

---

## ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

УДК 621.331

### Экспериментальное определение внешних характеристик тяговых подстанций переменного тока для выбора параметров активных устройств системы тягового электроснабжения

**А. А. Комяков, В. А. Тарасевич**

Омский государственный университет путей сообщения, Россия, 644046, Омск, пр. Маркса, 35

**Для цитирования:** Комяков А. А., Тарасевич В. А. Экспериментальное определение внешних характеристик тяговых подстанций переменного тока для выбора параметров активных устройств системы тягового электроснабжения // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 2. С. 5–17. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-02-5-17

#### Аннотация

**Цель:** разработать методику экспериментального определения внешних характеристик тяговых подстанций переменного тока для выбора параметров активных устройств системы тягового электроснабжения.

**Методы:** нахождение эквивалентных токов фаз понижающего трансформатора с применением теории линейных электрических цепей; статистические методы, в том числе построение и аппроксимация внешних характеристик методов регрессионного анализа, построение теоретического и экспериментального закона распределения эквивалентного тока тяговой нагрузки и определение квантиля тока для заданной доверительной вероятности.

**Результаты:** показаны преимущества и недостатки методов имитационного моделирования системы тягового электроснабжения применительно к определению параметров активных устройств, приведены возможности экспериментального метода. Приведено подробное описание проведенного эксперимента, показаны схемы подключения измерительных приборов и векторные диаграммы токов и напряжений. Изложены основные этапы предлагаемой методологии выбора параметров бустерного трансформатора. Представлены расчетные формулы для определения эквивалентных токов фаз, построена внешняя характеристика для выбранной тяговой подстанции. Построены теоретический и экспериментальный закон распределения эквивалентного тока тяговой нагрузки и определены квантили эквивалентного тока, который составил 400 А при доверительной вероятности 0,968. Определено максимальное необходимое значение вольтодобавки для выбранной тяговой подстанции и закон регулирования напряжения вольтодобавки для бустерного трансформатора.

**Практическая значимость:** предлагаемая методология выбора параметров активных устройств системы тягового электроснабжения, основанная на экспериментальном определении внешних характеристик тяговых подстанций, позволит более точно определять энергетические показатели бустерных трансформаторов. Предполагается совершенствование методики за счет обработки результатов синхронных измерений токов и напряжений на соседних тяговых подстанциях, питающих межподстанционную зону. Это позволит расширить возможности применения активных устройств системы тягового электроснабжения и усовершенствовать алгоритмы работы бустерного трансформатора, в том числе с учетом работы управляемых устройств компенсации реактивной мощности.

**Ключевые слова:** система тягового электроснабжения, тяговая подстанция, внешняя характеристика, железнодорожный транспорт, энергоэффективность.

## Введение

Система тягового электроснабжения переменного тока имеет ряд специфических особенностей по сравнению с промышленными нагрузками соизмеримой мощности. Во-первых, система тягового электроснабжения является протяженным потребителем электроэнергии, что не позволяет запитать все тяговые подстанции от одного центра питания. Вследствие этого десятки тяговых подстанций системы тягового электроснабжения подключаются к нескольким пунктам питания энергосистемы, имеющим различные по модулю и фазе напряжения в узлах подключения тяговых подстанций. А часть тяговых подстанций вообще подключается к пунктам питания разных энергосистем, которые различаются по уровню напряжения (110 и 220 кВ), что часто приводит к значительным отличиям уровня напряжения на шинах 27,5 кВ смежных тяговых подстанций. Во-вторых, система тягового электроснабжения является нелинейным несимметричным потребителем электроэнергии с резкопеременной нагрузкой, что приводит к существенным колебаниям уровня напряжения в контактной сети [1].

Указанные особенности могут приводить к значительному увеличению потерь электроэнергии на тягу поездов по сравнению с нормативными расчетными значениями [2] и, как следствие, к увеличению себестоимости перевозочного процесса. Поэтому разработка активных устройств для регулирования уровня напряжения в контактной сети является актуальной для железнодорожного транспорта задач.

В настоящее время из числа активных устройств в системе тягового электроснабжения переменного тока широкое применение нашли лишь управляемые устройства компенсации реактивной мощности. Исследованию этих устройств посвящены работы [3–5]. Проводятся исследования по внедрению накопителей электроэнергии [6–9], которые также используются для управления режимами работы системы тягового электроснабжения. К активным устройствам системы тягового электроснабжения могут быть отнесены также управляемые бустерные трансформаторы [10].

Выбор параметров активных устройств системы тягового электроснабжения является достаточно сложной задачей, что связано в первую очередь с резко переменным характером тяговой нагрузки, наличием нетяговых потребителей, особенностями режимов работы системы внешнего электроснабжения и иными факторами. Наиболее часто для решения указанной задачи применяются методы имитационного моделирования системы тягового электроснабжения с применением программных комплексов «КОРТЭС», Matlab, SimInTech, Fazonord [11–14] и др. Однако имитационные модели всегда в той или иной мере упрощены в сравнении с реальным объектом. Например, принимаемые в расчетах номинальные параметры понижающих трансформаторов тяговых подстанций, сопротивления питающих линий, мощности короткого замыкания системы внешнего электроснабжения



Клеммы  $U_a$  и  $U_b$  первого анализатора качества электроэнергии подключены к выходу измерительного трансформатора напряжения фазы  $A$ , а токоизмерительные клещи — к выходам измерительных трансформаторов тока питающих линий контактной сети  $\Phi 1$  и  $\Phi 2$ . Аналогичным образом к трансформатору напряжения фазы  $B$  и питающим линиям  $\Phi 4$ ,  $\Phi 5$  подключен второй анализатор качества электроэнергии. Внешний вид подключенных измерительных приборов приведен на рис. 2.

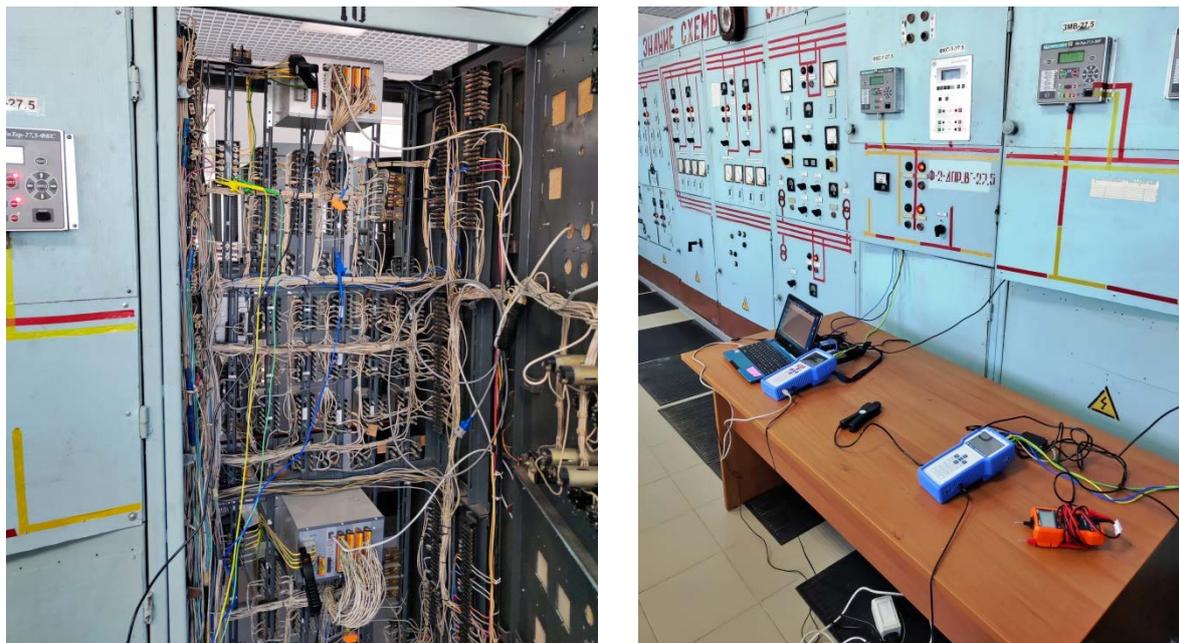


Рис. 2. Внешний вид подключенных измерительных приборов

В соответствии с векторной диаграммой тяговой подстанции I типа (рис. 3) отстающей является фаза  $A$  понижающего трансформатора, а опережающей — фаза  $C$ . Предположим, что для регулирования уровня напряжения в контактной сети питающих линий  $\Phi 1$ ,  $\Phi 2$  планируется установка управляемого бустерного трансформатора, который обеспечивает напряжение вольтодобавки  $\dot{U}_{вд}$  (рис. 4). Управление уровнем напряжения бустерного трансформатора осуществляется ШИМ-регулятором за счет изменения амплитуды задающей синусоиды. При этом примем допущение, что напряжение вольтодобавки будет отличаться от напряжения фазы  $A$  только по амплитуде, но не по фазе.

Предлагаемая методология выбора параметров бустерного трансформатора включает в себя несколько этапов.

На *первом этапе* осуществляется нахождение эквивалентных токов опережающей и отстающей фазы по методике, предложенной профессором С. П. Власовым [15].

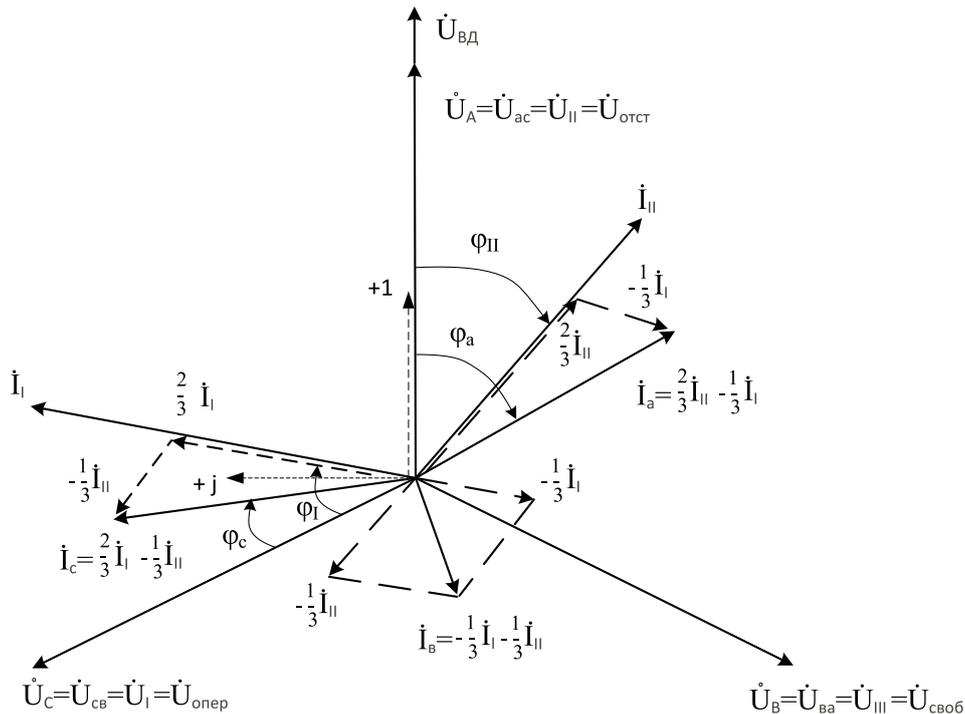


Рис. 3. Векторная диаграмма тяговой подстанции I типа

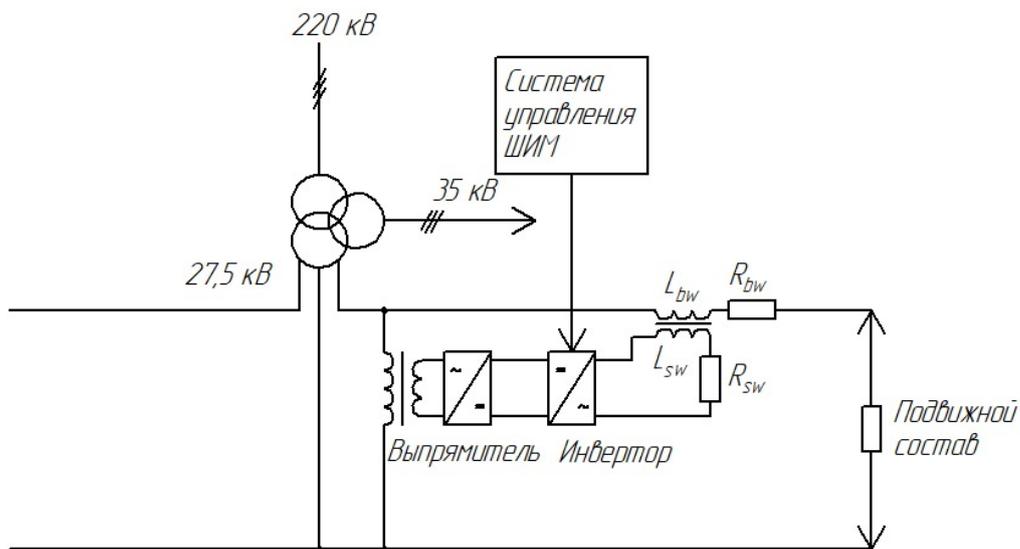


Рис. 4. Схема подключения бустерного трансформатора

Эквивалентный ток опережающей фазы определяется по выражению:

$$I_{эkv.I} = I_{эkv.опер} = \frac{2}{3}I_I \sin \varphi_I + \frac{1}{3}I_{II} \sin(\varphi_{II} - 60^\circ) + \rho \left( \frac{2}{3}I_I \cos \varphi_I + \frac{1}{3}I_{II} \cos(\varphi_{II} - 60^\circ) \right), \quad (1)$$

а для отстающей фазы — по выражению:

$$I_{\text{экв.л}} = I_{\text{экв.опер}} = \frac{2}{3}I_{II} \sin \varphi_{II} + \frac{1}{3}I_I \sin(\varphi_I + 60^\circ) + \rho \left( \frac{2}{3}I_{II} \cos \varphi_{II} + \frac{1}{3}I_I \cos(\varphi_I + 60^\circ) \right). \quad (2)$$

В приведенных выражениях  $I_I, I_{II}$  — суммарные токи соответствующих плеч питания тяговой подстанции;  $\varphi_I, \varphi_{II}$  — углы упомянутых токов относительно напряжений плеч питания;  $\rho$  — отношение входного активного сопротивления тяговой подстанции к реактивному сопротивлению. Учитывая, что в результате экспериментальных измерений согласно схеме на рис. 1 можно получить векторные значения токов питающих линий контактной сети ( $I_{\Phi_1}, I_{\Phi_2}, I_{\Phi_4}, I_{\Phi_5}, \varphi_{\Phi_1}, \varphi_{\Phi_2}, \varphi_{\Phi_4}, \varphi_{\Phi_5}$ ), значения  $I_I, I_{II}, \varphi_I, \varphi_{II}$  определяются по выражениям:

$$\begin{cases} I_I = \sqrt{(I_{\Phi_1} \cos \varphi_{\Phi_1} + I_{\Phi_2} \cos \varphi_{\Phi_2})^2 + (I_{\Phi_1} \sin \varphi_{\Phi_1} + I_{\Phi_2} \sin \varphi_{\Phi_2})^2}, \\ \varphi_I = \arctg \frac{I_{\Phi_1} \sin \varphi_{\Phi_1} + I_{\Phi_2} \sin \varphi_{\Phi_2}}{I_{\Phi_1} \cos \varphi_{\Phi_1} + I_{\Phi_2} \cos \varphi_{\Phi_2}}, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} I_{II} = \sqrt{(I_{\Phi_4} \cos \varphi_{\Phi_4} + I_{\Phi_5} \cos \varphi_{\Phi_5})^2 + (I_{\Phi_4} \sin \varphi_{\Phi_4} + I_{\Phi_5} \sin \varphi_{\Phi_5})^2}, \\ \varphi_{II} = \arctg \frac{I_{\Phi_4} \sin \varphi_{\Phi_4} + I_{\Phi_5} \sin \varphi_{\Phi_5}}{I_{\Phi_4} \cos \varphi_{\Phi_4} + I_{\Phi_5} \cos \varphi_{\Phi_5}}. \end{cases} \quad (4)$$

На *втором этапе* осуществляется построение внешней характеристики требуемой фазы и ее аппроксимация методом линейной регрессии.

На *третьем этапе* осуществляется построение теоретического и экспериментального закона распределения эквивалентного тока тяговой нагрузки и определение квантиля тока для заданной доверительной вероятности.

Результатом *четвертого этапа* является определение максимальной вольтодобавки и закона регулирования напряжения вольтодобавки в зависимости от токов тяговой нагрузки.

## Результаты и обсуждение

По итогам экспериментальных измерений на тяговой подстанции «М» Забайкальской железной дороги, выполненных в соответствии со схемой на рис. 1, сформирована выборка из 6203 векторных значений токов и напряжений питающих линий контактной сети  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_4, \Phi_5$ . Линии  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  питают отстающую фазу,  $\Phi_4$  и  $\Phi_5$  — опережающую фазу. Затем с применением выражений (1) – (4)

определены эквивалентные токи отстающей и опережающей фазы и построены внешние характеристики. Дальнейшие результаты приведены только для отстающей фазы, так как именно для нее планируется применение активного устройства системы тягового электроснабжения — бустерного трансформатора. Для расчетов использовался пакет программ *Statistica*. Внешняя характеристика отстающей фазы тяговой подстанции приведена на рис. 5.

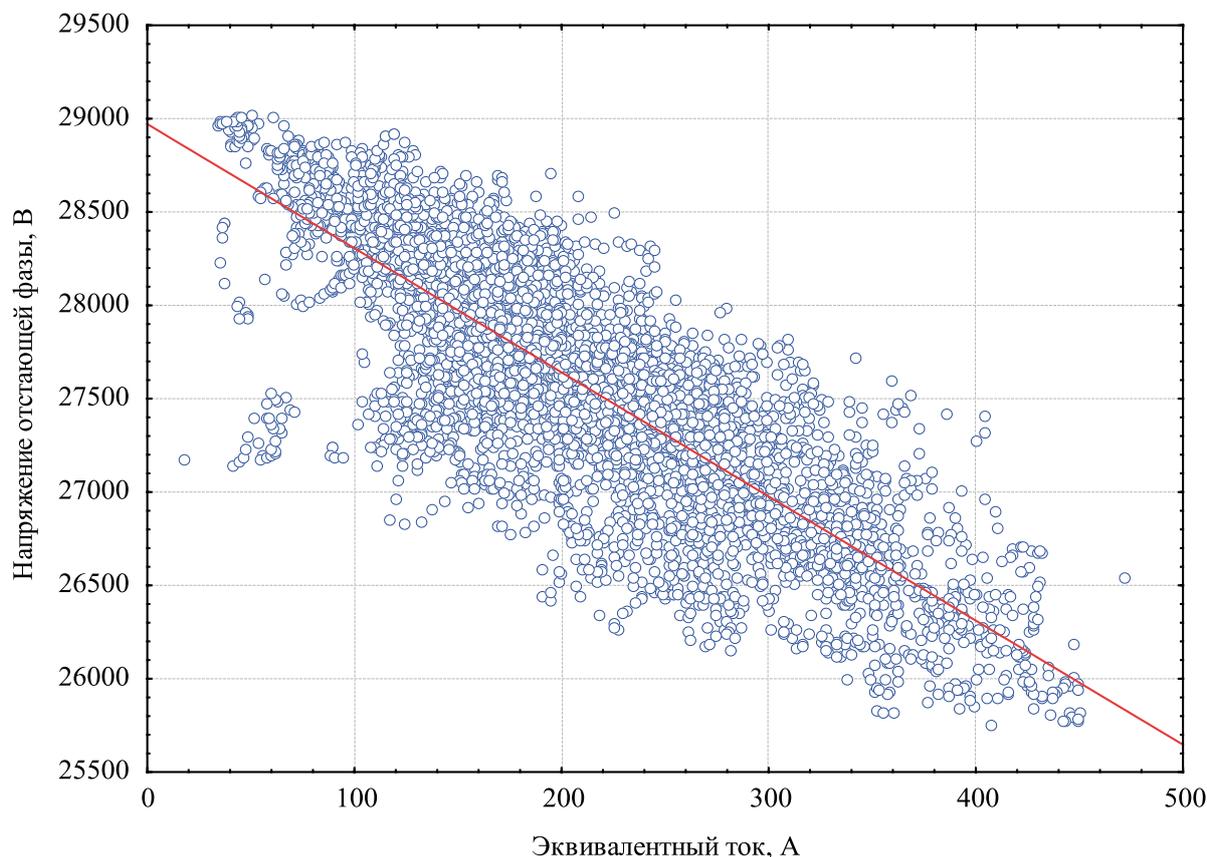


Рис. 5. Внешняя характеристика отстающей фазы тяговой подстанции

Внешняя характеристика может быть аппроксимирована выражением:

$$U_{\text{отст}} = -6,6491 \cdot I_{\text{экв.л}} + 28971. \quad (5)$$

Предыдущие исследования показывают, что закон распределения тока тяговой нагрузки в большинстве случаев не является нормальным [16, 17]. Это справедливо и для эквивалентного тока фаз понижающего трансформатора. Как видно из рис. 6, наиболее подходящим является гамма-распределение. С применением программного комплекса *Statistica* определены доверительные вероятности для квантилей 350, 400 и 450 А для теоретического и экспериментального закона распределения (табл.). Из приведенных результатов видно, что с вероятностью 0,968 (теоретическое значение) и 0,981 (экспериментальное значение) эквивалентный

ток отстающей фазы не превысит 400 А. Следовательно, имеются основания принять квантиль в 400 А для определения максимально необходимой вольтодобавки. Подставив это значение в выражение (5), получим, что  $U_{отст} = 26311$  В.

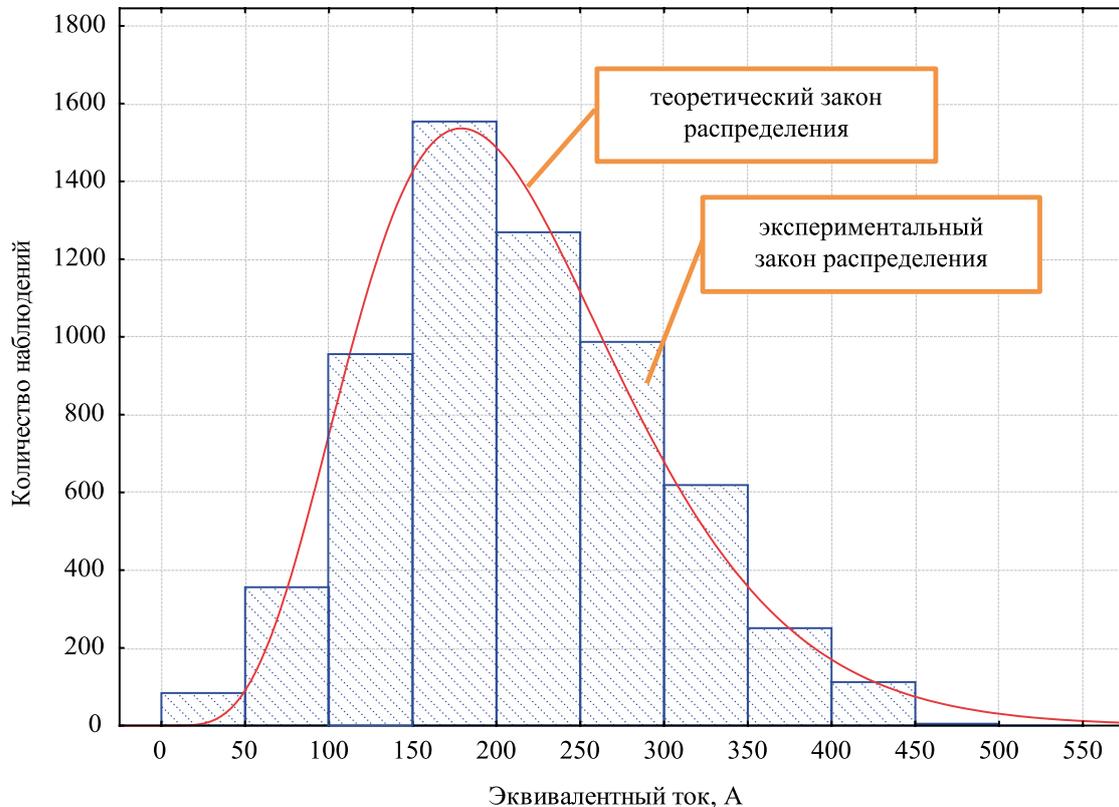


Рис. 6. Закон распределения эквивалентного тока отстающей фазы тяговой подстанции

ТАБЛИЦА. Доверительные вероятности для различных квантилей эквивалентного тока

Квантиль	Доверительная вероятность	
	Экспериментальный закон распределения	Теоретический закон распределения
350 А	0,941	0,927
400 А	0,981	0,968
450 А	0,999	0,987

Если принять, что бустерный трансформатор должен поддерживать максимально возможное напряжение 29 000 В на межподстанционной зоне для обеспечения наилучшей пропускной способности участка, то с теоретической вероятностью 0,968 максимальное напряжение вольтодобавки должно составлять  $U_{ВД} = 2689$  В. Закон регулирования напряжения вольтодобавки от эквивалентного тока тяговой нагрузки будет иметь вид:

$$U_{ВД} = 29 + 6,6491 \cdot I_{\text{экв.П}} \quad (6)$$

## Выводы

В результате исследования разработана методика, позволяющая определять параметры активных устройств системы тягового электроснабжения по данным экспериментальных измерений. Методика включает в себя четыре этапа, в том числе нахождение эквивалентных токов фаз понижающего трансформатора; построение и аппроксимация внешних характеристик каждой фазы; построение теоретического и экспериментального закона распределения эквивалентного тока тяговой нагрузки и определение квантиля тока для заданной доверительной вероятности; определение максимальной вольтодобавки и закона регулирования напряжения вольтодобавки в зависимости от эквивалентного тока тяговой нагрузки. Выполнена апробация предложенной методики на одной из тяговых подстанций Забайкальской железной дороги. Определены параметры и закон регулирования напряжения вольтодобавки бустерного трансформатора для теоретической доверительной вероятности 0,968.

В рамках дальнейших исследований предполагается совершенствование указанной методики за счет обработки результатов синхронных измерений токов и напряжений на соседних тяговых подстанциях, питающих межподстанционную зону. Это позволит расширить возможности применения активных устройств системы тягового электроснабжения и усовершенствовать алгоритмы работы бустерного трансформатора, в том числе с учетом работы управляемых устройств компенсации реактивной мощности.

## Финансирование

Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда № 24-29-00346 по теме «Применение бустерных трансформаторов с тиристорным управлением для повышения пропускной способности и энергоэффективности участков железных дорог переменного тока».

## Библиографический список

1. Герман Л. А. Регулирование напряжения в тяговой сети переменного тока железных дорог / Л. А. Герман, К. В. Кишкурно // *Электричество*. 2014. № 9. С. 23–33. EDN XXSQQN.
2. Cheremisin V.T. Assessment of Train Traction Electric Energy Losses / V.T. Cheremisin, M.M. Nikiforov, S.Y. Ushakov // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018, Vladivostok. P. 8602528. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602528.
3. Кондратьев Ю. В., Тарасенко А. В., Комяков А. А. и др. Расчет параметров устройств продольной компенсации реактивной мощности в тяговой сети переменного тока // *Омский научный вестник*. 2015. № 3 (143). С. 237–239. EDN VCNUPN.
4. Агунов А. В., Карабанов А. А., Терехин И. А. и др. Расчет тепловых потерь в комбинированной фильтрокомпенсирующей установке // *Бюллетень результатов научных исследований*. 2023. № 2. С. 92–103. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-92-103. EDN PJIOVK.

5. Баранов И. А. Моделирование процессов компенсации реактивной мощности в системе тягового электроснабжения с помощью MATLAB-Simulink / И. А. Баранов, А. В. Агунов // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2021. № 2(26). С. 5–12. EDN IRFFJT.
6. Гречишников В. А., Плетнев Д. С., Белов М. Н. и др. Выбор мест установки накопителей энергии на тяговых подстанциях линий метрополитена // Электротехника. 2023. № 9. С. 45–50. DOI: 10.53891/00135860\_2023\_9\_45. EDN TQUIRU.
7. Закарюкин В. П. Применение накопителей энергии в системах тягового электроснабжения железных дорог переменного тока / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, А. В. Черепанов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. № 2(42). С. 158–164. EDN SKDVTN.
8. Блинкова С. А. Эффективность использования альтернативных источников питания на железной дороге // Вестник транспорта Поволжья. 2024. № 1(103). С. 7–12. EDN SLLETJ.
9. Гаранин М. А. Моделирование системы тягового электроснабжения с использованием накопителей энергии / М. А. Гаранин, С. А. Блинкова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2023. № 2(90). С. 85–90. DOI: 10.46973/0201-727X\_2023\_2\_85. EDN TUOYML.
10. Комяков А. А. Совместное применение бустерных трансформаторов и статических компенсаторов реактивной мощности для управления режимами работы системы тягового электроснабжения переменного тока / А. А. Комяков, М. М. Никифоров // Проблемы безопасности и эффективности технических систем: Сборник докладов конференции с международным участием, посвященной 95-летию со дня рождения А. В. Плакса, Санкт-Петербург, 11–12 мая 2023 года. СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2023. С. 67–70. EDN CWABFT.
11. Закарюкин В. П. Параметрическая идентификация систем тягового электроснабжения 2×25 кВ / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, А. А. Кушов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2015. № 2(58). С. 121–129. EDN UCQZKL.
12. Комяков А. А. Разработка алгоритма совместных тяговых и электрических расчетов с учетом характеристик и параметров участков и поездной ситуации / А. А. Комяков, А. С. Вильгельм, А. И. Шкулов // Известия Транссиба. 2021. № 3(47). С. 106–115. EDN NFUWMM.
13. Королев А. А., Плетнев Д. С., Белов М. Н. и др. Анализ программного обеспечения для моделирования электрификации железных дорог // Наукосфера. 2022. № 1–1. С. 175–181. EDN ZHNNYU.
14. Незевак В. Л. Совершенствование методов и алгоритмов расчета энергетических показателей системы тягового электроснабжения с регулируемым устройствами / В. Л. Незевак, А. Д. Дмитриев // Известия Транссиба. 2022. № 3(51). С. 19–34. EDN KBOZNF.
15. Власов С. П. Вольтодобавочный трансформатор в условиях меняющейся тяговой нагрузки // Мир транспорта. 2012. Т. 10, № 1(39). С. 52–57. EDN OWZIPZ.
16. Незевак В. Л. Характеристика тяговой нагрузки для определения параметров накопителя электрической энергии / В. Л. Незевак, А. П. Шатохин // Мир транспорта. 2018. Т. 16, № 2(75). С. 84–94. EDN XSMVTN.

17. Комяков А. А. Применение вероятностного подхода для формирования графика электротяговой нагрузки при имитационном моделировании системы тягового электроснабжения / А. А. Комяков, Т. В. Комякова, А. И. Шкулов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4(92). С. 184–192. DOI: 10.46973/0201-727X\_2023\_4\_184. EDN JLRHET.

Дата поступления: 26.04.2024

Решение о публикации: 21.05.2024

#### **Контактная информация:**

КОМЯКОВ Александр Анатольевич — докт. техн. наук, профессор кафедры «Теоретическая электротехника»; [tskom@mail.ru](mailto:tskom@mail.ru)

ТАРАСЕВИЧ Виктор Александрович — аспирант кафедры «Теоретическая электротехника»; [viktortarasevich5665@gmail.com](mailto:viktortarasevich5665@gmail.com)

## **Experimental determination of external characteristics of AC traction substations for selection of parameters of active devices of traction power supply system**

**A. A. Komiakov, V. A. Tarasevich**

Omsk State University of Railway Engineering, 35, Marx Ave, Omsk, 644046, Russia

**For citation:** *Komiakov A. A., Tarasevich V. A. Experimental determination of external characteristics of AC traction substations for selection of parameters of active devices of traction power supply system // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 2. P. 5–17. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-02-5-17*

#### **Abstract**

**Objective:** to develop a method of experimental determination of external characteristics of alternating current traction substations for selection of parameters of active devices of traction power supply system.

**Methods:** finding of equivalent currents of phases of a step-down transformer using the theory of linear electric circuits; statistical methods, including: construction and approximation of external characteristics of regression analysis methods, construction of theoretical and experimental law of distribution of equivalent current of traction load and determination of current quantile for a given confidence probability.

**Results:** advantages and disadvantages of methods of simulation modeling of traction power supply system as applied to determination of parameters of active devices are shown, possibilities of experimental method are given. A detailed description of the conducted experiment is given, connection schemes of measuring devices and vector diagrams of currents and voltages are shown. The main stages of the proposed methodology for selecting the parameters of the booster transformer are outlined. Calculation formulas for determining the equivalent phase currents are presented, the external characteristic for the selected traction substation is constructed. The theoretical and experimental distribution law of the equivalent current of the traction load was constructed and the quantiles of the equivalent current were determined, which amounted to 400 A at a confidence level of 0.968. The maximum required value of volt additive for the selected traction substation and the law of volt additive voltage control for the booster transformer were determined.

**Practical importance:** the proposed methodology of selecting the parameters of active devices of traction power supply system based on the experimental determination of external characteristics of traction substations will allow to determine more accurately the energy performance of booster transformers. It is supposed to improve the methodology by processing the results of synchronous measurements of currents and voltages at neighboring traction substations feeding the inter-substation zone. This will make it possible to expand the possibilities of application of active devices of the traction power supply system and improve the algorithms of booster transformer operation, including taking into account the operation of controlled reactive power compensation devices.

**Keywords:** traction power supply system, traction substation, external characteristic, railway transportation, energy efficiency.

## References

1. German L.A. Regulirovaniye napryazheniya v tyagovoy seti peremennogo toka zheleznnykh dorog / L.A. German, K.V. Kishkurno // *Electricity*. 2014. № 9. S. 23–33. EDN XXSQQN. (In Russian)
2. Cheremisin V.T. Assessment of Train Traction Electric Energy Losses / V.T. Cheremisin, M.M. Nikiforov, S.Y. Ushakov // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018, Vladivostok. P. 8602528. DOI: 10.1109/FarEast-Con.2018.8602528.
3. Kondrat'ev Ju. V., Tarasenko A. V., Komjakov A. A. i dr. Raschet parametrov ustrojstv prodol'noj kompensacii reaktivnoj moshhnosti v tjagovoj seti peremennogo toka // *Omskij nauchnyj vestnik*. 2015. № 3 (143). S. 237–239. EDN VCNUPN. (In Russian)
4. Agunov A. V., Karabanov A. A., Terehin I. A. i dr. Raschet teplovyh poter' v kombinirovannoj fil'trokompensirujushhej ustanovke // *Bjulleten' rezul'tatov nauchnyh issledovanij*. 2023. № 2. S. 92–103. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-92-103. EDN PJIOVK. (In Russian)
5. Baranov I.A. Modelirovanie processov kompensacii reaktivnoj moshhnosti v sisteme tjagovogo jelektrosnabzhenija s pomoshh'ju MATLAB-Simulink / I.A. Baranov, A.V. Agunov // *Intellectual'nye tehnologii na transporte*. 2021. № 2(26). S. 5–12. EDN IRFFJT. (In Russian)
6. Grechishnikov V. A., Pletnev D. S., Belov M. N. i dr. Vybor mest ustanovki nakopitelej jenerгии na tjagovyh podstancijah linij metropolitena // *Jelektrotehnika*. 2023. № 9. S. 45–50. DOI: 10.53891/00135860\_2023\_9\_45. EDN TQUIRU. (In Russian)
7. Zakarjukin V.P. Primenenie nakopitelej jenerгии v sistemah tjagovogo jelektrosnabzhenija zheleznnykh dorog peremennogo toka / V.P. Zakarjukin, A.V. Krjukov, A.V. Cherepanov // *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie*. 2014. № 2(42). S. 158–164. EDN SKDVTN. (In Russian)
8. Blinkova S.A. Jefferktivnost' ispol'zovanija al'ternativnyh istochnikov pitanija na zheleznoj doroge // *Vestnik transporta Povolzh'ja*. 2024. № 1(103). S. 7–12. EDN SLLETJ. (In Russian)
9. Garanin M.A. Modelirovanie sistemy tjagovogo jelektrosnabzhenija s ispol'zovaniem nakopitelej jenerгии / M.A. Garanin, S.A. Blinkova // *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija*. 2023. № 2(90). S. 85–90. DOI: 10.46973/0201-727X\_2023\_2\_85. EDN TUOYML. (In Russian)

10. Komjakov A.A. Sovmestnoe primenenie busternyh transformatorov i staticheskikh kompensatorov reaktivnoj moshhnosti dlja upravlenija rezhimami raboty sistemy tjagovogo jelektrosnabzhenija peremennogo toka / A.A. Komjakov, M.M. Nikiforov // Problemy bezopasnosti i jeffektivnosti tehniceskikh sistem: Sbornik dokladov konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, posvjashhennoj 95-letiju so dnja rozhdenija A. V. Plaksa, Sankt-Peterburg, 11–12 maja 2023 goda. SPb.: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija Imperatora Aleksandra I, 2023. S. 67–70. EDN CWABFT. (In Russian)

11. Zakarjukin V.P. Parametricheskaja identifikacija sistem tjagovogo jelektrosnabzhenija 2×25 kV / V.P. Zakarjukin, A.V. Krjukov, A.A. Kushov // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija. 2015. № 2(58). S. 121–129. EDN UCQZKL. (In Russian)

12. Komjakov A.A. Razrabotka algoritma sovmestnyh tjagovyh i jelektricheskikh raschetov s uchetom harakteristik i parametrov uchastkov i poezdnoj situacii / A.A. Komjakov, A.S. Vil'gel'm, A.I. Shkulov // Izvestija Transsiba. 2021. № 3(47). S. 106–115. EDN NFUWMM. (In Russian)

13. Korolev A.A., Pletnev D.S., Belov M.N. i dr. Analiz programmnoho obespechenija dlja modelirovanija jelektrifikacii zheleznyh dorog // Naukosfera. 2022. № 1–1. S. 175–181. EDN ZHHHYU. (In Russian)

14. Nezevak V.L. Sovershenstvovanie metodov i algoritmov rascheta jenergeticheskikh pokazatelej sistemy tjagovogo jelektrosnabzhenija s reguliruemymi ustrojstvami / V.L. Nezevak, A.D. Dmitriev // Izvestija Transsiba. 2022. № 3(51). S. 19–34. EDN KBOZNF. (In Russian)

15. Vlasov S.P. Vol'todobavochnyj transformator v uslovijah menjajushhejsja tjagovoj nagruzki // Mir transporta. 2012. T. 10, № 1(39). S. 52–57. EDN OWZIPZ. (In Russian)

16. Nezevak V.L. Harakteristika tjagovoj nagruzki dlja opredelenija parametrov nakopitelja jelektricheskoi jenerгии / V.L. Nezevak, A.P. Shatohin // Mir transporta. 2018. T. 16, № 2(75). S. 84–94. EDN XSMVTN. (In Russian)

17. Komjakov A.A. Primenenie verojatnostnogo podhoda dlja formirovanija grafika jelektrotjagovoj nagruzki pri imitacionnom modelirovanii sistemy tjagovogo jelektrosnabzhenija / A.A. Komjakov, T.V. Komjakova, A.I. Shkulov // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija. 2023. № 4(92). S. 184–192. DOI: 10.46973/0201-727X\_2023\_4\_184. EDN JLRHET. (In Russian)

Received: 26.04.2024

Accepted: 21.05.2024

#### **Author's information:**

Alexander A. KOMYAKOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor of Department “Theoretical Electrical Engineering”; tskom@mail.ru

Victor A. TARASEVICH — Postgraduate Student of Department “Theoretical Electrical Engineering”; viktortarasevich5665@gmail.com