

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311, 621.331

DOI:10.18324/2077-5415-2020-4-47-56

## Моделирование электромагнитных влияний тяговых сетей на протяженные металлические сооружения в режимах плавки гололеда

Ю.Н. Булатов<sup>1a</sup>, А.В. Крюков<sup>2, 3b</sup>, А.В. Черепанов<sup>2c</sup>, А.Е. Крюков<sup>2d</sup>

<sup>1</sup> Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия

<sup>a</sup> bulatovyura@yandex.ru, <sup>b</sup> and kryukov@mail.ru, <sup>c</sup> smart\_grid@mail.ru, <sup>d</sup> appleforevor@gmail.com

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>

Статья поступила 30.10.2020, принята 09.11.2020

*Вдоль трасс электрифицированных железных дорог с тяговыми сетями 25 кВ могут располагаться протяженные металлические конструкции и сооружения. Типичным примером таких сооружений являются трубопроводы для транспорта жидких или газообразных продуктов. Из-за электромагнитных влияний тяговых сетей на деталях конструкций могут возникнуть наведенные напряжения, опасные для обслуживающего персонала. Для повышения электробезопасности и защиты людей от воздействия наведенных напряжений необходимо использовать комплекс специальных мероприятий. В условиях цифровизации электроэнергетики выбор таких мероприятий требует применения компьютерных технологий, которые могут быть реализованы на основе методов и средств моделирования систем электроснабжения железных дорог, разработанных в Иркутском государственном университете путей сообщения. В представленной методике реализован системный подход к моделированию электромагнитных влияний тяговых сетей на протяженные металлические конструкции. Системность обеспечивается следующими обстоятельствами: наведенные напряжения определяются на основе расчета режима сложной системы электроснабжения; при моделировании учитываются все значимые факторы, влияющие на уровни электромагнитных влияний; используемые алгоритмы расчета взаимных индуктивных сопротивлений корректно работают в ближней, промежуточной и дальней зонах интеграла Карсона; методика является универсальной и позволяет определять наведенные напряжения для тяговых сетей различного конструктивного исполнения; сближение металлической конструкции с железной дорогой может осуществляться по параллельной, непараллельной и сложным траекториям. В статье приведены результаты исследований, направленных на разработку компьютерных моделей, предназначенных для определения электромагнитных влияний тяговых сетей на магистральный трубопровод наземной прокладки в режимах плавки гололеда. Представленная методика и разработанные компьютерные модели могут использоваться на практике при планировании мероприятий по снижению наведенных напряжений, возникающих в режимах плавки гололеда на проходах контактных подвесок.*

**Ключевые слова:** тяговые сети 25 кВ; электромагнитные влияния на трубопровод наземной прокладки; моделирование.

## Modeling of electromagnetic influences of traction networks on extended metal structures in ice melting modes

Yu.N. Bulatov<sup>1a</sup>, A.V. Kryukov<sup>2, 3b</sup>, A.V. Cherepanov<sup>2c</sup>, A.E. Kryukov<sup>2d</sup>

<sup>1</sup> Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>2</sup> Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia

<sup>3</sup> Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

<sup>a</sup> bulatovyura@yandex.ru, <sup>b</sup> and kryukov@mail.ru, <sup>c</sup> smart\_grid@mail.ru, <sup>d</sup> appleforevor@gmail.com

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>

Received 30.10.2020, accepted 09.11.2020

*Long metal constructions and structures can be located along the routes of electrified railways with 25 kV traction networks. Typical examples of such structures are pipelines for the transport of liquid or gaseous products. Due to the electromagnetic influences of traction networks, induced voltages can occur on structural parts, which are dangerous for service personnel. To increase electrical safety and protect people from the effects of induced voltages, it is necessary to use a set of special measures. In the context of digitalization of the electric power industry, the choice of such measures requires the use of computer technologies, which can be implemented*

on the basis of methods and tools for modeling power supply systems for railways developed at the Irkutsk State Transport University. The presented methodology implements a systematic approach to modeling the electromagnetic effects of traction networks on extended metal structures. Consistency is provided by the following circumstances: induced voltages are determined on the basis of calculating the mode of a complex power supply system; all significant factors influencing the levels of electromagnetic influences of the vehicle are taken into account in modeling; the algorithms used for calculating the mutual inductive resistances work correctly in the near, intermediate and far zones of the Carson integral; the technique is universal and allows one to determine the induced stresses for traction networks of various designs; the rapprochement of a metal structure with a traction network can be carried out along parallel, non-parallel and complex trajectories. The article presents the results of research aimed at the development of computer models designed to determine the electromagnetic effects of traction networks on the main pipeline of ground laying in the modes of melting ice. The presented method and the developed computer models can be used in practice when planning measures to reduce induced voltages arising in the modes of melting ice on the wires of overhead catenaries.

**Keywords:** traction networks 25 kV; electromagnetic influences on the ground-laying pipeline; modeling.

**Введение.** Расположенные вдоль трасс электрифицированных железных дорог протяженные металлические конструкции и сооружения могут находиться в зонах заметных электромагнитных влияний тяговых сетей (ТС). Примером таких сооружений являются магистральные трубопроводы [1–3], предназначенные для транспорта жидких или газообразных продуктов. Из-за электромагнитных влияний тяговых сетей на деталях конструкций могут возникать значительные наведенные напряжения [4–13], опасные для обслуживающего персонала.

Для защиты людей от воздействия наведенных напряжений применяются специальные мероприятия. В условиях цифровизации электроэнергетики [14; 15] выбор таких мероприятий должен базироваться на компьютерных технологиях, которые могут быть реализованы на основе методов и средств моделирования систем электроснабжения железных дорог, разработанных в ИрГУПСе [16–18].

Наведенные напряжения в отдельных точках заземленной металлической конструкции определяются в основном механизмом магнитного влияния; при этом уровни напряжений зависят от токов, протекающих по проводам ТС. Значительные токи в проводах контактных подвесок имеют место в режимах коротких замыканий (КЗ) и плавки гололеда. Поврежденные участки с КЗ быстро отключаются релейной защитой, поэтому степень негативного воздействия наведенных в таких режимах напряжений невелика. Плавка гололеда осуществляется продолжительное время (до нескольких часов), поэтому вероятность электротравм из-за воздействия наведенных напряжений повышается.

Ниже представлены результаты исследований, направленных на реализацию методики компьютерного моделирования наведенных напряжений на трубопроводе наземной прокладки в режимах плавки гололеда на проводах ТС.

**Методика моделирования.** Методы моделирования режимов ТС, разработанные в ИрГУПСе [18], позволяют реализовать системный подход к моделированию электромагнитных влияний ТС на протяженные металлические конструкции. Системность обеспечивается следующими обстоятельствами:

1. Наведенные напряжения определяются на основе расчета режима сложной системы электроснабжения, включающей многопроводную ТС и примыкающую к тяговым подстанциям (ТП) высоковольтную сеть питающей электроэнергетической системы.

2. При моделировании учитываются все значимые факторы, влияющие на уровни электромагнитных влияний ТС: гармонические искажения в токах и напряжениях, проводимость земли, наличие стационарных и распределенных заземлений металлической конструкции; различие электрических параметров грунтов на отдельных участках трассы сближения ТС и анализируемого сооружения.

3. Используемые при определении электромагнитных влияний алгоритмы расчета взаимных индуктивных сопротивлений корректно работают в ближней, промежуточной и дальней зонах интеграла Карсона [18; 19].

4. Методика является универсальной и позволяет определять наведенные напряжения для ТС различного конструктивного исполнения.

5. Сближение металлической конструкции с ТС может осуществляться по параллельной, непараллельной и сложным траекториям.

**Результаты моделирования стационарных режимов.** Моделирование осуществлялось применительно к схемам, показанным на рис. 1. При моделировании предполагалось, что параллельно трассе железной дороги на расстоянии 100 м проложен стальной трубопровод наземной прокладки с диаметром трубы 250 мм. Координаты токоведущих частей показаны на рис. 2. Моделирование проводилось на основе программного комплекса Fazonord [16]. Расчетные схемы, фрагменты которых представлены на рис. 3, включают модели следующих сегментов системы электроснабжения:

- примыкающая к тяговым подстанциям высоковольтная сеть, выполненная воздушными линиями электропередачи 220 кВ;
- тяговые трансформаторы с номинальной мощностью 40 МВ·А;
- тяговые сети двух межподстанционных зон (МПЗ) протяженностью 50 км.

Модель МПЗ, на которой предусматривалось сближение с трубопроводом, была разбита на пять участков длиной в 10 км. На концах трубопровода предполагалось наличие стационарных заземлений с сопротивлением растеканию в 1 Ом; кроме того, учитывалось распределенное заземление трубы с удельной проводимостью 0,05 См/км. Удельная проводимость грунта на трассе сближения задавалась равной 0,01 См/м и принималась одинаковой для всех участков ТС.

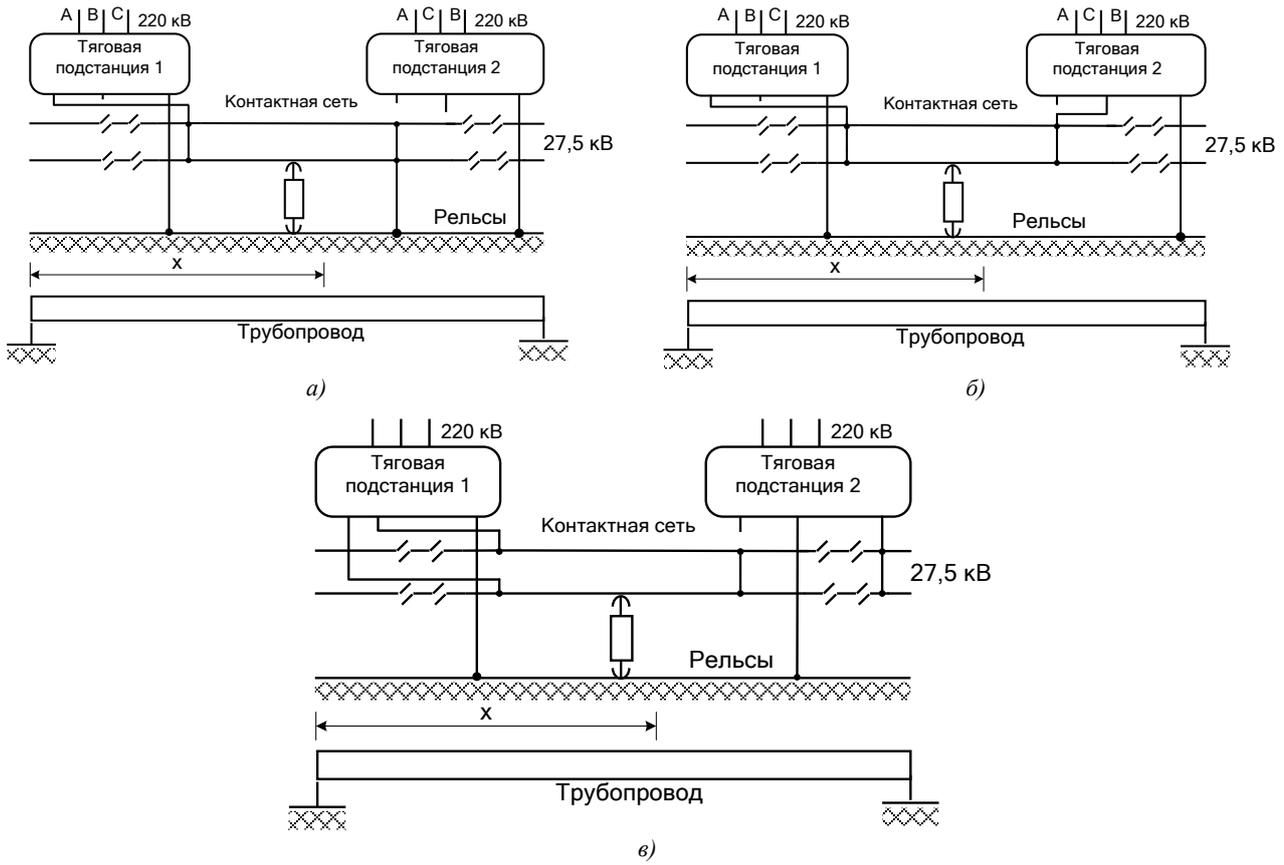


Рис. 1. Схемы плавки гололеда: а — способом искусственного короткого замыкания (КЗ); б — путем питания контактных подвесок (КП) от разных фаз смежных ТП; в — путем питания КП от разных фаз одной ТП

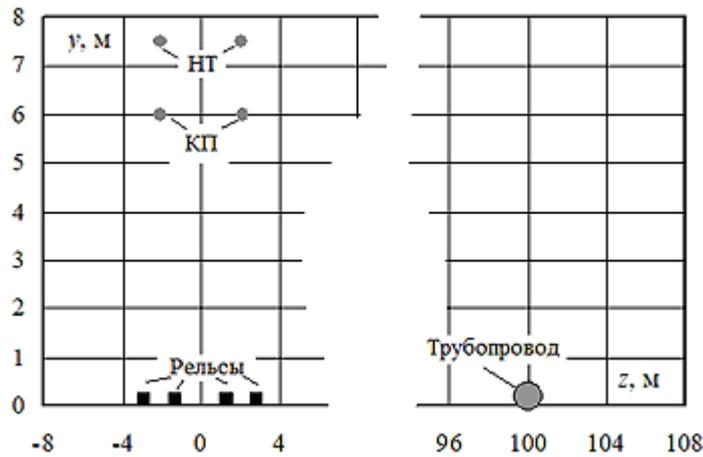


Рис. 2. Координаты токоведущих частей

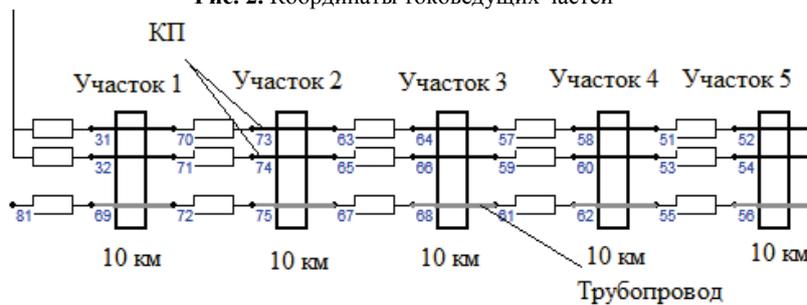


Рис. 3. Фрагмент схемы расчетной модели

Результаты моделирования представлены в табл. 1–3 и проиллюстрированы на рис. 4–7. За счет искус-

ственного КЗ или разнофазного подключения по проводам КП протекали значительные токи (табл. 1, рис.

4) достаточные для их профилактического подогрева с целью предотвращения образования гололеда. Токи, протекающие в рельсах, приведены в табл. 2 и показаны на графике, представленном на рис. 5.

**Таблица 1.** Результаты расчета токов и напряжений

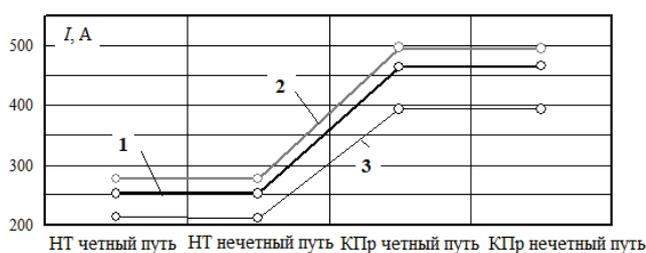
Схема	Путь	Токоведущая часть	Ток		Напряжение	
			Модуль, <i>A</i>	Фаза, <i>град.</i>	Модуль, <i>kB</i>	Фаза, <i>град.</i>
Искусственное КЗ	Нечетный	КПр	465,54	-81,08	20,44	-5,86
		НТ	251,55	-49,91	20,44	-5,86
	Четный	КПр	464,84	-81,10	20,44	-5,86
		НТ	251,54	-49,86	20,44	-5,86
	–	Труба	85,98	107,28	0,09	-72,72
Разнофазное питание от двух ТП	Нечетный	КПр	393,58	-145,93	24,16	10,93
		НТ	212,58	-114,78	24,16	10,93
	Четный	КПр	393,11	-145,98	24,16	10,93
		НТ	212,65	-114,76	24,16	10,93
	–	Труба	72,72	42,44	0,07	-137,56
Разнофазное питание от одной ТП	Нечетный	КПр	493,91	164,92	26,20	-57,46
		НТ	276,60	-161,46	26,20	-57,46
	Четный	КПр	496,09	-14,56	27,60	-4,43
		НТ	277,48	18,94	27,60	-4,43
	–	Труба	2,10	9,40	0,00	-170,60

Примечание. КПр – контактный провод; НТ – несущий трос; данные отвечают началу первого участка ТС, примыкающему к ТП 1.

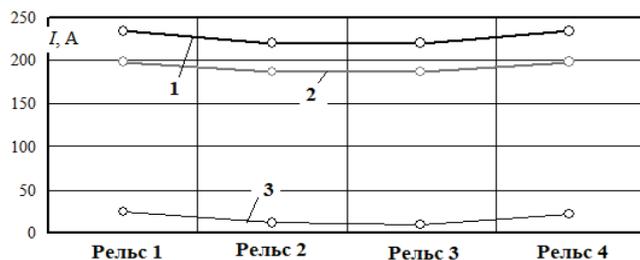
**Таблица 2.** Результаты расчета токов, протекающих по рельсам

Номер рельса	Искусственное КЗ		Разнофазное питание от двух ТП		Разнофазное питание от одной ТП	
	Ток, <i>A</i>	Фаза, <i>град.</i>	Ток, <i>A</i>	Фаза, <i>град.</i>	Ток, <i>A</i>	Фаза, <i>град.</i>
1	234,16	114,49	197,98	49,61	23,69	-158,47
2	220,48	111,96	186,42	47,08	11,70	-160,50
3	220,38	111,94	186,33	47,07	9,71	11,36
4	233,88	114,46	197,73	49,58	21,65	17,58

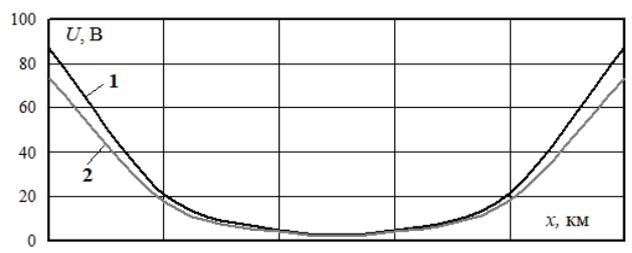
Примечание. Данные отвечают началу первого участка ТС, примыкающему к ТП 1.



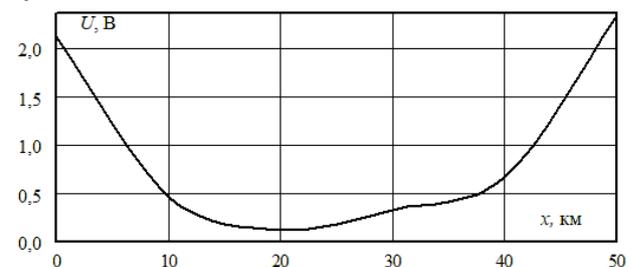
**Рис. 4.** Токи проводов КПр в начале первого участка ТС: 1 — искусственное КЗ; 2 — разнофазное питание от одной ТП; 3 — разнофазное питание от двух ТП



**Рис. 5.** Токи рельсов в начале первого участка ТС: 1 — искусственное КЗ; 2 — разнофазное питание от двух ТП; 3 — разнофазное питание от одной ТП



**Рис. 6.** Зависимости наведенных напряжений от координаты *x*: 1 — искусственное КЗ; 2 — разнофазное питание от двух ТП



**Рис. 7.** Зависимости наведенных напряжений от координаты *x* при разнофазном питании от одной ТП

Результаты определения наведенных напряжений сведены в табл. 3 и проиллюстрированы на графиках (рис. 6 и 7).

**Таблица 3.** Наведенные напряжения на трубопроводе, В

Схема	Координата $x$ , км					
	0	10	20	30	40	50
Искусственное КЗ	86,8	21,2	4,9	4,6	21,7	87
Разнофазное питание от одной ТП	2,12	0,46	0,12	0,33	0,67	2,34
Разнофазное питание от двух ТП	73,5	17,7	3,9	4,1	18,5	73,5

Представленные выше результаты позволяют сформулировать следующие выводы:

1. В рассмотренных режимах по проводам КП протекают значительные токи; наибольшие токи контактного провода, достигающие 496 А, наблюдаются при разнофазном питании от одной ТП; ток несущего троса в этой ситуации равен 277 А (см. табл. 1, рис. 4); значительно меньшие токи имеют место в режиме разнофазного питания от смежных ТП (394 А для КПр и 213 А для НТ).

2. В схемах разнофазного питания в рельсах протекают только наведенные токи; при этом в схеме по рис. 1, в эти токи не превышают 24 А, что связано с противофазностью токов, протекающих по КП отдельных путей (см. рис. 5, табл. 2).

3. Токи, наводимые за счет магнитного влияния в трубопроводе, имеют наибольшие значения в схемах искусственного КЗ и разнофазного питания от смеж-

ных ТП: 86 и 73 А соответственно. При разнофазном питании от одной ТП фазы токов КП отдельных путей различаются на  $180^\circ$  (см. табл. 1); поэтому наведенный ток в трубе снижается до 2 А.

4. На вводах тяговых подстанций поддерживаются напряжения 20...28 кВ (табл. 1), что соответствует допустимым пределам.

5. Уровни наведенных напряжений превышают допустимые значения в 60 В [20] в режимах искусственного КЗ и разнофазного питания от смежных ТП (рис. 6). Такие напряжения наблюдаются на концах моделируемого участка сооружения. В режиме разнофазного питания от одной ТП из-за противофазности токов, протекающих по КП отдельных путей, уровни наведенных напряжений не превышают 2,5 В.

**Результаты моделирования при движении поездов.** Моделирование осуществлялось применительно к схеме, показанной на рис. 1, б и отвечающей плавке гололедаобразований на проводах контактных подвесок путем их подключения к разным фазам смежных тяговых подстанций. За счет разнофазного подключения по проводам КП начинают протекать значительные токи, достаточные для их разогрева с целью устранения гололеда.

В режимах плавки гололеда по схемам, приведенным на рис. 1, б, возможен ограниченный пропуск поездов. При моделировании рассматривалось движение поездов массой 4 084 т в четном и нечетном направлениях (рис. 8). Токвые профили этих поездов представлены на рис. 9. Моделирование проводилось на основе программного комплекса Fazonord [16] с учетом высших гармоник токов и напряжений ТС.

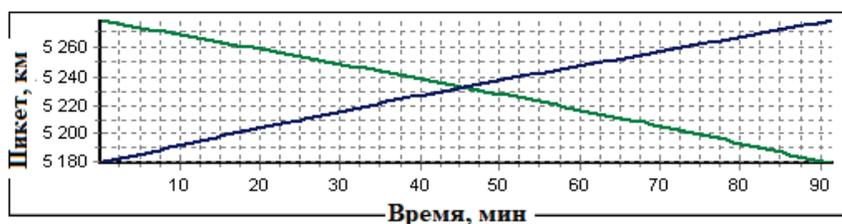


Рис. 8. График движения поездов

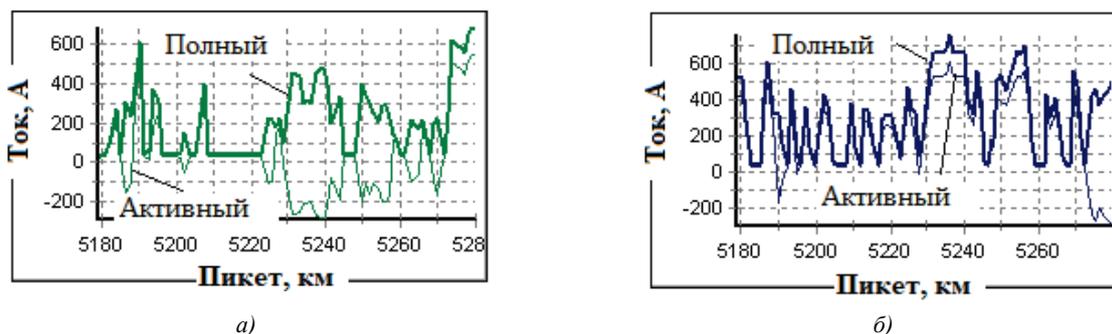


Рис. 9. Токвые профили поездов массой 4 084 т, двигавшихся в нечетном (а) и четном (б) направлениях

На рис. 10 проиллюстрированы результаты моделирования динамики изменения напряжений на вводах 27,5 кВ тяговых подстанций. На рис. 11 приве-

дены аналогичные результаты для суммарных токов контактных подвесок и тока, наведенного в трубопроводе.

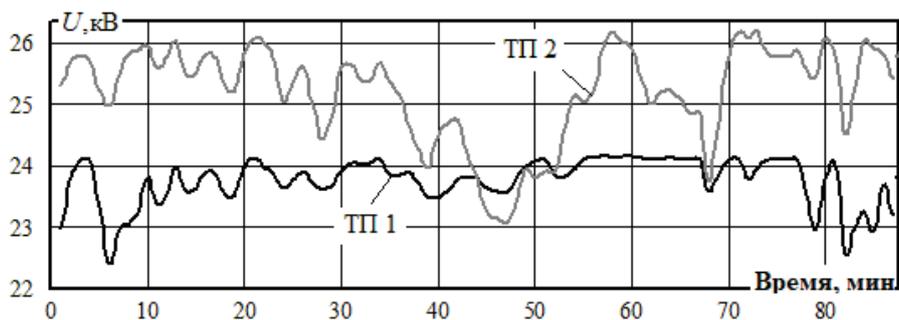


Рис. 10. Изменение напряжений на выводах 27,5 кВ ТП 1 во времени

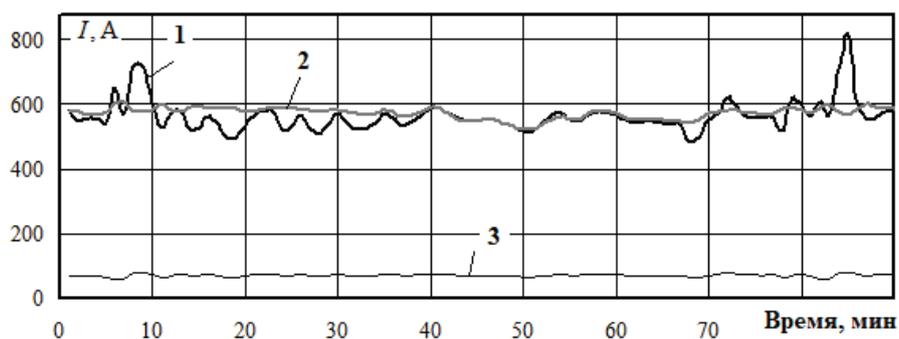
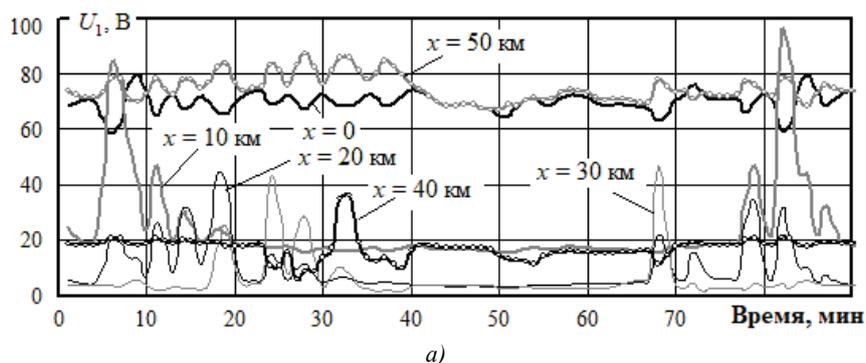
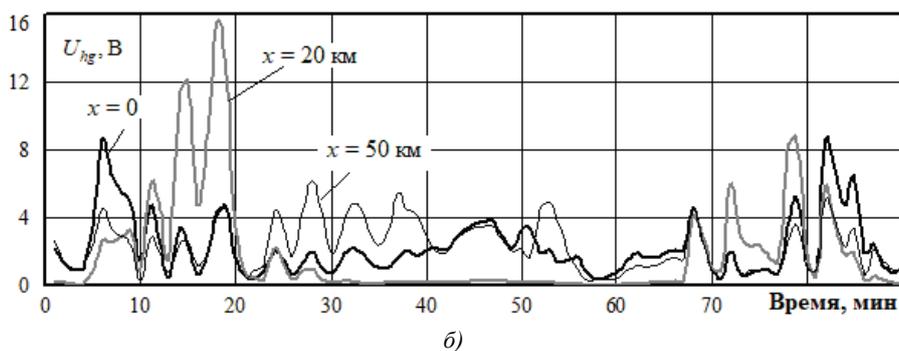


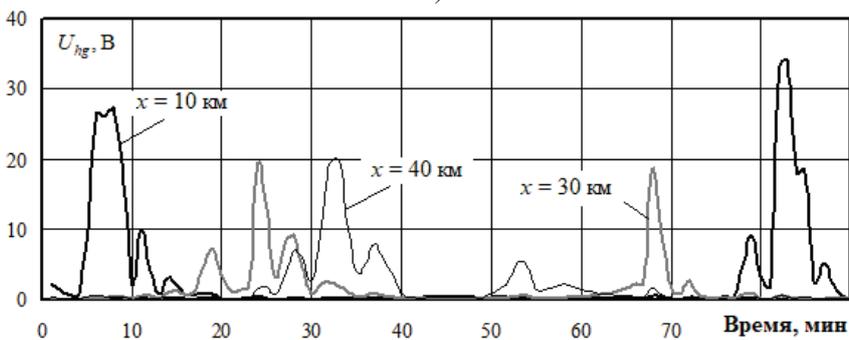
Рис. 11. Временные зависимости токов контактных подвесок (КП) и трубопровода: 1 — ток КП нечетного пути; 2 — ток КП четного пути; 3 — ток, наведенный в трубопроводе



а)



б)



в)

Рис. 12. Зависимости наведенных напряжений от времени: а — напряжения основной частоты; б, в — эффективные значения напряжений высших гармоник

Результаты определения составляющих наведенных напряжений основной частоты и эффективных значений напряжений высших гармоник представлены на рис. 12. Кроме того найдены результирующие напряжения наведенных напряжений, которые определялись по формуле:

$$U_{\Sigma} = U_1 \sqrt{1 + k_U^2},$$

где  $k_U$  — суммарный коэффициент высших гармоник.

Ввиду относительно небольших значений  $k_U$  (рис. 13) зависимости  $U_{\Sigma}$  от времени незначительно отличаются от графиков, приведенных на рис. 12, а. Однако в некоторые интервалы моделирования различия становятся заметными (рис. 14).

Итоговые данные по величинам  $k_U$  и уровням наведенных напряжений на трубопроводе приведены в табл. 3 и 4.

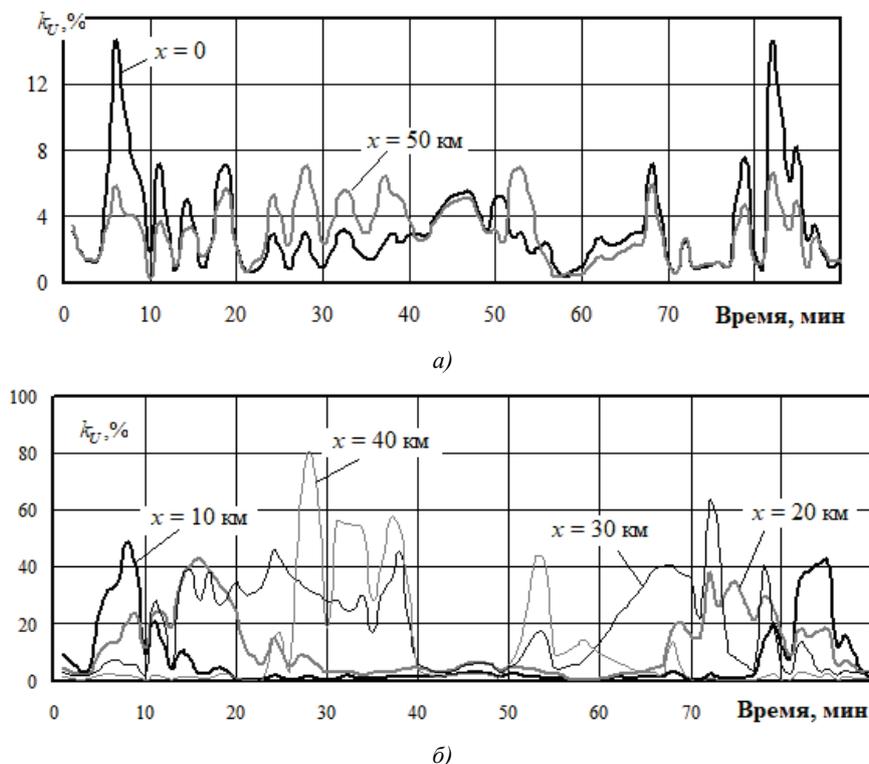


Рис. 13. Зависимости суммарного коэффициента гармоник от времени

Таблица 3. Суммарные коэффициенты гармоник  $k_U, \%$

Показатель	Расстояние $x$ от начала координат, км					
	0	10	20	30	40	50
Среднее значение	3,29	6,69	11,47	18,50	11,04	3,03
Максимум	14,59	48,78	42,68	63,36	80,55	7,06

Таблица 4. Наведенные напряжения на трубопроводе, В

Параметр	Показатель	Расстояние $x$ от начала координат, км					
		0	10	20	30	40	50
$U_1$	Среднее значение	69,84	23,89	9,58	6,24	17,11	74,64
	Максимум	79,50	95,20	44,30	46,10	36,10	87,20
$U_{hg}$	Среднее значение	2,24	3,10	1,81	1,62	1,69	2,30
	Максимум	8,58	33,75	15,58	19,27	19,72	6,15
$U_{\square}$	Среднее значение	69,90	24,36	9,82	6,52	17,44	74,68
	Максимум	<b>79,76</b>	<b>100,81</b>	46,96	49,74	41,13	<b>87,42</b>

На рис. 15 приведены зависимости составляющих наведенных напряжений от координаты  $x$ , а на рис. 16 аналогичные графики для суммарного коэффициента гармоник. На рис. 17 представлены результаты

сопоставления наведенных напряжений основной частоты, рассчитанных при движении поездов и без их пропуска.

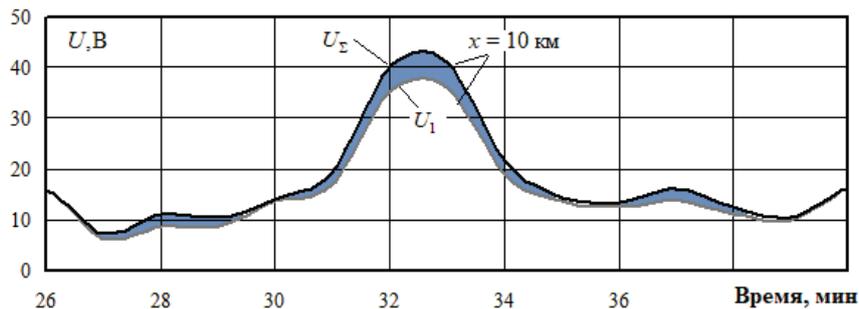


Рис. 14. Влияние гармонических искажений на наведенные напряжения

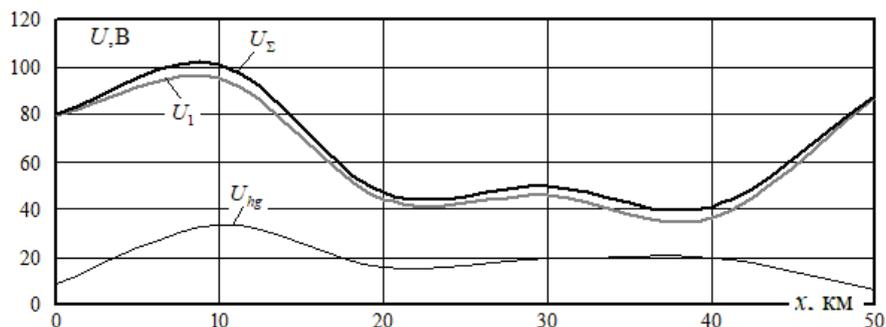


Рис. 15. Зависимости составляющих наведенных напряжений от координаты  $x$

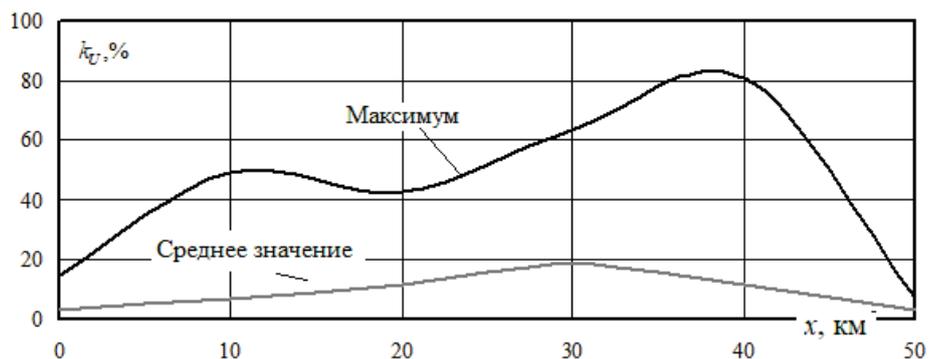


Рис. 16. Зависимости среднего значения и максимума коэффициентов гармоник от координаты  $x$

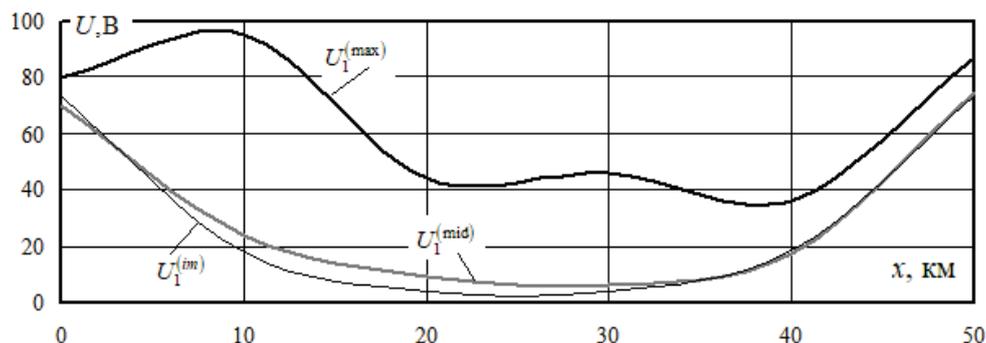


Рис. 17. Зависимости наведенных напряжений от координаты  $x$ :  $U_1^{(max)}$  — максимальные значения наведенных напряжений основной частоты при движении поездов;  $U_1^{(mid)}$  — средние значения наведенных напряжений основной частоты при движении поездов;  $U_1^{(im)}$  — значения наведенных напряжений основной частоты без пропуска поездов

Представленные выше результаты позволяют сформулировать следующие выводы:

1. В рассмотренном режиме плавки гололеда по проводам КП протекают значительные токи; суммарные токи контактного провода и несущего троса находятся в

диапазоне 480...820 А. За счет магнитного влияния в трубопроводе наводятся токи 60...80 А (см. рис. 11).

2. На вводах тяговых подстанций поддерживаются напряжения 22...26 кВ (см. рис. 10), что соответствует допустимым пределам.

3. В отдельных точках сооружения наводятся напряжения, превышающие допустимое значение в 60 В [20] (см. табл. 4). Для уменьшения наведенных напряжений можно применять дополнительные заземлители. Кроме того, в процессе эксплуатации сооружения величины сопротивлений распределенного заземления могут снижаться, что будет приводить к уменьшению наводимых напряжений.

4. Наведенные напряжения отличаются повышенным уровнем гармонических искажений (см. рис. 13, табл. 3). Суммарный коэффициент гармоник достигает 81 % и наблюдается в точке, отвечающей координате  $x$ , равной 40 км.

5. Значения наведенных напряжений основной частоты без пропуска поездов (см. рис. 12) близки к средним величинам  $U_1$ , полученным в результате мо-

делирования движения поездов массой 4 084 т по графику, приведенному на рис. 2.

**Заключение.** Представленная методика и разработанные компьютерные модели могут использоваться на практике при планировании мероприятий по снижению наведенных напряжений, возникающих в режимах плавки гололеда на проводах контактных подвесок.

Работа выполнена при финансовой поддержке по гранту государственного задания Минобрнауки России на тему «Повышение качества электрической энергии и электромагнитной безопасности в системах электроснабжения железных дорог, оснащенных устройствами Smart Grid, путем применения методов и средств математического моделирования на основе фазных координат».

#### Литература

1. Бородавкин П.П., Березин В.Л. Сооружение магистральных трубопроводов. М.: Недра, 1987. 470 с.
2. Зиневич А.М., Глазков В.И., Котик В.Г. Защита трубопроводов и резервуаров от коррозии. М.: Недра, 1975, 288 с.
3. Третьякова М.В., Фуркин А.В. Оценка опасного влияния наведенных токов линий электропередач на подземные трубопроводы // Рассохинские чтения. Ухта: УГТУ, 2011. С. 320–325.
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 его защита от воздействия наведенного переменного тока // Газовая промышленность. № 9 (774). 2018. 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». № 12. 2013. 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 литературы по строительству, 1967. 248 с.
9. Мокроусова Ю.В. Применение компенсирующих проводов для снижения влияния воздушных линий электропередачи на трубопроводы // Наука. Технологии. Инновации. Новосибирск, 2017. С. 164–167.
10. Ратнер М.П. Индуктивное влияние электрифицированных железных дорог на электрические сети и трубопроводы. М.: Транспорт, 1966. 164 с.
11. Котельников А.В., Косарев А.Б. Электромагнитное влияние тяговых сетей переменного тока на металлические конструкции // Электричество. 1992. № 9. С. 26–34.
12. Коннова Е.И., Косарев А.Б. Расчет электромагнитного влияния сетей переменного тока на металлические коммуникации // Вестник ВНИИЖТ. № 2. 1990. С. 17–19.
13. Hu Xiande; Zhou Hao. Simulation and analysis of induced voltage and induced current on overhead ground wire of Jindongnan-Nanyang-Jingmen 1000 kV UHV AC transmission line // 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). 2011. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/DRPT.2011.5993968.

14. Жуков О.А. Аспекты цифровизации электроэнергетики и электротехнической экспертизы // Евразийское научное объединение. № 5–2 (51). 2019. С. 121–125.
15. Цифровизация и пути развития электроэнергетики с участием потребителей: новые задачи для формирования инвестиционного климата / Е.Д. Бурда, И.О. Волкова, Е.В. Гаврикова, А.В. Косыгина // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Гуманитарные науки. Т. 12. № 4. 2019. С. 545–564.
16. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Иркут. ун-т. 2005. 273 с.
17. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Determination of the induced voltages when nonparallel power lines are adjacent to one another // Power Technology and Engineering. Vol. 49, No. 4. 2015. P. 304–309.
18. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Уточненная методика определения взаимных электромагнитных влияний смежных линий электропередачи // Известия вузов. Проблемы энергетики. № 3–4. 2015. С. 29–35.
19. Carson I. R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell System Techn. J. 1926. V. 5. P. 539–554.
20. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz für Erdgasfernleitungen. P. 80.

#### References

1. Borodavkin P.P., Berezin V.L. Construction of main pipelines. Moscow, 1987. 470 p.
2. Zinevich A.M., Glazkov V.I., Kotik V.G. Protection of pipelines and reservoirs from corrosion. Moscow, 1975, 288 p.
3. Tretyakova M.V., Furkin A.V. Assessment of the dangerous influence of induced currents of power lines on underground pipelines // Rassokhin readings. Ukhta, 2011. P. 320–325.
4. Yabluchanskiy A.I. Methods for assessing the dangerous influence of alternating current of high-voltage transmission lines on the projected gas pipeline // Materials of the branch meeting on the problems of protection against corrosion. M., 2008. P. 110–123.
5. Zakharov D.B., Piont D.Yu., Yabluchanskiy P.A. Assessment of the impact of a high-voltage power transmission line on an underground pipeline, its protection from the effects of induced alternating current // Gas industry. No. 9 (774). 2018. S. 84–90.
6. Zakharov D.B., Yabluchanskiy P.A., Titov A.V. On the assessment of the corrosive effect of power lines on the underground pipeline at their intersection // Territory «Neftegaz». No. 12. 2013. P. 68–74.

7. Kotelnikov A.V., Kosarev A.B. Electromagnetic influence of alternating current traction networks on metal structures // *Electricity*. 1992. No. 9. P. 26–34.
8. Strizhevsky I.V., Dmitriev V.I. Theory and calculation of the influence of the electrified railway on underground metal structures. Moscow, 1967. 248 p.
9. Mokrousova Yu.V. Application of compensating wires to reduce the influence of overhead power lines on pipelines // *Science. Technology. Innovation*. Novosibirsk, 2017. P. 164–167.
10. Ratner M. P. Inductive influence of electrified railways on electrical networks and pipelines. Moscow: Transport, 1966. 164 p.
11. Kotelnikov A.V., Kosarev A.B. Electromagnetic influence of alternating current traction networks on metal structures // *Electricity*. 1992. No. 9. S. 26–34.
12. Konnova E.I., Kosarev A.B. Calculation of the electromagnetic influence of alternating current networks on metal communications // *Bulletin of the Railway Research Institute*. No. 2. 1990. P. 17–19.
13. Hu Xiande; Zhou Hao. Simulation and analysis of induced voltage and induced current on overhead ground wire of Jindongnan-Nanyang-Jingmen 1000 kV UHV AC transmission line // 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). 2011. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/DRPT.2011.5993968.
14. Zhukov O.A. Aspects of digitalization of electrical power engineering and electrical engineering expertise // *Eurasian Scientific Association*. No. 5-2 (51). 2019. P. 121–125.
15. Digitalization and ways of developing the electric power industry with the participation of consumers: new tasks for the formation of an investment climate / E.D. Burda, I.O. Volkova, E. V. Gavrikova, A.V. Kosygina // *Journal of the Siberian Federal University. Series: Humanities*. T. 12. No. 4. 2019. P. 545–564.
16. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Asymmetric modes of electrical systems. Irkutsk, 2005. 273 p.
17. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Determination of the induced voltages when nonparallel power lines are adjacent to one another // *Power Technology and Engineering*. Vol. 49, No. 4. 2015. P. 304–309.
18. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. A refined method for determining the mutual electromagnetic influences of adjacent power lines // *Energy problems*. No. 3–4. 2015. P. 29–35.
19. Carson I. R. Wave propagation in overhead wires with ground return // *Bell System Techn. J.* 1926 V. 5. P. 539–554.
20. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz für Erdgasfernleitungen. P. 80.