

2.4.3. Электроэнергетика

Научная статья

УДК 621.311.001.57

<https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.6.4>

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСИММЕТРИЧНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ ТЯГОВЫХ НАГРУЗОК В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 110 КВ

Владимир Иванович Нагай^{1*}, Александр Валерьевич Украинцев², Борис Евгеньевич Дынькин³,
Иван Владимирович Нагай⁴, Сергей Владимирович Сарры⁵, Павел Сергеевич Киреев⁶,
Юрий Иванович Жарков⁷

- ¹⁻⁶ Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова (д. 132, ул. Просвещения, Новочеркасск, Ростовская область, 346428, Российская Федерация),
^{3,7} Ростовский государственный университет путей сообщения (зд. 2, площадь Ростовского стрелкового полка Народного ополчения, Ростов-на-Дону, 344038, Российская Федерация)
¹ nvi53@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9446-2799>
² xelandr@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5547-7963>
³ dynkin1949@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6195-3145>
⁴ nagayiv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6425-5390>
⁵ sv@sarry.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1570-4310>
⁶ kireevps@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8660-0960>
⁷ zharkov43@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-3939-4812>
^{*} Автор, ответственный за переписку

Аннотация. Введение. В работе выполнен анализ результатов экспериментальных исследований несимметричной и нелинейной тяговой нагрузки (НТНГ) на подстанциях внешней системы электроснабжения напряжением 110 кВ. Определены области, характеризующие степень несимметрии в зависимости от тока прямой последовательности (ТПП), которые сопоставлены с подобными областями, полученными при математическом исследовании. Нелинейность тяговой нагрузки из-за наличия статических преобразователей энергии порождает в основном нечетные высшие гармонические составляющие, оказывающие влияние на функционирование релейной защиты (РЗ). Получены зависимости максимальных значений 3, 5, 7 гармонических составляющих фазных токов, что позволит их использовать при выборе параметров измерительных органов РЗ и обосновании требований к фильтрации сигналов тока. **Цель.** Исследование режимов СТЭ для уточнения методик расчета параметров срабатывания измерительных органов релейной защиты (РЗ) и разработки новых алгоритмов функционирования микропроцессорных РЗ. **Материалы и методы.** Исследование построено на анализе режимов электрических сетей внешнего и тягового электроснабжения. **Результаты и обсуждение.** Определены области возможных несимметричных тяговых нагрузок в зависимости от степени их несимметрии. Получены математические зависимости максимальных относительных значений токов нечетных гармонических составляющих от фазных токов. Показана необходимость учета составляющих тока обратной последовательности (ТОП), высших гармонических составляющих, обусловленных нелинейной тяговой нагрузкой, при выборе параметров измерительных органов (ИО) РЗ. **Заключение.** Отмечено достижение отношения тока обратной последовательности к ТПП до 100 % не только при холостом ходе одного из плеч тягового трансформатора, но и с нагрузкой обеих плеч данного трансформатора при различных аргументах нагрузки. Отмечено существенное значение нечетных гармонических составляющих в фазных токах тяговых трансформаторов, достигающих 6–14 % от максимального (номинального) тока тягового трансформатора.

Ключевые слова: несимметричная и нелинейная тяговая нагрузка, ток прямой и обратной последовательностей, высшие гармонические составляющие токов, релейная защита

Для цитирования: Экспериментальные исследования несимметричных и нелинейных тяговых нагрузок в электрических сетях 110 кВ / В. И. Нагай [и др.] // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2025. № 6(111). С. 36–45. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.6.4>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 16.10.2025;

одобрена после рецензирования 18.11.2025;

принята к публикации 24.11.2025.

Research article

EXPERIMENTAL STUDIES OF ASYMMETRICAL AND NONLINEAR TRACTION LOADS IN 110 KV ELECTRIC GRIDS

Vladimir I. Nagay^{1*}, Alexander V. Ukraintsev², Boris E. Dynkin³, Ivan V. Nagay⁴,
Sergey V. Sarry⁵, Pavel S. Kireev⁶, Yuri I. Zharkov⁷

- ¹⁻⁵ Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk (132, Prosveshcheniya str., Novocherkassk, Rostov Region, 346428, Russian Federation)
^{3,7} Rostov State University of Railway Transport (Building 2, Rostov Infantry Regiment of the People's Militia Square, Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation)
¹ nvi53@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9446-2799>
² xelandr@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5547-7963>

© Нагай В. И., Украинцев А. В., Дынькин Б. Е., Нагай И. В., Сарры С. В., Киреев П. С., Жарков Ю. И., 2025

3 dynkin1949@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6195-3145>
 4 nagayiv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6425-5390>
 5 sv@sarry.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1570-4310>
 6 kireevps@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8660-0960>
 7 zharkov43@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-3939-4812>
 * Corresponding author

Abstract. Introduction. The paper analyzes the results of experimental studies of asymmetrical and nonlinear traction loads (ANTL) at substations of a 110 kV external power supply system. Regions characterizing the degree of asymmetry depending on the positive sequence current (PSC) are constructed and compared with similar regions obtained through mathematical analysis. Traction load nonlinearity due to the presence of static energy converters primarily generates odd higher harmonic components, which affect the operation of relay protection (RP). Dependences for the maximum values of 3rd, 5th, and 7th harmonic components of phase currents are obtained, which will allow use in selecting the parameters of RP measuring units and basing for the current signal filtering requirements. **Goal.** The study of STE modes to refine the methods for calculating the response parameters of relay protection measuring devices (RP) and the development of new algorithms for the operation of microprocessor RS. **Materials and methods.** The study is based on the analysis of the modes of external and traction power supply electrical grids. **Results and discussion.** Regions of possible asymmetric traction loads are constructed depending on the degree of their asymmetry. Mathematical relationships between the maximum relative values of odd harmonic currents and phase currents are obtained. The need to consider the components of the traction load due to the traction load factor and higher harmonic components when selecting the parameters of the protection relay is demonstrated. **Conclusion.** The ratio of the negative sequence current (NSC) to the TPP has been shown to reach 100%, not only when shoulder of the traction transformer is idle, but also when both shoulder of the transformer are loaded under various load conditions. Odd harmonic components in the phase currents of traction transformers are significant, reaching 6–14 % of the maximum (nominal) current of the traction transformer.

Keywords: asymmetrical and nonlinear traction load, positive and negative sequence current, higher harmonic components of currents, relay protection

For citation: Nagay VI, Ukraintsev AV, Dynkin BE, Nagay IV, Sarry SV, Kireev PS, Zharkov YuI. Experimental Research of Asymmetrical and Nonlinear Traction Loads in 110 kV Electric Grids // Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2025; 6(111):36-45. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.6.4>

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 16.01.2025;

approved after reviewing 18.11.2025;

accepted for publication 24.11.2025.

Введение / Introduction. Одними из мощных потребителей электрических сетей напряжением 110–220 кВ являются системы тягового электроснабжения (СТЭ) железных дорог (ЖД). При этом тяговые трансформаторы, как правило, мощностью 40 МВА и реже 25 МВА, питающие несимметричную тяговую нагрузку, подключаются непосредственно к шинам подстанций 110–220 кВ опорных подстанций и / или к шинам промежуточных (ответвительных) подстанций. Режимы работы систем внешнего электроснабжения (СВЭ), т. е. электрических распределительных сетей 110–220 кВ и СТЭ оказывают друг на друга существенное влияние [1–3], что обусловлено осуществлением питания электропоездов по однофазной схеме (см. рис. 1).

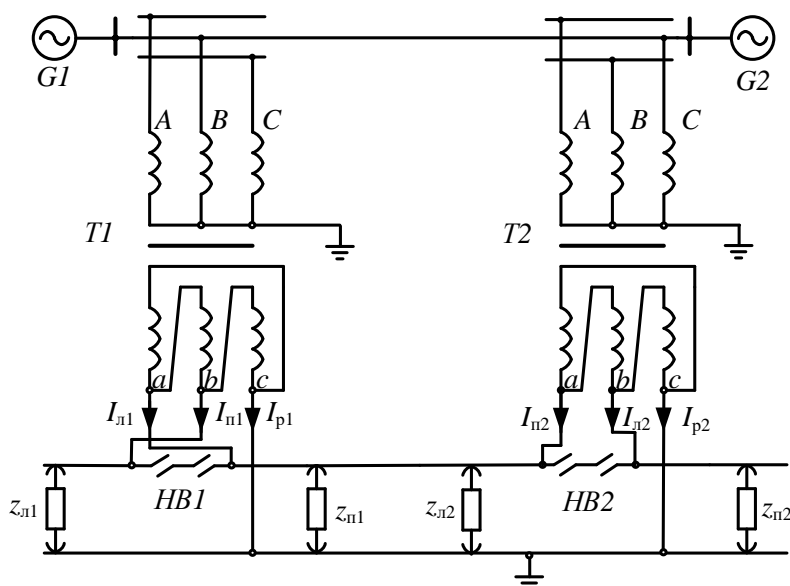


Рис. 1. Поясняющая схема включения тяговых подстанций /
 Fig. 1. Explanatory diagram of switching on traction substations

Обмотки стороны высшего напряжения соединяются в «звезду», а на стороне низшего напряжения – в «треугольник». Причем фаза С «треугольника» всегда соединяется с рельсом, а для симметрирования нагрузок фаз электрической сети слева и справа на подстанциях изменяется фазировка

стороны трансформатора «звезда», которая должна дать эффект симметрирования со стороны опорных подстанций при одинаковой нагрузке на всех дистанциях железнодорожного пути [4, 5]. Для исключения появления уравнильных токов обязательно сфазированное включение фаз соседних тяговых подстанций. В табл. 1 приведен алгоритм подключения тяговых подстанций, что получило отражение на рис. 1.

Таблица 1 / Table 1

Алгоритм подключения фаз трансформатора тяговой подстанции к фазам линии на стороне ВН, при заданной схеме подключения ТП, расположенной по центру / The algorithm for connecting the phases of the transformer of a traction substation to the phases of the line on the side of the overhead line, with a given TP connection scheme located in the center

№ п.п.	Подстанция слева			Подстанция по центру			Подстанция справа		
Фаза ВЛ	А	В	С	А	В	С	А	В	С
Тяговая ПС по центру	Подключение фаз трансформатора тяговой подстанции								
ТП1	В	А	С	А	В	С	А	С	В
ТП2	А	В	С	А	С	В	С	А	В
ТП3	А	С	В	С	А	В	С	В	А
ТП4	С	А	В	С	В	А	В	С	А
ТП5	С	В	А	В	С	А	В	А	С
ТП6	В	С	А	В	А	С	А	В	С

На каждой подстанции установлены нейтральные вставки (НВ), исключающие междуфазное КЗ при переходе электровоза с одной межподстанционной зоны на другую. Некоторый эффект симметрирования также создается за счет наличия на подстанции симметричной общепромышленной нагрузки, питающейся от третичной обмотки тягового трансформатора. Полная симметрия со стороны питающих подстанций в идеальном случае достигается в схеме так называемого «полного винта» (подключение трех подстанций при радиальной схеме питания или шести подстанций при двухстороннем питании). Кроме того, нагрузка тяговой подстанции является не только несимметричной, но и нелинейной из-за наличия в электровозе статических преобразователей, позволяющих регулировать его мощность.

Указанные особенности выполнения СТЭ порождают ряд проблем качества электроэнергии, а также выполнения релейной защиты СВЭ напряжением 110–220 кВ [6–8], что актуализирует вопрос исследования режимов СТЭ для уточнения методик расчета параметров срабатывания измерительных органов релейной защиты (РЗ) и разработки новых алгоритмов функционирования микропроцессорных РЗ, минимизирующих влияние высших гармонических составляющих и несимметрии токов и напряжений не только в аварийных, но и нормальных нагрузочных режимах, являющихся зачастую расчетными для определения параметров РЗ.

Материалы и методы исследований / Materials and methods of research. Экспериментальные исследования проводились на тяговых подстанциях, подключенных к электрической сети ПАО Россети Юг» [9] (рис. 2), питающей тяговые подстанции С, Е, D. Контактная электрическая сеть, обеспечивающая питание электропоездов, состоит из четырех участков, разделенных нейтральными вставками NV1, NV2, NV3 (рис. 2). Два средних участка контактной сети получают двустороннее питание от тяговых подстанций. Два крайних участка обеспечивают питание контактной сети с одной стороны от данной сети, а с другой стороны – от смежной электрической сети. Измерения напряжений и токов проводились на стороне высшего напряжения 110 кВ силового трансформатора с тяговой нагрузкой на стороне 27,5 кВ и при отключенной стороне низшего напряжения 10 кВ, питающей симметричную общепромышленную нагрузку, с усреднением на интервале в 1 с в течение около 30 мин. Максимальное значение фазных токов достигало значений 140 А на стороне высшего напряжения.

Оценка степени несимметрии оценивается коэффициентом A_{12} , отражающим отношение токов обратной (ТОП) I_2 и прямой (ТПП) I_1 последовательностей на стороне высшего напряжения трансформатора тяговой подстанции (ТПС), как правило, определенным отношением фазных токов левого

$I_{\phi_{\text{лп}}}$ и правого $I_{\phi_{\text{пп}}}$ плеч $n = I_{\phi_{\text{лп}}}/I_{\phi_{\text{пп}}}$, питающих соответствующие межподстанционные зоны железной дороги, а также отношением величины тока общепромышленной нагрузки $I_{\text{пр}}$ к току правого плеча $I_{\phi_{\text{пп}}}$ тяговой нагрузки $m = I_{\text{пр}}/I_{\phi_{\text{пп}}}$. Общее выражение для определения данного коэффициента при равенстве аргументов токов левого и правого плеч можно представить выражением, приведенным в [2]:

$$A12 = \sqrt{(n^2 - n + 1)/[(1 + n)^2 + 3m(3m + 2n + 1)]}. \quad (1)$$

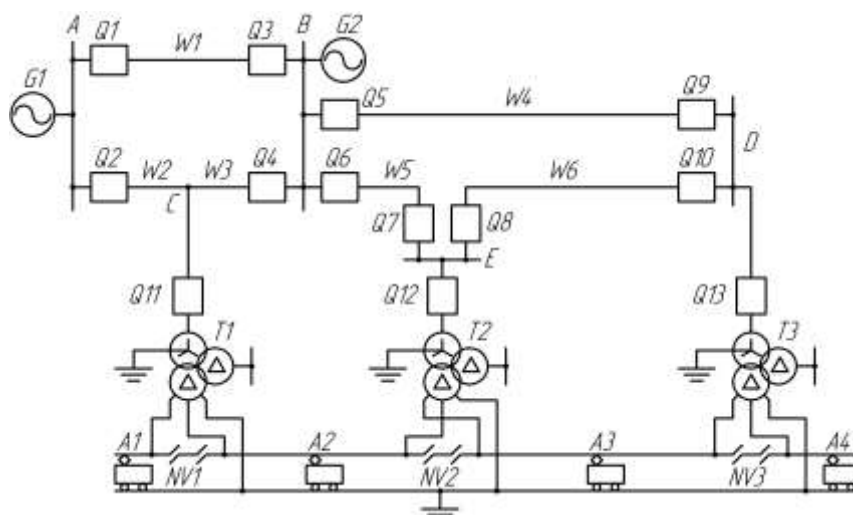


Рис. 2. Поясняющая схема электрических сетей внешнего и тягового электроснабжения /
Fig. 2. Explanatory diagram of electrical networks of external and traction power supply

Анализ выражения (1) показывает, что максимальное значение коэффициента $A12$ может достигать 100 % в случае холостого хода на одном из плеч, а минимальное значение составляет 50 % при равенстве токов плеч и их аргументов и отсутствии общепромышленной нагрузки. Наличие общепромышленной нагрузки приводит к снижению этого показателя.

При проведении данного эксперимента измерения токов производилось на стороне высшего напряжения (ВН) и поэтому графики степени несимметрии $A12$ построены в зависимости от относительного тока прямой последовательности (рис. 3а) на стороне ВН. За базу принято номинальное значение тока трансформатора мощностью 40 МВА стороны ВН 110 кВ, равное 210 А.

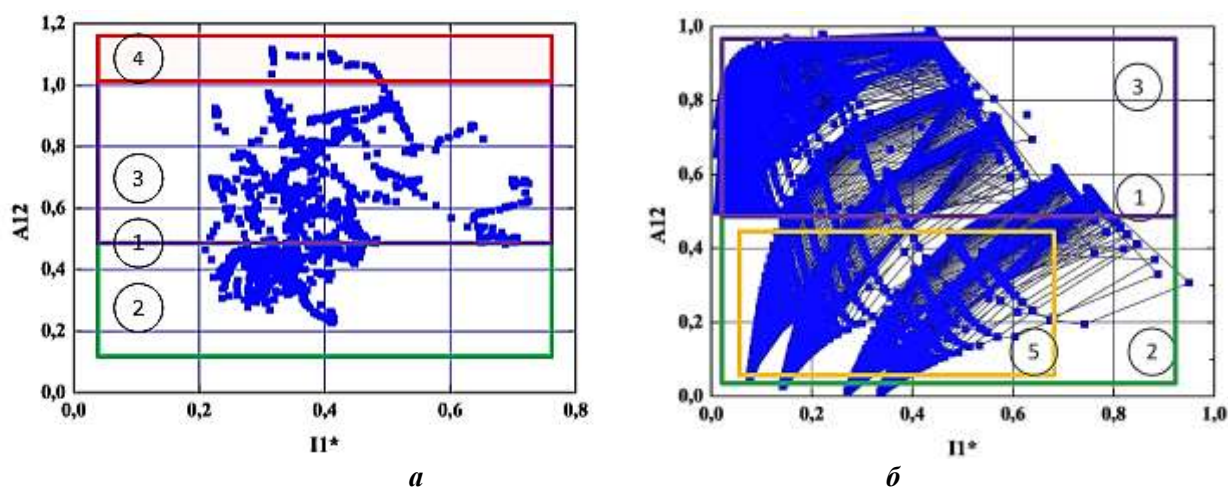


Рис. 3. Зависимости коэффициента несимметрии токов трансформатора, питающего тяговую нагрузку:
а – экспериментальные данные; б – расчетные данные / Fig. 3. Dependences of the current asymmetry coefficient of the transformer feeding the traction load: a – experimental data; b – calculated data

На данном графике (рис. 3а) можно выделить несколько областей 1–4, которые требуют пояснения и дополнительного исследования. Область 1 вблизи значения 0,5 (50 %) свидетельствует о равенстве токов плеч на стороне 27,5 кВ; область 3, где $0,5 < A_{12} < 1,0$ – отражает неравные значения токов левого и правого плеча тяговой нагрузки; область 4 ($A_{12} \geq 1,0$) – отражает режим выдачи мощности электровозом во внешнюю сеть, что подтверждено графиком мощности, зафиксированного измерительным прибором анализатором качества электроэнергии «Fluke 435». Подобный эффект может также возникать и при перетоке мощности между тяговыми подстанциями по сети СТЭ. Отдельного пояснения требует область 2, где $A_{12} < 0,5$, т. к. при проведении эксперимента общепромышленная нагрузка на обмотке 10 кВ тягового трансформатора отсутствовала и не могла влиять на снижение коэффициента A_{12} . При этом возможен эффект снижения несимметрии от симметричного транзита мощности по линии электропередачи внешнего электроснабжения.

Рассмотрим распределение токов нагрузки в обмотках трансформатора на стороне 27,5 кВ (обмотки трансформатора включены по схеме треугольника) (рис. 4) и во внешней сети тягового электроснабжения.

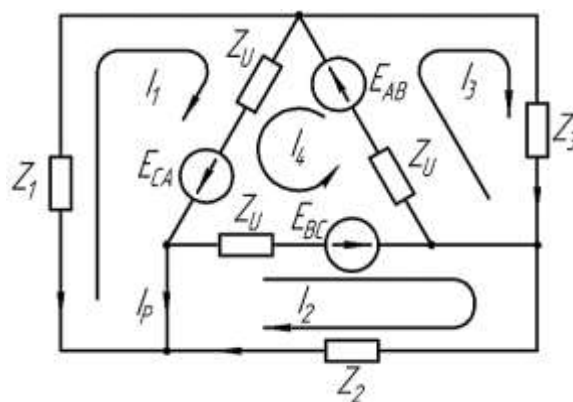


Рис. 4. Поясняющая схем для определения токов во вторичной обмотке тягового трансформатора и во внешней сети тягового электроснабжения / Fig. 4. Explanatory diagrams for determining currents in the secondary winding of a traction transformer and in the external traction power supply network

На рис. 4 приняты следующие обозначения: $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2$ – сопротивления нагрузки левого и правого плеч соответственно с учетом собственного тяговой нагрузки $\underline{Z}_{f1}, \underline{Z}_{f2}$ и \underline{Z}_3 – сопротивления общепромышленной нагрузки; \underline{Z}_u – сопротивление источника питания (трансформатора); $i_1 - i_4$ – контурные токи (рис.4); $i_{A\Delta}, i_{B\Delta}, i_{C\Delta}, i_{AY}, i_{BY}, i_{CY}$ – токи фаз A, B, C вторичной и первичной обмоток; $\dot{E}_{ca}, \dot{E}_{bc}, \dot{E}_{ab}$ – междуфазные ЭДС вторичных обмоток трансформатора.

При этом можно записать систему уравнений:

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_{f2} * \underline{Z}_3 / (\underline{Z}_{f2} + \underline{Z}_3) \quad (2)$$

$$\underline{Z}_2 = \underline{Z}_{f1} * \underline{Z}_3 / (\underline{Z}_{f1} + \underline{Z}_3) \quad (3)$$

$$i_1 = \left\{ \underline{Z}_u \left[\frac{\dot{E}_{ca} - \dot{E}_{ab}}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_u} + \frac{\dot{E}_{ca} - \dot{E}_{bc}}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_u} \right] - 3\dot{E}_{ca} \right\} / \left\{ \underline{Z}_u \left[1 + \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_u}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_u} + \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_u}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_u} \right] - 3(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_u) \right\} \quad (4)$$

$$i_2 = [\dot{E}_{ab} - \dot{E}_{ca} + i_1(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_u)] / (\underline{Z}_3 + \underline{Z}_u) \quad (5)$$

$$i_3 = \frac{[\dot{E}_{bc} - \dot{E}_{ca} + i_1(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_u)]}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_u}, \quad (6)$$

$$i_4 = \frac{[\dot{E}_{ca} - i_1(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_u)]}{\underline{Z}_u}, \quad (7)$$

$$i_{A\Delta} = i_3 + i_4, \quad (8)$$

$$i_{B\Delta} = i_2 + i_4, \quad (9)$$

$$i_{C\Delta} = i_1 + i_4, \quad (10)$$

$$i_{AY} = \frac{i_{A\Delta}}{K_t}, \quad (11),$$

$$i_{BY} = \frac{i_{B\Delta}}{K_t}, \quad (12),$$

$$i_{CY} = \frac{i_{C\Delta}}{K_t}. \quad (13)$$

Токи прямой i_{11} и обратной i_{22} последовательностей сформированы из токов фаз сторон трансформатора вторичной и первичной обмоток. Это позволяет получить области существования коэффициента A_{12} , что получило отражение на рис. 3б. На данных графиках отмечены области 1, 2, 3 (подобные областям 1, 2, 3 на рис. 3а) и 5, характеризующие влияние как симметричной общепромышленной нагрузки, так и тяговой нагрузки с неравными аргументами токов левого и правого плеч. Это позволяет объяснить, что принятое допущение равенства аргументов тяговой нагрузки имеет частный характер, при котором $A_{12} = 0,5$, а в реальных условиях данное соотношение выполняется только в отдельные моменты времени при прохождении электровозами межподстанционных зон. Таким образом, неравенство аргументов токов левого и правого плеч приводит к уменьшению данного коэффициента, т. е. существование области 2 со значениями $A_{12} < 0,5$. Также наличие симметричной общепромышленной нагрузки приводит к уменьшению коэффициента A_{12} .

Таким образом, максимальное значение коэффициента несимметрии A_{12} может достигать 100 %, а из-за возможного режима рекуперации и более, что необходимо учитывать при выборе параметров измерительных органов прямой и обратной последовательностей, и особенно ИО РЗ, контролирующих их приращения. В ряде случаев это приведет к их загромождению, но при этом не потребуются их выведения из работы, что предполагают существующие методики выбора параметров пусковых органов дифференциально-фазных и высокочастотных защит с блокирующими (разрешающими) сигналами [10].

Тяговая нагрузка (ТНГ) характеризуется не только несимметрией и нестационарностью, но и нелинейностью, обусловленной работой управляемых преобразователей энергии электровоза. Можно отметить для подстанций D и E (рис. 2) значительный уровень 3-й, 5-й и 7-й гармоник, которые в отдельные интервалы времени достигают 6–14 % от максимального значения основной гармоники на наблюдаемом интервале (номинальному току тягового трансформатора), 60 % и 50 % по отношению к текущему значению при малых значениях ТПП. Четные гармоники представлены слабо, на уровне нескольких процентов.

На рис. 5 приведены наблюдаемые области токов 3-й и 5-й гармоник фазы A , содержание которых составляет 6 % и 10 % соответственно. При этом за базу принято максимальное значение тока прямой последовательности. Зеленой линией 2 на рис. 5 обозначено максимальное значение токов во время эксперимента. Так как для релейной защиты принята отстройка от максимального возможного значения параметра, то граничной линией выбора возможного значения порога является линия, обозначенная синим цветом 3.

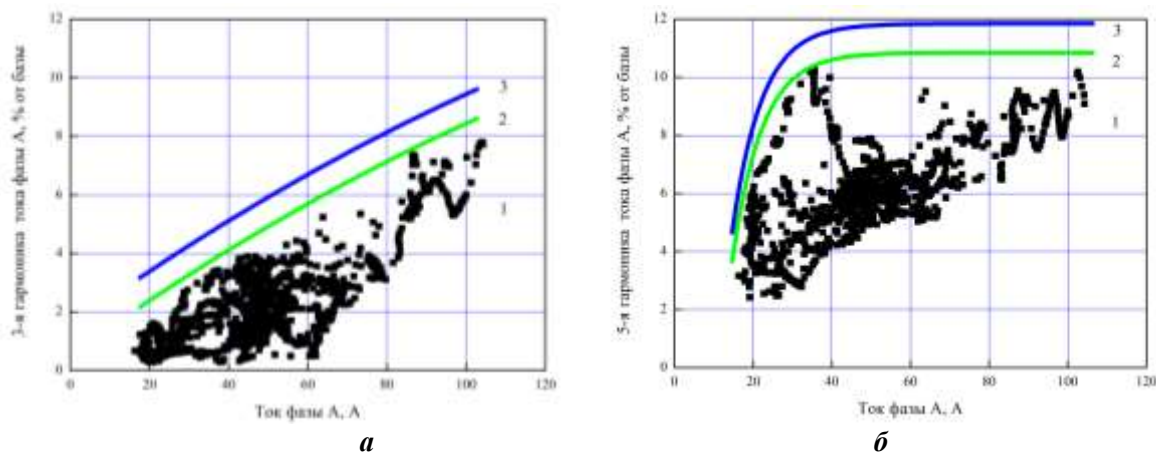


Рис. 5. Области токов высших гармонических составляющих (а – третья гармоника, б – пятая гармоника) фазы A в зависимости от тока этой же фазы / Fig. 5. Areas of currents of higher harmonic components (a – the third harmonic, b – the fifth harmonic) of phase A depending on the current of the same phase

Для всех остальных фаз построены зависимости максимальных значений токов гармонических составляющих 3-й, 5-й, 7-й гармоник, которые приведены на рис. 6. Максимальное значение достигают уровни 3-й гармоники (14 %), сопоставимы с ними уровни 5-й гармоники (12 %) и на третьем месте находятся показатели 7-й гармоники (8 %). На рис. 6 приняты обозначения: желтый цвет – фаза А, зеленый цвет – фаза В, красный цвет – фаза С, черный цвет – результирующая зависимость, охватывающая все три зависимости. Результирующая зависимость является расчетной для выбора параметров измерительных органов и определения требований к фильтрам высших гармонических составляющих и фильтру основной гармоники.

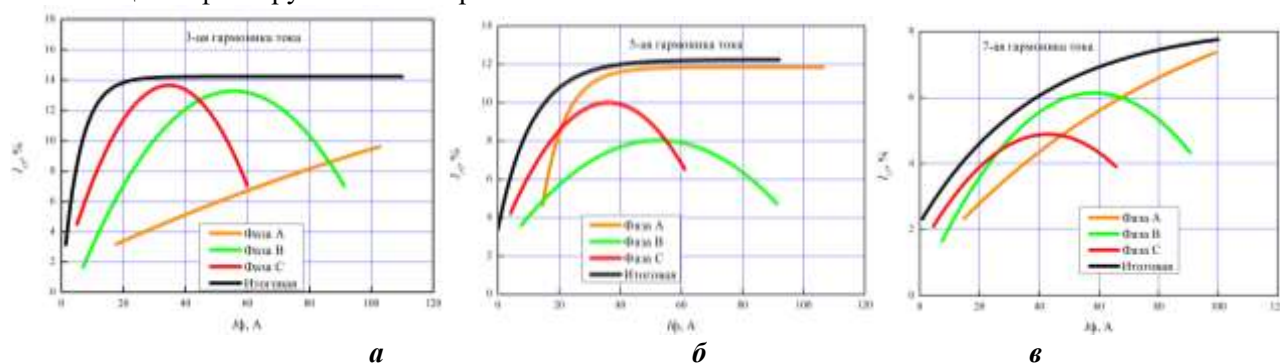


Рис. 6. Зависимости максимальных значений высших гармонических составляющих (а – третья гармоника, б – пятая гармоника, в – седьмая гармоника) от фазного тока / Fig. 6. Dependences of the maximum values of the higher harmonic components (a – the third harmonic, b – the fifth harmonic, c – the seventh harmonic) on the phase current

В табл. 2 приведены математические зависимости гармонических составляющих токов, отраженных на рис. 6.

Таблица 2 / Table 2

Математические описания максимальных значений гармонических составляющих токов фаз и результирующих зависимостей от тока I / Mathematical descriptions of the maximum values of the harmonic components of the phase currents and the resulting dependencies on the current I

Фаза	3-я гармоника тока	5-я гармоника тока	7-я гармоника тока
А	$y = 1,51147 + 0,097704I - 1,7787 \cdot 10^{-4}I^2$	$y = 11,84508 - 50,39294e^{-I/7,50161}$	$y = 10,62973 - 9,77157e^{-I/90,42585}$
В	$y = -2,33141 + 0,54668I - 0,00492I^2$	$y = 1,95145 + 0,23131I - 0,0022I^2$	$y = 0,2413 + 0,202I - 0,00173I^2$
С	$y = 1,10205 + 0,72179I - 0,01038I^2$	$y = 2,65496 + 0,40553I - 0,0056I^2$	$y = 1,39988 + 0,16237x - 0,00189I^2$
Результирующая зависимость	$y = 12,71557 - 14,23769e^{-I/5,5596}$	$y = 12,22532 - 8,83317e^{-I/11,12302}$	$y = 8,22173 - 6,02061e^{-I/39,18382}$

В экспериментах зафиксированы существенные значения напряжения обратной последовательности до 3,75 %, что необходимо учитывать при выборе параметров измерительных органов напряжения обратной последовательности высокочастотных защит воздушных линий.

Заключение / Conclusion. При проведении экспериментальных исследований на ТПС 110 кВ потребляемая полная мощность на подстанции составляла не более (40–55) % от номинальной мощности трансформатора, что обусловлено графиком движения поездов. Потребляемая мощность по каждой фазе отличалась в 2–3 раза, что вызывало появление значений токов обратной последовательности на стороне 110 кВ ТПС до (50–60) А. Выявлено, что коэффициент несимметрии A_{12} достигает 100 % не только при холостом ходе одного из плеч тягового трансформатора, но и при неравенстве аргументов токов тяговой нагрузки. Кратковременно возможно повышение степени несимметрии более 100 % из-за рекуперации энергии электровозом. При большей загруженности тягового трансформатора последует увеличение значения тока обратной последовательности, что требует учета при выборе параметров измерительных органов (ИО) ТОП (ИО приращений ТОП).

Токи, потребляемые электровозами, существенно несинусоидальны, содержат значительные уровни нечетных гармоник, начиная с 3-й и выше, что обусловлено применением на электровозах коллекторных тяговых электродвигателей (ТЭД), с возможностью регулирования мощности ТЭД управляемыми выпрямителями. В результате исследований выявлено, что 3-я гармоника в фазах А и

В, питающих контактную сеть электровазов достигает (10–14) %, 5-я гармоника (10–12) %, а в фазе С (подключенной к заземленному рельсу) уровень данных гармонических составляющих достигает: 3-я и 5-я гармоника – (8–10) % (за базу принято максимальное значение ТПП). При малых значениях ТПП отмечается рост содержания 3-й, 5-й, 7-й гармоник по отношению к наблюдаемому ТПП.

Напряжение обратной последовательности составляет (3–4) % от напряжения прямой последовательности при указанной выше максимальной нагрузке тягового трансформатора.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. 528 с.
2. Тамазов А. И. Несимметрия токов и напряжений, вызываемая однофазными тяговыми нагрузками. М.: Транспорт, 1965. 235 с.
3. Фигурнов Е. П. О влиянии нагрузки электровазов со статическими преобразователями на релейную защиту фидеров // Труды института / Ростовский-на-Дону ин-т инженеров ж/д транспорта. 1967. Вып. 71. С. 62–85.
4. ГОСТ Р 57670-2017 Системы тягового электроснабжения железной дороги. Методика выбора основных параметров. М.: Стандартинформ, 2017.
5. СП 224.1326000.2014 Тяговое электроснабжение железной дороги. УТВЕРЖДЕН пр. Минтранса России от 02.12.2014. № 330. Дата введения 2014.12.01.
6. Фигурнов Е. П. Релейная защита устройств электроснабжения железных дорог. М.: Транспорт, 2006. 215 с.
7. Дынькин Б. Е. Защита тяговых сетей переменного тока при разземлении опор контактной сети. Хабаровск: ДВГУПС, 1999. 170 с.
8. Учет влияния несимметричной тяговой нагрузки на выбор параметров срабатывания блокировки при качаниях дистанционной защиты / В. И. Нагай [и др.] // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2024. № 6(105). С. 59–68.
9. Экспериментальное исследование режимов электрических сетей внешнего электроснабжения тяговых электрических сетей / А. В. Украинцев [и др.] // Кибернетика энергетических систем: сборник материалов XLVI Международной научно-технической конференции, г. Новочеркасск, 19–21 ноября 2024 г. / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова. Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2024. С. 196–202.
10. СТО 56947007-29.120.70.032-2009 Методические указания по выбору параметров срабатывания дифференциально-фазной и высокочастотной микропроцессорных защит сетей 220 кВ и выше, устройств АПВ сетей 330 кВ и выше производства ООО НПП «ЭКРА»: стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС».

REFERENCES

1. Markvardt KG. Power Supply of Electrified Railways. Moscow: Transport; 1982. 528 p. (In Russ.).
2. Tamazov AI. Current and Voltage Unbalance Caused by Single-Phase Traction Loads. Moscow: Transport; 1965. 235 p. (In Russ.).
3. Figurnov EP. On the Influence of Electric Locomotive Loads with Static Converters on Feeder Relay Protection. Proceedings of the Rostov-on-Don Institute of Railway Engineering. Proceedings. Rostov-on-Don Institute of Railway Engineering. 1967;(71):62-85. (In Russ.).
4. GOST R 57670-2017. Railway Traction Power Supply Systems. Methodology for Selecting the Main Parameters. M.: Standartinform; 2017. (In Russ.).
5. SP 224.1326000.2014. Railway Traction Power Supply. APPROVED by the RF Ministry of Transport Resolution of 02.12.2014, No. 330. Effective Date: 2014-12-01. (In Russ.).
6. Figurnov EP. Relay Protection of Railway Power Supply Devices. M.: Transport; 2006. 215 p. (In Russ.).
7. Dynkin BE. Protection of AC Traction Networks During Disconnection of Overhead Contact Network Supports. Khabarovsk: DVGUPS; 1999. 170 p. (In Russ.).
8. Nagay VI, Ukraintsev AV, Dynkin BE, Zasytkin AS, Kireev PS. Taking into account the influence of an asymmetrical traction load on the selection of blocking response parameters during distance protection swings. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2024;6(105):59-68. (In Russ.).
9. Ukraintsev AV, Sarry SV, Nagay VI, Dynkin BE, Nagay IV, Trotsenko IV. Experimental study of the modes of electrical networks of external power supply of traction electrical networks. Cybernetics of energy systems: collection of materials of the XLVI International scientific and technical conference, Novocherkassk, November 19-21, 2024. South-Russian State Polytechnical University (NPI) named after M. I. Platov. Novocherkassk: SUPU (NPI); 2024. P. 196-202. (In Russ.).
10. SТО 56947007-29.120.70.032-2009 Guidelines for the selection of response parameters for differential-phase and high-frequency microprocessor protection of 220 kV networks and above, automatic reclosure devices for 330 kV networks and above manufactured by EKRA Research and Production Enterprise LLC: standard of the organization of FGC UES JSC. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

- Владимир Иванович Нагай** – доктор технических наук профессор, профессор кафедры электрических станций и электроэнергетических систем Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова, Scopus ID: 56229983300, Researcher ID: E-4282-2015
- Александр Валерьевич Украинцев** – старший преподаватель кафедры электрических станций и электроэнергетических систем Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова, Scopus ID: 56239079600, Researcher ID: P-9286-2015
- Борис Евгеньевич Дынькин** – доктор технических наук профессор, профессор кафедры электрических станций и электроэнергетических систем Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова, профессор кафедры автоматизированных систем электроснабжения Ростовского государственного университета путей сообщения, Scopus ID: 56245776700, Researcher ID: LSK-0476-2024
- Иван Владимирович Нагай** – кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций и электроэнергетических систем Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова, Scopus ID: 562299664800, Researcher ID: E-4762-2014
- Сергей Владимирович Сарры** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой электрических станций и электроэнергетических систем Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова, Scopus ID: 6506692253, Researcher ID: P-2667-2015.
- Павел Сергеевич Киреев** – кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций и электроэнергетических систем Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова, Scopus ID: 56921839900, Researcher ID: AAC-7398-2021.
- Юрий Иванович Жарков** – доктор технических наук профессор, профессор кафедры автоматизированных систем электроснабжения Ростовского государственного университета путей сообщения, Scopus ID: 57188832622.

ВКЛАД АВТОРОВ

- Владимир Иванович Нагай**
Проведение исследования – постановка задачи, сбор, интерпретация и анализ полученных данных. Утверждение окончательного варианта – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.
- Александр Валерьевич Украинцев**
Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта, разработка математической модели, интерпретация и анализ полученных данных, участие в экспериментальных исследованиях.
- Борис Евгеньевич Дынькин**
Постановка задачи моделирования, описание и характеристики объекта исследования, анализ полученных данных, организация экспериментальных исследований.
- Иван Владимирович Нагай**
Интерпретация и анализ полученных данных, участие в экспериментальных исследованиях.
- Сергей Владимирович Сарры**
Подготовка программы экспериментальных исследований, руководство ими, обработка результатов исследований.
- Павел Сергеевич Киреев**
Выполнение математического моделирования, оформление результатов исследования, анализ результатов моделирования, дизайн материалов статьи.
- Юрий Иванович Жарков**
Постановка задачи экспериментальных исследований, описание и характеристики объекта исследования, анализ полученных данных.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

- Vladimir I. Nagay** – Dr. Sci. (Techn.), Professor, Professor in the Department of Electric Power Plants and Electric Power Systems, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Scopus ID: 56229983300, Researcher ID: E-4282-2015
- Aleksandr V. Ukraintsev** – Senior Lecturer in the Department of Electric Power Plants and Electric Power Systems, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Scopus ID: 56239079600, Researcher ID: P-9286-2015
- Boris E. Dynkin** – Dr. Sci. (Techn.), Professor, Professor in the Department of Electric Power Plants and Electric Power Systems, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Professor of the Department of Automated Power Supply Systems, Rostov State Transport University, Scopus ID: 56245776700, Researcher ID: LSK-0476-2024
- Ivan V. Nagay** – Cand. Sci. (Techn.), Associate Professor in the Department of Electric Power Plants and Electric Power Systems, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Scopus ID: 562299664800, Researcher ID: E-4762-2014

Sergey V. Sarry – Cand. Sci. (Techn.), Head of the Department of Electric Power Plants and Electric Power Systems, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Scopus ID: 6506692253, Researcher ID: P-2667-2015.

Pavel S. Kireev – Cand. Sci. (Techn.), Associate Professor in the Department of Electric Power Plants and Electric Power Systems, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Scopus ID: 56921839900, Researcher ID: AAC-7398-2021.

Yuri I. Zharkov – Dr. Sci. (Techn.), Professor, Professor of the Department of Automated Power Supply Systems, Rostov State Transport University, Scopus ID: 57188832622.

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Vladimir I. Nagay

Conducting the research – defining the problem, collecting, interpreting, and analyzing the obtained data. Approval of the final version – accepting responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article, and its final version.

Alexander V. Ukraintsev

Preparing and editing the text – drafting the manuscript and creating its final version, developing the mathematical model, interpreting and analyzing the obtained data, participating in the experimental research.

Boris E. Dynkin

Formulating the modeling problem, describing and characterizing the research object, analyzing the obtained data, organizing the experimental research.

Ivan V. Nagay

Interpreting and analyzing the obtained data, participating in the experimental studies.

Sergey V. Sarry

Preparing the experimental study program, supervising it, and processing the research results.

Pavel S. Kireev

Conducting mathematical modeling, presenting the research results, analyzing the modeling results, designing the article materials.

Yuri I. Zharkov

Formulating the experimental research problem, describing and characterizing the research object, analyzing the obtained data.