

2.4.3. Электроэнергетика

Научная статья

УДК 621.311.001.57

<https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.6.6>

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ НЕСИММЕТРИЧНОЙ ТЯГОВОЙ НАГРУЗКИ НА ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ БЛОКИРОВКИ ПРИ КАЧАНИЯХ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

Владимир Иванович Нагай^{1*}, Александр Валерьевич Украинцев²,
Борис Евгеньевич Дынькин³, Александр Сергеевич Засыпкин⁴,
Павел Сергеевич Киреев⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова (д. 132, ул. Просвещения, Новочеркасск Ростовской области, 346428, 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 zasandzas@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2985-4619>

⁵ kireevps@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8660-0960>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация. Введение. В работе рассмотрена проблема влияния несимметричной тяговой нагрузки (ТНГ) на функционирование релейной защиты, в частности, блокировки при качаниях (БК) дистанционной защиты (ДЗ). **Цель.** Уточнение выбора параметров срабатывания измерительных органов (ИО) тока обратной последовательности (ТОП) (и его приращения) БК ДЗ при наличии в электрической сети тяговых подстанций. **Материалы и методы.** Исследование построено на анализе режимов электрических сетей внешнего и тягового электроснабжения. **Результаты и обсуждение.** В ходе работы показана необходимость учета составляющей ТОП, обусловленной ТНГ, при выборе параметров ИО ТОП. **Заключение.** По итогам проведенного исследования можно отметить, что ТОП, обусловленные ТНГ, могут превышать токи небаланса обратной последовательности, порождаемые качаниями (асинхронным режимом), что требует их учета при выборе параметров срабатывания БК ДЗ защит воздушных линий.

Ключевые слова: блокировка при качаниях дистанционной защиты, измерительный орган тока обратной последовательности, релейная защита, тяговая нагрузка

Для цитирования: Нагай В. И., Украинцев А. В., Дынькин Б. Е., Засыпкин А. С., Киреев П. С. Учет влияния несимметричной тяговой нагрузки на выбор параметров срабатывания блокировки при качаниях дистанционной защиты // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2024. № 6 (105). С. 59–68. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.6.6>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 09.10.2024;

одобрена после рецензирования 12.11.2024;

принята к публикации 18.11.2024.

Research article

TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF ASYMMETRIC TRACTION LOAD ON THE CHOICE OF THE RESPONSE PARAMETERS OF BLOCKING DURING OSCILLATIONS OF DISTANCE PROTECTION

Vladimir I. Nagay^{1*}, Alexander V. Ukraintsev², Boris E. Dynkin³,
Alexander S. Zasyepkin⁴, Pavel S. Kireev⁵

^{1,2,3,4,5} Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk (132, Prosveshcheniya str., Novocherkassk, Rostov Region, 346428, Russian Federation)

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 zasandzas@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2985-4619>

⁵ kireevps@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8660-0960>

* Corresponding author

Abstract. Introduction. The paper considers the problem of the influence of asymmetric traction load (ATL) on the functioning of relay protection, in particular, blocking during swings (BD) of distance protection (DP). Goal. The paper aims to clarify the choice of parameters for the response of measuring elements (ME) of the negative sequence current (NSC) (and its increment) of BD DP in the presence of traction substations in the electric network. **Materials and methods.** The study is based on the analysis of the modes of electric networks of external traction power supply. **Results and discussion.** The work shows the need to take into account the NSC component caused by the ATL when choosing the parameters of the MI NSC. **Conclusion.** Based on the results of the conducted study, it can be noted that the TOPs caused by the TNG may exceed the negative sequence unbalance currents generated by oscillations (asynchronous mode), which requires their consideration when selecting the response parameters of the BC DZ protection of overhead lines.

Keywords: blocking during oscillations of distance protection, measuring element of the negative sequence current, relay protection, traction load

For citation: Nagay VI, Ukraintsev AV, Dynkin BE, Zasyepkin AS, Kireev PS. Taking into account the influence of asymmetric traction load on the choice of the response parameters of blocking during oscillations of distance protection. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2024;6(105):59-68. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.6.6>

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

The article was submitted 09.10.2024;

approved after reviewing 12.11.2024;

accepted for publication 18.11.2024.

Введение / Introduction. В качестве резервных защит воздушных линий (ВЛ) нашли широкое применение дистанционные защиты (ДЗ), уставки срабатывания которых зависят не только от параметров защищаемой сети, но и от возможных режимов, например, от нагрузочных режимов, режимов качаний и асинхронных режимов. Дистанционные защиты воздушных линий имеют несомненное преимущество перед токовыми защитами по чувствительности, стабильности характеристик при изменении параметров защищаемой сети, но при этом требуют обязательного включения в свой состав блокировки при качаниях (БК) и блокировки при неисправностях в цепях напряжения (БНН), обеспечивающих их правильное функционирование в режимах качаний (асинхронном режиме) и неисправностях в цепях напряжения. В настоящее время сформировалось два основных подхода в распознавании быстротекущих процессов при коротких замыканиях (КЗ) и относительно медленных процессов при качаниях и асинхронном режиме (АР): по наличию несимметрии токов и напряжений и по скорости изменения электрических величин, например, по приращению токов прямой и / или обратной последовательности или же по скорости изменения сопротивления [1]. В частности, одним из влияющих на чувствительность измерительных органов (ИО) тока обратной последовательности (ТОП) БК факторов является несимметричная тяговая нагрузка (ТНГ) железнодорожного транспорта, влияние которой рассматривается ниже.

Материалы и методы исследований / Materials and methods of research. В состав БК входят по два пусковых измерительных органа (ПИО) тока прямой и обратной последовательности и их приращений: один чувствительный, а второй – грубый. Чувствительный ИО необходимо отстраивать от наброса нагрузки, а грубый обеспечивает повторный пуск ДЗ при возникновении КЗ в защищаемой зоне. ПИО БК данного типа реагируют на приращение первой гармоники тока DI , измеренное через n периодов: $DI = IT(n + 1) - IT(n)$, где $T(n)$ – номер отсчёта тока на n -ном периоде промышленной частоты [1, 2].

При скачкообразном изменении вынужденной составляющей тока, например, при КЗ, значение тока изменяется за один период от тока нагрузки до тока КЗ, а при плавном изменении тока, например, при качаниях или АР, скорость изменения тока DI / dt зависит не только от амплитуды тока, но и от периода качаний или АР [1–3]. При наличии в электрической сети тяговых подстанций необходимо учитывать возможность излишнего срабатывания ПИО как в стационарном режиме, так и при коммутациях в системах тягового электроснабжения (ТЭС).

Уставка чувствительного ПИО БК $DI_{2чув}$ в настоящее время выбирается по наихудшему из условий.

1. Отстройки от тока небаланса обратной последовательности при максимальном токе рабочего режима с учётом АР [1]. Основной составляющей ТОП $I_{2нб}$ является погрешность измерительных трансформаторов тока (ТТ) ϵ_1 , расчётный ток небаланса обратной последовательности может быть определен без учета погрешности фильтра тока обратной последовательности (ФТОП):

$$I_{2нб\text{ расч}} = I_{\text{махраб}} \cdot \epsilon_1 / 3, \quad (1)$$

где $I_{\text{махраб}}$ – максимальный рабочий ток линии с учётом возможных качаний и АР; ϵ_1 – полная относительная погрешность ТТ.

С учетом составляющей тока небаланса (1) $I_{2нб\text{ расч}}$ уставку чувствительного ПИО приращения ТОП для сетей при отсутствии несимметричной нагрузки, в частности ТНГ, рекомендуется определять по соотношению

$$DI_{2нб\text{ расч}} \geq k_{\text{зап}} \cdot I_{2нб\text{ расч}} / (k_{\text{возв}} \cdot k_{\text{ТТ}}) \quad (2)$$

где $k_{\text{зап}} = 1,3$ – коэффициент запаса; $I_{2нб\text{ расч}}$ – расчётный ток небаланса обратной последовательности; $k_{\text{возв}} = 0,95$ – коэффициент возврата; $k_{\text{ТТ}}$ – коэффициент трансформации измерительного ТТ.

2. При наличии близкой тяговой нагрузки, влияющей на ток воздушной линии, соответствующая расчетная составляющая уставки будет равна

$$DI_{2\text{ расч ТГ}} \geq k_{\text{зап}} \cdot \Delta I_{2\text{ max}} / k_{\text{ТТ}}, \quad (3)$$

где $\Delta I_{2\text{ max}}$ – максимальный наблюдаемый или расчётный наброс ТОП.

Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion. Составляющая ТОП $\Delta I_{2\text{ max}}$, обусловленная тяговой нагрузкой, зависит не только от ее мощности, но и от схемы включения тяговых трансформаторов, использования способов симметрирования и т. д. Единичная мощность трансформаторов тяговой подстанции, как правило, составляет 40 МВА и реже 25 МВА (рис. 1). При этом на тяговой подстанции, установлено, как правило, два трансформатора одинаковой мощности [4–6]. На рис. 1 условно изображен один трансформатор, а тяговая подстанция может подключаться как к шинам левой и правой систем, так и на ответвлении воздушной линии (или в рассечку ВЛ, т. е. являться промежуточной подстанцией). При этом возможно одновременное подключение всех трех подстанций с соблюдением схем симметрирования и фазировки, исключающих протекание уравнивающих токов между тяговыми подстанциями.

Максимальную величину тока тягового трансформатора $T1$ I_{T1} можно определить по его номинальной мощности, а величина ТОП $I_{2\text{ ТГ}}$ соответственно определяется с учетом наличия симметричной общепромышленной нагрузки и загрузки левого и правого плеч питания контактной сети, т. е. зависящей от величины коэффициента несимметрии $a1$ [6, 7]. Коэффициент несимметрии $a1$, отражающий отношение токов обратной и прямой последовательности на стороне

высшего напряжения трансформатора тяговой подстанции, определяется отношением фазных токов левого $I_{\text{флп}}$ и правого $I_{\text{фпп}}$ плеч $n=I_{\text{флп}}/I_{\text{фпп}}$, питающих соответствующие межподстанционные зоны железной дороги, а также отношением величины тока общепромышленной нагрузки $I_{\text{пр}}$ к току правого плеча $I_{\text{фпп}}$ тяговой нагрузки $m=I_{\text{пр}}/I_{\text{фпп}}$, именуемой на тяговой подстанции районной нагрузкой.

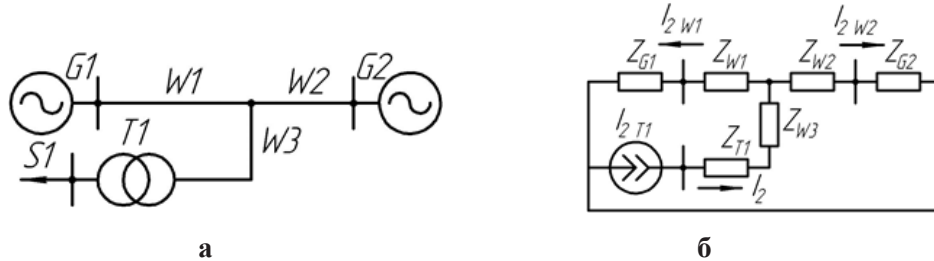


Рис. 1. Поясняющая схема питания тяговой подстанции от одиночной транзитной линии (а), и ее схема замещения для обратной последовательности (б) / Fig. 1. Explanatory diagram of the power supply of a traction substation from a single transit line (a), and its equivalent circuit for the negative sequence (b)

Общее выражение для определения данного коэффициента для трехфазных трансформаторов можно представить выражением [6, 7]

$$a1 = \sqrt{(n^2 - n + 1)/[(1 + n)^2 + 3m(3m + 2n + 1)]}. \quad (4)$$

Соотношение токов обратной последовательности несимметричной тяговой нагрузки ΔI_2 и тока небаланса, обусловленного качаниями (или АР) ΔI_2 ^{мах тяга} ^{мах кач нб} оценим коэффициентом $\beta = \Delta I_2^{\text{мах тяга}} / \Delta I_2^{\text{мах кач нб}}$. Если данный коэффициент менее 0,1 (т. е. 10 %), то для релейной защиты можно увеличить коэффициент запаса на 10 %. Иллюстрацией зависимостей коэффициента несимметрии $a1$ (4) является рис. 2. При этом необходимо отметить: загрузка только одного плеча увеличивает уровень несимметрии, но абсолютные значения токов прямой и обратной последовательностей будут существенно меньше номинального значения тока тягового трансформатора.

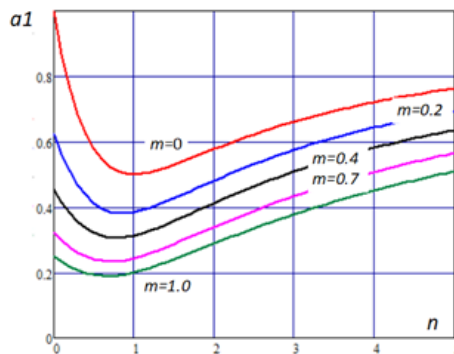


Рис 2. Зависимости коэффициента несимметрии токов трансформатора, питающего тяговую нагрузку / Fig.2. Dependencies of the coefficient of asymmetry of currents of the transformer supplying the traction load

Для расчета уставок релейной защиты необходимо иметь информацию о токе в ее цепях [8–10], что требует определения коэффициентов токораспределения в конкретной схеме электрической сети. Токи по концам защищаемой линии будут равны для рис. 1

$$I_{2w1} = I_{2T1} \cdot kt1 \text{ и } I_{2w2} = I_{2T1} \cdot kt2,$$

где $kt1, kt2$ – коэффициенты токораспределения токов (схема на рис. 1б)

$$kt1 = \left| \frac{(Z_{W2} + Z_{G2})}{(Z_{W1} + Z_{G1} + Z_{W2} + Z_{G2})} \right|, \quad (5)$$

$$kt2 = \left| \frac{(Z_{W1} + Z_{G1})}{(Z_{W1} + Z_{G1} + Z_{W2} + Z_{G2})} \right|. \quad (6)$$

С учетом возможного перегруза трансформатора тяговой подстанции до 140 % или включением двух трансформаторов параллельно, загруженных до $0,7S_{\text{номТ1}}$, необходимо ввести соответствующий коэффициент $kt1p$ отражающий увеличение мощности тяговой нагрузки подстанции и соответственно ТОП.

Выражения для определения токов обратной последовательности по ВЛ $W1 \dot{I}_{2w1}$ и $W2 \dot{I}_{2w2}$, обусловленных тяговой нагрузкой, с учетом степени несимметрии и (5), (6) можно описать выражениями:

$$\dot{I}_{2w1} = I_{1T1} \cdot kt1 \cdot a1 \cdot e^{j\psi^2}; \quad \dot{I}_{2w2} = I_{1T1} \cdot kt2 \cdot a1 \cdot e^{j\psi^2},$$

где I_{1T1} – ток прямой последовательности тягового трансформатора; $a1$ – соотношение токов обратной и прямой последовательностей тяговой подстанции (принимается равным 1,0 и может быть уточнено для конкретной электрической сети внешнего электроснабжения (см. зависимости на рис. 2); ψ^2 – аргумент вектора тока обратной последовательности по отношению к вектору тока прямой последовательности. В случае недостаточной чувствительности ПИО тока обратной последовательности возможно уменьшение коэффициента до $a1=0,5$ с последующим уточнением значения ТОП.

Задаввшись следующими параметрами защищаемой электрической сети: $E1=110000$ кВ, $E2=E1$, $|Z_{\text{нгТ1}}|=10Z_{T1}$, $Z_{G1}=6$ Ом, $Z_{G2}=8$ Ом, $Z_{w1}=8$ Ом, $Z_{w2}=12$ Ом, $Z_{T1}=36$ Ом, можно определить составляющие тока небаланса ИО, контролирующие токи обратной последовательности, обусловленные качаниями (АР) и несимметричной тяговой нагрузкой.

Для рассматриваемых параметров электроэнергетических систем, линий, мощности трансформатора тяговой подстанции отношение тока обратной последовательности от несимметричной тяговой нагрузки $\Delta I_{2 \text{ max тяга}}=176$ А и тока небаланса обратной последовательности из-за погрешности ТТ (при этом выполнено допущение неучёта погрешности фильтров симметричных составляющих и устройств РЗ) $\Delta I_{2 \text{ max кач нб}}=0,03 \cdot 3736=112$ А, возникающего при максимальном токе асинхронного режима $\Delta I_{2 \text{ max кач нб}}$, $\beta=\Delta I_{2 \text{ max тяга}}/\Delta I_{2 \text{ max кач нб}}$ достигает 157 %. Следовательно, необходим учет составляющей тока обратной последовательности тяговой нагрузки.

Предлагается ток срабатывания ИО ТОП выбирать не по максимальному значению одного из расчетных условий, а как сумму тока небаланса, возникающего при качаниях (АР), с наложением максимальной составляющей тока обратной последовательности несимметричной тяговой нагрузки. Режим наложения тяговой нагрузки на режим качаний и АР весьма вероятен, так как отключение электровозов происходит только при значительном снижении напряжения (снижении напряжения до 60 % от номинального значения), т. е. нахождении центра качаний в середине межподстанционной зоны. Исходя из вышеизложенного рекомендуется выбирать параметры срабатывания чувствительного органа по следующему выражению:

$$DI_{2\text{чув}} \geq k_{\text{зап}} * (0,046I_{\text{max раб}} + kt1p \cdot kt1 \cdot a1 \cdot I_T)/(k_{\text{возв}} \cdot k_{\text{ТТ}}),$$

где $kt1p$ – коэффициент, отражающий увеличение мощности тяговой нагрузки подстанции при включенном одном трансформатора (кратность перегрузки составляет 1,4 в данном случае) и соответственно тока обратной последовательности. Максимальное значение данного коэффициента должно быть равно $kt1p=1,4$; $I_{\text{max раб}}$ – максимальный ток качаний (АР); $kt1$ – коэффициент токораспределения; $a1$ – коэффициент несимметрии токов тяговой подстанции; I_T – номинальный ток трансформатора тяговой подстанции; ψ_2 – аргумент тока обратной последовательности; $k_{\text{зап}}=1,3$ – коэффициент запаса; $k_{\text{возв}}=0,95$ – коэффициент возврата; $k_{\text{ТТ}}$ – коэффициент трансформации измерительного трансформатора тока.

При включении двух трансформаторов параллельно, нагруженных до $0,7S_{\text{ном}} T1$, коэффициент $kt1p=1,4$.

При наличии близкой тяговой нагрузки, влияющей на ток линии, с плавным пуском локомотивов:

$$DI_{2\text{чув}} \geq k_{\text{зап}} \cdot kt1 \cdot a1 \cdot \Delta\alpha_2 \cdot I_T / (k \cdot k_{\text{возв}} \cdot k_{\text{тт}})$$

где $\Delta\alpha_2$ – доля коммутируемой нагрузки от общей нагрузки тяговой подстанции (как правило, $\Delta\alpha_2 \leq 0,5$).

Для проверки полученных результатов была разработана математическая модель в среде визуального моделирования *Simulink MATLAB*. Произведено моделирование внешней электрической сети, обеспечивающей питание тяговых подстанций *E, F, G*. Контактная электрическая сеть состоит из четырех участков, разделенных нейтральными вставками *NV1, NV2, NV3* (рис.3). Два средних участка контактной сети имеют двустороннее питание от тяговых подстанций. Два крайних участка условно моделируются с питанием с одной стороны.

В модели на каждый участок включена нагрузка, имитирующая работающие эквивалентные электровазы суммарной мощностью до 35 МВт на каждый средний участок и по 17,5 МВт на крайние участки. Также моделируется переключение одного электроваза с крайнего левого участка до крайнего правого с прохождением нейтральных вставок. Мощность электроваза принята 10 МВт. В итоге в процессе моделирования имеется возможность наблюдать изменения протекающих через тяговые подстанции токов и величин напряжений, происходящие как при переходе питания электроваза с одного участка контактной сети на другой и на последующие. В модель включены блоки выделения величины обратной последовательности в токах на стороне 110 кВ каждой из тяговых подстанций, в начале и в конце питающих линий 110 кВ.

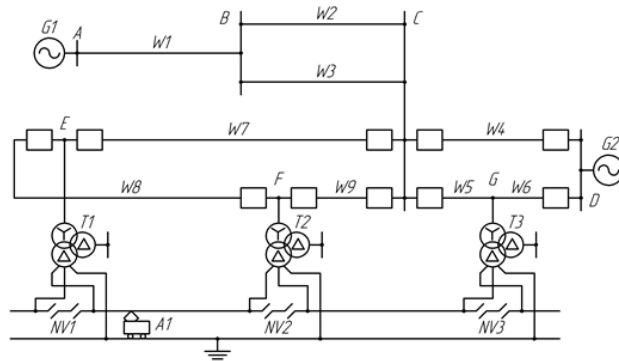


Рис. 3. Поясняющая схема электрических сетей внешнего и тягового электроснабжения /

Fig. 3. Explanatory diagram of electrical networks of external and traction power supply

Исходные параметры моделируемого оборудования следующие: системы *G1* и *G2* – напряжение $U_s1 = 115$ кВ и их внутреннее сопротивление $r_s1 = 0,5929$ Ом, $x_s1 = 12,56$ Ом; трансформаторы тяговых подстанций, подключенных к линии, имеют для обмотки стороны высшего напряжения: номинальное напряжение $U = 110$ кВ, $U_k = 12$ %. Схема соединения обмоток $Y / \Delta - 11$, номинальная мощность трансформаторов на подстанциях *E* и *F* $S_t = 40$ МВА и на подстанции *G* $S_t = 25$ МВА. Сопротивления ВЛ: *C-E* $r = 9,15$ Ом, $x = 25,6$ Ом; *E-F* $r = 5,775$ Ом, $x = 16,18$ Ом; *C-G* $r = 3,45$ Ом, $x = 9,64$ Ом; участок линии *D-G* $r = 9,2$ Ом, $x = 19,3$ Ом; *C-D* $r = 16,2$ Ом, $x = 34,0$ Ом. Эквивалентное сопротивление от подстанции *A* до подстанции *C* $r = 33$ Ом, $x = 65,3$ Ом. Каждый участок контактной сети с двухсторонним питанием представлен двумя блоками полного сопротивления с параметрами $r_k = 0,116$ Ом/км, $x_k = 0,55$ Ом/км. Длины участков: *E-F* – 38,5 км; *F-G* – 39 км. Смежные участки условно приняты по 20 км.

Модель также позволяет выделять скорость приращения токов прямой и обратной последовательности за период промышленной частоты на питающей линии или на любом участке сети. Также возможно выделение приращения полного сопротивления и изменение аргумента (фазового угла) комплекса полного сопротивления за один период промышленной частоты.

Для уменьшения объема вычислений на математической модели интервалы времени прохождения электровозом участков контактной сети и нейтральных вставок искусственно сокращены. Движение происходит от левого плеча трансформатора Т1 до правого плеча трансформатора Т3 (всего 6 участков, отраженных на временных диаграммах на приведенных ниже рисунках). Интервал переключения условно принят 0,3 сек, а временные промежутки между отключением и последующим включением на новом участке условно приняты менее 0,05 сек.

Моделируется режим АР между двумя питающими центрами: подстанцией А (50 Гц) и подстанцией D (48 Гц). Данный режим накладывается на нормальный режим работы тяговых подстанций *E, F, G*. Нагрузка тяговых подстанций моделируется нагрузкой в режиме трогания поезда на межподстанционной зоне *E–F* в кольцевом режиме питания тяговых подстанций с дальнейшим проходом нейтральной вставки с отключением поезда от контактной сети и последующим подключением к контактной сети на другой межподстанционной зоне *F–G* с неизменяющейся фоновой тяговой нагрузкой другими электровозами.

На рис. 4 и 5 представлены полученные с помощью математического моделирования временные диаграммы изменения тока обратной последовательности I_2 в различных участках электрической сети в нормальных режимах тяговой нагрузки (рис. 4а и 5а) и в режимах АР между двумя питающими центрами: подстанцией А и подстанцией D с наложением режима тяговой нагрузки (рис. 4б и 5б).

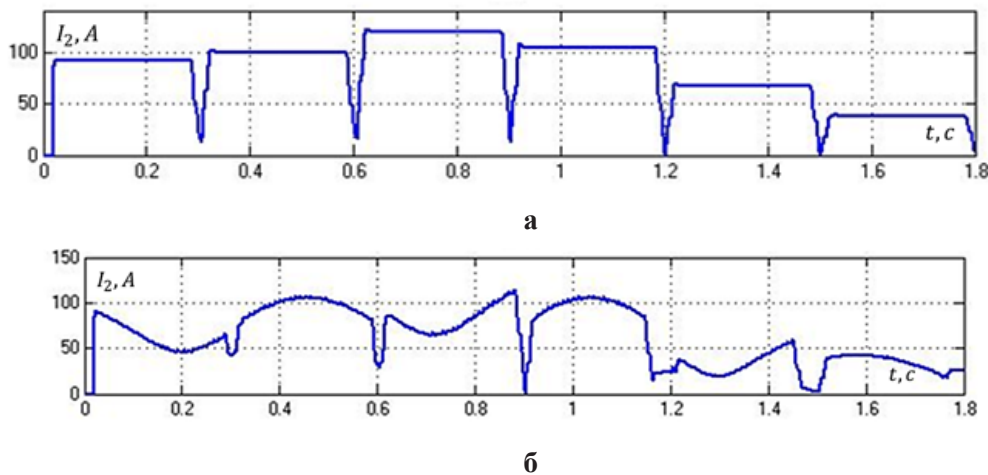
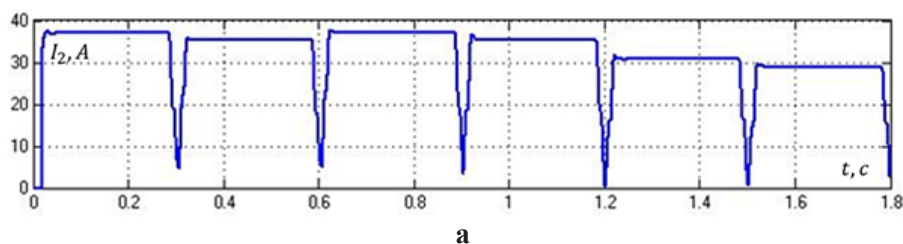


Рис. 4. Токи обратной последовательности по линии со стороны подстанции С в сторону подстанции F в нормальном (а) режиме и в режиме асинхронного хода (б) / Fig. 4. Negative sequence currents along the line from substation C to substation F in normal (a) mode and in asynchronous mode (b)



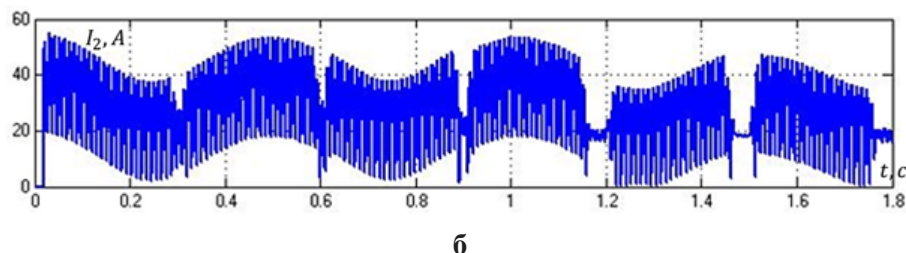


Рис. 5. Токи обратной последовательности по линии со стороны центра питания А в сторону подстанции С в нормальном (а) режиме и в режиме АР (б) / Fig. 5. Negative sequence currents along the line from power supply center A towards substation C in normal (a) mode and in AR mode (b)

Анализ режимов свидетельствует о значительной несимметрии, обусловленной тяговой нагрузкой, требующемся обязательном учете данной составляющей ТОП и наложением нагрузочной составляющей ТНГ на ток качаний, что предполагает отстройку ПИО не от максимальной составляющей небаланса, а от суммы этих составляющих ТОП.

Заключение / Conclusion. Анализ методик расчета параметров пусковых измерительных органов тока обратной последовательности блокировки при качаниях дистанционных защит воздушных линий, питающих тяговые подстанции с несимметричной тяговой нагрузкой, режимов данных электрических сетей показал необходимость учета их влияния, а также позволил предложить уточненные расчетные выражения для определения уставок ПИО ТОП как сумму составляющих небаланса тока обратной последовательности в режиме качаний (АР) и максимального тока обратной последовательности тяговой нагрузки, определяемого с учетом схемных и режимных факторов схем внешнего и тягового электроснабжения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Малый А. П., Дони Н. А., Шурупов А. А. Зависимость уставки блокировки дистанционной защиты при качаниях по скорости изменения сопротивления от параметров энергосистемы // Цифровая электротехника: проблемы и достижения: сборник научных трудов НПП «ЭКРА». Выпуск III. Чебоксары: РИЦ «СРЗАУ», 2014. 104 с.
2. Петров С. Я. Предотвращение ложного срабатывания защит при качаниях // Электроэнергия. 2012. № 2 (11).
3. Лямец Ю. Я., Воронов П. И., Мартынов М. В. Распознающая способность адаптивной дистанционной защиты линии электропередачи // Электричество. 2015. № 10. С. 13–20.
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 г., N 330. Дата введения 2014-12-01. Введен впервые.
6. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. 528 с.
7. Тамазов А. И. Несимметрия токов и напряжений, вызываемая однофазными тяговыми нагрузками. М.: Транспорт, 1965. 235 с.
8. Фигурнов Е. П. О влиянии нагрузки электровозов со статическими преобразователями на релейную защиту фидеров / Ростовский-на-Дону ин-т инж. ж/д. тр-та. // Труды института. 1967. Вып. 71. С. 62–85.
9. Фигурнов Е. П. Релейная защита устройств электроснабжения железных дорог. М.: Транспорт, 2006. 215 с.
10. Дынькин Б. Е. Защита тяговых сетей переменного тока при разземлении опор контактной сети. Хабаровск: ДВГУПС, 1999. 170 с.

REFERENCES

1. Maly AP, Doni NA, Shurupov AA. Dependence of the distance protection blocking setting during power swings on the resistance change rate from the power system parameters. Digital electrical engineering:

- problems and achievements: Collection of scientific papers of NPP “EKRA”. Issue III. Cheboksary: RIC “SRZAU”; 2014. 104 p. (In Russ.).
2. Petrov SYa. Prevention of false tripping of protection during power swings. Electric power. 2012;2(11). (In Russ.).
 3. Lyamets YuYa, Voronov PI, Martynov MV. Recognizing ability of adaptive distance protection of a power transmission line. Electricity. 2015;(10):13-20. (In Russ.).
 4. GOST R57670 - 2017 Traction power supply systems for railways. Methodology for selecting the main parameters. Moscow: Standartinform; 2017. (In Russ.).
 5. SP 224.1326000.2014 Traction power supply for railways. APPROVED by the Ministry of Transport of Russia dated 02.12.2014. No. 330. Date of introduction 2014-12-01. Introduced for the first time. (In Russ.).
 6. Marquardt KG. Power supply of electrified railways. Moscow: Transport; 1982. 528 p. (In Russ.).
 7. Tamazov AI. Asymmetry of currents and voltages caused by single-phase traction loads. Moscow: Transport; 1965. 235 p. (In Russ.).
 8. Figurnov EP. On the influence of the load of electric locomotives with static converters on the relay protection of feeders. Rostov-on-Don Institute of Railway Engineering transport. Proceedings of the Institute. 1967;(71):62-85. (In Russ.).
 9. Figurnov EP. Relay protection of railway power supply devices. Moscow: Transport; 2006. 215 p. (In Russ.).
 10. Dynkin BE. Protection of AC traction networks during ungrounding of contact network supports. Khabarovsk: DVGUPS; 1999. 170 p. (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, Scopus ID: 56245776700, Researcher ID: LSK-0476-2024
- Александр Сергеевич Засыпкин** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электрических станций и электроэнергетических систем Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова, Researcher ID: LSJ-8094-2024.
- 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.

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.
- Борис Евгеньевич Дынькин.** Постановка задачи моделирования, описание и характеристики объекта исследования, анализ полученных данных.
- Александр Сергеевич Засыпкин.** Интерпретация и анализ полученных результатов, определение режимов моделирования электрических сетей внешнего и тягового электроснабжения.
- Павел Сергеевич Киреев.** Выполнение математического моделирования, оформление результатов исследования, анализ результатов моделирования, дизайн материалов статьи.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

- Vladimir I. Nagay** – Dr. Sci. (Tech.), Professor, Professor of the Department of Electric Power Plants and Electric Power Systems, South-Russian State Polytechnical University (NPI) named after M. I. Platov, Scopus ID: 56229983300, Researcher ID: E-4282-2015.
- Alexander V. Ukraintsev** – Senior Lecturer of the Department of Electric Power Plants and Electric Power Systems, South-Russian State Polytechnical University (NPI) named after M. I. Platov, Scopus ID: 56239079600, Researcher ID: P-9286-2015.

Boris E. Dynkin – Dr. Sci. (Tech.), Professor, Professor of the Department of Electric Power Plants and Electric Power Systems, South-Russian State Polytechnical University (NPI) named after M. I. Platov, Scopus ID: 56245776700, Researcher ID: LSK-0476-2024.

Alexander S. Zasyplin – Dr. Sci. (Tech.), Professor, Professor of the Department of Electric Power Plants and Electric Power Systems, South-Russian State Polytechnical University (NPI) named after M. I. Platov, Researcher ID: LSJ-8094-2024.

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

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Vladimir I. Nagay. Conducting the study – setting the task, 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 forming its final version, developing a mathematical model, interpreting and analyzing the obtained data.

Boris E. Dynkin. Setting the modeling problem, describing and characterizing the object of study, analyzing the obtained data.

Alexander S. Zasyplin. Interpretation and analysis of the obtained results, determining the modes of modeling electrical networks of external and traction power supply.

Pavel S. Kireev. Performing mathematical modeling, presenting the research results, analyzing the modeling results, designing the article materials.