

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ И СИСТЕМ АТДП

С. Ю. Козлов, А. А. Лянда, к. т. н., Д. А. Пентегов, И. А. Сиваков, к. т. н., ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс»

Современный метрополитен – это сложнейшее сооружение, предназначенное для быстрой, комфортной, безопасной и экономичной перевозки пассажиров. Требования к объему перевозок стремительно растут.

Именно поэтому проектирование систем, обеспечивающих движение поездов с требуемой интенсивностью, является важной и актуальной задачей. Решение этой задачи связано с большим количеством вычислений, которые повторяются при решении различных задач, а также с большим количеством исходных данных.

В институте «Ленметрогипротранс» разработана и в течение многих лет используется система автоматизации расчетов, основанная на использовании единой базы данных (БМТ). В 2021 г. в институте запущена новая версия системы с абсолютно новой архитектурой программного обеспечения. При этом основные технические методы и алгоритмы остались прежними.

При разработке архитектуры системы ставились следующие требования.

- система должна быть удобной для работы проектировщиков разных специальностей и системных администраторов. Для удобства проектировщиков разработан интуитивно понятный графический интерфейс;

- система должна иметь возможность разветвления, как в сети, так и на локальных компьютерах пользователей;

- проектная и расчетная документация, выпускаемая программами системы, должна иметь возможность редактирования независимо от БМТ, например, с помощью Microsoft Office и Autocad.

По замыслу разработчиков, ядром системы является единая база данных по трассе существующих и проектируемых линий метрополитена. Для того чтобы задать линию, необходимо для двух путей установить пикеты начала и конца линии по двум путям. Линия может иметь несколько систем пикетов. В этом случае задаются точки сбоя пикетажа. Когда система пикетов задана, линия будет считаться введенной, она сохранится в перечне линий и далее можно вводить все необходимые данные.

Работа с трассой линии метрополитена

Предполагается, что на одной линии может быть несколько участков с различными системами пикетов. В пределах одного участка нумерация пикетов должна быть сплошной, при этом может быть как возрастающей, так и убывающей. Допускается любое количество участков с разными системами пикетов. «Неправильные» пикеты изображаются условно,

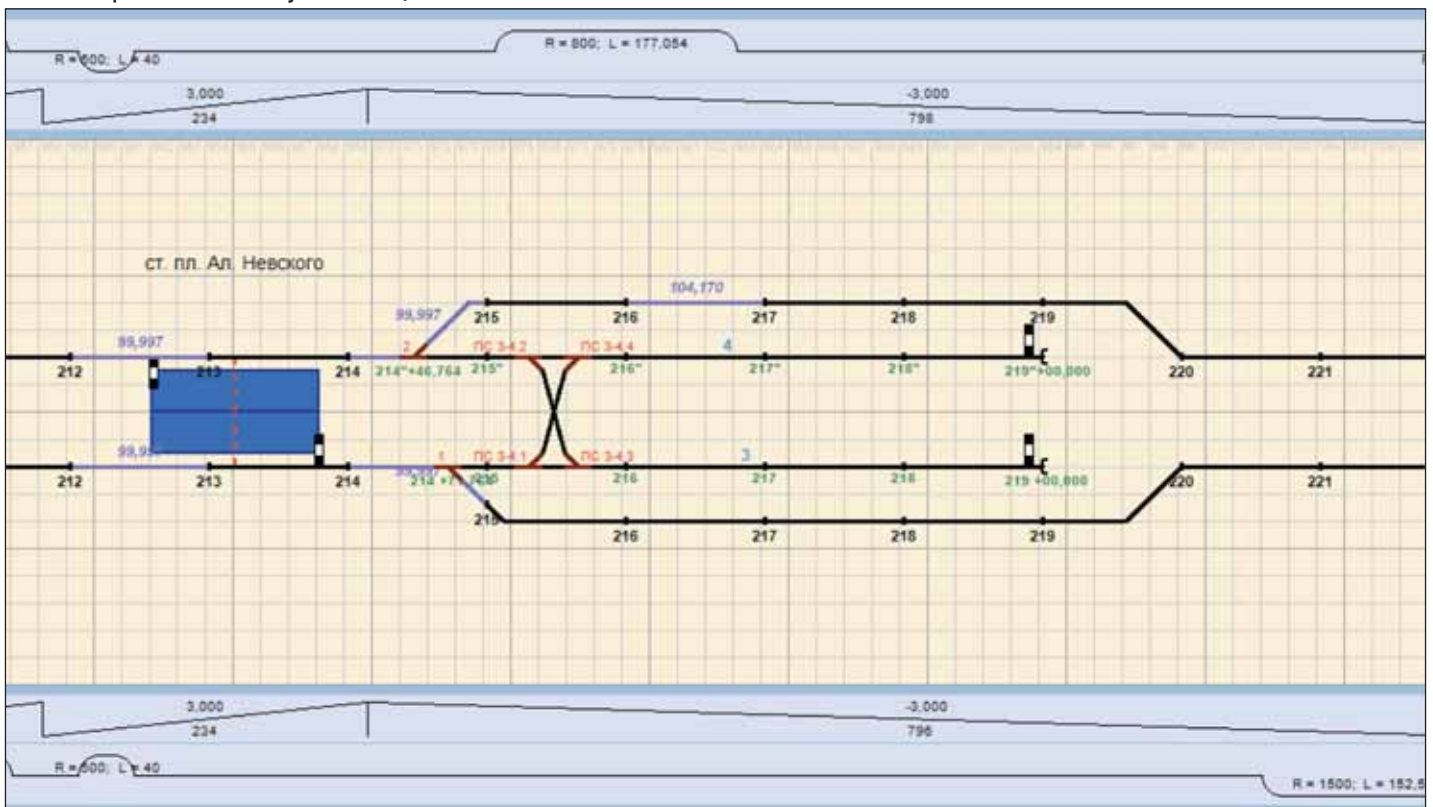
без учета их реальной длины и выделяются цветом с указанием настоящей длины неправильного пикета. Во всех расчетах системы учитываются истинные длины пикетов.

Графический интерфейс позволяет отобразить на экране практически любую топологию станций с путевым развитием.

Тяговые расчеты метрополитена

Программа позволяет выполнить тяговый расчет, то есть определить зависимости скорости поезда от пройденного пути $V(s)$, времени хода от пройденного пути $t(s)$ и тока поезда $I(t)$, общее время хода поезда и общий расход энергии на тягу, а также режимы ведения поезда. Расчет выполняется от любой точки до любой точки на пути, указанном пользователем, промежуточные остановки не допускаются. Траектория движения поезда при движении по стрелкам определяется автоматически. Результаты тягового расчета предназначены, главным образом, для использования в программах расчета тяговых нагрузок фидеров и подстанций и проектирования системы АТДП (автоматики и телемеханики движения поездов). Для решения этих задач применяются различные расчетные режимы ведения поездов с разной точностью расчета. Поэтому существуют две версии про-

Рис. 1. Изображение главных путей со смещением



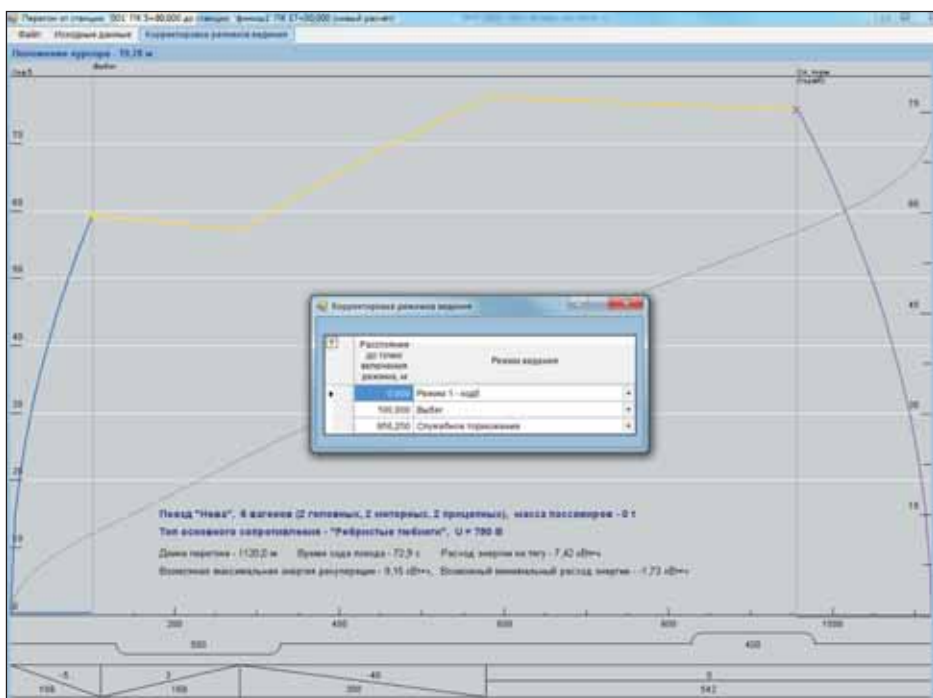


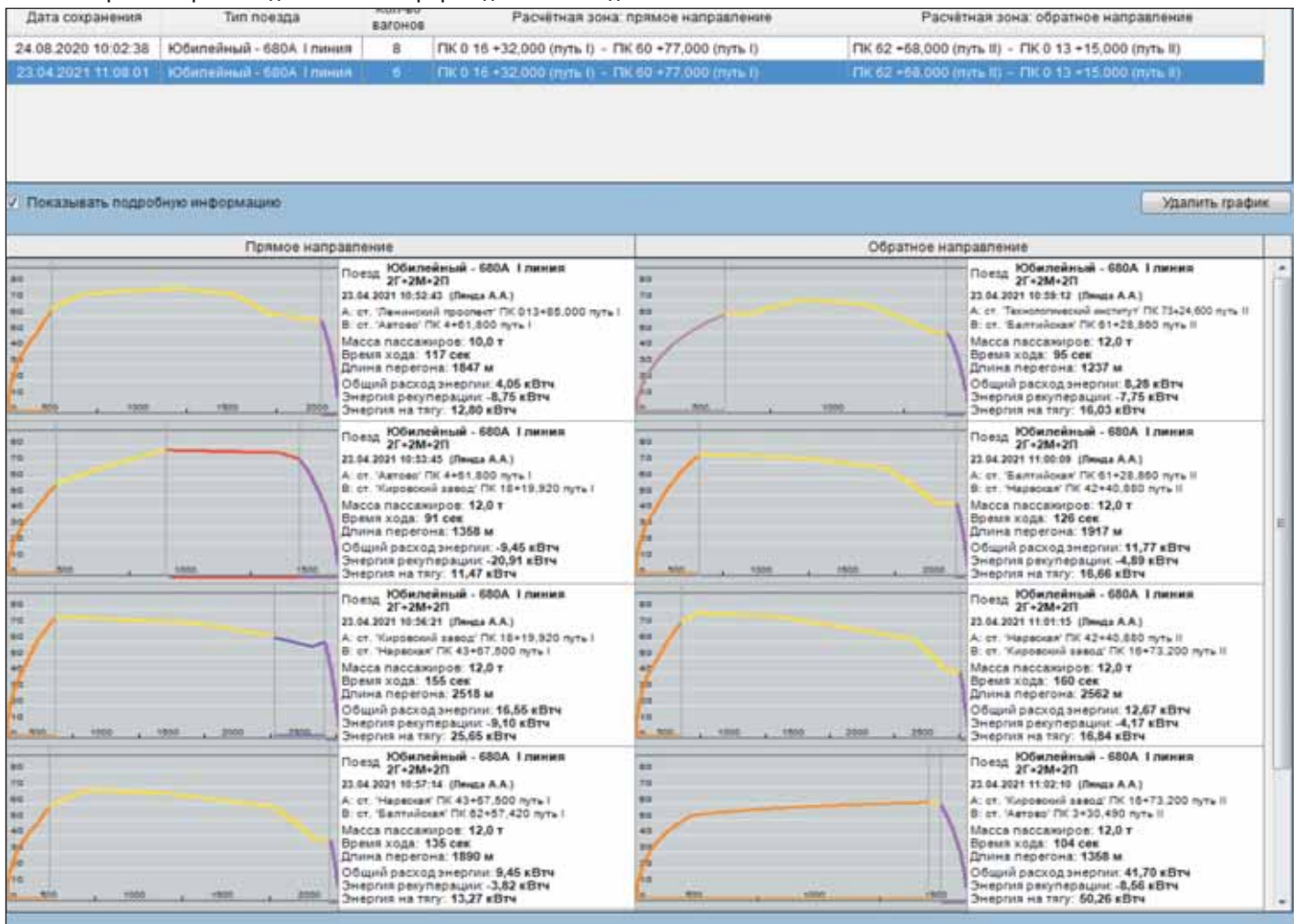
Рис. 2. Интерфейс выполнения тягового расчета

граммы и пользователи каждой специальности работают только с результатами, полученными в «своей» версии программы.

Программа тяговых расчетов позволяет задать любой режим ведения с учетом нало-

женных ограничений скорости, в том числе повторить режимы, установленные службой подвижного состава для каждого конкретного перегона. Тяговые характеристики подвижного состава хранятся в базе данных.

Рис. 3. Выбор тяговых расчетов для составления графика движения поездов



Соппротивление движению в тоннеле рассчитывается по известной формуле Дэвиса с учетом дополнительного аэродинамического сопротивления в тоннеле, которое зависит от конструкции тоннеля и количества вагонов в составе.

Программный комплекс имеет удобный интерфейс для корректировки существующих и создания новых типов подвижного состава. Методика расчета имеет общепринятые допущения – поезд считается материальной точкой, расположенной в центре масс состава, вертикальные кривые не учитываются. Анализ точности расчетов показал необходимость учета плавного изменения ускоряющих и тормозных сил и уровня напряжения в контактной сети, что и было реализовано в программе тяговых расчетов. Многократные опытные поездки на существующих участках линии на разных типах составов показали высокую точность получаемых результатов с отклонениями от практических не более погрешности измерений.

На рис. 2. показан пример выполнения тягового расчета по одному из перегонов.

Моделирование и расчет системы тягового энергоснабжения

Программы комплекса решают следующие задачи:

- приближенный расчет мощности тяговых подстанций. Результаты расчета предназначены для первоначального выбора тяговых агрегатов и подготовки ТУ на подключение к энергосистеме;
- моделирование графика движения поездов с учетом возможных отклонений от стандартного графика движения;
- расчет тяговых нагрузок подстанций в рабочих и аварийных режимах, питающих и отсасывающих фидеров, кабельных перемычек;
- расчет токов короткого замыкания в тяговой сети;
- расчет максимальной и минимальной интенсивности движения на существующих подстанциях для разных типов подвижного состава;
- расчет и выбор оборудования, исходя из планировочных решений реконструируемых подстанций.

Приближенный расчет мощности выполняется по методике, разработанной в Ленметрогипротрансе [2]. Методика основана на анализе продольного профиля линии, проектной интенсивности движения с использованием наиболее распространенных режимов ведения. Возможности рекуперативного торможения не учитываются.

Расчет нагрузок с учетом графика движения поездов выполняется отдельно для каждой подстанции. При расчете нагрузок учитывается влияние четырех фидерных зон по каждому из путей (по две с каждой стороны). Эти фидерные зоны образуют расчетный участок, для которого составляется график движения, при этом рассматриваются все варианты отклонения поездов от графика в пределах 15 секунд. Для построения графика движения поездов по расчетному участку из базы данных выбираются тяговые расчеты. При наличии нескольких вариантов расчетов, например для поездов разных типов или разных режимов ведения, пользователь имеет возможность самостоятельно выбрать нужный. Пример выбора тяговых расчетов приведен на рис. 3.

Реализации графиков движения по первому и второму путям предполагаются независимыми. Результатом являются зависимости токов от времени на протяжении интервала попутного следования в кабелях тяговой сети и на тяговых подстанциях, соответствующие наиболее неблагоприятному сочетанию отклонений поездов от стандартного графика. На основании зависимостей рассчитываются максимальные, средние и среднеквадратичные токи подстанций, фидеров и кабельных перемычек. Кроме того, для подстанций определяются максимальные значения среднеквадратичных токов подстанций на интервалах 5, 10 и 20 секунд, для проверки допустимых кратковременных перегрузок тяговых агрегатов.

Пример расчетного графика нагрузок подстанции приведен на рис. 4.

Если подвижной состав имеет возможность рекуперативного торможения, автоматически определяется возможность рекупе-

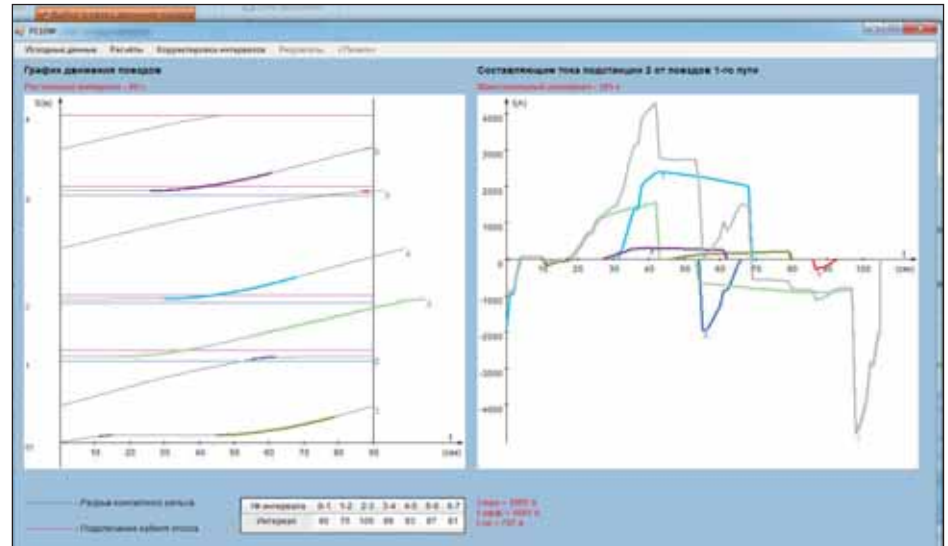


Рис. 4. Наиболее неблагоприятный график движения поездов и соответствующие этому графику мгновенные токи подстанции

рации при наличии потребителей. Частично, в зависимости от реального графика движения, энергия торможения идет на нагрев тормозных реостатов.

Расчет токов короткого замыкания в тяговой сети выполняется отдельно для каждой фидерной зоны. Расчетными точками короткого замыкания являются середины кабельных линий питающих фидеров и кабельных перемычек, а также середины фидерных зон I и II путей [1]. Коротким замыканием в кабельной линии считается пробой оболочки кабеля на токопроводящую оплетку.

До начала расчета необходимо задать данные сети зануления, схемы и параметры подключения оболочек кабелей к сетям зануления. Кабельные линии, для которых не заданы параметры сети зануления, исключаются из расчета.

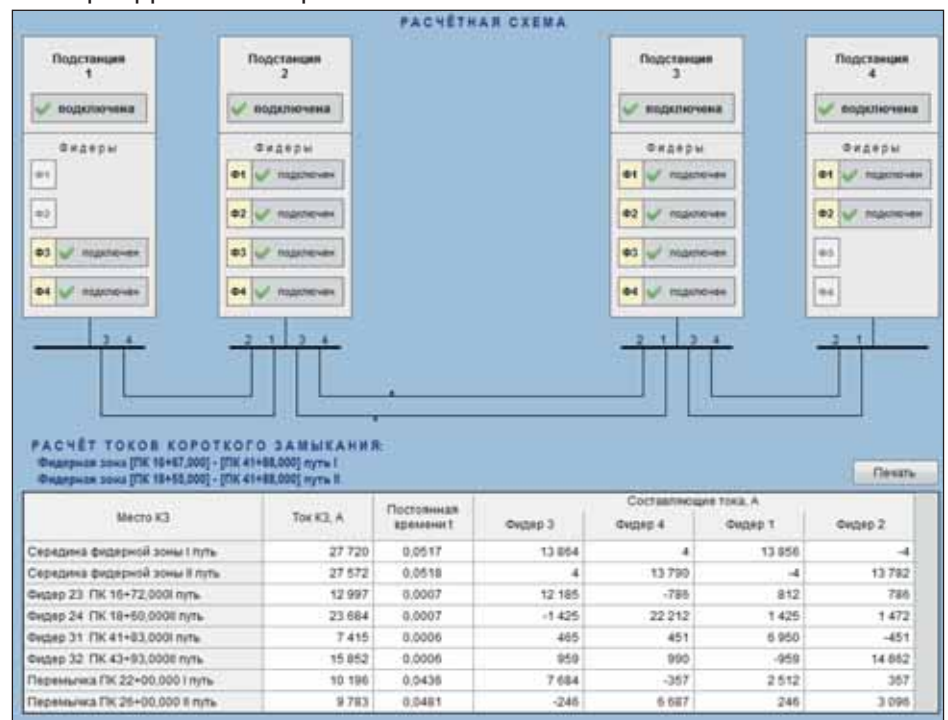
В процессе расчета можно отключить любой фидер и подстанцию целиком, чтобы проанализировать реальную ситуацию в контактной сети.

Расчет пропускной способности и расстановка сигнальных точек для линии метрополитена

Комплекс программ расчета пропускной способности выполнен с учетом основных требований к электрической централизации, устройствам интервального регулирования движения поездов, описанных в разных источниках [3], [4] и выполняет следующие задачи:

- расчет максимальных длин рельсовых цепей для заданной пропускной способности;
- расчет пикетов установки изолирующих стыков и точек подключения бесстыковых рельсовых цепей;

Рис. 5. Пример расчета токов короткого замыкания в тяговой сети



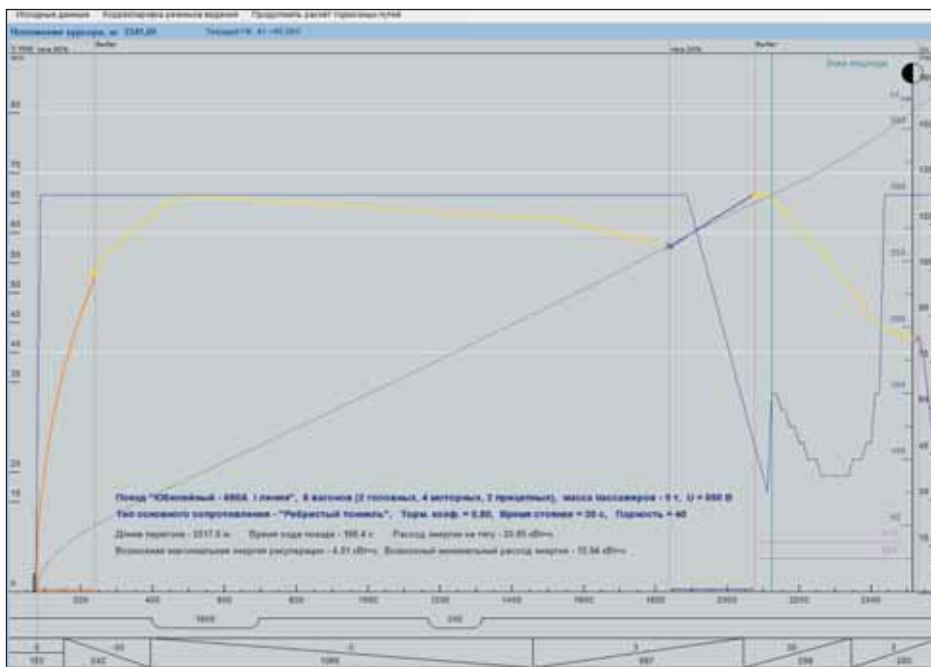


Рис. 6. График скорости, времени хода и максимальной длины рельсовой цепи

- расчет тормозных путей APC;
- расчет «факультативов»;
- вывод максимальной расчетной скорости для каждой рельсовой цепи;
- расчет пропускной способности для перегонов;
- расчет пропускной способности оборота поездов;
- ступенчатое распределение длин тормозных путей для полного набора пороговых скоростей;
- выпуск чертежей расчета пропускной способности и схемы трассы, совмещенной с расположением оборудования автоматики и телемеханики движения поездов.

Исходными данными для расчетов пропускной способности являются результаты тяговых расчетов, выполненные специально для этой цели, заданный интервал движения, время передачи управления подвижным составом при обороте и время стоянки на станции.

На основании тягового расчета выполняется расчет максимальных длин рельсовых цепей при установленных лимитирующих значениях, зависимость выводится на экран совместно с зависимостью скорости от пройденного пути. Пользователь может корректировать режим ведения поезда, подбирая его так, чтобы увеличить максимально возможную длину рельсовой цепи, что соответствует максимальной пропускной способности. Уточненный тяговый расчет сохраняется в базе данных. На рис. 6 показан график зависимости максимальной длины рельсовой цепи от пройденного пути.

На основании рассчитанных длин рельсовых цепей выполняется расстановка изолирующих стыков и точек подключения бесстыковых рельсовых цепей с учетом всех особенностей плана и профиля линии, расположения стрелочных переводов, требований по соотношению длин рельсовых цепей

и т. п. По расставленным рельсовым цепям выполняется расчет нормативных тормозных путей APC и проверяется заданная пропускная способность.

На этом этапе у проектировщика существует возможность изменить конфигурацию рельсовых цепей для увеличения пропускной способности.

Результаты расчета (тормозные пути и «факультативы») сохраняются в базе данных. Существует возможность для одной конфигурации рельсовых цепей выполнить расчеты для разных типов подвижного состава и разных режимов ведения поездов.

Графическая документация – чертеж расчета пропускной способности перегона и схема трассы, совмещенная с расположением оборудования АТДП, выпускается с использованием информации из базы данных. Чертежи выпускаются в виде DXF-файлов, что позволяет легко интегрировать полученные документы в общий объем проектной документации. Для расчета пропускной способности оборота поездов необходимо выбрать путь, по которому осуществляется оборот поездов, это может быть отдельный тупик или один из станционных путей. Далее выполняются тяговые расчеты захода на путь оборота и выхода из него, а также расчет пропускной способности для выхода поезда с пути оборота на станцию с последующим его уходом на перегон. Кроме того, необходимо вручную установить изолирующий стык, по которому будет осуществляться разделка маршрута или его части. В процессе расчета пользователь может корректировать время стоянки в тупике, учитывающего передачу управления подвижным составом, стык разделки маршрута и выбирать разные варианты режимов ведения поезда. Если пропускная способность достаточна, может быть выпущен чертеж оборота поездов на конечной станции.

Существующая версия программы не может быть использована для расчета пропускной способности станции без оборотных путей, когда поезд отправляется в обратный путь непосредственно со станции.

Заключение

Описанная технология используется в ОАО «Ленметрогипротранс» в течение многих лет и постоянно совершенствуется. Уже сейчас программа позволяет минимизировать количество рельсовых цепей вследствие использования выводимых на экран данных о максимальных длинах рельсовых цепей, что, в свою очередь, в целом дает возможность снизить стоимость системы автоматики и телемеханики движения поездов. Следует отметить и потенциал интеграции со сторонним программным обеспечением, позволяющий, например, выполнить моделирование движения поездов на всей линии с воспроизведением различных внештатных ситуаций или имитацию индивидуальных особенностей машинистов по ведению подвижного состава. Принятые решения также предлагается применять относительно поставленных актуальных задач модернизации системы управления движением поездов Московского метрополитена [5].

Трудоемкость выполнения расчетов, связанных с проектированием систем, обеспечивающих движение поездов, сократилась многократно, выросло качество за счет высокого уровня моделирования, рассмотренного большого количества вариантов.

В настоящей статье описаны возможности программного обеспечения на конец мая 2021 г. Система, доказавшая свою высокую эффективность, продолжает развиваться.

Мы готовы сотрудничать со всеми проектными и эксплуатирующими организациями для выполнения отдельных расчетов и совместной эксплуатации базы данных и системы расчетов.

Список литературы

1. Е. И. Быков, Б. В. Панин, В. Н. Путьнин. Тяговые сети метрополитенов. М., Транспорт, 1987, 256 с.
2. А. А. Лянда. Оценка расхода электроэнергии на тягу поездов метрополитена и определение мощности тяговых подстанций. «Метро и тоннели» № 5, 2014 с. 22–24.
3. В. В. Лаврик. Электрическая централизация стрелок и сигналов метрополитенов. М., Транспорт, 1984.
4. К. М. Махмутов. Устройства интервального регулирования движения поездов на метрополитене. М., Транспорт, 1984.
5. Е. О. Аверченков, С. В. Данько. Актуальные задачи модернизации системы управления движением поездов Московского метрополитена // Наука и технологии железных дорог. – 2017. – № 2. – С. 11–22.

Для связи с авторами

Сиваков Иван Анатольевич
iSivakov@lmg.ru

