

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехника

УДК [UDC] 658.264

DOI 10.17816/transsyst20206192-103

© И. А. Терёхин¹, И. А. Кремлев², И. В. Тарабин², Е. Г. Абишов¹

¹Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

²Омский государственный университет путей сообщения

(Омск, Россия)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПАСНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В СМЕЖНЫХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ ПРИ МАГНИТНОМ ВЛИЯНИИ ТЯГОВОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Обоснование: В настоящее время на железных дорогах РФ существуют препоны для повсеместного внедрения нового способа заземления опор контактной сети, а именно отсутствует теоретическая и экспериментальная оценка электромагнитного влияния тяговой сети переменного тока на смежные линии связи при использовании опор контактной сети в качестве естественных заземлителей.

Цель: Совершенствование методики определения опасного напряжения в смежных линиях связи при магнитном влиянии тяговой сети переменного тока.

Методы: В статье рассматривается магнитное влияние при двух принципиально разных системах заземления опор контактной сети переменного тока – традиционная система заземления на тяговую рельсовую сеть и система без заземления опор контактной сети рельсовую сеть (использование арматуры и фундаментов опор контактной сети в качестве естественных заземлителей).

Результаты: В работе показан недостаток существующей методики расчета опасного напряжения в кабельных линиях при магнитном влиянии, которая имеет ряд серьезных допущений не позволяющих получить объективную картину магнитного влияния на смежные линии при наличии троса группового заземления. На основе существующей методики разработана усовершенствованная математическая модель, позволяющая определить уточненные значения опасного напряжения в смежных линиях связи посредством учета действительной длины троса группового заземления при эксплуатации тяговой сети без заземления опор на тяговую рельсовую сеть. Проведено сравнение полученных значений опасных влияний с нормативными значениями в режиме короткого замыкания и вынужденном режиме. Дана оценка магнитного влияния на смежные линии связи при традиционной системе заземления и системе без заземления опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть.

Выводы: Магнитное влияние системы тягового электроснабжения переменного тока с использованием опор в качестве естественных заземлителей меньше, чем при использовании системы заземления опор контактной сети на рельсовую сеть.

Ключевые слова: заземление; система заземления опор контактной сети; тяговое электроснабжение; магнитное влияние; опора контактной сети; естественный заземлитель; железобетонный фундамент; методика расчета опасного напряжения.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrical Engineering

© I. A. Terekhin¹, I. A. Kremlev², I. V. Tarabin², E. G. Abishov¹

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

²Omsk State Transport University
(Omsk, Russia)

IMPROVEMENT OF THE METHOD OF DETERMINING DANGEROUS VOLTAGE IN ADJACENT LINES OF COMMUNICATION UNDER MAGNETIC INFLUENCE OF A TRACING AC SYSTEM

Background: Currently, there are obstacles on the railways of the Russian Federation for the widespread introduction of a new method of grounding the contact network supports, namely, there is no theoretical and experimental assessment of the electromagnetic effect of the AC traction network on adjacent communication lines when using the contact network supports as natural grounding conductors.

Aim: Improving the methodology for determining hazardous voltage in adjacent communication lines under the magnetic influence of the AC traction network.

Methods: The article discusses the magnetic effect with two fundamentally different grounding systems for AC contact poles - a traditional grounding system on a traction rail network and a system without grounding a contact network poles on a rail network (using fittings and foundations of contact network poles as natural grounding conductors).

Results: The paper shows the disadvantage of the existing methodology for calculating the dangerous voltage in cable lines under magnetic influence, which has a number of serious assumptions that do not allow an objective picture of the magnetic effect on adjacent lines in the presence of a group ground wire. Based on the existing methodology, an improved mathematical model has been developed that allows one to determine the specified values of the dangerous voltage in adjacent communication lines by taking into account the actual length of the group ground cable during operation of the traction network without grounding the supports on the traction rail network. The obtained values of hazardous influences are compared with standard values in the short circuit mode and forced mode. An assessment of the magnetic effect on adjacent communication lines with a traditional grounding system and a system without grounding the supports of the contact network to the traction rail network is given.

Conclusions: The magnetic effect of the traction power supply system of alternating current using poles as natural grounding conductors is less than when using the grounding system of poles of a contact network on a rail network.

Keywords: grounding; grounding system of contact network supports; traction power supply; magnetic effect; support of a contact network; natural grounding; reinforced concrete foundation; dangerous voltage calculation methodology.

ВВЕДЕНИЕ

Многие авторы в своих работах [1, 2], рассматривая магнитное влияние контактной сети на смежные линии, отмечали создание заземленными тросами экранирующего действия. Однако все авторы приводили расчеты с учетом следующих допущений: длина сближения влияющей и подверженной влиянию линии одинаковы для контактной сети и троса группового заземления (далее – ТГЗ); ТГЗ имеет традиционную систему заземления на тяговую рельсовую сеть. При таких допущениях коэффициент экранирующего действия ТГЗ во многом зависит только от диаметра и марки провода. Данные пренебрежения не полностью отражают объективную картину магнитного влияния на смежные линии при наличии ТГЗ.

В случае заземления опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть длина ТГЗ согласно инструкции по заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах [3] регламентируется в зависимости от схемы заземления и не может превышать по Т-образной – 400 м, по Г-образной – до 200 м. Соответственно рассматривая любую межподстанционную зону между группами опор существует промежуток на котором отсутствует ТГЗ, длина данного промежутка не может быть меньше длины пролета между соседними опорами. На данном участке будет отсутствовать экранирующее действие ТГЗ. В случае отсутствия заземления опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть такие промежутки также будут присутствовать, однако заземление ТГЗ будет происходить через арматурную сетку каждой из опор объединенных тросом.

ОБЪЕКТ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

С учетом вышеизложенного представим методику расчета опасного напряжения в кабельной линии при магнитном влиянии, учитывающую экранирующее действие ТГЗ в зависимости от длины. Для этого составим схему замещения экранирующего действия ТГЗ для системы без заземления опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть (Рис. 1).

Для системы опор заземленных на тяговую рельсовую сеть схема замещения представлена на Рис. 2.

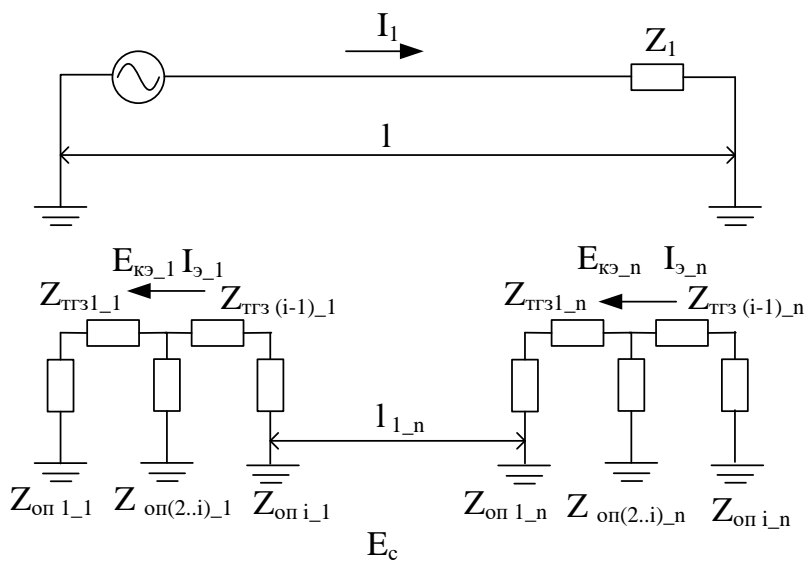
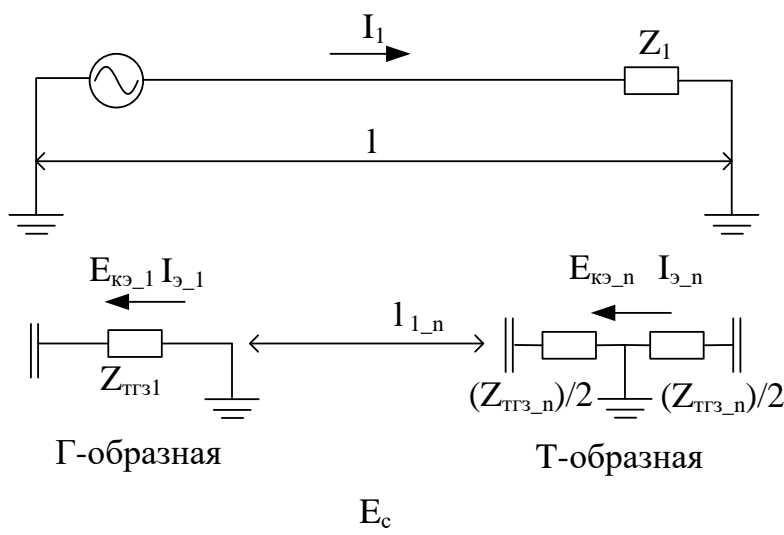


Рис. 1. Схема замещения экранирующего действия ТГЗ для системы без заземления опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть:

- I_1 – ток в контактной сети, кА;
- l – расстояние межподстанционной зоны, км;
- Z_1 – полное сопротивление контактной сети, Ом;
- n – количество групп опор; $Z_{оп\ i_n}$ – полное сопротивление i -ой опоры в группе n , Ом;
- $Z_{ТГЗ\ (i-1)_n}$ – полное сопротивление ТГЗ на участке между соседними опорами, Ом;
- $E_{кэ_n}$ – эдс на ТГЗ индуцируемая током контактной сети, В;
- l_{1_n} – расстояние между группами близлежащих опор, км.



Рису. 2. Схема замещения экранирующего действия ТГЗ для системы с заземлением опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть

Составим уточненную математическую модель для определения коэффициента экранирования ТГЗ.

Коэффициент экранирования равен отношению результирующей ЭДС в смежной линии к ЭДС, наведенной током контактной сети

$$S_T = \frac{\dot{E}_C}{\dot{E}_{CK}} = \frac{\dot{E}_{CT} + \dot{E}_{CK}}{\dot{E}_{CK}}, \quad (1)$$

где $\dot{E}_{CT} = j\omega M_{TC} \dot{I}_T l = z_{TC} \dot{I}_T l_T$ – ЭДС в смежной линии индуцируемая при прохождении тока в ТГЗ, В;

$\dot{E}_{CK} = -j\omega M_{KC} \dot{I}_K l = z_{KC} \dot{I}_K l_K$ – ЭДС в смежной линии индуцируемая при прохождении тока в контактной сети, В.

Уравнение равновесие будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} -z_{KT} \dot{I}_K l_T = z_T \dot{I}_T l_T \\ \dot{E}_C = -z_{KC} \dot{I}_K l_K - z_{TC} \dot{I}_T l_T' \end{cases} \quad (2)$$

где l_T, l_K – длина ТГЗ и контактной сети соответственно, м.

Определив из первого уравнения \dot{I}_T и подставив его значение во второе, получим:

$$\dot{E}_C = \frac{-z_{KC} z_T l_K + z_{TC} z_{KT} l_T}{z_T} \dot{I}_K \quad (3)$$

В то же время ЭДС смежной линии, наведенная током контактной сети

$$\dot{E}_{CK} = -z_{KC} l_K \dot{I}_K. \quad (4)$$

Подставим значения ЭДС из формул (3) и (4) в формулу (1) с учетом равенства полных сопротивлений взаимоиндукции между ТГЗ и контактной сетью

$$S_T = 1 - \frac{z_{KT}}{z_T} \beta. \quad (5)$$

где $\beta = \frac{l_T}{l_K}$ – коэффициент учитывающий пропорциональное отношение длины ТГЗ к длине контактной сети, м;

z_{KT} взаимное сопротивление между контактной сетью и ТГЗ, Ом;

$z_T = R_T + j\omega L_T$ полное сопротивление ТГЗ, Ом.

Уравнение 5 справедливо для коэффициента экранирующего действия ТГЗ вне зависимости от системы заземлений опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть. Отличие усовершенствованной математической модели от модели [1] заключается в том, что вводится коэффициент β , учитывающий пропорциональное отношение длины ТГЗ к длине контактной сети на рассматриваемом участке. В случае если длина ТГЗ равна длине контактной сети $\beta=1$.

Определить длину ТГЗ на рассматриваемом участке необходимо по формуле

$$l_{\text{т}} = \sum_{n=1}^n l_n. \quad (6)$$

где l_n длина n-ой группы опор, м.

Расчет сопротивления ТГЗ при различных системах заземления будет различаться. В случае использования системы с заземлением опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть (рисунок 2), сопротивление будет состоять из полного активного и индуктивного сопротивления ТГЗ. Основные факторы влияющие на сопротивление: длина и материал ТГЗ. В случае использования системы без заземления опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть, основное отличие при нахождении сопротивления ТГЗ будет заключаться в том, что необходимо учитывать и сопротивление опор входящих в группу.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Научным коллективом совместно с сотрудниками Дорожной электротехнической лаборатории (ДЭЛ) и Карасукской дистанцией электроснабжения (ЭЧ-14) в октябре 2015 г. выполнена экспериментальная оценка условий электробезопасности, электромагнитного влияния и дана оценка возможности использования арматуры для прохождения кратковременных токов промышленной частоты при замыканиях на группу опор 761–779, расположенную в районе 403-го км нечетного пути двухпутного участка тяговой подстанции (ТПС) Чебачий – посту секционирования (ПС) Зубково [4,5].

Рассмотрим зависимость опасного напряжения от проводимости земли в режиме КЗ на примере двухпутного участка Карасук-Зубково (Рис. 3).

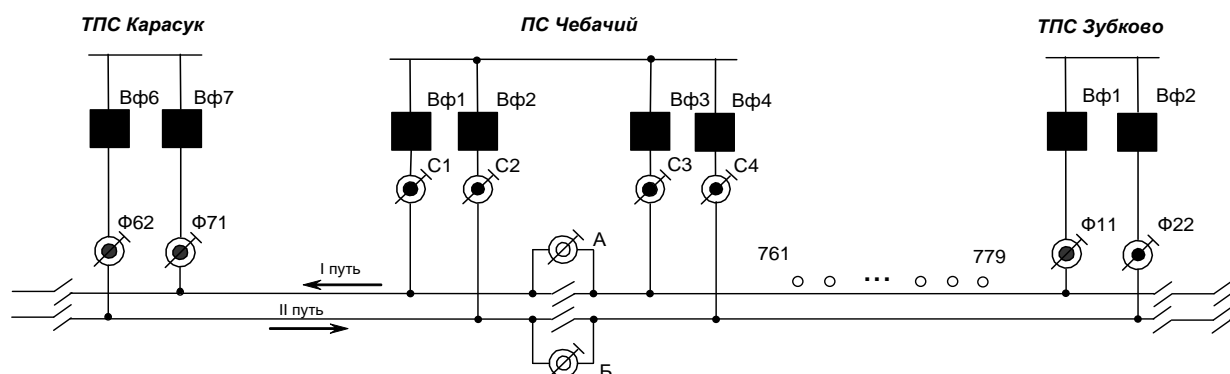


Рис. 3. Схема питания контактной сети участка Карасук – Зубково

Для дальнейших расчетов примем условия:

$$a_{\text{ск}} = 15 \text{ м}; a_{\text{кт}} = 4 \text{ м}; l_3 = 8,85 \text{ км}; \gamma_3 = 0,02; 0,01; 0,007; 0,005; 0,002 \text{ См / м};$$

$$s_p = 0,4 \div 0,55 S_0 = 0,125; \beta = 0,87; R_{\text{он}} = 20 \text{ Ом}; f = 50 \text{ Гц}.$$

Результаты расчетов сведены в Табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчета опасного напряжения от проводимости земли в режиме КЗ

Удельное сопротивление земли ρ_z , Ом·м	Проводимость земли $\gamma_3 \cdot 10^{-3}$, См/м	Коэффициент экранирования рельсов S_p	Коэффициент экранирования ТГЗ S_T	Коэффициент экранирующего действия S	Опасное напряжение U_m , В
					При $I_{\text{кз}}$, кА
					2,8
1	2	3	4	5	6
Традиционная система заземления					
50	20	0,46	0,62	0,036	218
100	10	0,45	0,59	0,033	222
150	7	0,43	0,57	0,031	217
200	5	0,42	0,56	0,030	215
500	2	0,41	0,53	0,027	213
Система при отсутствии заземления опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть					
50	20	0,46	0,55	0,032	194
100	10	0,45	0,52	0,029	195
150	7	0,43	0,50	0,027	189
200	5	0,42	0,49	0,026	186
500	2	0,41	0,45	0,023	181

На Рис. 4 приведены графики зависимости наведенного напряжения от проводимости земли для традиционной системы заземления и системы при отсутствии заземления опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть.

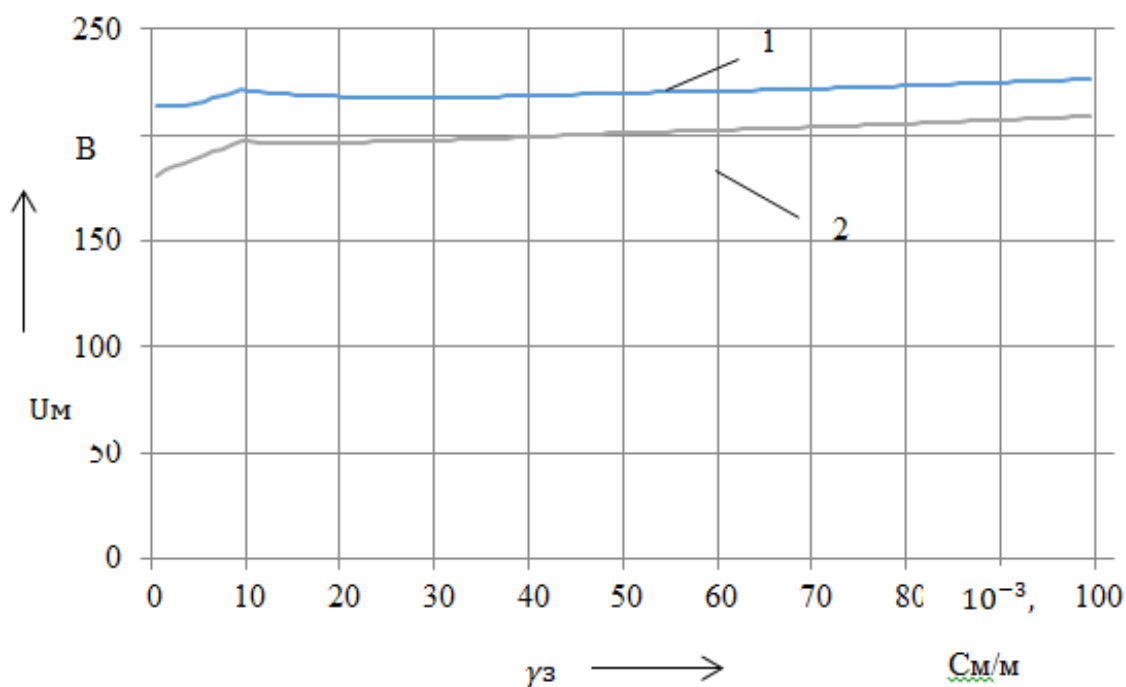


Рис. 4. Зависимость опасного напряжения от проводимости земли в режиме КЗ:

- 1 – традиционная система заземления;
- 2 – система при отсутствии заземления опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть.

Для полной оценки опасных напряжений при магнитном влиянии, необходимо выполнить расчет вынужденного режима, который связан с определенными трудностями. Они обусловлены тем, что на отдельных участках тяговой сети протекают различные токи, меняющиеся по величине и во времени. При этом ток, потребляемый электровозом, зависит от массы поезда, профиля пути, поэтому вычисление опасных напряжений в вынужденном режиме работы тяговой сети сложно и громоздко.

В целях упрощения поставленной задачи действительный ток, протекающий по отдельным участкам тяговой сети, заменяется эквивалентным влияющим током. Под эквивалентным влияющим током понимается одинаковый по всей длине сближения ток, который вызывает такое же опасное напряжение, что и действительный тяговый ток.

Для вынужденного режима в тяговой сети опасные напряжения рекомендуется определять в соответствии с [6] по нижеприведенным формулам.

Для участка кабеля менее 40 км при параллельном сближении, В:

$$U_m = k_\varphi \omega M_{(1-2)} I_{\text{ЭКВ}} I_\varphi S \quad (7)$$

где k_ϕ - коэффициент формы кривой влияющего тока тяговой сети, характеризующий увеличение индуктированного напряжения вследствие его несинусоидальности (при расчете влияний на кабельные жилы $k_\phi = 1$);

$I_{\text{ЭКВ}}$ - эквивалентный влияющий ток при вынужденном режиме работы тяговой сети, А.

Для дальнейших расчетов примем условия:

$$I_{\text{ЭКВ}} = 300 \text{ А}; a_{\text{СК}} = 15 \text{ м}; l_{\text{Э}} = 8,85 \text{ км};$$

$$\gamma_{\text{З}} = 0,02; 0,01; 0,007; 0,005; 0,002 \text{ См/м};$$

$$s_p = 0,4 \div 0,55 \quad S_0 = 0,125; \beta = 0,87; R_{\text{он}} = 20 \text{ Ом}; f = 50 \text{ Гц}.$$

Результаты расчетов зависимости опасного напряжения от проводимости земли в вынужденном режиме для традиционной системы заземления и системы при отсутствии заземления опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть сведены в Табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчета зависимости опасного напряжения от проводимости земли в вынужденном режиме

Удельное сопротивление земли $\rho_{\text{З}}, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	Проводимость земли $\gamma_{\text{З}} \cdot 10^{-3}, \text{ См/м}$	Коэффициент экранирования рельсов S_p	Коэффициент экранирования ТГЗ S_T	Коэффициент экранирующего действия S	Опасное напряжение $U_m, \text{ В}$
Традиционная система заземления					
50	20	0,46	0,62	0,036	23,41
100	10	0,45	0,59	0,033	23,59
150	7	0,43	0,57	0,031	23,16
200	5	0,42	0,56	0,030	22,95
500	2	0,41	0,53	0,027	22,96
Система при отсутствии заземления опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть					
50	20	0,46	0,55	0,032	21,07
100	10	0,45	0,52	0,029	20,94
150	7	0,43	0,50	0,027	20,36
200	5	0,42	0,49	0,026	20,04
500	2	0,41	0,45	0,023	19,39

Результаты расчетов зависимости опасного напряжения от проводимости земли в вынужденном режиме не выходят за пределы допустимых (Табл. 3).

Таблица 3. Допустимые значения опасных напряжений по отношению к земле в проводах линий связи и проводного вещания

Вид линии связи	Допустимые значения напряжения, В	
	Вынужденный режим	Режим короткого замыкания
Воздушная с деревянными опорами, в том числе с железобетонными приставками	60	2000 при $t_0 < 0,15$; 1500 при $t_0 < 0,3$; 1000 при $t_0 < 0,6$;
Воздушная с железобетонными и металлическими опорами и кабельная магистральной и проводной связи, проводного вещания и местной связи	36	320 при $t_0 < 0,15$; 240 при $t_0 < 0,3$; 160 при $t_0 < 0,6$;

Здесь t_0 - время отключения тяговой сети при коротком замыкании, с.

ВЫВОДЫ

Проанализировав полученные данные можно сделать следующие выводы:

- опасное напряжение при традиционной системе заземления выше, чем при отсутствии заземления опор контактной сети на тяговую рельсовую сеть (в среднем на 13 %);
- с увеличением удельной проводимости земли опасное напряжение имеет нелинейный характер изменения в сторону увеличения (при наличии ТГЗ);
- с увеличением тока КЗ опасное напряжение увеличивается;
- на значение опасного напряжения существенным образом влияет длина сближения влияющей и подверженной влиянию линии l_{Σ} , а также коэффициент экранирования ТГЗ, который в свою очередь зависит от коэффициента β ;
- опасное напряжение не превышает допустимое значение напряжения;
- усовершенствованная методика определения опасного напряжения в смежных линиях связи при магнитном влиянии тяговой сети переменного тока позволяет не только выполнить расчеты для системы без заземления опор, но и отказаться от допущений, которые не позволяли дать объективную картину магнитного влияния на смежные линии при наличии ТГЗ.

Библиографический список / References

1. Бадер М.П. Электромагнитная совместимость. – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с. [Bader MP. *Elektromagnitnaya sovместimost'*. Moscow; 2002. 638 p. (In Russ.)].

2. Косарев А.Б. Основы теории электромагнитной совместимости систем тягового электроснабжения переменного тока. – М.: Интекст, 2004. – 272 с. [Kosarev AB. *Osnovy teorii elektromagnitnoj sovmestimosti sistem tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka*. Moscow: Intekst; 2004. 272 p. (In Russ.)].
3. ЦЭ-191. Инструкция по заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах. – М.: МПС РФ, 1993. – 69 с. [CE-191. *Instrukciya po zazemleniyu ustrojstv elektrosnabzheniya na elektrificirovannyh zheleznyh dorogah*. Moscow: Ministry of Railways of Russia, 1993. 69 p. (In Russ.)].
4. Квашук В.А., Кондратьев Ю.В., Кремлев И.А., Терехин И.А. Методика проведения экспериментальных испытаний условий электробезопасности на участке тяговой сети переменного тока, эксплуатируемом без заземления опор контактной сети на рельс // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – № 2(109). – С. 68–73. [Kvashchuk VA, Kondrat'ev YuV, Kremlev IA, Teryohin IA. The Methodology of Electrical Safety Pilot Testing on the Site of an ac Electrical Traction Network Operated with Ungrounded Catenary Supports. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;2(109):68-73 (In Russ.)]. Доступно по: [file:///C:/Users/user/AppData/Local/Packages/Microsoft.MicrosoftEdge_8wekyb3d8bbwe/TempState/Downloads/article_09_0%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/user/AppData/Local/Packages/Microsoft.MicrosoftEdge_8wekyb3d8bbwe/TempState/Downloads/article_09_0%20(1).pdf) Ссылка активна на 02.03.2020.
5. Кузнецов А.А., Кремлев И.А., Терехин И.А. Планирование эксперимента по оценке электромагнитного влияния тяговой сети переменного тока на смежные линии связи в аварийных режимах // Электроснабжение железных дорог: Межвузовский тематический сборник научных трудов. – Омск: ОмГУПС, 2016. – С. 18–21. [Kuznecov AA, Kremlev IA, Teryohin IA. Planirovanie eksperimenta po ocenke elektromagnitnogo vliyaniya tyagovoj seti peremennogo toka na smezhnye linii svyazi v avarijnyh rezhimah. *Elektrosnabzhenie zheleznyh dorog: Mezhvuzovskij tematicheskij sbornik nauchnyh trudov*. Omsk: OMGUPS, 2016. pp. 18-21. (In Russ.)].
6. Шалимов М.Г. Мешающие влияния электрифицированных железных дорог на смежные устройства: учебное пособие. – Омск: Омская гос. акад. путей сообщения, 1996. – 107 с. [Shalimov MG. *Meshayushchie vliyaniya elektrificirovannyh zheleznyh dorog na smezhnye ustrojstva: uchebnoe posobie*. Omsk: Omskaya gos. akad. putej soobshcheniya, 1996. 107 p. (In Russ.)].

Сведения об авторах:**Терехин Илья Александрович, к.т.н.;**

адрес: 190031 г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9;

eLibrary SPIN: 6947-0053; ORCID: 0000-0002-9873-4795;

E-mail: terekhin_ilya@mail.ru

Кремлев Иван Александрович, к.т.н., доцент;

eLibrary SPIN: 5756-7320; ORCID: 0000-0001-6722-6037;

E-mail: ivkreml@mail.ru

Тарабин Игорь Валерьевич, к.т.н., доцент;

eLibrary SPIN: 4248-7230; ORCID: 0000-0001-8956-4598;

E-mail: igor_tarabin@mail.ru

Абишов Ербол Гайдарович, инженер;

ORCID: 0000-0003-1746-7929;

E-mail: abishov@pgups.ru

Information about the authors:

Ilya A. Terekhin, Candidate of Technical Science;
address: 190031 St. Petersburg, Moskovsky pr., 9;
eLibrary SPIN: 6947-0053; ORCID: 0000-0002-9873-4795;
E-mail: terekhin_ilya@mail.ru

Ivan A. Kremlev, Candidate of Technical Science, docent;
eLibrary SPIN: 5756-7320; ORCID: 0000-0001-6722-6037;
E-mail: ivkreml@mail.ru

Igor V. Tarabin, Candidate of Technical Science, docent;
eLibrary SPIN: 4248-7230; ORCID: 0000-0001-8956-4598;
E-mail: igor_tarabin@mail.ru

Erbol G. Abishov, engineer;
ORCID: 0000-0003-1746-7929;
E-mail: abishov@pgups.ru

Цитировать:

Терёхин И.А., Кремлев И.А., Тарабин И.В., Абишов Е.Г. Совершенствование методики определения опасного напряжения в смежных линиях связи при магнитном влиянии тяговой сети переменного тока // Транспортные системы и технологии. – 2020. – Т. 6. – № 1. – С. 92–103. doi: 10.17816/transsyst20206192-103

To cite this article:

Terekhin IA, Kremlev IA, Tarabin IV, Abishov EG. Tax Improvement of the Method of Determining Dangerous Voltage in Adjacent Lines of Communication Under Magnetic Influence of a Tracing AC System. *Transportation Systems and Technology*. 2020;6(1):92-103. doi: 10.17816/transsyst20206192-103