

## К ВОПРОСУ О СОВМЕСТНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ СИСТЕМ ТЯГОВОГО И ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

*Д. А. БОСЫЙ, Д. Р. ЗЕМСКИЙ*

*Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта  
им. акад. В. Лазаряна, Украина*

Проектная и научно-исследовательская деятельность, касающаяся систем тягового электро-снабжения, в отличие от систем питания со стационарной нагрузкой, усложняется учетом передвижения поездов согласно принятому графику движения по электрифицированным железнодорожным линиям. Кроме того, использование рельсовой сети в качестве обратного провода и определенное конечное переходное сопротивление системы рельс-земля вынуждает в особых случаях учитывать токи утечки с рельса в землю. В системах тяги на переменном токе, где имеет место электромагнитная связь между элементами тяговой сети и смежными линиями электропередач, определение тока в рельсовой цепи вдоль перегона, распределение которого зависит от расположения поездов на участке, расстояния до подстанции и электрических параметров схемы замещения системы рельс-земля, представляет большой научно-практический интерес, так как это приведет к повышению точности расчетов потери напряжения в тяговой сети и в системе нетягового электро-снабжения. Кроме того, распространенная система питания нетяговых потребителей на дорогах переменного тока (система «два провода – рельс») использует рельсовую цепь в качестве третьей фазы, что должно быть учтено при исследовании проблем электромагнитной совместимости системы электрической тяги, СЦБ и линий электро-снабжения прочих потребителей, которые питаются от тяговой сети (обмотки трансформатора). На энергетические показатели и качество электрической энергии в тяговой сети также имеет влияние конфигурация, параметры, схема питания системы внешнего электро-снабжения, параметры элементов системы тягового электро-снабжения и электроподвижного состава, режимы работы последнего.

Из вышесказанного возможно резюмировать, что моделирование электроэнергетических процессов в системе тягового электро-снабжения – задача сложная и требует комплексного подхода для учета многих влияющих факторов. Полнота построенной математической модели позволяет избежать погрешностей в расчетах и приводит к улучшению методов анализа, способствует повышению энергетической эффективности и безопасности движения. Поэтому поднятый вопрос актуален для специалистов в области электро-снабжения и связи на железнодорожном транспорте.

Для решения описанных задач на сегодняшний день уже существуют программы, которые позволяют выполнять расчеты тяговой сети с учетом графика движения и определять интересующие электрические величины. Наибольший вклад на сегодняшний день сделан коллективом авторов, среди которых Закарюкин В. П. и Кюков А. В. Основываясь на результатах их работы, разработан программный комплекс «Fazonord-качество» предназначенный для расчетов режимов и нагрузочной способности системы тягового электро-снабжения в фазных координатах [1–3]. Известна специализированная программа OpenPowerNet немецкого института железнодорожных технологий, которая, однако, не разрабатывалась для учёта совместной работы системы тягового электро-снабжения с системой электро-снабжения нетяговых потребителей, в отличие от «Fazonord-качество». В основе расчета в программах, приведенных в качестве примера, использован символьный метод представления синусоидальных электрических величин.

Новый подход, который существенно упрощает процесс построения оптимизационных моделей, был предложен в Днепропетровском национальном университете железнодорожного транспорта. Его суть заключается в определении сопротивления тяговой сети как функции в зависимости от расположения поезда на участке, схемы питания и секционирования тяговой сети. Суммарный ток от нескольких нагрузок на межподстанционной зоне определяется по принципу суперпозиции. Такой подход Почаевца Э. С. получил дальнейшее развитие в современных работах [4], где он использовался для моделирования процессов в системе тягового электро-снабжения постоянного тока.

Данные методы и вычислительные комплексы хорошо зарекомендовали себя при решении большинства научных и прикладных задач, однако более глубокий анализ протекания электромаг-

нитных процессов требует решения дифференциальных систем уравнений, что позволит также рассчитывать и переходные процессы, определять гармонические искажения, идентифицировать неизвестные параметры.

При составлении исходной системы уравнений удобно применить теорию графов и матриц. При этом полученную систему уравнений можно записать в матричной форме

$$\begin{pmatrix} M \\ NL \end{pmatrix} \frac{d\vec{i}}{dt} = \begin{pmatrix} \frac{d\vec{j}}{dt} \\ N(\vec{e} - R\vec{i}) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $M$  – первая матрица соединений;  $N$  – вторая матрица соединений;  $L$  – матрица коэффициентов само- и взаимной индуктивности;  $R$  – матрица активных сопротивлений;  $\vec{i}$  – вектор неизвестных токов;  $\vec{e}$  – вектор источников напряжения;  $\vec{j}$  – вектор источников тока.

Для численного решения системы дифференциальных уравнений необходимо окончательно систему уравнений записать в форме Коши

$$\frac{d\vec{i}}{dt} = \begin{pmatrix} M \\ NL \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \frac{d\vec{j}}{dt} \\ N(\vec{e} - R\vec{i}) \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Далее при заданных начальных условиях производится расчет искомых значений функций токов численным методом.

В докладе рассматриваются вопросы моделирования совместной работы систем тягового, внешнего и нетягового электроснабжения железных дорог переменного тока, идентификация параметров тяговой сети и трансформатора подстанции, а также полученные при моделировании коэффициенты несимметрии напряжений по обратной последовательности и искажения синусоидальности напряжения с измеренными во время эксперимента на объекте показателями качества электроэнергии.

#### Список литературы

- 1 **Закарюкин, В. П.** Мультифункциональный подход к моделированию электроэнергетических систем / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков // Системный анализ и прикладная информатика. – 2013. – № 4 (40). – С. 100–107.
- 2 **Закарюкин, В. П.** Качество электроэнергии в линиях электропередачи «два провода – рельс» / В. П. Закарюкин // Электрификация транспорта. – 2014. – № 7. – С. 84–91.
- 3 **Закарюкин, В. П.** Параметрическая идентификация силовых трансформаторов / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, М. С. Шульгин // Вестник ИрГТУ. – 2011. – № 12 (59). – С. 219–227.
- 4 Энергетика тяговых сетей: монография / В. Г. Сиченко, В. Г. Кузнецов, Д. О. Босий, О. І. Саблін ; за заг. ред. д-ра техн. наук, проф. В. Г. Сиченка ; М-во освіти і науки України, ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро : ПФ «Стандарт-Сервіс», 2017. – 210 с.

УДК 621.331

### ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НАКОПИТЕЛЕЙ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

*Д. А. БОСЫЙ, О. И. САБЛИН*

*Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта  
им. акад. В. Лазаряна, Украина*

Наличие в режимах электропотребления электрического транспорта периодических колебаний, которые вызваны инерционностью его работы, обуславливает необходимость исследований о применении накопителей энергии, которые позволяют демпфировать колебания тяговой нагрузки, повышать эффективность использования энергии рекуперации, снижать потери электроэнергии и установленную мощность систем тягового электроснабжения. Временное сохранение энергии в