

литические методы исследований. Принципиально возможно на стадии проектирования использовать специальные электроаналоговые установки, в которых моделировался бы процесс взаимодействия контактной подвески с токоприемниками. Однако подобных установок нет, и поэтому обычно используют только аналитические методы расчетов, учитывающие динамические процессы.

Расчеты, учитывающие динамику, можно базировать на результатах анализа процессов, возникающих при токосъеме, принимая их детерминированными или случайными. И в том, и в другом случае развитие методик расчета идет по различным путям в зависимости от того, учитывается или не учитывается распространение колебаний вдоль контактной подвески. Не менее важен учет влияния на токосъем колебаний пути и локомотива. Воздействия этих колебаний, а также ветра (действие его допустимо учитывать совместно с аэродинамическими силами) всегда являются случайными. Можно считать случайными и некоторые другие факторы, например кривые провисания контактных проводов, натяжения проводов подвески и т.д. Поэтому исследования динамики взаимодействия контактной подвески с токоприемниками методами теории вероятностей являются более строгими. Однако учет случайных явлений существенно усложняет решение поставленной задачи. Поэтому в первую очередь были разработаны методики расчетов взаимодействия контактной подвески с токоприемниками, базирующиеся на анализе детерминированных процессов.

В большинстве современных методик расчета, разработанных в различных странах, не принимается во внимание распространение волн колебаний в обе стороны от точки контакта вдоль контактной подвески. Такие методики применяют лишь для расчетов взаимодействия контактной подвески с одним токоприемником. При взаимодействии же контактной подвески с несколькими работающими одновременно токоприемниками без учета распространения колебаний вдоль контактной подвески точно решить задачу нельзя. Влияние на процесс токосъема колебаний локомотива необходимо учитывать, так как иначе результаты расчетов могут существенно разойтись с действительными перемещениями или нажатиями.

Из сказанного следует, что решить поставленную задачу аналитически на основе анализа детерминированных процессов достаточно трудно. Колебания даже одиночного провода описываются дифференциальными уравнениями в частных производных четвертого порядка со сложными граничными условиями. Колебания каждого из токоприемников должны быть представлены обыкновенными нелинейными дифференциальными уравнениями, которые нужно решать совместно с уравнением колебаний контактной подвески и уравнениями, описывающими колебания крыши локомотива. Последние происходят с переменной амплитудой и спектром частот, зависящими от типа локомотива, состояния пути, скорости движения. Колебательная система, в которой учтены все участвующие в процессе токосъема компоненты, обладает бесконечным числом степеней свободы. Все это делает практически невозможным аналитические решения систем таких уравнений без принятия каких-либо упрощающих допущений. Однако каждое из вводимых допущений должно быть тщательно обосновано. Критерием приемлемости тех или иных допущений является соответствие результатов аналитических расчетов экспериментальным данным с достаточной для практических целей точностью.

#### Список литературы

- 1 **Инсапов, Д. М.** Методика расчета траекторий движения элементов токоприемника / Д. М. Инсапов // Материалы Республиканской НТК с участием зарубежных ученых (6–7 декабря 2005 г.). – 2005.
- 2 **Фрайфельд, А. В.** Проектирование контактной сети / А. В. Фрайфельд, Г. Н. Брод. – М. : Маршрут, 2003.

УДК 621.311:625.42

### **ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА С НАКОПИТЕЛЯМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

*О. С. АНАНЬЕВА, В. Н. ПОДОЛЬСКАЯ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

За последние годы в результате увеличения спроса на грузо- и пассажироперевозки, а также роста цен на энергоносители приоритетной задачей всех развитых стран мира является решение про-

блем, связанных с энергосбережением и энергоэффективностью транспортных средств. В транспортной системе Республики Беларусь согласно Государственной программе «Энергосбережение» на период 2016–2020 гг. предусмотрено сдерживание роста валового потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), а также увеличение использования местных ресурсов и возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Реализация указанных направлений данной программы осуществляются за счет комплекса энергосберегающих мероприятий, включающих:

- экономию ТЭР за счет внедрения современных энергоэффективных технологий, энергосберегающего оборудования и приборов;
- повышение эффективности работы энергетических мощностей путем использования энергоэффективных, в том числе инновационных, технологий с выводом из эксплуатации физически и морально устаревшего оборудования;
- снижение потерь при транспортировке энергии;
- повышение энергоэффективности на транспорте, в том числе ВИЭ.

На сегодняшний день наиболее эффективным и инновационным мероприятием по энергосбережению в транспортном комплексе является применение накопителей электрической энергии (НЭЭ) – устройств аккумулирующих электроэнергию с последующей ее отдачей потребителю, способных снизить капиталовложения на основное оборудование тяговых подстанций (ТП) и уменьшить затраты на электроэнергию, используемую на тягу электрического подвижного состава (ЭПС).

Анализ опубликованных к настоящему времени исследований [1–5] в области применения НЭЭ в системе тягового электроснабжения (СТЭ) показал отсутствие комплексного подхода к решению задач, связанных с исследованием совместной работы СТЭ и подвижного состава с НЭЭ, включающего детальный анализ режимов их совместной работы с учетом многообразия типов ЭПС. В связи с этим разработка имитационной модели является актуальной задачей.

Основной целью работы является создание имитационной модели, способной адекватно описать совместную работу СТЭ и подвижного состава с НЭЭ, что позволит избежать значительных погрешностей в расчетах режимов, а также улучшить разработанные ранее методы расчетов и средства анализа схем замещения.

На кафедре «Локомотивы» учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта» ведется научно-исследовательская работа, направленная на исследование совместной работы СТЭ и подвижного состава с НЭЭ. Исследования проводятся с учетом оснащения ЭПС асинхронным приводом, так как применение такого вида подвижного состава позволит в значительной степени сократить потребление электроэнергии.

В рамках проводимых исследований была разработана имитационная модель совместной работы СТЭ и подвижного состава с НЭЭ, отличительной особенностью, которой является возможность анализа режимов работы ЭПС (тяги и торможения) от НЭЭ и одновременного проведения тяговых и электрических расчётов.

Разработанная имитационная модель состоит из следующих блоков: реализации графика движения подвижного состава, выполнения тяговых расчетов, определения поездной ситуации, формирования математической модели СТЭ, формирования математической модели НЭЭ, расчета токораспределения в системе тягового электроснабжения.

*Блок формирования графика движения подвижного состава.* Предоставляется возможным использованием как вероятностного, так и детерминированного графика движения поездов. Для движения подвижного состава метрополитена характерно строгое соблюдение времени отправления и прибытия на станции (интервал попутного следования), однако не всегда предоставляется возможным соблюдение детерминированного графика, и в этом случае интервал попутного следования рассматривается как случайная величина или используется вероятностный график движения ЭПС.

*Блок выполнения тяговых расчетов.* Выполнение тяговых расчетов позволяет определить скорость движения подвижных составов, время хода по участку, а также зависимости скорости движения ЭПС, времени хода и токопотребления от пути.

*Блок определения поездной ситуации.* Формирование мгновенной схемы замещения СТЭ с НЭЭ и определение расположения ЭПС на фидерной зоне, а также их токопотребления в текущий момент времени определяется по результатам графика движения и проведенных тяговых расчетов.

*Блок формирования математической модели СТЭ.* Математическая модель СТЭ представлена в виде математической модели системы внешнего электроснабжения, тяговой подстанции, контактной сети и подвижного состава. Тяговая подстанция системы внешнего электроснабжения пред-

ставлена в виде источника ЭДС, внутреннее сопротивление которого определяется в зависимости от напряжения короткого замыкания, а также расчетного напряжения холостого хода преобразователей тяговой подстанции. Подвижной состава представлен в виде источника тока как в режиме тяги, так и в режиме рекуперации.

*Блок формирования математической модели НЭЭ.* Аккумулирующая установка при формировании мгновенной схемы замещается конденсатором определенной емкости, рассчитанной исходя из количества и параметров ЭПС.

*Блок расчета токораспределения в системе тягового электроснабжения.* Расчет токов и напряжений в элементах СТЭ и НЭЭ производится по схеме замещения одним из существующих методов анализа электрических цепей. В цепях постоянного тока (СТЭ метрополитена и городского электрического транспорта) наиболее удобным способом расчёта для определения токов и напряжений во всех элементах схем замещения является метод контурных токов.

В настоящий момент нами ведется разработка компьютерной программы для реализации описанной структуры имитационной модели совместной работы СТЭ и подвижного состава с НЭЭ. В дальнейшем разработанная имитационная модель может быть рекомендована для определения токовых нагрузок, подбора оборудования и расчета экономии электроэнергии за счет применения в тяговых сетях НЭЭ.

#### Список литературы

- 1 **Шевлюгин, М. В.** Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.09.03 / М. В. Шевлюгин. – М., 2013. – 48 с.
- 2 **Заруцкая, Т. А.** Исследование эффективности применения сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии на тяговой подстанции постоянного тока : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Т. А. Заруцкая. – Ростов н/Д, 2004. – 21 с.
- 3 **Омельяненко, В. И.** Математическая модель режимов обмена энергией между накопителем и тяговым приводом пригородного электроподвижного состава / В. И. Омельяненко, Л. В. Оверьянова // Вісник НТУ «ХПІ». Сер. Транспорт-немашинобудування. – 2013. – № 31 (1004). – С. 101–104.
- 4 Стационарная система аккумуляции энергии рекуперации электроподвижного состава метрополитена на базе емкостных накопителей энергии / Ю. А. Бродский [и др.]. // Электротехника. – 2008. – № 7. – С. 38–41.
- 5 **Черемисин, В. Т.** Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в условиях работы постов секционирования с накопителями электрической энергии / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, А. П. Шатохин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326, № 10. – С. 54–64.

УДК 625.42

## МАТРИЧНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

*О. С. АНАНЬЕВА, В. Н. ПОДОЛЬСКАЯ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Применение матричных методов расчета определяется прежде всего необходимостью совместного рассмотрения сетей тягового электроснабжения и электрического подвижного состава, что связано с решением задачи большой размерности. В результате полученные данные более точны и могут использоваться для проектирования новых и модернизации существующих железнодорожных участков и линий метрополитенов.

Электрический подвижной состав расходует на нужды тяги до 80 % электроэнергии от общего количества необходимой для предприятия. Одной из главных задач всех транспортных предприятий на сегодняшний день является экономия электроэнергии. Поэтому выбор рациональных схем и режимов работы тягового электроснабжения по-прежнему остается актуальной задачей.

Наиболее удобным способом формализации и расчетов электрических цепей является, как известно, использование матричных методов анализа. Эти методы широко известны и применяются для формализации электрических схем тягового электроснабжения (СТЭ) железных дорог, метрополитенов и городского электрического транспорта, а также для расчета токов и напряжений в их элементах. В основе разработанного расчета лежит обобщенный алгоритм Гаусса. При этом алго-