

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311

DOI: 10.18324/2077-5415-2022-1-63-71

Моделирование электромагнитных влияний тяговых сетей на трубопроводы при эксплуатации электровозов с асинхронными тяговыми двигателями

Ю.Н. Булатов^{1a}, А.В. Крюков^{2,3b}, А.В. Черепанов^{2c}, А.Е. Крюков^{2d}, С.Ю. Кузнецова^{3e}

¹ Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

² Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия

³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия

^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c smart_grid@mail.ru,

^d appleforevor@gmail.com, ^e user89021700822@gmail.com

^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>,

^d <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>, ^e <https://orcid.org/0000-0003-4690-6935>

Статья поступила 01.12.2021, принята 25.12.2021

Вблизи трасс железных дорог, электрифицированных на переменном токе, могут располагаться протяженные металлические конструкции, в частности трубопроводы, предназначенные для транспорта газа и нефти, а также продуктов ее переработки. Тяговые сети 25 кВ отличаются электромагнитной несбалансированностью и могут создавать на деталях перечисленных сооружений наведенные напряжения, уровни которых могут превышать допустимые значения. Так как формы кривых токов и напряжений выпрямительных электровозов с зонно-фазовым регулированием существенно отличаются от синусоиды, то наряду с наведенными напряжениями основной частоты появляются напряжения, обусловленные высшими гармониками. Электровозы нового поколения, оборудованные асинхронными тяговыми двигателями и оснащенные 4Q-S преобразователями, практически не искажают синусоиду тока и, следовательно, можно ожидать снижения составляющих наведенных напряжений, обусловленных высшими гармониками. Поэтому становится актуальной задача количественной оценки величины такого снижения. Для решения этой задачи были проведены компьютерные исследования, направленные на определение напряжений, наводимых тяговыми сетями 25 кВ на металлическом трубопроводе при движении локомотивов, оборудованных четырехквadrантными преобразователями. Для сравнения выполнялось моделирование применительно к движению локомотивов с зонно-фазовым регулированием. Полученные результаты позволили сделать следующие выводы: при замене электровозов с зонно-фазовым управлением на современные локомотивы с асинхронными электродвигателями и четырехквadrантными преобразователями наблюдается существенное снижение гармонических искажений форм кривых наведенных напряжений; максимальные значения коэффициентов гармоник, фиксируемые в отдельных точках трубы, уменьшаются на 51...116 %, что приводит к уменьшению примерно в 6 раз максимальных величин эффективных значений напряжений, наведенных за счет высших гармоник; максимумы результирующих наведенных напряжений в отдельных точках трубы снижаются на 3...7 %. Предложенная методика и разработанные компьютерные модели могут использоваться на практике при разработке мероприятий по обеспечению электробезопасности персонала, работающего в зонах электромагнитных влияний тяговых сетей 25 кВ.

Ключевые слова: тяговые сети 25 кВ; электровозы с 4Q-S преобразователями; стальные трубопроводы; наведенные напряжения; моделирование.

Modeling the electromagnetic effects of traction networks on pipelines during operation of electric locomotives with asynchronous traction engines

Yu.N. Bulatov^{1a}, A.V. Kryukov^{2,3b}, A.V. Cherepanov^{2c}, A.E. Kryukov^{2d}, S.Yu. Kuznetsova^{3e}

¹ Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

² Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia

³ Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

^a bulatovyura@yandex.ru, ^b and_kryukov@mail.ru, ^c smart_grid@mail.ru,

^d appleforevor@gmail.com, ^e user89021700822@gmail.com

^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>,

^d <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>, ^e <https://orcid.org/0000-0003-4690-6935>

Received 01.12.2021, accepted 25.12.2021

Extensive metal structures, in particular, pipelines intended for the transport of gas and oil, as well as products of its processing, can be located near the routes of railways electrified with alternating current. Traction networks of 25 kV are distinguished by electromagnetic imbalance and can create induced voltages on the parts of the listed structures, the levels of which may exceed permissible values. Since the shapes of the curves of currents and voltages of rectifier electric locomotives with zone-phase regulation differ significantly from the sinusoid, then along with the induced voltages of the fundamental frequency, voltages due to higher harmonics appear. Electric locomotives of the new generation, equipped with asynchronous traction motors and equipped with 4Q – S converters, practically do not distort the current sinusoid, and a decrease in the components of induced voltages due to higher harmonics should be expected. Therefore, the task of quantifying the magnitude of such a decrease becomes urgent. To solve this problem, computer studies have been carried out aimed at determining the voltages induced by 25 kV traction networks on a metal pipeline during the movement of locomotives equipped with four-quadrant converters. For comparison, modeling has been carried out in relation to the movement of locomotives with zone-phase regulation. The results obtained make it possible to draw the following conclusions: when replacing electric locomotives with zone-phase control by modern locomotives with asynchronous electric motors and four-quadrant converters, there is a significant decrease in harmonic distortions of the induced voltage curves; the maximum values of the harmonic coefficients recorded at individual points of the pipe are reduced by 51 ... 116%; this leads to a decrease in approximately six times the maximum values of the effective values of the voltages induced by higher harmonics; the maxima of the resulting induced stresses at individual points of the pipe decrease by 3 ... 7%. The proposed methodology and the developed computer models can be used in practice when developing measures to ensure the electrical safety of personnel working in the electromagnetic influence zones of 25 kV traction networks.

Key words: traction networks of 25 kV; electric locomotives with 4Q–S converters; steel pipelines; induced voltages; modeling.

Введение. В непосредственной близости от трасс железных дорог, которые электрифицированы на переменном токе и оборудованы тяговыми сетями 25 кВ, могут проходить трубопроводы, предназначенные для транспорта газа и нефти, а также продуктов ее переработки [1; 2]. Указанные тяговые сети (ТС) отличаются электромагнитной несбалансированностью и могут создавать на деталях перечисленных сооружений наведенные напряжения, уровни которых могут превышать допустимые значения [3]. Поэтому для обеспечения электробезопасности персонала, обслуживающего трубопроводы в зонах электромагнитных влияний, требуется применение специальных мероприятий [4–12]. Такие мероприятия в современных условиях, характеризующихся масштабным внедрением цифровых технологий [13], должны разрабатываться на основе компьютерного моделирования. Актуальность задач определения электромагнитных влияний высоковольтных и сильноточных линий электропередачи (ЛЭП) на трубопроводы подтверждается большим числом публикаций по этой теме, часть из которых приведена в списке литературы к данной статье [4–12; 14–25]. Большая часть перечисленных работ посвящена вопросам расчета наведенных напряжений, создаваемых ЛЭП высокого напряжения [4–6; 14–26]. Задачи, в которых источником влияний являются тяговые сети, рассматриваются в работах [7–11].

Адекватные компьютерные модели для решения задач определения наведенных напряжений на трубопроводе, вызванных электромагнитными влияниями тяговых сетей, могут быть сформированы с использованием методов, предложенных в работах [27; 28] и реализованных в программном комплексе *Fazonord*. Эти модели

позволяют корректно учитывать все влияющие факторы, такие как размеры движения на участке сближения ТС с трубопроводом; траектория и ширина сближения; наличие и параметры заземлений, установленных на сооружении; протяженность участка и электрические характеристики грунтов на нем.

Предлагаемая методика отличается универсальностью, потому что дает возможность определять электромагнитные влияния ТС в любых ситуациях, имеющих место на практике. В ее основе лежит системный подход, позволяющий определять наведенные напряжения с учетом конкретного режима питающей электроэнергетической системы (ЭЭС). Адекватность моделирования электромагнитных влияний достигается корректной работой применяемых алгоритмов в ближней, промежуточной и дальней зонах интеграла Карсона [29].

Ниже представлены результаты исследований, цель которых состоит в дальнейшем развитии методики в направлении определения электромагнитных влияний ТС 25 кВ при эксплуатации электровозов с асинхронными тяговыми двигателями [30; 31].

Постановка задачи. Уровень генерации токов высших гармоник электровозом зависит от его конструктивных особенностей. Традиционные отечественные электровозы с зонно-фазовым регулированием и электровозы нового поколения с асинхронными двигателями и четырехквadrантными преобразователями значительно отличаются по показателям качества электропотребления. В частности, на рис. 1 представлены спектры гармоник электровозов ВЛ-80Р и нового электровоза УТУ-1 при токе первой гармоники 300 А, взятые из статьи [30].

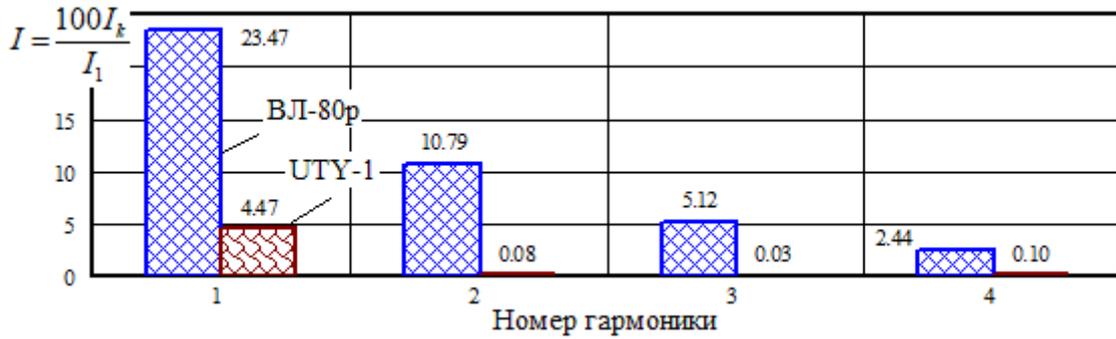


Рис. 1. Спектры гармоник токов электровозов ВЛ-80р и УТУ-1

Электроподвижной состав (ЭПС) с двигателями постоянного тока и зонно-фазовым регулированием создает значительные гармонические искажения; при этом увеличиваются потери мощности в тяговой сети, что приводит к дополнительным нагревам оборудования и ухудшению энергетических показателей. Еще один негативный эффект, связанный с повышенным уровнем высших гармоник, состоит в увеличении электромагнитных влияний ТС на смежные линии электропередачи и связи, а также на протяженные металлические конструкции.

Электровозы с асинхронными тяговыми электродвигателями (АТЭД), оснащенные 4Q-S преобразователями, практически не искажают синусоиду тока [30; 31], имеют пониженное реактивное электропотребление и

уменьшают уровни гармонических составляющих напряжений в узловых точках питающих сетей. Поэтому можно ожидать снижения составляющих наведенных напряжений, обусловленных высшими гармониками. Для количественной оценки степени этого снижения далее представлено моделирование системы тягового электроснабжения для двух вариантов используемых локомотивов:

- 1) электровозы с двигателями постоянного тока и зонно-фазовым регулированием (рис. 2, а);
- 2) с асинхронными тяговыми двигателями, подключаемыми к четырехквadrантным (4Q-S) преобразователям (рис. 2, б).

Спектры гармоник тока электровоза с АТЭД, принятые по данным [30], приведены в табл. 1.

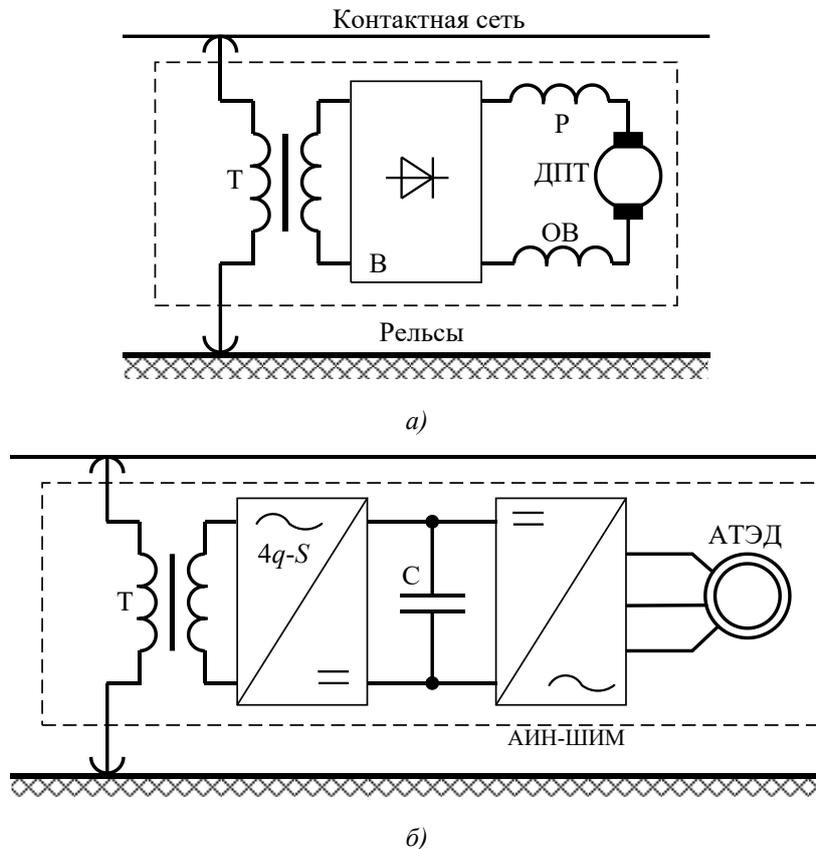


Рис. 2. Схемы ЭПС [30]: а — ЭПС с зонно-фазовым регулированием; б — ЭПС с АТЭД и четырехквadrантными преобразователями; Т — трансформатор; В — выпрямительная установка; Р — сглаживающий реактор; ДПТ — тяговый двигатель постоянного тока; АИН-ШИМ — автономный инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией; 4Q-S — четырехквadrантный преобразователь; С — емкостный фильтр

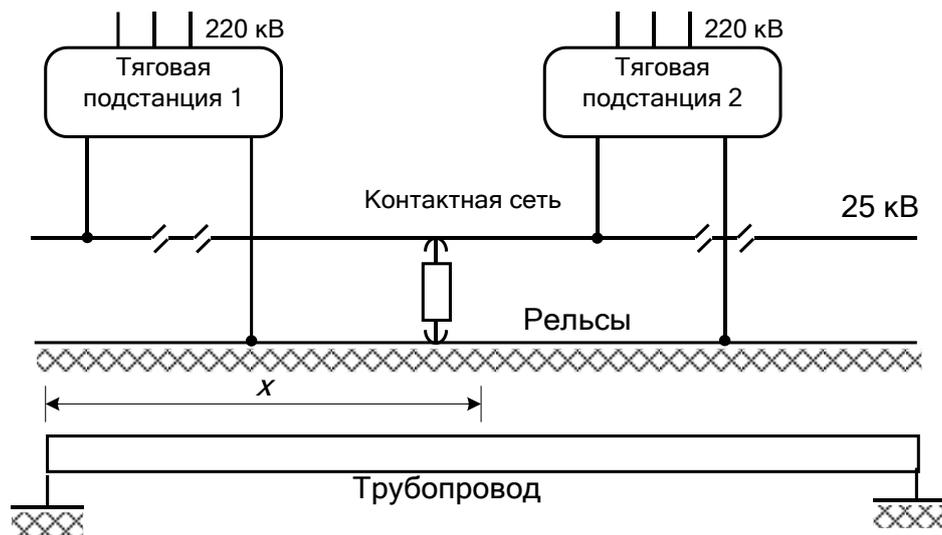
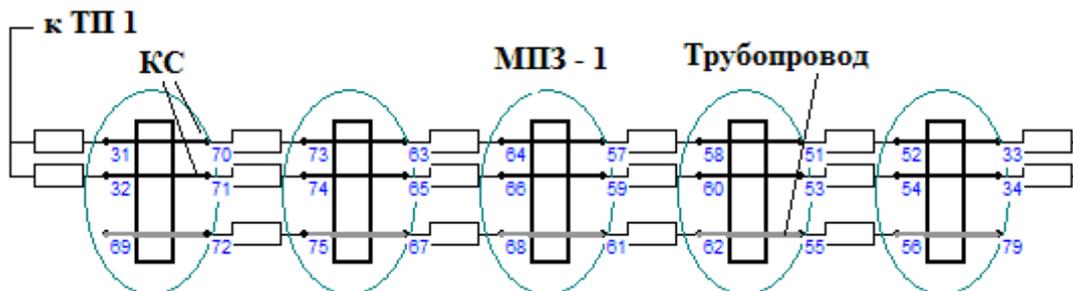
Таблица 1. Спектр гармоник тока ЭПС с асинхронным двигателем, *A*

| Рекуперация | Ток секции | Номер гармоники | | | | |
|-------------|------------|-----------------|------|------|------|------|
| | | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 |
| Отключена | 150 | 150 | 6,72 | 0,13 | 0,04 | 0,16 |
| Включена | 90 | 90 | 4,03 | 0,08 | 0,03 | 0,09 |

Результаты моделирования. Моделирование выполнено в программном комплексе *Fazonord* [28] применительно к схеме ТС 25 кВ, включающей три тяговых подстанции (ТП). На расстоянии 100 м от оси дороги предполагалось наличие трубопровода длиной 50 км с диаметром трубы 250 мм, характеризующейся распределенным заземлением 0,05 См/км. По краям сооружения были установлены стационарные заземлители с сопротивлениями растеканию в 1 Ом.

Фрагмент исходной схемы моделируемой сети приведен на рис. 3. На ее основе была реализована расчетная модель, фрагмент которой показан на рис. 4. В ее состав входили модели следующих элементов ТС и ЭЭС: трех тяговых трансформаторов и такого же числа линий электропередачи 220 кВ, а также двух меж-

подстанционных зон (МПЗ). В модель левой МПЗ была включена токоведущая часть, расположенная на поверхности земли и моделирующая трубопровод наземной прокладки. Эта МПЗ была разбита на 5 участков, протяженность которых составляла 10 км. Такой прием использовался для определения наведенных напряжений в отдельных точках сооружения. График движения поездов массой 6 300 т в нечетном направлении и такого же числа поездов массой 6 тыс. т в четном — показаны на рис. 5. Зависимости токов поездов от пикета железной дороги представлены на рис. 6. При проведении моделирования учитывались гармонические искажения напряжений и токов тяговой сети, а также распределенность параметров. Результаты моделирования представлены в табл. 2 и на рис. 7, 8.

**Рис. 3.** Фрагмент схемы сближения тяговой сети и трубопровода. Для упрощения показана контактная подвеска одного пути**Рис. 4.** Фрагмент схемы расчетной модели: МПЗ — межподстанционная зона; ТП — тяговая подстанция; КС — контактная сеть

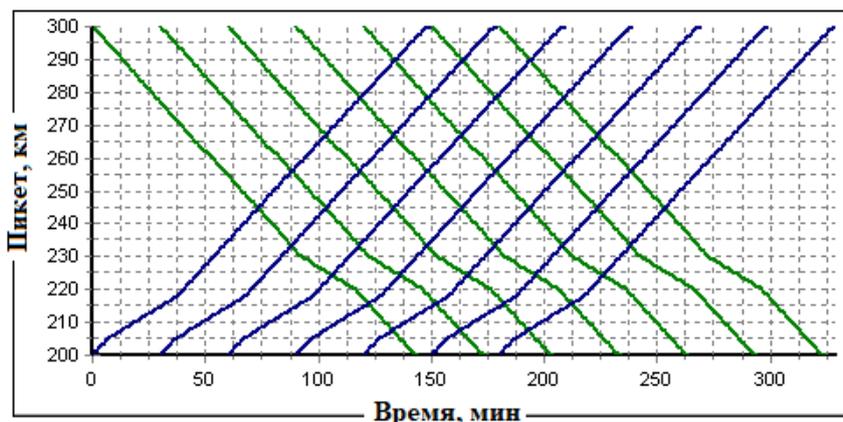


Рис. 5. График движения

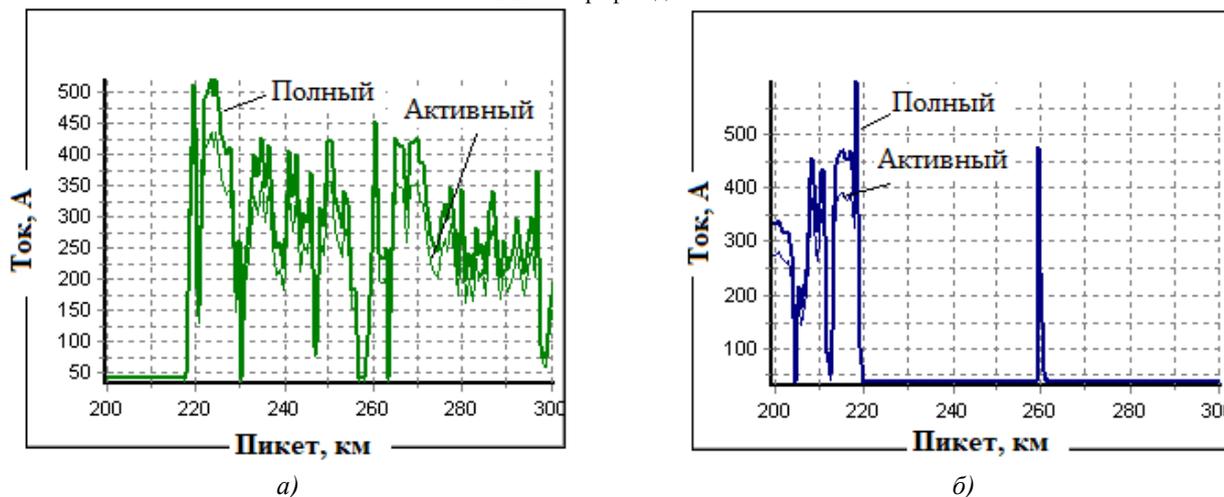


Рис. 6. Зависимости токов, потребляемых поездами, от пикета железной дороги: а — нечетный поезд массой 6 300 т; б — четный поезд массой 6 тыс. т

Таблица 2. Результаты моделирования

| x, км | Показатель | kU, % | | Отношение | U ₁ , В | U _{hg} , В | | Отношение | U _Σ , В | | Различие, % |
|-------|------------|-------|--------|-----------|--------------------|---------------------|--------|-----------|--------------------|--------|-------------|
| | | УТУ-1 | ВЛ-80р | | | УТУ-1 | ВЛ-80р | | УТУ-1 | ВЛ-80р | |
| 0 | Ср. знач. | 4,0 | 24,2 | 6,1 | 23,1 | 0,9 | 5,6 | 6,1 | 23,1 | 23,7 | 2,8 |
| | Макс. | 7,4 | 46,9 | 6,4 | 59,4 | 2,5 | 14,7 | 6,0 | 59,5 | 61,2 | 2,9 |
| | СКО | 0,8 | 4,4 | 5,7 | 14,6 | 0,6 | 3,6 | 6,0 | 14,6 | 15,0 | 2,9 |
| | Размах | 7,4 | 46,9 | 6,4 | 59,1 | 2,5 | 14,7 | 6,0 | 59,2 | 60,9 | 3,0 |
| 10 | Ср. знач. | 5,0 | 29,9 | 6,0 | 22,9 | 1,2 | 6,8 | 5,9 | 22,9 | 23,9 | 4,4 |
| | Макс. | 18,7 | 118,8 | 6,4 | 64,6 | 3,7 | 23,0 | 6,1 | 64,7 | 68,6 | 6,0 |
| | СКО | 2,0 | 12,9 | 6,4 | 18,3 | 1,0 | 6,2 | 6,1 | 18,3 | 19,2 | 5,1 |
| | Размах | 18,7 | 118,8 | 6,4 | 64,5 | 3,7 | 23,0 | 6,1 | 64,6 | 68,4 | 5,9 |
| 20 | Ср. знач. | 4,0 | 23,0 | 5,8 | 36,1 | 1,6 | 9,1 | 5,9 | 36,2 | 37,3 | 3,2 |
| | Макс. | 30,6 | 163,3 | 5,3 | 116,0 | 5,7 | 34,4 | 6,0 | 116,1 | 121,0 | 4,2 |
| | СКО | 1,8 | 10,2 | 5,6 | 26,8 | 1,3 | 7,8 | 6,0 | 26,8 | 27,9 | 3,9 |
| | Размах | 30,6 | 163,3 | 5,3 | 116,0 | 5,7 | 34,4 | 6,0 | 116,1 | 121,0 | 4,2 |
| 30 | Ср. знач. | 3,2 | 19,1 | 5,9 | 27,5 | 1,1 | 6,2 | 5,8 | 27,6 | 28,3 | 2,5 |
| | Макс. | 6,1 | 37,8 | 6,2 | 68,5 | 2,6 | 15,6 | 5,9 | 68,6 | 70,2 | 2,5 |
| | СКО | 1,3 | 8,0 | 6,0 | 19,5 | 0,8 | 4,7 | 5,9 | 19,5 | 20,0 | 2,5 |
| | Размах | 6,1 | 37,8 | 6,2 | 68,4 | 2,6 | 15,6 | 5,9 | 68,5 | 70,1 | 2,5 |
| 40 | Ср. знач. | 4,0 | 23,4 | 5,9 | 14,1 | 0,7 | 4,2 | 6,0 | 14,1 | 14,8 | 4,5 |
| | Макс. | 8,6 | 52,5 | 6,1 | 55,9 | 3,4 | 21,0 | 6,1 | 56,0 | 59,7 | 6,6 |
| | СКО | 1,8 | 10,9 | 6,2 | 13,7 | 0,8 | 4,9 | 6,1 | 13,7 | 14,5 | 5,7 |
| | Размах | 8,6 | 52,5 | 6,1 | 55,7 | 3,4 | 21,0 | 6,1 | 55,8 | 59,5 | 6,7 |

| $x, \text{ км}$ | Показатель | $k_U, \%$ | | Отно- шение | $U_1, \text{ В}$ | $U_{hg}, \text{ В}$ | | Отно- шение | $U_{\Sigma}, \text{ В}$ | | Разли- чие, % |
|-----------------|------------|-----------|--------|----------------|------------------|---------------------|--------|----------------|-------------------------|--------|------------------|
| | | УТЧ-1 | ВЛ-80р | | | УТЧ-1 | ВЛ-80р | | УТЧ-1 | ВЛ-80р | |
| 50 | Ср. знач. | 5,1 | 29,2 | 5,7 | 20,2 | 1,0 | 5,7 | 5,8 | 20,3 | 21,1 | 3,8 |
| | Макс. | 9,2 | 49,9 | 5,4 | 50,6 | 2,3 | 13,5 | 5,8 | 50,6 | 52,2 | 3,1 |
| | СКО | 0,8 | 4,5 | 5,3 | 13,4 | 0,6 | 3,7 | 5,8 | 13,4 | 13,9 | 3,6 |
| | Размах | 9,2 | 49,9 | 5,4 | 50,5 | 2,3 | 13,5 | 5,8 | 50,5 | 52,1 | 3,1 |

Примечание: k_U — суммарный коэффициент высших гармоник; U_1 — наведенное напряжение основной частоты; U_{hg} — эффективное напряжение высших гармоник; U_{Σ} — результирующее наведенное напряжение; СКО — среднеквадратичное отклонение. Токковые профили электро-возов приняты одинаковыми, поэтому напряжения основной частоты не отличаются.

На рис. 7 приведены графические зависимости составляющих наведенных напряжений от параметра x , отвечающего расстоянию от точки наблюдения до левой ТП. Указанные составляющие определялись по формулам:

$$U_{hg} = \frac{U_1 k_U}{100}; U_{\Sigma} = U_1 \sqrt{1 + \left(\frac{k_U}{100}\right)^2}.$$

На рис. 8 показаны формы кривых напряжений и токов, полученные на 66-й минуте моделирования в модели, отвечающей движению поездов с локомотивами ВЛ-80р.

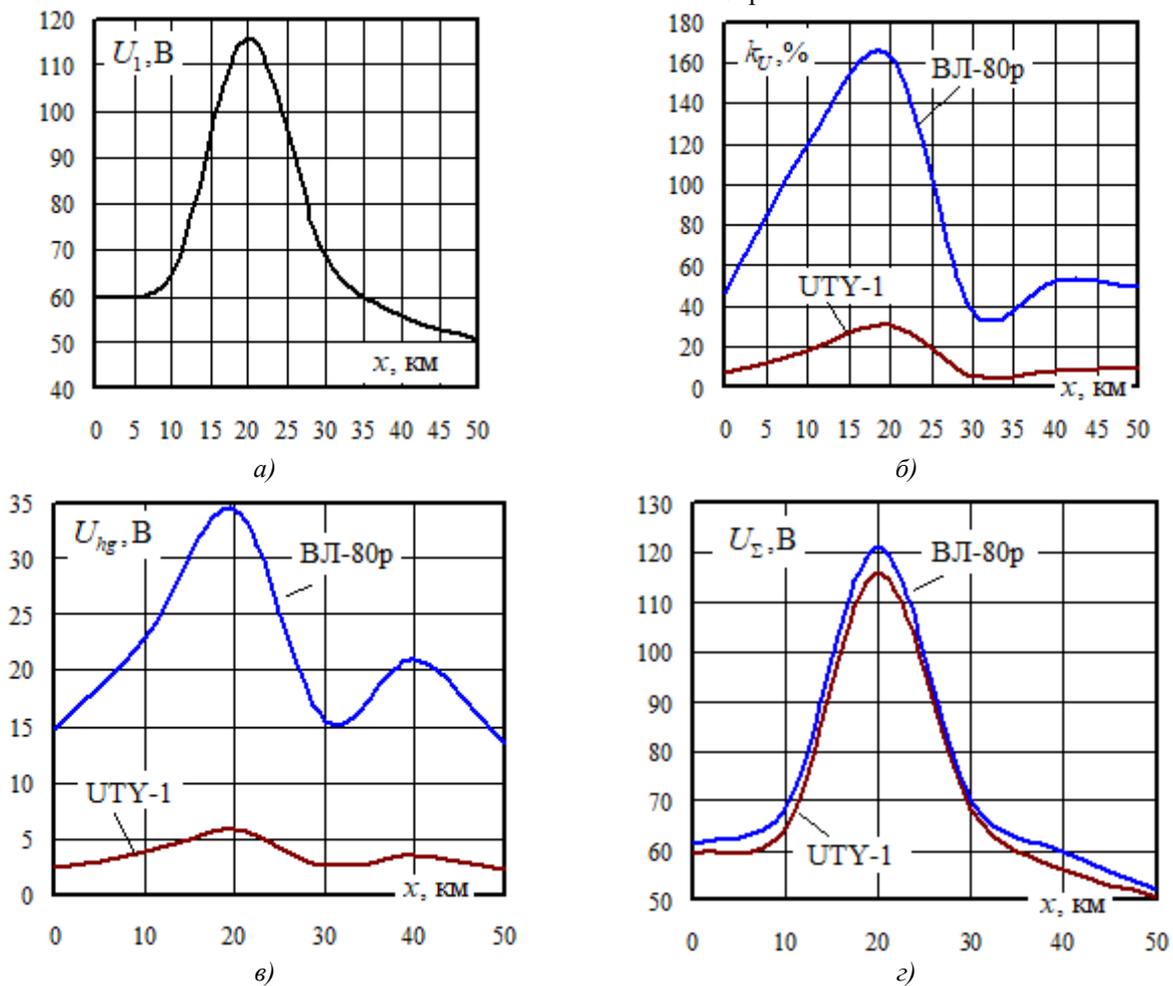


Рис. 7. Зависимости параметров от координаты x : а — наведенные напряжения основной частоты; б — суммарные коэффициенты гармоник; в — эффективные напряжения высших гармоник; з — результирующие наведенные напряжения

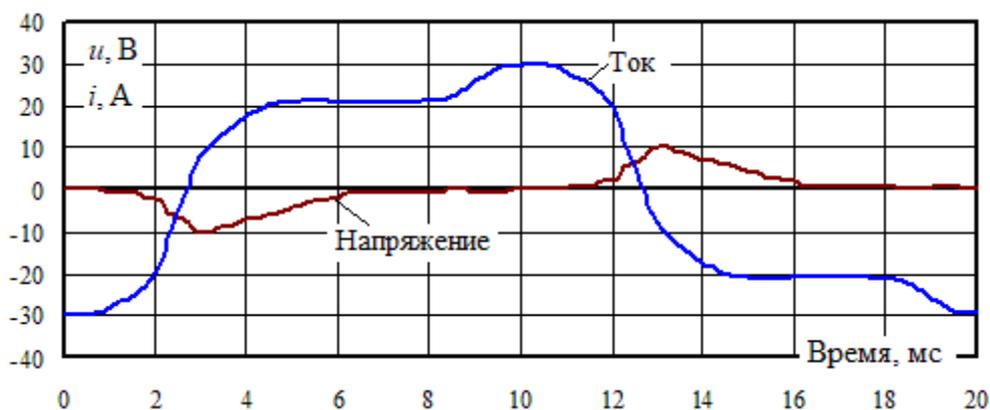


Рис. 8. Формы кривых напряжения и тока при движении поездов с локомотивами ВЛ-80р на 66-й минуте моделирования. Точка измерения, отвечающая координате $x = 40$ км

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. При замене электровозов с зонно-фазовым управлением на современные локомотивы с асинхронными электродвигателями и четырехквadrантными преобразователями наблюдается существенное снижение гармонических искажений форм кривых наведенных напряжений. Максимальные значения коэффициентов гармоник, фиксируемые в отдельных точках трубы, уменьшаются на 51...116 %.

2. Это приводит к уменьшению примерно в 6 раз максимальных величин эффективных значений напряжений, наведенных за счет высших гармоник. Макси-

мумы результирующих наведенных напряжений в отдельных точках трубы снижаются на 3...7 %.

Заключение

Предложена методика, позволяющая определять наведенные напряжения на протяженных металлических конструкциях, создаваемые тяговыми сетями при эксплуатации электровозов нового типа, оснащенных четырехквadrантными преобразователями. Методика и разработанные компьютерные модели могут использоваться на практике при разработке мероприятий по обеспечению электробезопасности персонала, работающего в зонах электромагнитных влияний тяговых сетей 25 кВ.

Литература

1. Зиневич А.М., Глазков В.И., Котик В.Г. Защита трубопроводов и резервуаров от коррозии. М.: Недра, 1975. 288 с.
2. Гамзаев Б.А. Состояние и особенности развития трубопроводного транспорта России на современном этапе // Молодой ученый. 2019. № 3 (241). С. 155-159.
3. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz für Erdgasfernleitungen. P. 80.
4. Яблучанский А.И. Методика оценки опасного влияния переменного тока высоковольтных ЛЭП на проектируемый газопровод // Материалы отраслевого совещания по проблемам защиты от коррозии. М., 2008. С. 110-123.
5. 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 пром-сть. 2018. № 9 (774). С. 84-90.
6. Захаров Д.Б., Яблучанский П.А., Титов А.В. Об оценке коррозионного воздействия ЛЭП на подземный трубопровод при их пересечении // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2013. № 12. С. 68-74.
7. Котельников А.В., Косарев А.Б. Электромагнитное влияние тяговых сетей переменного тока на металлические конструкции // Электричество. 1992. № 9. С. 26-34.
8. Стрижевский И.В., Дмитриев В.И. Теория и расчет влияния электрифицированной железной дороги на подземные металлические сооружения. М.: Изд-во лит. по строительству, 1967. 248 с.
9. Ратнер М.П. Индуктивное влияние электрифицированных железных дорог на электрические сети и трубопроводы. М.: Транспорт, 1966. 164 с.
10. Котельников А.В., Косарев А.Б. Электромагнитное влияние тяговых сетей переменного тока на металлические конструкции // Электричество. 1992. № 9. С. 26-34.
11. Коннова Е.И., Косарев А.Б. Расчет электромагнитного влияния сетей переменного тока на металлические коммуникации // Вестн. ВНИИЖТ. 1990. № 2. С. 17-19.
12. Третьякова М.В., Фуркин А.В. Оценка опасного влияния наведенных токов линий электропередач на подземные трубопроводы // Рассохинские чтения: материалы межрегион. семинара (3-4 февр. 2011 г.). Ухта: УГТУ, 2011. С. 320-325.
13. Василенко Я.В. Цифровизация российской электроэнергетики: современное состояние и перспективы развития // Проблемы рос. экономики на современном этапе: материалы всерос. науч.-практической конф. (12 апр. 2019 г.). М., 2020. С. 105-111.
14. Al Shahri A.S., Nair N.C. «Overhead shielding wire and induced potential on pipeline located close to high voltage transmission», 2016 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2016. P. 1-4.
15. Milesevic B., Filipovic-Greic B., Radosevic T. «Analysis of low frequency electromagnetic fields and calculation of induced voltages to an underground pipeline», Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE), 2011. P. 1-7.
16. Paucar B.C., Ortiz J.L.R., Pinto J.O.P., Koltermann P.I. «Induced Voltage on Gas Pipeline With Angle Between a Transmission Line», 2007 IEEE Lausanne Power Tech, 2007. P. 796-800.
17. Sidik M.A.B. «Induced voltage on objects under six-phase transmission line», TENCON 2011-2011 IEEE Region 10 Conference, 2011. P. 968-970.

18. AlShahri A.S., Nguyet Dinh M.T., Nair N.K.C. «Induced voltage on pipeline located close to high voltage lines due to electromagnetic induction», 2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2014. P. 1-5.
19. Czumbil L., Stet D., Micu D.D., Topa V., Ancas L. «Stream gas pipeline in proximity of high voltage power lines. Part II-Induced voltage evaluation», 2012 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2012. P. 1-6.
20. 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), 2019. P. 761-767.
21. Gupta A., Thomas M.J. «Coupling of high voltage AC power line fields to metallic pipelines», 2006 9th International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility (INCEMIC 2006), 2006. P. 278-283.
22. El-Refaie E.M., Ahmed A.S., Mohamed S.M., Gaber H.M. «Electromagnetic field interference between high voltage transmission lines and nearby metallic gas pipelines», 2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), 2017. P. 332-336.
23. Yuan H., Qi L., Wu Y., Cui X., Wang L. «Lightning induced voltage on the underground pipeline near overhead transmission line», 2011 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning, 2011. P. 411-415.
24. Cetin O., Duzkaya H., Taplamacioglu M.C. «Analysis of Transmission Line Electromagnetic Interference on Touch and Step Voltages on Buried Gas Pipeline under Different Shielding and Resistivity Conditions», 2021 13th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), 2021. P. 1-4.
25. Junyang and Li X. «Interference on Buried Pipeline with Insulating Flange Near High Voltage Transmission Line», 2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), 2018. P. 1186-1189.
26. Hossam-Eldin A.A., Mokhtar W. «Electromagnetic Interference between Electrical Power Lines and Neighboring Pipelines», 2008 19th International Conference on Systems Engineering, 2008. P. 97-102.
27. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Determination of the induced voltages when nonparallel power lines are adjacent to one another // *Power Technology and Engineering*. 2015. V. 49. № 4. P. 304-309.
28. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.
29. Carson I.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // *Bell System Techn. J.* 1926. V. 5. P. 539-554.
30. Бурков А.Т., Мирсайтов М.М. Режимы электротяговой сети при эксплуатации электровозов ВЛ-80Р и УТУ-1 // *Изв. Петербург. ун-та путей сообщения. Современные технологии - транспорту*. 2016. № 2. С. 146-160.
31. Литовченко В.В. 4q-S четырёхквadrантный преобразователь электровозов переменного тока // *Изв. высш. учеб. заведений. Электромеханика*. 2000. № 3. С. 64-73.
- lines on the projected gas pipeline // *Materialy otraslevogo soveshchaniya po problemam zashchity ot korrozii*. M., 2008. P. 110-123.
5. Zaharov D.B., Piont D.YU., Yabluchanskij P.A. Assessment of the impact of a high-voltage power line on an underground pipeline and its protection from the effects of induced alternating current // *Gas Industry Magazine*. 2018. № 9 (774). P. 84-90.
6. Zaharov D.B., Yabluchanskij P.A., Titov A.V. On the assessment of the corrosive effect of power lines on an underground pipeline at their intersection // *Territorija "NEFTEGAS"* [Oil and Gas Territory]. 2013. № 12. P. 68-74.
7. Kotel'nikov A.V., Kosarev A.B. Electromagnetic influence of alternating current traction networks on metal structures // *Electrichestvo (ELECTRICITY)*. 1992. № 9. P. 26-34.
8. Strizhevskij I.V., Dmitriev V.I. Theory and calculation of the influence of the electrified railway on underground metal structures. M.: Izd-vo lit. po stroitel'stvu, 1967. 248 p.
9. Ratner M.P. Inductive influence of electrified railways on electrical networks and pipelines. M.: Transport, 1966. 164 p.
10. Kotel'nikov A.V., Kosarev A.B. Electromagnetic influence of alternating current traction networks on metal structures // *Electrichestvo (ELECTRICITY)*. 1992. № 9. P. 26-34.
11. Konnova E.I., Kosarev A.B. Calculation of the electromagnetic influence of alternating current networks on metal communications // *Vestnik of the Railway Research Institute*. 1990. № 2. P. 17-19.
12. Tret'yakova M.V., Furkin A.V. Assessment of the dangerous impact of induced currents of power lines on underground pipelines // *Rassohinskie chteniya: materialy mezhtregion. seminara (3-4 fevr. 2011 g.)*. Uhta: UGTU, 2011 P. 320-325.
13. Vasilenko YA.V. Digitalization of the Russian electric power industry: current state and development prospects // *Problemy ros. ekonomiki na sovremennom etape: materialy vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (12 apr. 2019 g.)*. M., 2020. P. 105-111.
14. Al Shahri A.S., Nair N.C. «Overhead shielding wire and induced potential on pipeline located close to high voltage transmission», 2016 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2016. P. 1-4.
15. Milesevic B., Filipovic-Grcic B., Radošević T. «Analysis of low frequency electromagnetic fields and calculation of induced voltages to an underground pipeline», *Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE)*, 2011. P. 1-7.
16. Paucar B.C., Ortiz J.L.R., Pinto J.O.P., Koltermann P.I. «Induced Voltage on Gas Pipeline With Angle Between a Transmission Line», 2007 IEEE Lausanne Power Tech, 2007. P. 796-800.
17. Sidik M.A.B. «Induced voltage on objects under six-phase transmission line», *TENCON 2011-2011 IEEE Region 10 Conference*, 2011. P. 968-970.
18. AlShahri A.S., Nguyet Dinh M.T., Nair N.K.C. «Induced voltage on pipeline located close to high voltage lines due to electromagnetic induction», 2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2014. P. 1-5.
19. Czumbil L., Stet D., Micu D.D., Topa V., Ancas L. «Stream gas pipeline in proximity of high voltage power lines. Part II-Induced voltage evaluation», 2012 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2012. P. 1-6.
20. 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), 2019. P. 761-767.
21. Gupta A., Thomas M.J. «Coupling of high voltage AC power line fields to metallic pipelines», 2006 9th International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility (INCEMIC 2006), 2006. P. 278-283.

References

1. Zinevich A.M., Glazkov V.I., Kotik V.G. Protection of pipelines and reservoirs from corrosion. M.: Nedra, 1975. 288 p.
2. Gamzaev B.A. State and features of development of pipeline transport in Russia at the present stage // *Young Scientist*. 2019. № 3 (241). P. 155-159.
3. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz für Erdgasfernleitungen. P. 80.
4. Yabluchanskij A.I. Methodology for assessing the hazardous influence of alternating current of high-voltage transmission

22. El-Refaie E.M., Ahmed A.S., Mohamed S.M., Gaber H.M. «Electromagnetic field interference between high voltage transmission lines and nearby metallic gas pipelines», 2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), 2017. P. 332-336.
23. Yuan H., Qi L., Wu Y., Cui X., Wang L. «Lightning induced voltage on the underground pipeline near overhead transmission line», 2011 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning, 2011. P. 411-415.
24. Cetin O., Duzkaya H., Taplamacioglu M.C. «Analysis of Transmission Line Electromagnetic Interference on Touch and Step Voltages on Buried Gas Pipeline under Different Shielding and Resistivity Conditions», 2021 13th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), 2021. P. 1-4.
25. Junyang and Li X. «Interference on Buried Pipeline with Insulating Flange Near High Voltage Transmission Line», 2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), 2018. P. 1186-1189.
26. Hossam-Eldin A.A., Mokhtar W. «Electromagnetic Interference between Electrical Power Lines and Neighboring Pipelines», 2008 19th International Conference on Systems Engineering, 2008. P. 97-102.
27. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Determination of the induced voltages when nonparallel power lines are adjacent to one another // Power Technology and Engineering. 2015. V. 49. № 4. P. 304-309.
28. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Asymmetric modes of electrical systems. Irkutsk: Izd-vo Irkut. un-ta, 2005. 273 p.
29. Carson I.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell System Techn. J. 1926. V. 5. P. 539-554.
30. Burkov A.T., Mirsaitov M.M. Modes of the electric traction network during the operation of electric locomotives VL-80R and UTY-1 // Proceedings of Petersburg Transport University. Sovremennye tekhnologii - transportu. 2016. № 2. P. 146-160.
31. Litovchenko V.V. 4q-S four-quadrant converter of alternating current electric locomotives // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika (Russian Electromechanics). 2000. № 3. P. 64-73.