ВЛ8, которые еще массово применяются для вождения поездов в Украине подтвердил концепцию экономии энергоресурсов. Так внедрение импульсного регулирования в процессе пуска на электровозе ЧС2 позволяет снизить потери до

75 раз, а на ВЛ8 до 60 раз по сравнению с реостатами.

Сохранение группировок тяговых двигателей при внедрении импульсного регулирования позволяет получить промежуточные уровни скоростей, характерных группировкам (С-соединение, СП-соединение) с отключенным регулятором, дополнительно снизить потери и нагрев преобразователя. Для 6-осных электровозов (ЧС2) снизить до 11 % пульсации тока либо снизить габариты реакторов.

Библиографический список

1. Тихменев Б.Н. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования: учебник [для студ. вузов]/ Б.Н. Тихменев, Л.М. Трахтман. – М.: Транспорт, 1980. – 471 с.
2. Статичні перетворювачі тягового рухомого складу. Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко та ін. – Х.: НТУ «ХП», 2007. – 192 с.
3. Калиниченко А. Я. Особенности работы цифровых систем управления тиристорными преобразователями на электроподвижном составе. / Развитие современной науки и прикладные аспекты. Сборник статей студентов, магистрантов, аспирантов, молодых ученых и преподавателей. Том. Выпуск 7 Пермь: ИП Сигитов Т. М., 2016 С:10–13. ISBN: 978-5-9908647-2-6
4. Калиниченко А. Я., Фесечко А. И. Системы управления многофазными преобразователями. Вестник международного института управления. Частное образовательное учреждение высшего образования "Институт управления" (Архангельск), Номер: 3-4 (133-134). 2015 С: 102–105.
5. Белухин Д. С. Преимущества сохранения группировок тяговых двигателей при импульсном регулировании напряжения. // Проблемы и перспективы раз-

вития железнодорожного транспорта: Тезисы 73 Международной научно-практической конференции. – Д.: ДИИТ, 2013. – С.110-111.

6. Регулятор скорости для электровоза ЧС2К с индивидуальными электропневматическими контакторами реостатного пуска. Антонюк М. С. Автореферат на соискание ученой степени к.т.н. по спец. 05.22.07 - «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» Москва 2007 – 24 с.
7. Уильямс Б. Силовая электроника: приборы, применение, управление; Справ. пособие: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1993. – 240 с.
8. Білухін Д. С. Електроніка та мікросхемотехніка: завдання на курсову роботу з методичними вказівками / Дніпропетр. націон. ун-т залізн. трансп. ім. ак. В. Лазаряна. – Д. – 2004. – 28 с.
9. Розенфельд В. Е. Теория электрической тяги: учебник для вузов ж.-д. трансп. / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.
10. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
11. Бирзниец Л. В. «Импульсные преобразователи постоянного тока» – М.: Энергия, 1974– 256 с.

Ключевые слова: электровоз, преобразователь, потери.

Ключові слова: электровоз, перетворювач, втрати.

Keywords: electric locomotive, converter, losses.

Рецензенты:

д. т. н., проф. Д. А. Босый
к. т. н., доц. В. Е. Кажан

Поступила в редколлегию 15.09.2019 р.
Принята в печать 30.09.2019 р.