
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.331:621.314.57

EDN EWTBSF

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЛИЯНИЙ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ, ОСНАЩЕННЫХ СРЕДСТВАМИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ, НА ТРУБОПРОВОДЫ

А.В. Крюков

ORCID: 0000-0001-6543-1790 e-mail: and_kryukov@mail.ru

Иркутский государственный университет путей сообщения

Иркутск, Россия

Иркутский национальный исследовательский технический университет

*Иркутск, Россия***К.В. Суслов**

ORCID: 0000-0003-0484-2857 e-mail: dr.souslov@yandex.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

Иркутский национальный исследовательский технический университет

*Иркутск, Россия***А.Е. Крюков**

ORCID: 0000-0003-3272-5738 e-mail: appleforevor@mail.ru

Иркутский национальный исследовательский технический университет

Иркутск, Россия

Задачей исследования является разработка цифровых моделей, обеспечивающих вычисление электромагнитных влияний тяговых сетей (ТС) на трубопроводы. Предполагается, что система электроснабжения (СЭС), в состав которой входят данные ТС, оснащена средствами компенсации реактивной мощности (КРМ). Рассмотрены установки поперечного и продольного подключения. Для реализации моделей использованы методы определения режимов СЭС в фазных координатах. Для моделирования применялся программный комплекс *Fazonord*, версия 5.3.4.1 – 2024. Рассмотрена СЭС, включающая внешнюю сеть, образованную четырьмя линиями электропередачи 220 кВ, а также три тяговых подстанции, питающих контактные подвески двухпутного участка. В состав модели одной межподстанционной зоны включен трубопровод, расположенный параллельно трассе дороги на расстоянии в 50 м. Результаты моделирования показали, что средства КРМ заметно влияют на уровни

наведенных напряжений на трубопроводе. По сравнению с СЭС, не имеющей установок компенсации, максимумы этих параметров в отдельных точках трубы изменяются в пределах от -14 до 31 %. Предлагаемая методика является универсальной и может применяться для ТС различного конструктивного исполнения, включая перспективные ТС повышенного напряжения.

Ключевые слова: моделирование, тяговые сети, установки компенсации реактивной мощности, электромагнитные влияния на трубопроводы.

Для цитирования: Крюков А.В., Суслов К.В., Крюков А.Е. Моделирование электромагнитных влияний тяговых сетей, оснащенных средствами компенсации реактивной мощности, на трубопроводы // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 3. С. 65-81. EDN: EWTBSF

MODELING OF ELECTROMAGNETIC INFLUENCES OF TRACTION NETWORKS EQUIPPED WITH REACTIVE POWER COMPENSATION MEANS ON PIPELINES

A.V. Kryukov

ORCID: 0000-0001-6543-1790 e-mail: and_kryukov@mail.ru

Irkutsk State Transport University

Irkutsk, Russia

Irkutsk National Research Technical University

Irkutsk, Russia

K.V. Suslov

ORCID: 0000-0003-0484-2857 e-mail: dr.souslov@yandex.ru

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

Moscow, Russia

Irkutsk National Research Technical University

Irkutsk, Russia

A.E. Kryukov

ORCID: 0000-0003-3272-5738 e-mail: appleforevor@mail.ru

Irkutsk National Research Technical University

Irkutsk, Russia

Abstract. This research presents digital models for calculation of the electromagnetic influences of traction networks on pipelines. It was assumed that the power supply system, which includes these networks, is equipped with means of reactive power compensation. Shunt and series reactive power compensation devices were considered. Methods for determining modes in phase coordinates were used. The Fazonord ver. 5.3.4.1 - 2024 was used for modeling. A power supply system with an external network formed by

four 220 kV power lines, as well as three traction substations that supply catenary suspensions of a double-track section was considered. The model of one intersubstation zone included a pipeline located parallel to the road route at a distance of fifty meters. The simulation results showed that compensation devices have a noticeable effect on the levels of induced voltages on the pipeline. Compared to a power supply system that does not have reactive power compensation devices, the maximum induced voltages at individual points of the pipe vary from -14 to 31 %. The proposed methodology is universal and can be used for traction networks of various designs, as well as promising high-voltage traction networks.

Key words: electromagnetic influences on pipelines, modeling, reactive power compensation, traction networks.

For citation: A.V. Kryukov, K.V. Suslov and A.E. Kryukov, “Modeling of electromagnetic influences of traction networks equipped with reactive power compensation means on pipelines”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 65-81, 2024. EDN: EWTBSF

I. Введение

Вблизи трасс электрифицированных железных дорог могут располагаться протяженные металлические конструкции, например, стальные трубопроводы. За счет электромагнитных влияний (ЭМВ) тяговых сетей (ТС) на деталях этих сооружений могут появляться наведенные напряжения, опасные для персонала и негативно влияющие на системы защиты от электрохимической коррозии [1, 2]. Вопросам моделирования ЭМВ, создаваемых ТС и линиями электропередачи (ЛЭП), посвящено большое число работ. Алгоритмы аналитического расчета ЭМВ, применимые для относительно простых схем ТС, представлены в [3, 4]. Результаты анализа подходов к оценке ЭМВ ЛЭП переменного тока на подземные трубопроводы приведены в [5]. Вопросы защиты труб от воздействия наведенного переменного тока рассмотрены в [6]. Оценка влияния воздушных ЛЭП на стальные конструкции дана в [7]. Определению электрических величин в ТС и подземных трубах, находящихся под воздействием блуждающих токов, посвящена [8]. Результаты расчета наведенных напряжений на трубопровод представлены в [9]. Влияние ЛЭП высокого напряжения на распространение блуждающих токов от ТС проанализировано в [10]. Исследованию ЭМВ ЛЭП 750 кВ на несколько подземных труб посвящена работа [11]. Задача определения взаимного ЭМВ между ЛЭП и трубопроводом решена в [12, 13]. Детальное исследование помех переменного тока на металлических трубах, создаваемых двухцепными ЛЭП выполнено в [14]. Задача снижения ЭМВ на заглубленные трубы, проложенные вблизи воздушной ЛЭП решена в [15]. ЭМВ трехфазного кабеля, примыкающего к трубопроводу, изучалось в [16]. ЭМВ ЛЭП на подземные трубы проанализированы в [17]. Оценка влияния структуры грунта на покрытия заглубленного трубопровода дана в

[18]. Расчеты наведенных напряжений на подземных трубах при однофазных замыканиях на воздушных ЛЭП приведены в [19]. Вопросы моделирования влияний ЛЭП на трубопроводы проанализированы в [20, 21]. Ускоренные алгоритмы расчета ЭМВ ЛЭП на трубы описаны в [22]. Задача определения влияния повреждений изоляции на наведенные напряжения в трубопроводах решена в [23].

Анализ описанных выше публикаций дает возможность сделать следующие выводы:

- задача моделирования ЭМВ ЛЭП и ТС является актуальной, что связано с необходимостью обеспечения безопасности персонала и снижением негативных воздействий наведенных токов на системы защиты от электрохимической коррозии;
- в большинстве работ по определению ЭМВ на трубы рассмотрены воздействия трехфазных ЛЭП;
- универсальный подход к вычислению ЭМВ ТС в указанных работах не реализован.

Кроме того, в ТС переменного тока широко применяются средства компенсации реактивной мощности [24–27], которые могут изменять уровни наведенных напряжений и токов, протекающих по трубам. Задача учета влияний КРМ в полном объеме не решена. Ниже представлены результаты разработки цифровых моделей для определения ЭМВ ТС на трубопроводы с корректным учетом установок КРМ.

II. Методика и результаты моделирования

Для определения ЭМВ ТС использовались методы и алгоритмы моделирования режимов систем тягового электроснабжения (СТЭ), предложенные в [28, 29] и реализованные в программном комплексе *Fazonord* версии 5.3.4.1 – 2024. Рассматривались установки поперечной компенсации (УКРМ), установленные на тяговой подстанции (ТП) и посту секционирования (ПС) (рис. 1), а также продольной компенсации (УПК) – в рельсовом фидере и междупутное компенсирующее устройство (КУ) (рис. 2).

Моделирование проводилось для СТЭ (рис. 3), имеющей в своем составе: внешнюю сеть с четырьмя ЛЭП 220 кВ и три ТП, питающих контактные подвески двухпутного участка. В состав модели одной межподстанционной зоны был включен трубопровод диаметром 250 мм, расположенный параллельно трассе дороги на расстоянии в пятьдесят метров. Учитывалось распределенное заземление трубы с проводимостью 0,05 См/км. Также предполагалось, что по краям участка сооружения имеются стационарные заземлители с сопротивлением растеканию в один Ом. Для наглядности на рис. 3 показана контактная подвеска одного пути.

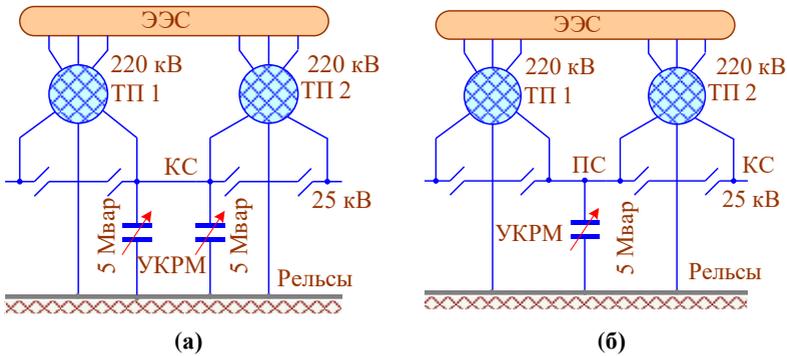


Рис. 1. Схемы включения УКРМ:

на тяговой подстанции (ТП) (а); на посту секционирования (ПС) (б)

Fig. 1. Schematic diagram of the shunt reactive power compensation devices:
on traction substation (a); on sectioning post (b)

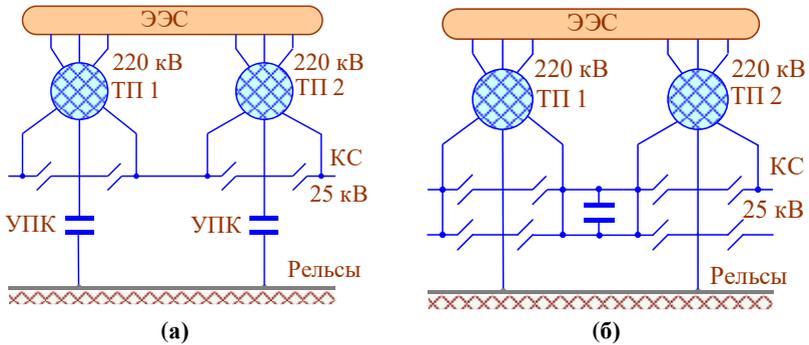


Рис. 2. Схемы включения УПК:

в рельсовом фидере (а); междутутное компенсирующее устройство (б)

Fig. 2. Schematic diagram of the series reactive power compensation devices:
in a rail feeder (a); inter-track compensating device (b)

Часть схемы расчетной модели, соответствующая ТС и трубопроводу, представлена на рис. 4. Рассматривалось движение семи поездов в четном и нечетном направлениях (рис. 5). Массы составов указаны на рис. 6.

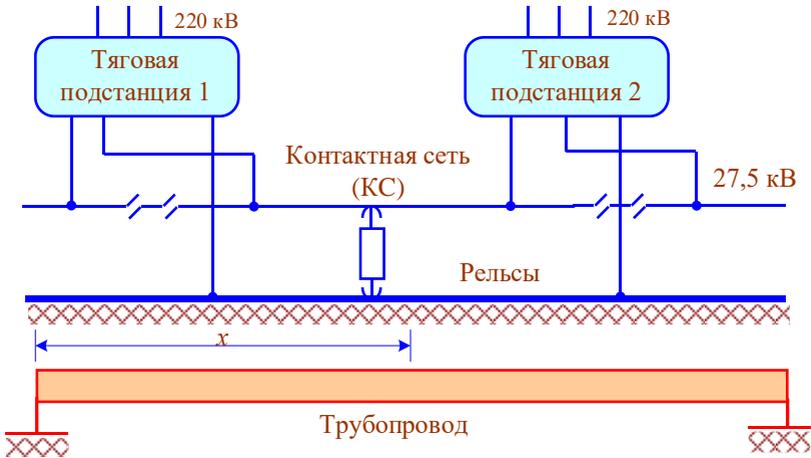


Рис. 3. Схема сближения ТС и трубопровода

Fig. 3. Diagram of the proximity of the traction network and the pipeline

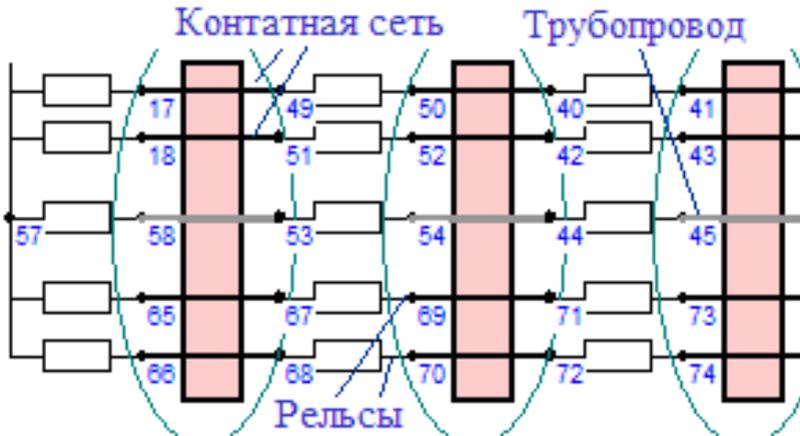


Рис. 4. Часть схемы расчетной модели, соответствующая ТС и трубопроводу

Fig. 4. Part of the calculation model diagram corresponding to the traction network and pipeline

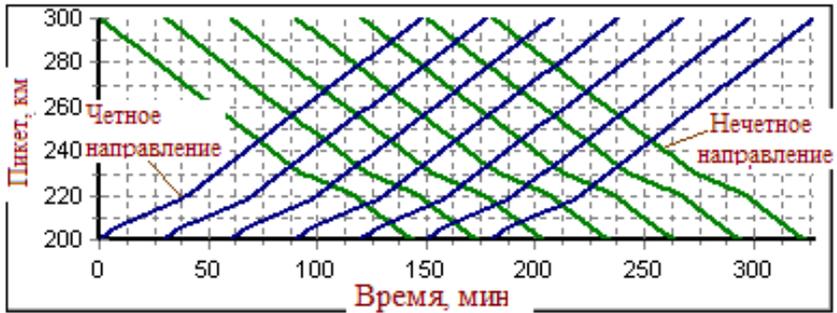


Рис. 5. График движения составов:
пикеты – точки разметки расстояний на железнодорожных линиях

Fig. 5. Train schedule:
pickets – distance marking points on railway lines

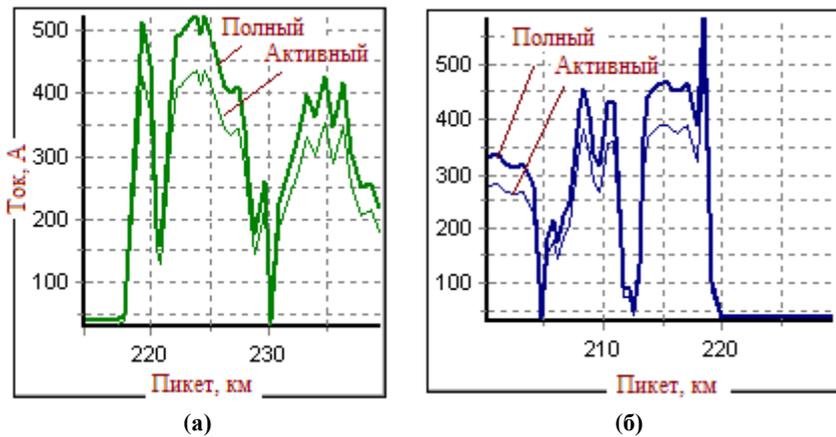


Рис. 6. Токи, потребляемые электровозами:
поезда нечетного направления массой 6300 т (а); то же четного 6000 т (б)

Fig. 6. Currents consumed by electric locomotives:
odd-numbered trains weighing 6300 t (a); the same even 6000 t (b)

Моделирование наведенных напряжений и токов осуществлялось с учетом высших гармоник, генерируемых выпрямительными электровозами [28]; при этом эффективные значения определялись по выражению:

$$U_{\Sigma} = U_1 \sqrt{1 + \left(\frac{k_U}{100}\right)^2}; I_{\Sigma} = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{k_I}{100}\right)^2},$$

где k_U, k_I – суммарные коэффициенты гармоник напряжения и тока.

Результаты моделирования представлены на рис. 7-11 и в табл. 1. На рис. 7 приведена зависимость $U_{\Sigma} = U_{\Sigma}(t)$, полученная для точки, соответствующей координате $x = 20$ км. На рис. 8 и 9 показаны графики $U_1 = U_1(t)$, $I_1 = I_1(t)$, $U_{\Sigma} = U_{\Sigma}(t)$, $I_{\Sigma} = I_{\Sigma}(t)$, отвечающие максимумам соответствующих параметров.

В табл. 1 приведены отличия максимальных значений U_{Σ} и I_{Σ} при использовании установок компенсации от ситуации, в которой они отсутствуют. Указанные параметры проиллюстрированы на рис. 10. На рис. 11 приведены координаты точек максимальных различий U_{Σ} и I_{Σ} .

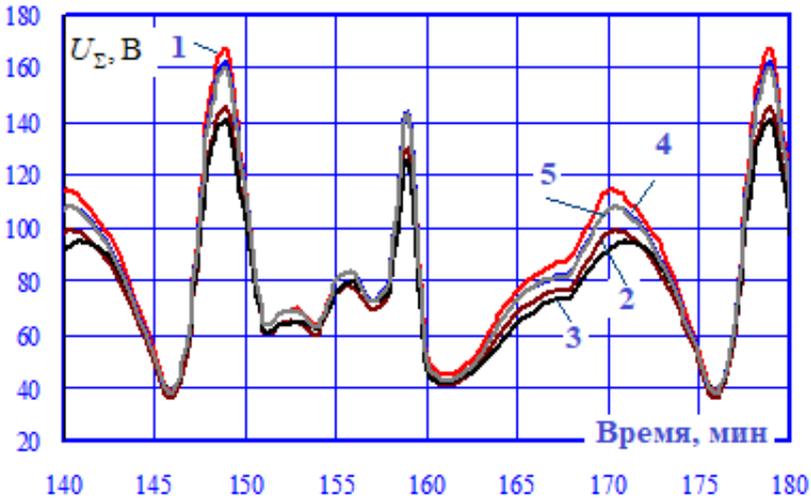


Рис. 7. Изменения наведенных напряжений во времени в точке с координатой $x = 20$ км:

междупутное КУ (1); УКРМ на ТП (2); УКРМ на ПС (3); УПК в рельсовом фидере (4); средства компенсации отсутствуют (5)

Fig. 7. Changes in induced voltages over time at a point $x = 20$ km:
inter-track compensating device (1); shunt compensation device on traction substation (2); shunt compensation device on sectioning post (3); series compensation device in a rail feeder (4); no means of compensation (5)

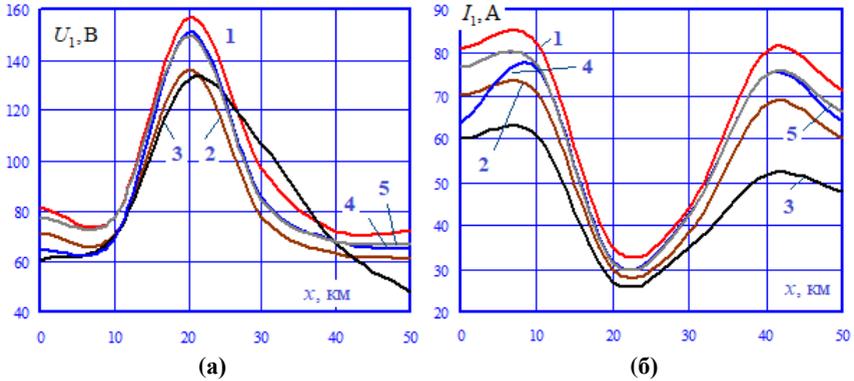


Рис. 8. Зависимости максимальных значений наведенных напряжений (а) и токов (б) основной частоты: обозначения аналогичны рис. 7

Fig. 8. Dependences of the maximum values of induced voltages (a) and currents (b) of the fundamental frequency: legend is similar to fig. 7

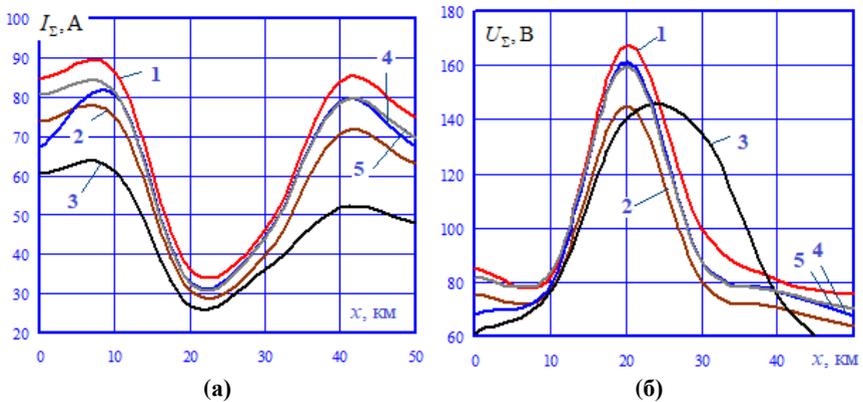


Рис. 9. Зависимости максимальных значений эффективных наведенных напряжений (а) и токов (б) от координаты x : цифровые обозначения аналогичны рис. 7

Fig. 9. Dependences of the maximum values of effective induced voltages (a) and currents (b) on the x coordinate: legend is similar to fig. 7

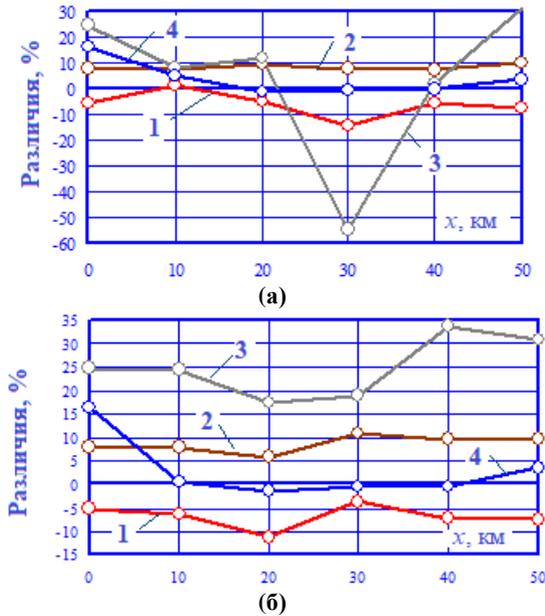


Рис. 10. Отличия максимальных значений U_{Σ} (а) и I_{Σ} (б):
 междупутное КУ (1); УКРМ на ТП (2);
 УКРМ на ПС (3); УПК в рельсовом фидере (4)

Fig. 10. Differences in maximum values of U_{Σ} and I_{Σ} :
 inter-track compensating device (1); shunt compensation device on traction
 substation (2); shunt compensation device on sectioning post (3);
 series compensation device in a rail feeder (4)

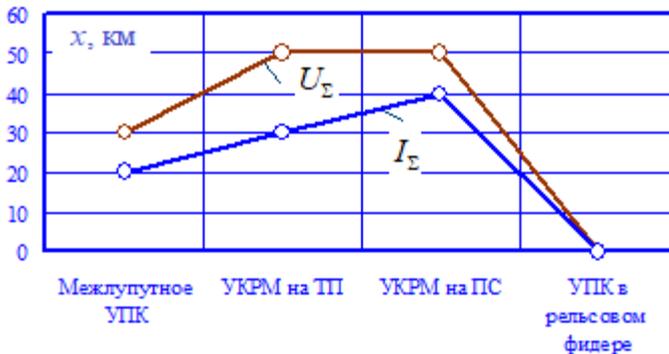


Рис. 12. Координаты точек максимальных различий U_{Σ} и I_{Σ}

Fig. 12. Coordinates of points of maximum differences U_{Σ} and I_{Σ}

Таблица 1.
Отличия максимальных значений U_{Σ} и I_{Σ} при наличии установок компенсации от ситуации, в которой они отсутствуют

Table 1.
Differences between the maximum values of U_{Σ} and I_{Σ} in the presence of reactive compensation devices from the situation in which they are absent

Вид установки	x , км					
	0	10	20	30	40	50
U_{Σ}						
Междупутное КУ	-5,23	1,40	-4,82	-14,30	-5,31	-7,43
УКРМ на ТП	7,99	7,73	9,11	7,95	7,34	9,65
УКРМ на ПС	24,75	8,23	11,88	-54,81	1,92	30,88
УПК в рельсовом фидере	16,33	5,32	-1,09	-0,93	-0,26	3,53
I_{Σ}						
Междупутное КУ	-5,26	-6,41	-11,26	-3,66	-7,10	-7,44
УКРМ на ТП	7,95	7,84	5,88	10,77	9,75	9,63
УКРМ на ПС	24,69	24,62	17,49	18,96	33,76	30,80
УПК в рельсовом фидере	16,31	0,61	-1,25	-0,39	-0,33	3,53

Представленные результаты дают возможность сформулировать следующие выводы:

- наличие установок КРМ приводит к изменению уровней наведенных напряжений на деталях трубопровода (рис. 7, 8а, 9а, 10а и 11) и токов (рис. 8б, 9б, 10б и 11), протекающих по трубе;

- при междупутном УПК в точках с координатами $x = 0, 20, 30$ максимумы U_{Σ} уменьшаются 5... 14 %; в точке $x = 10$ наблюдается рост этого параметра на 1,4 %; I_{Σ} снижается на 4...11 %; следует отметить, что данные установки компенсации не получили распространения, но могут использоваться в ситуациях, когда токи контактных подвесок отдельных путей существенно различаются;

- при УКРМ, установленном на ТП, происходит увеличение U_{Σ} и I_{Σ} на 7...10 и 6...11 % соответственно;

- при УКРМ, размещенном на посту секционирования, напряжения U_{Σ} увеличиваются во всех точках измерения, кроме $x = 30$ км; в этой точке оно снижается на 55 %; токи, протекающие по трубе, возрастают на 17...34 %;

- при УПК в рельсовом фидере наблюдается рост U_{Σ} в точках $x = 0, 10$ и 50 км, а при $x = 20, 30$ и 40 км снижение величины этого параметра; характер изменения I_{Σ} аналогичен U_{Σ} .

III. Заключение

Разработаны цифровые модели, обеспечивающие определение режимов СТЭ, оснащенных установками продольной и поперечной компенсации. Проведенное моделирование показало, что по сравнению с СТЭ, не имеющей установок КРМ, максимумы наведенных напряжений в отдельных точках трубы изменяются в пределах от -14 до 31 %.

Представленная методика может использоваться на практике при выборе средств КРМ на участках сближения ТС с протяженными проводящими сооружениями. Методика является универсальной и может применяться для ТС различного конструктивного исполнения, включая перспективные ТС повышенного напряжения.

© Крюков А.В., 2024

© Суслов К.В., 2024

© Крюков А.Е., 2024

Поступила в редакцию 22.03.2024

Принята к публикации 08.05.2024

Received 22.03.2024

Accepted 08.05.2024

Библиографический список

- [1] Котельников А.В., Косарев А.Б. Электромагнитное влияние тяговых сетей переменного тока на металлические коммуникации // *Электричество*. 1992. № 9. С. 26-34.
- [2] Коннова Е.И., Косарев А.Б. Расчет электромагнитного влияния сетей переменного тока на металлические коммуникации // *Вестник ВНИИЖТ*. 1990. № 2. С. 17-19.
- [3] Стрижевский И.В., Дмитриев В.И. Теория и расчет влияния электрифицированной железной дороги на подземные металлические сооружения. М.: Стройиздат, 1967. – 248 с.
- [4] Ратнер М.П. Индуктивное влияние электрифицированных железных дорог на электрические сети и трубопроводы. М.: Транспорт, 1966. – 164 с.
- [5] Ракито О.Н. Анализ подходов к оценке влияния высоковольтных линий электропередач переменного тока на подземные трубопроводы // *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. 2022. № 2 (128). С. 79-87. DOI: 10.33285/1999-6934-2022-2(128)-79-87
- [6] Захаров Д.Б., Пионт Д.Ю., Яблучанский П.А. Оценка влияния высоковольтной линии электропередачи на подземный трубопровод и его защита от воздействия наведенного переменного тока // *Газовая промышленность*. 2018. № 9 (774). С. 84-90.
- [7] Пискунов А.А., Копытина Е.А., Чудинова П.А., Петрикеева И.А. Влияние воздушных линий переменного тока на стальные трубопроводы // *Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации*. 2019. № 3 (16). С. 42-46.

- [8] Kandaev V.A., Avdeeva K.V., Utkina A.V. Determination of electrical quantities in the traction rail network and buried pipelines located under the influence of stray currents from electrified railway transport // 2018 Dynamics of systems, mechanisms and machines (Dynamics), Nov. 13-15, 2018, Omsk, Russia. Omsk: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/Dynamics.2018.8601479
- [9] Milesevic B., Filipovic-Grcic B., Radošević T. Analysis of low frequency electromagnetic fields and calculation of induced voltages to an underground pipeline // 2011 3rd International youth conference on energetics (IYCE), Jul. 07-09, 2011, Leiria, Portugal: IEEE, 2011.
- [10] Hoger M., Regula M., Bracinek P., Otcenasova A. Influence of high voltage power lines on the propagation of stray currents from DC traction // 2022 ELEKTRO (ELEKTRO), May 23-26, 2022, Krakow, Poland: IEEE, 2022. DOI: 10.1109/EL-EKTRO53996.2022.9803410
- [11] Haifeng S., Pei W., Haojing C., Xiancang A., Tianlong E., Bonian S., Rongrong Z., Zhihong L., Chunfeng W. Study on electromagnetic influence of 750 kV AC transmission lines on multiple buried pipelines // 2016 Asia-Pacific International symposium on electromagnetic compatibility (APEMC), May 17-21, 2016, Shenzhen: IEEE, 2016. DOI: 10.1109/APEMC.2016.7522725
- [12] Liu X.-T., Wang W., Yu H. Analysis of mutual electromagnetic influence between transmission line and buried pipeline // 2017 4th International conference on information science and control engineering (ICISCE), Jul. 21-23, 2017, Changsha, China: IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ICISCE.2017.293
- [13] Tao Q., Suna B., Bingran S., Tao Y., Yunfei M., Xinliang Y. Analysis of electromagnetic influence between high-voltage AC transmission lines and buried oil and gas pipelines (May 2018) // 2018 China International conference on electricity distribution (CICED), Sep. 17-19, 2018, Tianjin, China: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/CICED.2018.8592579
- [14] Yuan H., Yang G., Jiang M., Wang X., Wang S., Yuan K. A detailed study of AC interference on metal pipelines due to double circuit power lines // 2018 2nd IEEE Conference on energy internet and energy system integration (EI2), Oct. 20-22, 2018, Beijing, China: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/EI2.2018.8582027
- [15] Lu D., Liu C., Qi L., Yuan H. Mitigation of electromagnetic influence on the buried metal pipeline near overhead AC transmission line // 2012 Sixth International conference on electromagnetic field problems and applications, Jun. 19-21, 2012, Dalian, China: IEEE, 2012. DOI: 10.1109/ICEF.2012.6310384
- [16] Wang Y., Liao X., Li J., Lu T. Impedance parameter analysis and electromagnetic influence modeling of three phase cable adjacent to metal pipeline // 2021 International conference on advanced electrical equipment and reliable operation (AEERO), Oct. 15-17, 2021, Beijing, China: IEEE, 2021.
- [17] Adamek M., Vostracky Z. Interference from transmission lines to buried pipelines // 2015 16th International scientific conference on electric power engineering (EPE), May 20-22, 2015, Kouty nad Desnou, Czech Republic: IEEE, 2015. DOI: 10.1109/EPE.2015.7161133
- [18] Kou X., Guo L., Zhang K., Dong M., Lu H., Li C., Hou M., Liu Y. Influence of soil structure on coating voltage of buried pipeline when lightning strikes transmission

- lines // 2021 IEEE 4th International electrical and energy conference (CIEEC), May 28-30, 2021, Wuhan, China: IEEE, 2021. DOI: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510526
- [19] Qi L., Yuan H., Li L., Cui X. Calculation of interference voltage on the nearby underground metal pipeline due to the grounding fault on overhead transmission lines // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2013. № 55 (5). P. 965-974. DOI: 10.1109/TEMC.2013.2240391
- [20] Janda Z., Noháč K. Analysis of the electromagnetic influences of overhead lines on nearby pipelines // 2015 16th International scientific conference on electric power engineering (EPE), May 20-22, 2015, Kouty nad Desnou, Czech Republic: IEEE, 2015. DOI: 10.1109/EPE.2015.7161179
- [21] Janda Z., Noháč K. Analysis of the inductive effects of overhead lines to close pipelines // Proceedings of the 2014 15th International scientific conference on electric power engineering (EPE), May 12-14, 2014, Brno-Bystrc, Czech Republic: IEEE, 2014. DOI: 10.1109/EPE.2014.6839430
- [22] Mu W., Zhao Z., Zhu Y., Lei X. A rapid modeling for analysis the effect of transmission line to oil and gas pipeline // 2016 Asia-Pacific International symposium on electromagnetic compatibility (APEMC), May 17-21, 2016, Shenzhen, China: IEEE, 2016. DOI: 10.1109/APEMC.2016.7522916
- [23] Abdel-Gawad N.M.K., Shaalan E.M., Darwish M.M.F., Basuny M.A.M. Influence of fault locations on the pipeline induced voltages near to power transmission lines // 2019 21st International middle east power systems conference (MEPCON), Dec. 17-19, 2019, Cairo, Egypt: IEEE, 2019. DOI: 10.1109/MEPCON47431.2019.9008020
- [24] Бородулин Б.М., Герман Л.А., Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1983. – 183 с.
- [25] Герман Л.А., Кишкурно К.В. Регулирование мощности установки поперечной компенсации на посту секционирования // Мир транспорта. 2014. Т. 12. № 6 (55). С. 48-54.
- [26] Герман Л.А., Гончаренко В.П. Современная схема продольной емкостной компенсации в системе тягового электроснабжения // Вестник Ростовского Государственного Университета Путей Сообщения. 2013. № 2 (50). С. 12-17.
- [27] Герман Л.А. Оценка технических показателей продольной емкостной компенсации, включенной между путями электрифицированной железной дороги // Известия высших учебных заведений. Энергетика. 1983. № 12. С. 44-46.
- [28] Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: ИрГУПС, 2005. – 273 с.
- [29] Крюков А.В., Черепанов А.В., Крюков А.Е. Моделирование электромагнитных влияний линий электропередачи и тяговых сетей на протяженные металлические конструкции. Иркутск: ИрГУПС, 2022. – 190 с.

References

- [1] A.V. Kotelnikov and A.B. Kosarev, “Elektromagnitnoe vliyanie tyagovykh setej peremennogo toka na metallicheskie kommunikacii [Electromagnetic influence of alternating current traction networks on metal structures]”, *Electricity*, no. 9, pp. 26-34, 1992 (in Russian).

- [2] E.I. Konnova and A.B. Kosarev, “Raschet elektromagnitnogo vliyaniya setej peremennogo toka na metallicheskie kommunikacii [Calculation of the electromagnetic influence of alternating current networks on metal communications]”, *Russian Railway Science Journal*, no. 2, pp. 17-19, 1990 (in Russian).
- [3] I.V. Strizhevsky and V.I. Dmitriev, *Teoriya i raschet vliyaniya elektrificirovannoj zheleznoj dorogi na podzemnye metallicheskie sooruzheniya [Theory and calculation of the influence of an electrified railway on underground metal structures]*. Moscow: Stroyizdat, 1967 (in Russian).
- [4] M.P. Ratner, *Induktivnoe vliyanie elektrificirovannyh zheleznyh dorog na elektricheskie seti i truboprovody [Inductive influence of electrified railways on electrical networks and pipelines]*. Moscow: Transport, 1966 (in Russian).
- [5] O.N. Rakito, “Analysis of approaches to assessing the impact of high-voltage AC power lines on underground pipelines”, *Equipment and Technologies for Oil and Gas Complex*, vol. 2, no. 128, pp. 79-87, 2022.
- [6] D.B. Zakharov., D.Yu. Piont and P.A. Yabluchansky, “Assessment of the influence of high-voltage power transmission line on the underground pipeline and pipeline protection against the induced alternate current”, *Gas Industry*, vol. 9, no. 774, pp. 84-90, 2018.
- [7] A.A. Piskunkov, E.A. Kopytina, P.A. Chudinova and I.A. Petrikeeva, “Vliyanie vozdushnyh linij peremennogo toka na stal'nye truboprovody [The influence of AC overhead lines on steel pipelines]”, *Urban planning. Infrastructure. Communication*, vol. 3, no. 16, pp. 42-46, 2019 (in Russian).
- [8] V.A. Kandaev, K.V. Avdeeva and A.V. Utkina, “Determination of electrical quantities in the traction rail network and buried pipelines located under the influence of stray currents from electrified railway transport”, in proc. *2018 Dynamics of systems, mechanics and machines (Dynamics)*, Nov. 13-15, 2018, Omsk, Russia. DOI: 10.1109/Dynamics.2018.8601479
- [9] B. Milesevic, B. Filipovic-Grcic and T. Radosevic, “Analysis of low frequency electromagnetic fields and calculation of induced voltages to an underground pipeline”, in proc. *2011 3rd International youth conference on energetics (IYCE)*, Jul. 07-09, 2011, Leiria, Portugal.
- [10] M. Hoger, M. Regula, P. Bracinek and A. Otcenasova, “Influence of high voltage power lines on the propagation of stray currents from DC traction”, in proc. *2022 ELEKTRO (ELEKTRO)*, May 23-26, 2022, Krakow, Poland. DOI: 10.1109/EL-EKTRO53996.2022.9803410
- [11] S. Haifeng, W. Pei, C. Haojing, A. Xiancang, E Tianlong, S. Bonian, Z. Rongrong, L. Zhihong and W. Chunfeng, “Study on electromagnetic influence of 750 kV AC transmission lines on multiple buried pipelines”, in proc. *2016 Asia-Pacific International symposium on electromagnetic compatibility (APEMC)*, May 17-21, 2016, Shenzhen. DOI: 10.1109/APEMC.2016.7522725
- [12] X.-T. Liu, W. Wang and H. Yu, “Analysis of mutual electromagnetic influence between transmission line and buried pipeline”, in proc. *2017 4th International conference on information science and control engineering (ICISCE)*, Jul. 21-23, 2017, Changsha, China. DOI: 10.1109/ICISCE.2017.293
- [13] Q. Tao, B. Suna, S. Bingran, Y. Tao, M. Yunfei and Y. Xinliang, “Analysis of electromagnetic influence between high-voltage AC transmission lines and buried oil and

- gas pipelines (May 2018)”, in proc. *2018 China International conference on electricity distribution (CICED)*, Sep. 17-19, 2018, Tianjin, China. DOI: 10.1109/CICED.2018.8592579
- [14] H. Yuan, G. Yang, M. Jiang, X. Wang, S. Wang and K. Yuan, “A detailed study of AC interference on metal pipelines due to double circuit power lines”, in proc. *2018 2nd IEEE Conference on energy internet and energy system integration (EI2)*, Oct. 20-22, 2018, Beijing, China. DOI: 10.1109/EI2.2018.8582027
- [15] D. Lu, C. Liu, L. Qi and H. Yuan, “Mitigation of electromagnetic influence on the buried metal pipeline near overhead AC transmission line”, in proc. *2012 Sixth International conference on electromagnetic field problems and applications*, Jun. 19-21, 2012, Dalian, China. DOI: 10.1109/ICEF.2012.6310384
- [16] Y. Wang, X. Liao, J. Li and T. Lu, “Impedance parameter analysis and electromagnetic influence modeling of three phase cable adjacent to metal pipeline”, in proc. *2021 International conference on advanced electrical equipment and reliable operation (AEERO)*, Oct. 15-17, 2021, Beijing, China. DOI: 10.1109/AEERO52475.2021.9708294
- [17] M. Adamek and Z. Vostracky, “Interference from transmission lines to buried pipelines”, in proc. *2015 16th International scientific conference on electric power engineering (EPE)*, May 20-22, 2015, Kouty nad Desnou, Czech Republic. DOI: 10.1109/EPE.2015.7161133
- [18] X. Kou, L. Guo, K. Zhang, M. Dong, H. Lu, C. Li, M. Hou and Y. Liu, “Influence of soil structure on coating voltage of buried pipeline when lightning strikes transmission lines”, in proc. *2021 IEEE 4th International electrical and energy conference (CIEEC)*, May 28-30, 2021, Wuhan, China. DOI: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510526
- [19] L. Qi, H. Yuan, L. Li and X. Cui, “Calculation of interference voltage on the nearby underground metal pipeline due to the grounding fault on overhead transmission lines”, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 55, no. 5, pp. 965-974, Oct. 2013. DOI: 10.1109/TEMPC.2013.2240391
- [20] Z. Janda and K. Noháč, “Analysis of the electromagnetic influences of overhead lines on nearby pipelines”, in proc. *2015 16th International scientific conference on electric power engineering (EPE)*, May 20-22, 2015, Kouty nad Desnou, Czech Republic. DOI: 10.1109/EPE.2015.7161179
- [21] Z. Janda and K. Noháč, “Analysis of the inductive effects of overhead lines to close pipelines”, in proc. *Proceedings of the 2014 15th International scientific conference on electric power engineering (EPE)*, May 12-14, 2014, Brno-Bystrc, Czech Republic. DOI: 10.1109/EPE.2014.6839430
- [22] W. Mu, Z. Zhao, Y. Zhu and X. Lei, “A rapid modeling for analysis the effect of transmission line to oil and gas pipeline”, in proc. *2016 Asia-Pacific International symposium on electromagnetic compatibility (APEMC)*, May 17-21, 2016, Shenzhen, China. DOI: 10.1109/APEMC.2016.7522916
- [23] N.M.K. Abdel-Gawad, E.M. Shaalan, M.M.F. Darwish and M.A.M. Basuny, “Influence of fault locations on the pipeline induced voltages near to power transmission lines”, in proc. *2019 21st International middle east power systems conference (MEPCON)*, Dec. 17-19, 2019, Cairo, Egypt.

- [24] B.M. Borodulin, L.A. German and G.A. Nikolaev, *Kondensatornye ustanovki elektrifirovannykh zheleznykh dorog [Capacitor installations of electrified railways]*. Moscow: Transport, 1983 (in Russian).
- [25] L.A. German and K.V. Kishkurno, "Power control of shunt compensation installation at section pillar", *World of Transport and Transportation*, vol. 12, no. 6 (55), pp. 48-54, 2014.
- [26] L.A. German and V.P. Goncharenko, "Modern design of series capacitive compensation in the traction electrical supply system", *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya*, vol. 2, no. 50, pp. 12-17, 2013.
- [27] L.A. German, "Ocenka tekhnicheskikh pokazatelej prodol'noj emkostnoj kompensacii, vkluchennoj mezhdru putyami elektrifirovannoj zheleznoj dorogi [Assessment of technical indicators of longitudinal capacitive compensation connected between the tracks of an electrified railway]", *Proceedings of Higher Educational Institutions. Energetika*, no. 12, pp. 44-46, 1983 (in Russian).
- [28] V.P. Zakaryukin and A.V. Kryukov, *Slozhnonesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem [Complex asymmetric modes of electrical systems]*. Irkutsk: ISTU, 2005 (in Russian).
- [29] A.V. Kryukov, A.V. Cherepanov and A.E. Kryukov, *Modelirovanie elektromagnitnykh vliyaniy linij elektroperedachi i tyagovykh setej na protyazhennyye metallicheskie konstrukcii [Modeling of electromagnetic influences of power lines and traction networks on extended metal structures]*. Irkutsk: ISTU, 2022 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Крюков Андрей Васильевич, доктор технических наук, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения; профессор Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация.

Andrey V. Kryukov, D. Sci. (Eng.), professor of the Irkutsk State Transport University; professor of the Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation.

Суслов Константин Витальевич, доктор технических наук, профессор Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва; профессор Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация.

Konstantin V. Suslov, D. Sci. (Eng.), professor of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow; professor of the Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation.

Крюков Александр Егорович, аспирант Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация.

Aleksandr E. Kryukov, postgraduate student of the Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation.