

Ограничения пропускной способности железных дорог по условиям электроснабжения и их снятие



М. А. Гаранин,
д-р экон. наук,
ректор Приволжского
государственного
университета путей
сообщения (ПривГУПС),



Е. В. Добрынин,
канд. техн. наук,
заведующий кафедрой
электроснабжения
железнодорожного
транспорта ПривГУПС,



А. Н. Потейко,
соискатель ученой
степени канд. техн.
наук, заместитель
председателя правления
МООО «Российские
студенческие отряды»

Электрификация железных дорог СССР, основной этап которой пришелся на вторую половину XX в., во многом определила инфраструктуру железнодорожного транспорта современной России. В начале XXI в. темпы электрификации спали, при этом доля электрифицированных железных дорог страны едва перевалила за отметку 50 %.

В истории развития систем тягового электроснабжения было два этапа, в которые инфраструктура хозяйства электроснабжения ограничивала рост размеров движения. Первый этап пришелся на 80-е гг. XX в., когда темпы электрификации замедлились, а рост грузооборота сохранился. Задача повышения размеров движения осуществлялась за счет сокращения межпоездных интервалов до минимальных по условиям автоблокировки и увеличением массы грузовых поездов с 3800 до 4500 т на грузонапряженных участках с уклоном до 15–18 ‰. Это негативно сказывалось на системе тягового электроснабжения, вызывая рост токовых нагрузок, падения напряжения и приводило к ухудшению показателей нагрузочной способности. Пик внимания отрасли к проблеме ограничения пропускной способности магистральных железных дорог приходился на 1985–1986 гг.

Второй этап наблюдаем в настоящее время. К 2020 г. объем грузооборота в России приблизился к уровню РСФСР в 1989 г. Система тягового электроснабжения на большинстве участков осталась прежней, спроектированной на максимальную массу грузовых поездов, не превышающую 5000 т. При этом задача повышения размеров движения так же, как и в 80-х гг., решается за счет повышения массы грузовых поездов (до 7000–9000 т).

Минимальный интервал попутного следования по условиям электроснабжения при этом может превышать время хода поезда по межподстанционной зоне. Энергообеспечение пропуска поездов сверхпроектных масс выполняется

за счет использования резерва — параллельной работы силового оборудования тяговых подстанций и повышения напряжения выхода. Наблюдается ухудшение показателей нагрузочной способности: рост токовых нагрузок, повышение уровня нагрева проводов контактной сети, снижение уровня напряжения в контактной сети.

Дополнительно следует отметить новые подходы к организации движения поездов: систему интервального регулирования и виртуальную сцепку. Данные экстенсивные методы нацелены на повышение пропускной способности за счет динамической оценки поездной ситуации. При этом тяговое электроснабжение они учитывают как статичную систему с постоянными энергетическими параметрами.

В условиях повышенной интенсивности движения поездов (коэффициент интенсивности стремится к 1) увеличивается риск возникновения аварийной ситуации из-за превышения показателей нагрузочной способности своих пороговых значений. Результатом может быть выход из строя контактной сети или силового оборудования тяговых подстанций. Возникает актуальность совершенствования методов и средств контроля пропускной способности и показателей нагрузочной способности.

Целью исследования является анализ ограничений пропускной способности железных дорог по условиям электроснабжения. Для этого поставлены и решены следующие задачи: анализ ограничений пропускной способности по условиям электроснабжения и возможности использования динамической

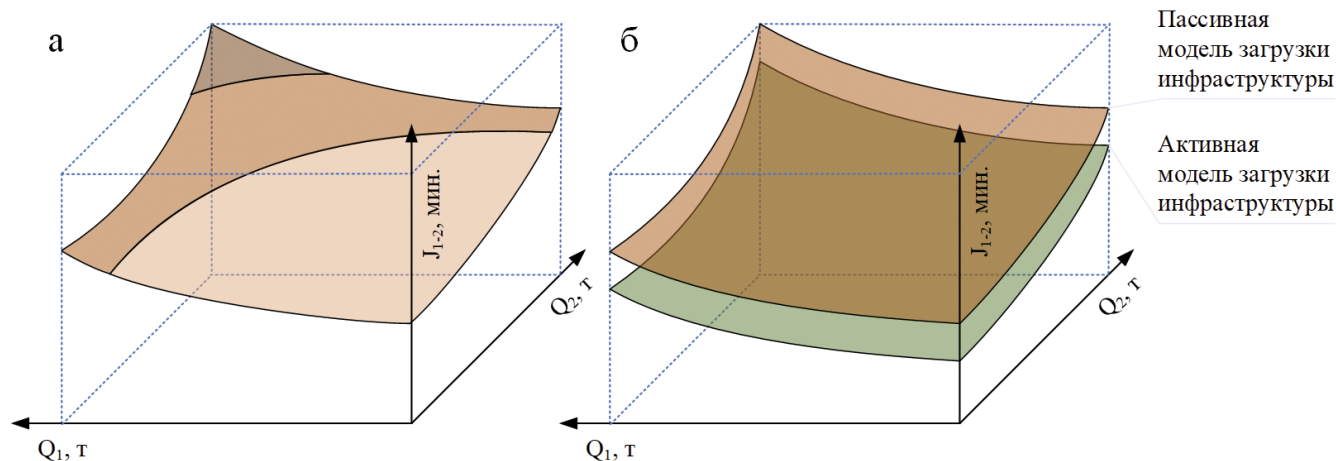


Рис. 1. График минимального допустимого межпоездного интервала движения поездов двухпутного участка в зависимости от массы поездов смежных направлений: а) пассивная модель загрузки инфраструктуры; б) активная модель загрузки инфраструктуры

оценки загрузки системы тягового электроснабжения как экстенсивного пути повышения нагрузочной способности.

Исследование является частью комплексной научной работы, посвященной совершенствованию системы тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог, проводимой на базе научной школы Самарского государственного университета путей сообщения [1–5]. Методологической основой исследования являются: методы анализа и синтеза, а также теория автоматического управления. Проведенное исследование опиралось на результаты научных работ ученых-экспертов в области систем тягового электроснабжения [6–17].

Анализ ограничений пропускной способности по условиям электроснабжения

В начале XXI в. стратегическими документами железнодорожной отрасли вводится понятие «гарантированное энергообеспечение перевозочного процесса» для железнодорожного транспорта. Оно закрепляет ответственность бизнес-блока «инфраструктура» за обеспечение потребной для тяги электрической мощности и приоритета питания тяговой сети перед другими потребителями: собственные нужды, нетяговое потребление и транзит. Учитывая объемы потребляемой на тягу электрической энергии, задача представляется масштабной: железнодорожный транспорт России потребляет около 5–6 % от всей вырабатываемой в стране электроэнергии, и преобладающая доля (более 80 %) расходуется на тягу поездов.

Понятие «гарантированное энергообеспечение перевозочного процесса» раскрывается за счет основных показате-

лей нагрузочной способности: мощности нагрузки силового оборудования тяговых подстанций, температуры нагрева проводов контактной сети и уровня напряжения на токоприемниках электроподвижного состава. Кроме того, применяются дополнительные показатели (качество электрической энергии, условия защиты от токов короткого замыкания, показатели работы обратной тяговой сети и др.), имеющие меньший вес, и если основные показатели не соответствуют ограничениям, то их расчет лишен смысла. Указанные основные показатели оцениваются во времени и зависят от соотношения массы поездов на участке (для двухпутных участков — от массы поездов смежных направлений) и межпоездных интервалов.

На рис. 1 а показано, как зависит минимальный межпоездный интервал попутного следования поездов J1–2 от массы грузовых поездов нечетного Q1 и четного Q2 направлений. Поверхность, образованная полем точек зависимости минимально возможных межпоездных интервалов в зависимости от массы поездов смежных направлений, поделена на три области, выделенные цветом: чем больше массы грузовых поездов, тем больше требуется интервал их попутного следования.

Поверхность на рис. 1, а построена для ситуации, при которой не предпринимаются усилия по оптимизации графика движения поездов (пассивная модель загрузки инфраструктуры). Увеличение массы грузовых поездов происходит без учета положения ниток графика движения других поездов на пути расположения поезда и соседнем пути. Вместе с тем, система тягового электроснабжения очень критична к этому расположению: от

положения токоприемников на участке и их сочетания зависит токовая нагрузка, имеющая резкопеременный характер. Как следствие, меняются основные показатели нагрузочной способности: мощность нагрузки силового оборудования тяговых подстанций, температура нагрева проводов контактной сети и уровень напряжения в тяговой сети у токоприемника электроподвижного состава.

Неравномерность нагрузки системы тягового электроснабжения обусловлена стохастичностью графика движения поездов — чередование разных масс и интервалов попутного следования, мест пересечения ниток графика встречного направления — и неравномерностью потребляемого тока, зависящего от профиля пути. Результатом этого является низкий коэффициент использования потенциала оборудования системы тягового электроснабжения (0,2–0,5), если брать за продолжительный период времени (сутки, месяц, год), сопровождающийся пиковыми нагрузками, превышающими номинальные значения оборудования. Такая неконтролируемость процесса нагрузки требует нерационального усиления системы тягового электроснабжения, в противном случае повышается риск выхода оборудования из строя.

Управление организацией движения поездов, включающее критерий энергообеспеченности, позволяет реализовать более эффективное использование инфраструктуры. На практике это достигается за счет активной модели ее загрузки, что позволяет снизить минимальные межпоездные интервалы — перейти с верхней плоскости на нижнюю (рис. 1, б).

При значительном ухудшении основных показателей нагрузочной способно-

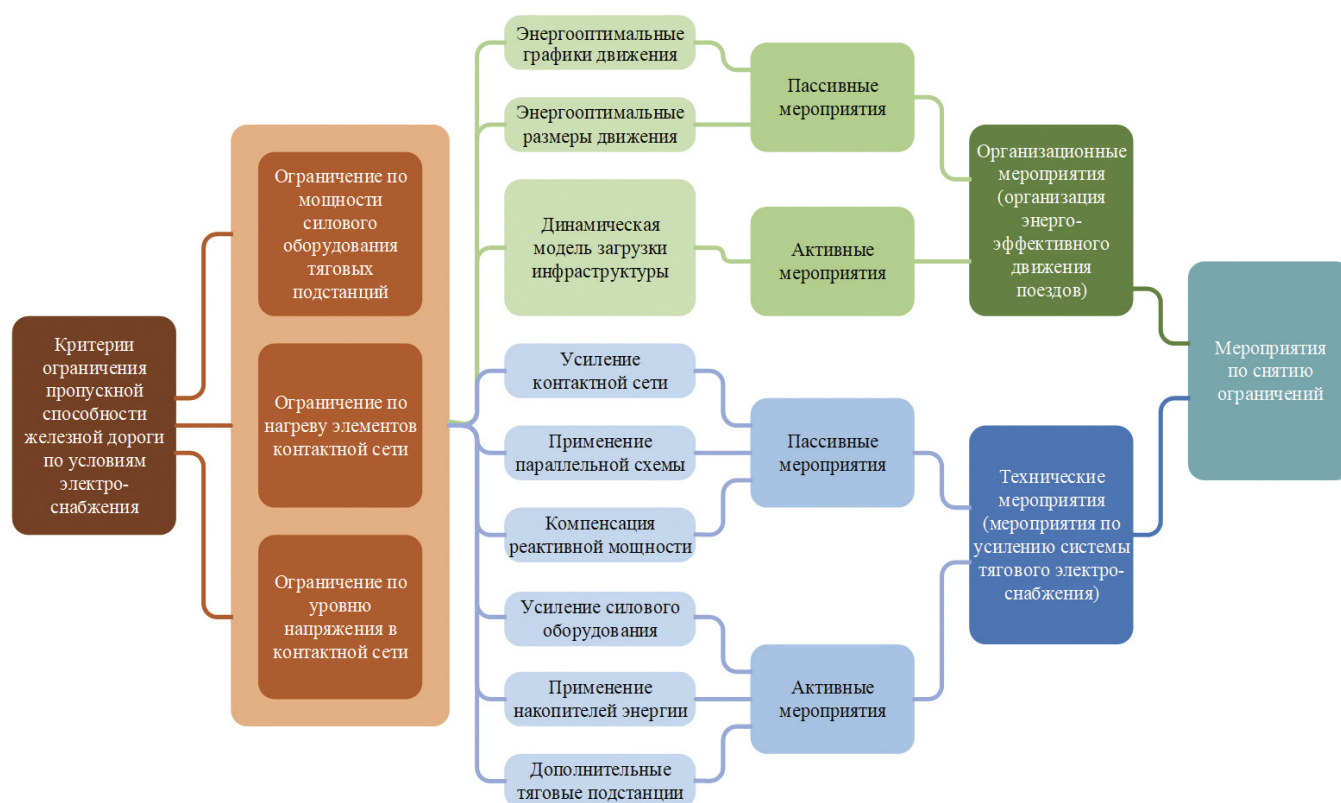


Рис. 2. Анализ ограничений пропускной способности и их снятие

сти (приближении их значений к ограничивающим и пересечении их) требуются мероприятия по усилению. Реализация таких мероприятий относится к экстенсивному пути повышения пропускной способности и сопряжена со значительными капитальными затратами.

Описанное решение не относится к экстенсивному пути повышения пропускной способности, но является гораздо менее затратным. При этом оно способно улучшить основные показатели нагрузочной способности в относительно малом диапазоне: снижение пиков нагрузки на величину до 2 МВт, нагрева проводов контактной сети до 10 °С и повышение уровня напряжения в контактной сети до 200 В.

Указанные ограничения пропускной способности между собой взаимосвязаны. Основной функциональной составляющей является токовая нагрузка, которая определяет загрузку силового оборудования, влияет на нагрев проводов и падение напряжения. Учитывая данное обстоятельство, мероприятия по снятию ограничений пропускной способности по условиям электроснабжения могут оказывать влияние на два или три ограничения одновременно (рис. 2). Приведем пример одновременного воздействия мероприятий на ограничения.

Один критерий: усиление силового

оборудования способно снять ограничение, связанное с его перегрузкой. Однако это мероприятие не влияет на ток, протекающий в тяговой сети, и не улучшает два других критерия. Изменение токораспределения и повышение напряжения может произойти в случае, если характеристики силового оборудования будут отличаться от прежнего (снижение сопротивления), но это изменение не превысит 5%.

Два критерия: усиление сечения контактной сети приводит к уменьшению ее сопротивления. В результате уменьшается нагрев проводов, снижается падение напряжения, и, как следствие, повышается уровень напряжения на токоприемниках электроподвижных составов. Загрузка силового оборудования тяговых подстанций при этом не изменяется.

Три критерия: использование накопителей энергии способно уменьшить пики токовой нагрузки и, как следствие, снизить загрузку силового оборудования тяговых подстанций, нагрев проводов, а также уменьшить потери напряжения в тяговой сети.

Представленные на рис. 2 мероприятия по снятию ограничений структурированы следующим образом: все мероприятия подразделяются на организационные (обычно менее затратные) и технические (более затратные). Каждое

из последних подразделяется на активные (увеличивающие мощность системы) и пассивные (не увеличивающие). Как правило, активные мероприятия являются более действенными и сильнее влияют на критерии. Организационные активные мероприятия высвобождают мощность, чтобы использовать ее для питания пиков нагрузки.

Различие в энергооптимальных размерах движения и графиках движения следующее. Энергооптимальный график движения — это оптимальное с точки зрения расхода и потерь электрической энергии расположение ниток графика движения без изменения массы поездов. Энергооптимальные размеры движения — это выбор оптимальной с точки зрения расхода и потерь электрической энергии массы грузовых поездов. В первом случае управляем интервалами, во втором — массой поездов.

Анализируя систематизированные на рис. 2 мероприятия, следует отметить, что технические мероприятия, за исключением накопителей энергии, направлены на постоянное расширение физических возможностей системы тягового электроснабжения. Она становится «сильнее» (мощность выше, возможности пропуска поездов больше и т. д.) даже в тех случаях, когда этого не требуется: режимы работы в «окно», ре-

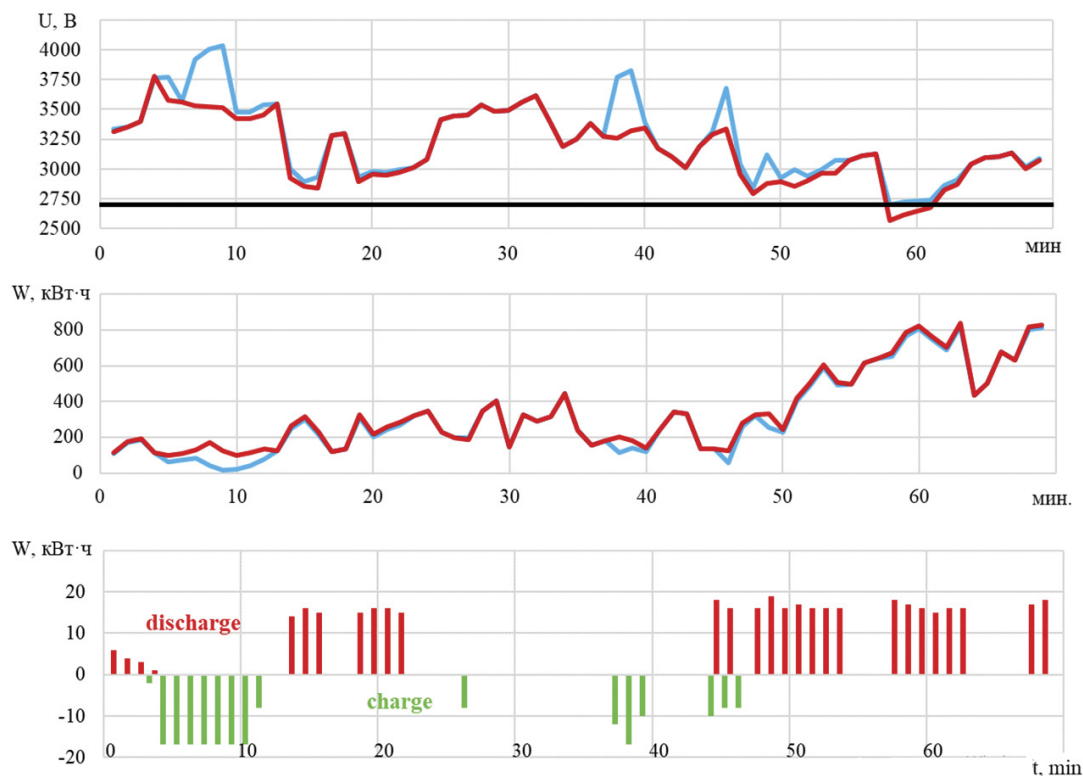


Рис. 3. Пример использования динамической модели загрузки системы тягового электроснабжения: красная кривая показывает уровень напряжения и расход электрической энергии на участке без использования накопителя энергии, синяя — с накопителем

жим неполной загрузки при движении пригородных поездов, режим работы при пропуске поездов по одному пути, отсутствие поездов и пр. Эти мероприятия не сглаживают пики нагрузки, опасные для системы тягового электроснабжения, и из-за этого происходит ограничение пропускной способности.

Применение накопителей энергии и организационные мероприятия относятся к «интеллектуальным» мероприятиям, позволяя повысить эффективность системы. Мероприятия «срезают» пики нагрузки, позволяя справиться с ними без изменения самой системы.

Модель динамической загрузки системы тягового электроснабжения (на примере накопителей электрической энергии)

Накопитель энергии — это устройство потребления избыточной энергии из тяговой сети, как правило, энергии рекуперации, и использования ее для питания электроподвижного состава в моменты пиковых нагрузок. Это позволяет снизить расход потребляемой энергии из внешней сети. Несмотря на массовое использование накопителей энергии, они мало применяются для тяги поездов, в первую очередь, из-за высокой мощности и, как следствие, стоимости устройства. Существует три способа раз-

мещения накопителей энергии в системе тягового электроснабжения: на электроподвижном составе, тяговой подстанции и перегоне. Каждый способ имеет свои преимущества.

Накопители электрической энергии могут размещаться на электроподвижном составе. Для этого может использоваться отдельный вагон с батареями, соединенный с силовой цепью электровоза. Основным преимуществом способа является наиболее короткий путь между точкой генерации энергии, точкой накопления и нагрузкой. Это преимущество позволяет упростить автоматический процесс переключения между режимами. Недостатком является невозможность передачи избыточной энергии другому электровозу, например, при встречном движении на затяжном подъеме. Также усложняется устройство электровоза, требующего дополнительные секции для размещения накопителей энергии.

Накопители энергии могут размещаться на тяговой подстанции. В этом случае цепи батареи подключаются к шинам тягового распределительного устройства. Основным преимуществом этого варианта является независимость накопителя от электровозов и простота автоматизации режимов работы накопителя. В случае роста напряжения в тя-

говой сети, т. е. появления избыточной энергии рекуперативного торможения и отсутствия спроса на нее на перегоне, накопитель на тяговой подстанции забирает избыточную энергию. Далее она используется для сглаживания пиков нагрузки, но при этом токи в тяговой сети и падение напряжения в ней не снижаются.

Накопители энергии могут размещаться на перегоне рядом с постом секционирования, обеспечивая подключение батареи ко всем секциям контактной сети двухпутного участка. По сути, это альтернатива второму варианту, когда накопитель энергии размещается не на электроподвижном составе. Основным преимуществом способа является сокращение расстояния между накопителем и электроподвижным составом при максимальном удалении электровоза от тяговой подстанции, т. е. там, где потери в тяговой сети максимальны. Как и во втором варианте, накопитель энергии может запасать энергию не только от электровоза в режиме рекуперации, но и забирать ее из сети в случае отсутствия нагрузки. В наиболее сложных режимах накопитель включается в питание нагрузки, работая как дополнительная тяговая подстанция. При такой схеме ток в тяговой сети перераспределяется между основными

и дополнительными источниками, что снижает потери в сети и повышает уровень напряжения.

На рис. 3 представлен пример работы накопителя энергии, установленного на посту секционирования. Видно, как накопитель предотвращает ограничение пропускной способности, когда критерийный параметр — уровень напряжения в тяговой сети — становится ниже допустимого значения (2700 В). Показаны режимы работы накопителя: charge (заряд) и discharge (разряд).

Рис. 3 демонстрирует пример использования модели динамической загрузки системы тягового электроснабжения. Накопитель энергии не добавляет мощности системе тягового электроснабжения, не делает ее «сильнее». Это интеллектуальный помощник, который «включается» тогда, когда системе «сложно» — возникают пики нагрузки. В этом случае накопитель переходит из режима charge (заряд) в режим discharge (разряд).

Раскрыть все возможности динамической загрузки системы тягового электроснабжения позволяет интеллектуальная система управления инфраструктурой системы электроснабжения: режимом работы накопителей энергии, отключением трансформаторов в режиме длительного отсутствия нагрузки, регулированием уровня напряжения холостого хода на шинах тяговых подстанций, перетоками электрической энергии между системами, подключением резерва, ограничением питания нетяговых потребителей и др. Представляется актуальным создание такой системы.

Заключение

Основным результатом представленного исследования является анализ возможных ограничений пропускной способности электрифицированных железных дорог по условиям электроснабжения и определение эффективных механизмов их снятия. Авторы утверждают, что, несмотря на высокие темпы внедрения современных средств автоматизации расчетов и цифровизации систем управления и принятия решения, система управления транспортной инфраструктурой остается архаичной. Дискуссионность данного тезиса снимается двумя фактами: неоправданно высокой долей человеческого фактора в системах управления транспортной инфраструктурой и подходами, используемыми для оценки пропускной и нагрузочной способности элементов инфраструктуры,

в основе которых статичные параметры. Статичность параметров наблюдается в пространстве и во времени. Так, например, ограничение по мощности системы электроснабжения меняется при движении поезда по участку, а также зависит от других факторов, т. е. меняется во времени. Несмотря на это существующие модели и методы оценки пропускной способности оперируют статичным параметром, не изменяемым на протяжении участка и постоянным в течение длительного времени (неделя, месяц, год).

Снятие указанного противоречия возможно за счет мероприятий, точно привносящих в систему дополнительные ресурсы, например, электрическую мощность. В результате может возникнуть ситуация, когда электроподвижному составу, отклонившемуся от коридора графика движения, требуется 1–2 МВт электрической мощности в течение краткосрочного периода в 2–3 мин. При этом существующие подходы и методы снятия ограничения требуют пассивных или активных мероприятий, комплексно увеличивающих мощность на указанные значения, не требуемые постоянно, что приводит к неоправданному завышению затрат. В то же время существующие технико-технологические решения позволяют обеспечить точечное приращение мощности без значительных капитальных затрат.

В рамках проведенного исследования представлены результаты анализа ограничений пропускной способности по условиям электроснабжения и систематизированы пути их снятия, впервые представлены результаты анализа возможности использования динамической оценки загрузки системы тягового электроснабжения как экстенсивного пути повышения нагрузочной способности.

Результаты исследования могут представлять интерес для инженерно-технических работников, обеспечивающих проектирование, монтаж, ремонт и эксплуатацию систем тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог; для научных работников и специалистов академического, вузовского и производственного секторов науки, осуществляющих исследования в области систем обеспечения работы транспорта; для научно-педагогических и педагогических работников, участвующих в реализации образовательных программ в области систем обеспечения движения поездов.

Источники

1. Гаранин М. А., Загорский В. А., Блинкова С. А. Усиление системы тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока // Вестник транспорта Поволжья. 2016. № 1(55). С. 30–34. EDN: VRCLZX.
2. Гаранин М. А., Блинкова С. А. Анализ основных проблем в области энергообеспечения, возникающих при организации скоростного и высокоскоростного движения на железных дорогах России, и пути их решения // Вестник транспорта Поволжья. 2018. № 4(70). С. 14–19. EDN: YASAPQ.
3. Гаранин М. А., Блинкова С. А. Повышение нагрузочной способности контактной сети // Вестник транспорта Поволжья. 2014. № 2(44). С. 19–23. EDN: SPSMVZ.
4. Гаранин М. А., Блинкова С. А. Повышение точности расчета энергообеспеченности перевозочного процесса // Вестник транспорта Поволжья. 2012. № 6(36). С. 36–40. EDN: PJUHVH.
5. Гаранин М. А., Блинкова С. А. Расчет энергообеспеченности перевозочного процесса и усиление системы тягового электроснабжения // Транспорт Урала. 2014. № 3(42). С. 109–114. EDN: SVNLMT.
6. Истомин С. Г., Эрбес В. В., Незевак В. Л. Повышение пропускной способности участка железной дороги переменного тока в условиях выбора мероприятий по усилению системы тягового электроснабжения // Транспорт-2013: Труды международной научно-практической конференции, 1 апреля 2013 г., Ростов-на-Дону, Россия. Ростов н/Д: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2013. Ч. 3. С. 155–157. EDN: VIQQDF.
7. Марский В. Е. Определение пропускной способности железнодорожных участков по устройствам тягового электроснабжения // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2014. № 1. С. 40–46. EDN: TOLGXL.
8. Игнатенко И. В., Власенко С. А., Тряпкин Е. Ю. Совершенствование программного комплекса по расчету системы тягового электроснабжения переменного тока // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2021. № 4(29). С. 68–71. EDN: DDASPL.
9. Бадер М. П., Лобынцев В. В. Повышение энергоэффективности системы тягового электроснабжения постоянного тока // Электротехника. 2020. № 9. С. 14–19. EDN: NXJIEO.

10. Герман Л. А., Субханвердиев К. С. Прогнозная емкостная компенсация для повышения пропускной способности системы тягового электроснабжения железных дорог // Электричество. 2022. № 11. С. 56–63. DOI: 10.24160/0013-5380-2022-11-56-63. EDN: ZCQLVI.
11. Пузина Е. Ю. Моделирование ремонтных режимов работы системы электроснабжения участка Юрты – Нижнеудинск при реализации систем интервального регулирования // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 3(75). С. 181–194. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75). 181-194. EDN: HBHMKF.
12. Баева И. А. Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения за счет применения устройств регулирования напряжения // Транспорт Урала. 2021. № 1(68). С. 78–85. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-1-78-85. EDN: GTSZHU.
13. Гаранин М. А. Совершенствование расчета наличной пропускной способности железных дорог постоянного тока по условиям электроснабжения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2004. 24 с. EDN: NHVBFH.
14. Митрофанов А. Н., Гаранин Н. Л. Со-

- вершенствование расчетов пропускной способности железных дорог переменного тока по условиям электроснабжения // Электрификация и организация скоростных и тяжелых коридоров на железнодорожном транспорте: Тезисы докладов Четвертого Международного симпозиума Eltrans'2007, 23–26 октября 2007 г., Санкт-Петербург, Россия. СПб: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2007. С. 62–63. EDN: UNUQWT.
15. Митрофанов А. Н., Гаранин М. А. Динамическая оценка пропускной способности участков железных дорог по условиям электроснабжения // Актуальные проблемы развития транспортных систем Российской Федерации: Сборник научных трудов с международным участием. Ч. 2. Самара: Самарский государственный университет путей сообщения, 2004. С. 89–95. EDN: ZJVCMF.
16. Митрофанов А. Н., Гаранин М. А. Программно-технологический комплекс по расчету наличной пропускной способности участков железных дорог постоянного тока по условиям электроснабжения

- (ПТК РНПС-ЭЧ) // Актуальные проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Материалы региональной научно-практической конференции, посвященной 130-летию Куйбышевской железной дороги, 27–28 октября 2004 г., Самара, Россия. Самара: Самарская государственная академия путей сообщения, Куйбышевская железная дорога – филиал ОАО «РЖД», 2004. Ч. 1. С. 253–257. EDN: WMWAZX.
17. Гаранин М. А., Митрофанов А. Н. Методика и программный комплекс для расчета наличной пропускной способности участков железных дорог постоянного тока по условиям электроснабжения // Электрификация и развитие энергосберегающей инфраструктуры и электроподвижного состава на железнодорожном транспорте: Тезисы докладов Третьего Международного симпозиума Eltrans'2005, 15–17 ноября 2005 г., Санкт-Петербург, Россия. СПб: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2005. С. 45–46. EDN: WHQAAJ.



Общероссийская общественная организация **РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ ТРАНСПОРТА**

Основные сферы:

