

УДК 621.331.3

Д. А. БОСЫЙ, кандидат технических наук, доцент, Е. Н. КОСАРЕВ, аспирант, Днепрпетровский национальный университет железнодорожного транспорта

## ОСОБЕННОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ РАСЧЕТОВ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Рассмотрены особенности расчета мгновенных схем при работе ряда тяговых подстанций постоянного тока на общую нагрузку. Для автоматизации расчетов расширено определение функции токораспределения, получены нелинейные зависимости, которые наиболее целесообразно использовать в современных средствах моделирования систем тягового электроснабжения. Особенности расчетов двухпутных участков предложено учитывать с использованием общей формулы нахождения сопротивления относительно тяговой нагрузки.

**Введение.** Система тягового электроснабжения электрифицированных участков железных дорог является сложной системой, в которой процесс электроснабжения тяговой нагрузки протекает под влиянием большого количества факторов детерминированного и стохастического характера.

В системе тягового электроснабжения для оценки пропускной способности и планирования мероприятий по усилению существующих технических средств определяющими факторами являются тип поезда, его вес, количество поездов на фидерной зоне и схема их пропуска, межпоездной интервал. На участках обращения скоростных поездов и поездов повышенной массы система тягового электроснабжения должна обладать соответствующей нагрузочной способностью. При пропуске таких поездов существенно возрастает токовая нагрузка в системе и, следовательно, более интенсивно происходит нагрев оборудования, снижается уровень напряжения в контактной сети, увеличиваются потери электроэнергии и усложняются условия работы устройств защиты.

В системе тягового электроснабжения постоянного тока по техническим условиям питания и секционирования выходит, что все тяговые подстанции электрифицированного участка работают на одну сеть. На практике методика электрических расчетов ограничивается одной межподстанционной зоной, что вызывает определенные неточности.

**Целью работы** является развитие методов расчета мгновенных схем, пригодных для последующего внедрения в современные имитационные средства моделирования систем тягового электроснабжения.

**Анализ публикаций.** До появления пакета программ NORD для тяговых и электрических расчетов в сфере проектирования и эксплуатации систем тягового электроснабжения существовавшие методики расчетов системы тягового электроснабжения не учитывали всех факторов и специфику конкретных участков железных дорог. Кроме этого, широкое распространение получили специализированные разработки средств моделирования систем тягового электроснабжения: Fazonord, Flow3, Fazonord-Расчеты, Fazonord-Качество (А. В. Крюков, В. П. Закарюкин), Иркутского государственного университета путей сообщения [1]; КОРТЭС (В. Е. Марский), Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ) [2]. Подобные разработки проводились также и Днепрпетровским национальным университетом железнодорожного транспор-

та, в частности PrEns (Я. Е. Савич) с последующим развитием в работах [3–5]; Матрикс (Р. С. Мыцко) [6] с последующим развитием в систему Поток (К. О. Калашников) [7].

В настоящее время в ДНУЖТ разработана программа iSET для расчетов систем тягового электроснабжения с применением принципов интеллектуального управления [8]. В основу моделирования положено пространственно-временное представление процесса электропотребления с использованием аналитических функций сопротивления, использование которых описано в [9] применительно к решению задачи регулирования напряжения в контактной сети.

**Методика расчета.** Для быстрого расчета мгновенных схем применим метод функций токораспределения, заключающийся в нахождении значений функции распределения токов в каждой точке с координатой тяговой сети. Ее значения в свою очередь показывают долю тока электроподвижного состава (ЭПС), которая потребляется фидером контактной сети тяговой подстанции. При нахождении нескольких ЭПС на фидерной зоне возможно использование принципа суперпозиции, поскольку полученные результаты будут использованы в качестве первой итерации для учета элементов со сложными характеристиками. Получение значений функций токораспределения для известных схем питания одной межподстанционной зоны не вызывает трудностей.

Рассмотрим методику определения функций токораспределения для нескольких межподстанционных зон однопутного участка. Расчет в общем виде проводится для электрифицированного участка, где  $L$  – длина каждой межподстанционной зоны составляет с количеством подстанций  $N$  (рисунок 1). При этом местоположение нагрузки учитывается переменной  $x$ .

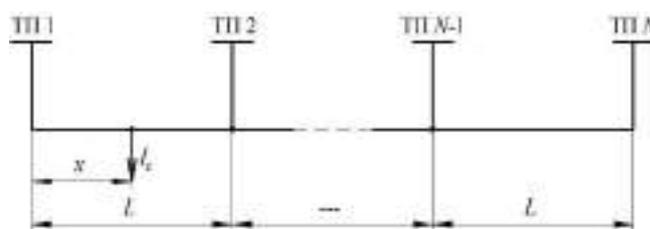


Рисунок 1 – Расчетная схема однопутного участка

Данная методика предполагает построение схемы замещения с учетом сопротивлений основных звеньев (рисунок 2).

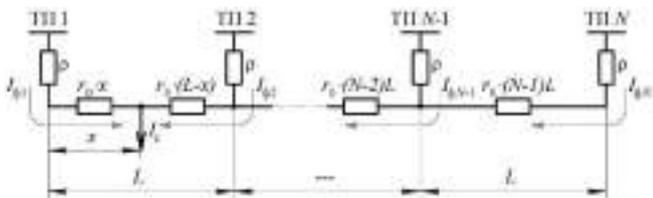


Рисунок 2 – Схема замещения расчетного однопутного участка

Токи фидеров подстанций относительно координаты местонахождения нагрузки  $x$  можно определить отношением падения напряжения на общем сопротивлении системы к сопротивлению участка, который проходит ток фидера каждой подстанции:

$$I_{\phi i} = \frac{\Delta U}{R_{\phi i}}, \quad (1)$$

где  $\Delta U$  – потери напряжения на общем сопротивлении системы, В;  $R_{\phi i}$  – сопротивление ветви эквивалентной схемы замещения (рисунок 3), Ом.

В общем виде

$$R_{\phi i} = \rho + r_0 x,$$

где  $\rho$  – эквивалентное внутреннее сопротивление тяговой подстанции, Ом;  $r_0$  – удельное сопротивление тяговой сети, Ом/км.

Применительно к принятой схеме замещения расчетного участка сопротивления каждой ветви могут быть выражены универсальной формулой

$$R_{\phi i} x = \begin{cases} \rho + r_0 (i-1)L - x, & 0 \leq x \leq (i-1)L; \\ \rho + r_0 x - (i-1)L, & (i-1)L \leq x \leq (N-1)L. \end{cases}$$

В формуле (1) падение напряжения

$$\Delta U = I_e R_{\Sigma}, \quad (2)$$

где  $I_e$  – ток, потребляемый электровозом, А;  $R_{\Sigma}$  – суммарное сопротивление эквивалентной схемы замещения (общее сопротивление системы) (рисунок 3), Ом.

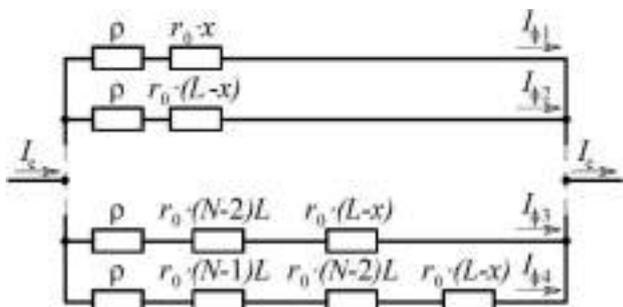


Рисунок 3 – Эквивалентная схема замещения

Суммарное сопротивление схемы рассчитывается по формуле параллельного соединения сопротивлений

$$\frac{1}{R_{\Sigma}} = \frac{1}{R_{\phi 1}} + \frac{1}{R_{\phi 2}} + \dots + \frac{1}{R_{\phi(N-1)}} + \frac{1}{R_{\phi N}}, \quad (3)$$

где  $R_{\phi 1} \dots R_{\phi N}$  – суммарное сопротивление каждой ветви схемы, Ом.

Функция токораспределения, как известно, определяется в виде отношения тока фидера к току нагрузки. Подставив вместо тока фидера выражение (1) и заменив  $\Delta U$  выражением (2), получим

$$\varphi_i = \frac{I_{\phi i}}{I_e}; \quad \varphi_i = \frac{R_{\phi i}}{I_e}; \quad \varphi_i = \frac{I_e R_{\Sigma}}{R_i}. \quad (4)$$

После подстановки выражения (3) вместо  $R_{\Sigma}$  и сокращений получим искомое выражение для функций токораспределения каждого фидера

$$\varphi_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^N \frac{R_j}{R_i}}, \quad \text{или} \quad \varphi_i = \frac{1}{R_i \sum_{j=1}^N \frac{1}{R_j}}. \quad (5)$$

В качестве примера расчетов по данной методике на рисунках 4–9 показаны: функция токораспределения, токи фидеров тяговых подстанций, напряжение на токоприемнике ЭПС и потери мощности в тяговой сети для участка с пятью тяговыми подстанциями.

Принято, что все тяговые подстанции являются однотипными, имеют одинаковое внутреннее сопротивление и одинаковый уровень напряжения на шинах. Кроме того, тип контактной сети по всей длине участка и расстояния между смежными тяговыми подстанциями также принимаются одинаковыми. Принятые допущения не являются догматичными и использованы с целью обеспечения наглядности полученных результатов.

Расчеты выполнены для двух вариантов: когда электротяговая нагрузка определяется значением тока и для случая стабилизации электроподвижным составом потребляемой мощности. Для второго варианта использована методика [10], которая заключается в пересчете тока электровоза

$$I_e = \frac{U_{\text{ш}} - \sqrt{U_{\text{ш}}^2 - 4f(x)P}}{2f(x)}, \quad (6)$$

где  $U_{\text{ш}}$  – напряжение на шинах тяговой подстанции, В;  $P$  – мощность, реализуемая электроподвижным составом, Вт;  $f(x)$  – функция сопротивления тяговой сети, Ом, которая для случая ряда тяговых подстанций определяется как результирующее сопротивление всех ветвей для данной координаты  $x$ ,

$$f(x) = 1 / \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_{\phi i} x}$$

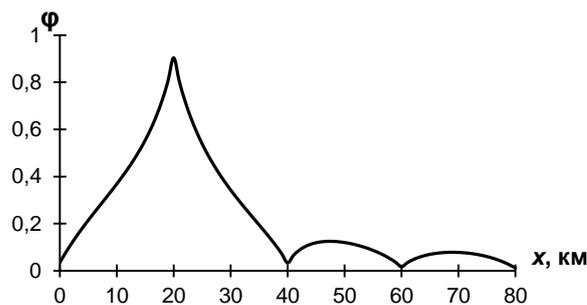


Рисунок 4 – Функция токораспределения фидера второй тяговой подстанции

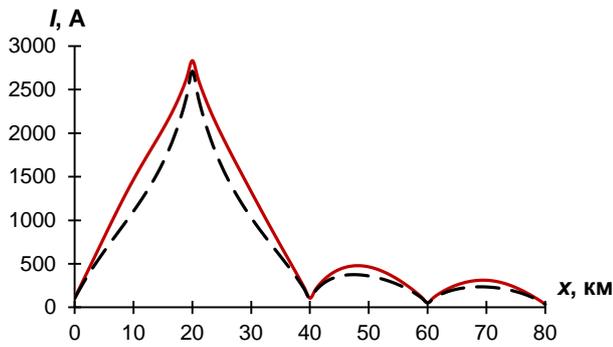


Рисунок 5 – Ток фидера второй тяговой подстанции при стабилизации мощности ЭПС (сплошная) и без нее (пунктирная)

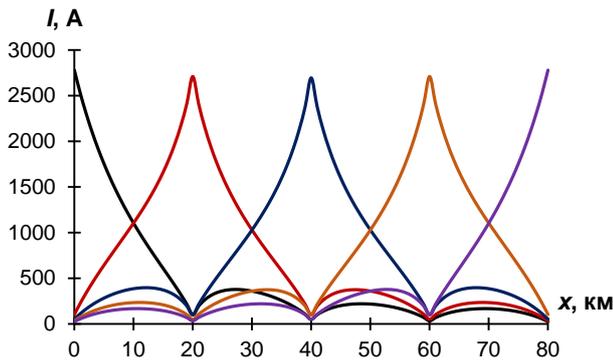


Рисунок 6 – Токи фидеров всех тяговых подстанций без стабилизации мощности ЭПС

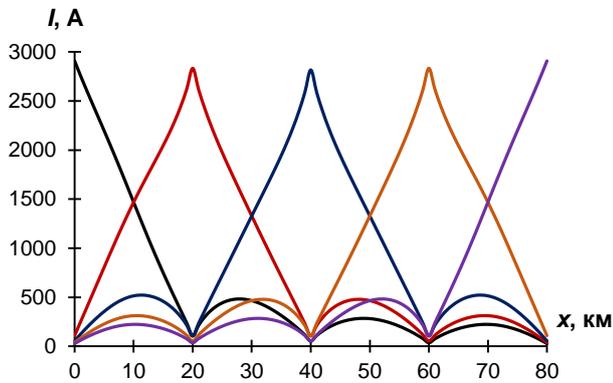


Рисунок 7 – Токи фидеров всех тяговых подстанций при стабилизации мощности ЭПС

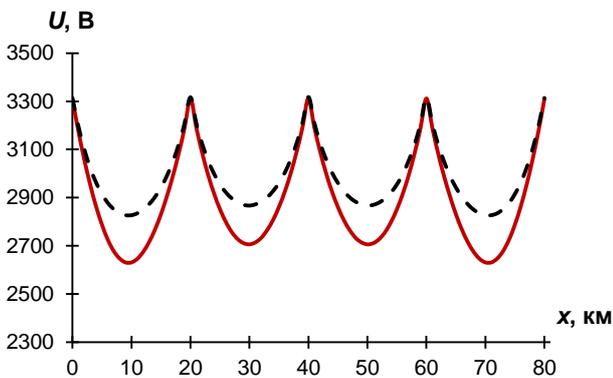


Рисунок 8 – Напряжение на токоприемнике ЭПС при стабилизации мощности (сплошная) и без нее (пунктирная)

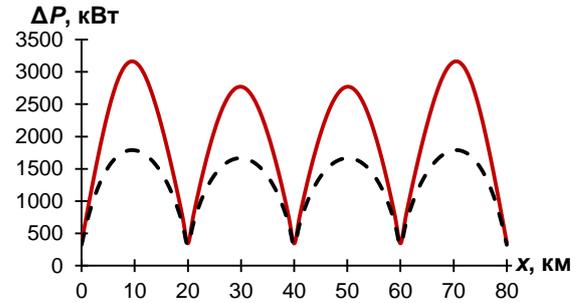


Рисунок 9 – Потери мощности в тяговой сети при стабилизации мощности (сплошная) и без нее (пунктирная)

В случае двухпутного участка расчет будет усложняться необходимостью учета схемы раздельного, узлового, параллельного, а в некоторых случаях – неполного параллельного питания. Обобщенная схема замещения (рисунок 10) для определения функции сопротивления учитывает местоположение электровоза относительно узлов параллельного соединения контактных подвесок.

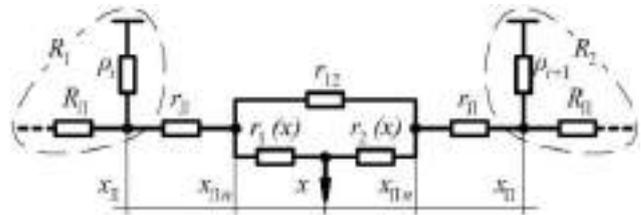


Рисунок 10 – Обобщенная схема замещения двухпутного участка тяговой сети

При этом следует отметить, что учету подлежат узлы только левее и правее от нагрузки, остальные не имеют влияния для данной координаты местоположения. Сворачивание схемы выполняется через преобразование «треугольник – звезда», таким образом, что функция сопротивления

$$f_x = \frac{r_1(x)r_2(x)}{r_1(x) + r_2(x) + r_{12}} + \quad (7)$$

$$+ 1 / \frac{1}{\frac{r_1(x)r_{12}}{r_1(x) + r_2(x) + r_{12}} + R_1 + r_{\pi}} + \frac{1}{\frac{r_2(x)r_{12}}{r_1(x) + r_2(x) + r_{12}} + R_2 + r_{\pi}},$$

где  $R_1, R_2$  – сопротивления слева и справа от рассматриваемых тяговых подстанций с учетом их внутреннего сопротивления;  $r_1(x), r_2(x)$  – сопротивления тяговой сети одного пути до ближайшего узла слева и справа от нагрузки;  $r_{12}$  – то же, между ближайшими узлами;  $r_{\pi}, r_{\pi}$  – сопротивления тяговой сети двух путей, между ближайшими узлами и соответствующими тяговыми подстанциями слева и справа.

Кроме расчета функции сопротивления (7) при наличии на участке нескольких тяговых подстанций необходимо учесть возможность протекания уравнительных токов.

Для этого методом суперпозиции рассчитывается токораспределение в общей схеме при наличии только одной ЭДС от каждой из тяговых подстанций. Затем результаты расчетов накладываются и находится результирующее токораспределение, которое определяет закон изменения напряжения холостого хода вдоль участка. Этот метод применим для случая инверторных тяговых подстанций. В случае неуправляемых преобразователей

необходимо учитывать случаи их запитания другими подстанциями с большим значением ЭДС.

Полученное таким образом распределение напряжения холостого хода вдоль участка может быть использовано в формуле (6) вместо  $U_{ш}$ , но с учетом его изменения относительно координаты.

Для рассматриваемого двухпутного участка, состоящего из четырех межподстанционных зон с разными схемами питания (рисунок 11), получим функцию сопротивления и остальные характеристики электрического расчета (рисунки 12–14).

При учете фактического внутреннего сопротивления тяговых подстанций (порядка 0,1 Ом) функция сопротивления  $f(x)$  принимает значения в точках их подключения до 30 % менее, чем учитывается параллельная работа каждой подстанции на общую нагрузку.

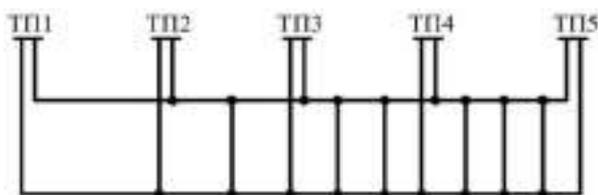


Рисунок 11 – Расчетная схема двухпутного участка

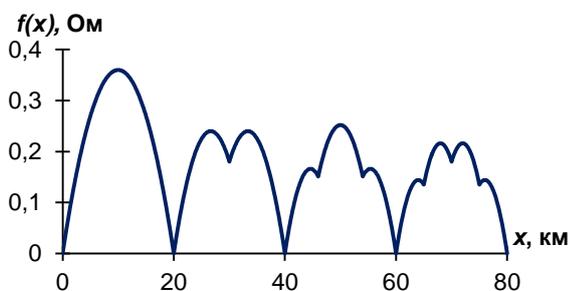


Рисунок 12 – Функция сопротивления участка

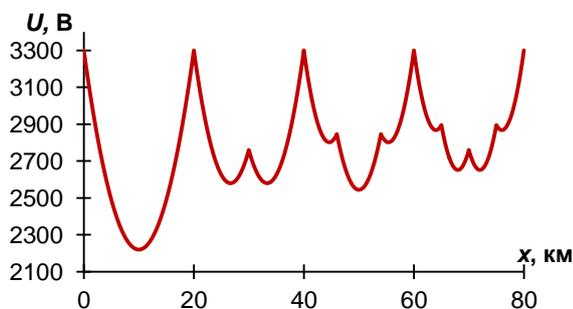


Рисунок 13 – Напряжение на токоприемнике ЭПС

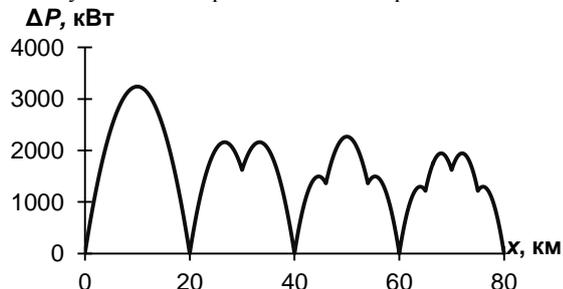


Рисунок 14 – Потери мощности в тяговой сети

Получено 12.12.2016

**D. A. Bosiy, E. N. Kosarev.** Features of the automated calculations the DC traction power supply systems.

The article describes the features of calculating the instantaneous schemes in the case of working a row of DC traction substations on a common load. It extends the concept of current distribution functions to calculate the nonlinear dependence that is most advisable to use in modern traction simulation systems. The features of the calculations the double-track sections suggested to consider using a general formula of finding resistance regarding the traction load.

**Выводы.** Проведенные расчеты показали, что количество тяговых подстанций на участке, которые принимаются в расчетную схему, влияет на уровень напряжения на токоприемнике ЭПС, токи фидеров подстанций и потери мощности в тяговой сети, т. е. на все характеристики электрического расчета.

Токи фидеров тяговых подстанций описываются нелинейными зависимостями, которые могут быть получены с помощью приведенных аналитических выражений. Характер нелинейности также зависит и от наличия систем стабилизации тяговой мощности на ЭПС.

Полученные результаты пригодны для последующего внедрения в современные имитационные средства моделирования, поскольку имеют возможность аналитической формализации, что, в свою очередь, сказывается на объемах и скорости выполнения расчетов.

#### Список литературы

- 1 **Крюков, А. В.** Компьютерные технологии для моделирования систем электроснабжения железных дорог переменного тока / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – № 3 (28). – С. 61–65.
- 2 **Герман, Л. А.** Сравнение методов расчета системы тягового электроснабжения при разных способах учета параметров внешней сети / Л. А. Герман, К. В. Кишкурно // Вестник ВНИИЖТ. – 2013. – № 1. – С. 16–21.
- 3 **Бобирь, Д. В.** Удосконалення режимів ведення вантажного поїзда з електричною тягою : авт. дис. ... канд. техн. наук / Д. В. Бобирь. – Д. : ДНУЗТ, 2007. – 22 с.
- 4 **Іванов, О. П.** Удосконалення режимів тяги поїздів з вартісними показниками при змінних тарифах на електроенергію: авт. дис. ... канд. техн. наук / О. П. Іванов. – Д. : ДНУЗТ, 2013. – 24 с.
- 5 **Кузнецов, В. Г.** Розвиток теоретичних основ енергозбереження в системах електропостачання тяги поїздів постійного струму : авт. дис. ... д-ра техн. наук / В. Г. Кузнецов. – Д. : ДНУЗТ, 2012. – 38 с.
- 6 **Кузнецов, В. Г.** Оценка потерь электроэнергии в тяговой сети магистральных железных дорог / В. Г. Кузнецов, Р. С. Мыцко, Д. А. Босий // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2006. – Вип. 12. – С. 36–40.
- 7 **Калашников, К. О.** Зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі постійного струму шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень : авт. дис. ... канд. техн. наук / К. О. Калашников. – Д. : ДНУЗТ, 2014. – 20 с.
- 8 Комп'ютерна програма «Інтелектуальна система електропостачання транспорту» (Intelligence System of Electrified Transport) : свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 60711 / Д. О. Босий, Є. М. Косарев; Україна / Зареєстровано 20.07.2015. – К. : ДСІВУ, 2015.
- 9 **Косарев, Є. М.** Регулювання напруги в контактній мережі електрифікованих залізниць постійного струму / Є. М. Косарев // Електрифікація транспорту. – 2015. – № 9. – С. 37–43.
- 10 **Босий, Д. О.** Методика розрахунку миттєвих схем системи тягового електропостачання для споживання постійної потужності / Д. О. Босий // Електрифікація транспорту. – 2014. – № 8. – С. 15.