

EDN: ZBRAHW

УДК 621.311, 621.331

## Modeling of Electromagnetic Fields Traction Networks Taking into Account Metal Structures of Portal Type

Andrey V. Kryukov<sup>a, b</sup>,  
Konstantin V. Suslov<sup>b, c</sup> and Ekaterina V. Voronina<sup>\*a</sup>

*<sup>a</sup>Irkutsk State Transport University  
Irkutsk, Russian Federation*

*<sup>b</sup>Irkutsk National Research Technical University  
Irkutsk, Russian Federation*

*<sup>c</sup>National Research University «MEI»  
Moscow, Russian Federation*

Received 03.08.2024, received in revised form 24.09.2024, accepted 28.10.2024

**Abstract.** Electric power transport facilities create significant levels of electromagnetic fields (EMF) in their surroundings, which can have a negative impact on personnel, the environment and electronic equipment. To reduce these influences, various measures are used, the rational choice of which in modern conditions should be carried out on the basis of computer modeling. To carry it out, it is necessary to develop digital models that provide adequate determination of EMF. In the spans between supports, the fields created by traction networks are plane-parallel in nature, and effective methods and means have been developed to calculate their strengths. However, near metal supports and other conductive structures, the task of modeling EMF becomes significantly more complicated, due to the fact that the field in this case becomes three-dimensional. An analysis of publications devoted to calculations of EMF of traction networks showed that methods for determining EMF near metal structures are not presented in the reviewed works. To solve this problem, algorithms based on the use of multiphase representation of traction power supply systems and implemented in the Fazonord software package can be used. The article presents the results of the development of digital models for determining EMF near rigid crossbars, which are widely used on hauls and multi-track traction networks of railway stations. Two operating modes were considered: normal, load and short circuit. Based on the modeling results, the dependences of the amplitudes of EMF strengths on the coordinates of the axes running along the road route and perpendicular to it were obtained. In addition, three-dimensional diagrams have been constructed that make it possible to analyze the distribution of EMF in space. The results of the studies showed that the presented methodology allows taking into account the influence of metal structures when modeling the EMF of traction networks. It can be used in practice when developing measures to improve electromagnetic safety conditions.

---

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: dr.souslov@yandex.ru; and\_kryukov@mail.ru; eka7erina.voronina@yandex.ru

**Keywords:** AC traction networks, electromagnetic fields, accounting of conductive structures, emergency modes, modeling.

Citation: Kryukov A. V., Suslov K. V., Voronina E. V. Modeling of electromagnetic fields traction networks taking into account metal structures of portal type. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2024, 17(7), 841–852. EDN: ZBRAHW



## Моделирование электромагнитных полей тяговых сетей с учетом металлических конструкций порталного типа

А. В. Крюков<sup>а, б</sup>, К. В. Суслов<sup>б, в</sup>, Е. В. Воронина<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения  
Российская Федерация, Иркутск

<sup>б</sup>Иркутский национальный исследовательский  
технический университет

Российская Федерация, Иркутск

<sup>в</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
Российская Федерация, Москва

**Аннотация.** Объекты транспортной электроэнергетики создают в окружающем их пространстве значительные уровни электромагнитных полей (ЭМП), оказывающие негативные воздействия на персонал, природную среду и электронное оборудование. Для их снижения применяются различные мероприятия, рациональный выбор которых в современных условиях должен осуществляться на основе компьютерного моделирования. Для его проведения необходима разработка цифровых моделей, обеспечивающих адекватное определение ЭМП. Пролеты между опорами поля, создаваемые тяговыми сетями (ТС), имеют плоскопараллельный характер, и для расчета их напряженностей разработаны эффективные методы и средства. Однако вблизи металлических опор и других проводящих сооружений задача моделирования ЭМП существенно усложняется вследствие того, что поле в этом случае становится трехмерным. Анализ публикаций, посвященных расчетам ЭМП ТС, показал, что методы определения ЭМП вблизи металлических конструкций в рассмотренных работах не описаны. Для решения этой задачи могут применяться алгоритмы, основанные на использовании мультифазного представления систем тягового электроснабжения и реализованные в программном комплексе Fazonord. В статье представлены результаты разработки цифровых моделей для определения ЭМП вблизи жестких поперечин, широко применяемых на перегонах и многопутных ТС железнодорожных станций. Рассматривались два режима работы ТС: нормальный, нагрузочный и короткого замыкания. По результатам моделирования получены зависимости амплитуд напряженностей ЭМП от координат осей, проходящих вдоль трассы дороги и перпендикулярно ей. Кроме того, построены объемные диаграммы, позволяющие анализировать распределение ЭМП в пространстве. Результаты проведенных исследований показали, что представленная методика позволяет осуществлять учет влияния металлических конструкций при моделировании ЭМП тяговых сетей. Она может использоваться на практике при разработке мероприятий по улучшению условий электромагнитной безопасности.

**Ключевые слова:** тяговые сети переменного тока, электромагнитные поля, учет проводящих конструкций, аварийные режимы, моделирование.

Цитирование: Крюков А. В. Моделирование электромагнитных полей тяговых сетей с учетом металлических конструкций порталного типа / А. В. Крюков, К. В. Суслов, Е. В. Воронина // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(7). С. 841–852. EDN: ZBRANW

## Введение

В пространстве, окружающем объекты транспортной электроэнергетики, наблюдаются значительные уровни электромагнитных полей, которые могут оказывать негативное влияние на персонал, природную среду и электронное оборудование [1, 2]. Для снижения воздействия ЭМП применяются различные мероприятия, рациональный выбор которых в современных условиях [3] должен осуществляться на основе компьютерного моделирования. Для его проведения необходима разработка цифровых моделей, обеспечивающих адекватное определение ЭМП. Актуальность этой задачи подтверждается большим числом работ по данной тематике. Так, например, статья [4] посвящена расчету электромагнитных влияний ТС на смежные линии. В ней показано, что наведенные потенциалы, создаваемые ЭМП, могут представлять угрозу жизни и здоровью людей, а также генерировать помехи, вызывающие отказы низковольтного оборудования. В работе [5] даны аналитические соотношения, позволяющие определять напряженности ЭМП, создаваемые сложными ТС постоянного тока, и выполнено сравнение расчетных данных с экспериментальными. Результаты определения ЭМП вблизи контактной сети и контура заземления приведены в [6]. Статья [7] посвящена алгоритмам вычисления магнитных полей ТС и анализу влияния экранирования на распределение напряженности вдоль железнодорожного пути. Метод экспериментального определения ЭМП при коротких замыканиях (КЗ) контактных подвесок на рельсы представлен в статье [8]. В ней показано, что он позволяет оценить помехи и разработать защиту для слаботочного оборудования. Способ прогнозирования ЭМП в эксперименте по КЗ описан в [9]. Воздействие на персонал поля, создаваемого выпрямительными преобразователями тяговых подстанций (ТП), рассмотрено в [10]. Оценка низкочастотного ЭМП вблизи электроустановок дана в [11]. На этой основе предложен принцип нормирования ЭМП частотой 50 Гц. Результаты моделирования магнитного поля вокруг ТС, питающей высокоскоростные поезда, приведены в [12]. Оценка электромагнитного воздействия ТС на воздушные линии железнодорожной связи дана в [13], там же проведен анализ гармоник тягового тока и представлено теоретическое исследование их влияния на системы связи. Работа [14] посвящена вопросам использования программных модулей Comsol Multiphysics для нахождения напряженностей ЭМП вблизи высоковольтной линии электропередачи (ЛЭП). Результаты расчета ЭМП в пространстве между трассами ЛЭП и железной дорогой приведены в [15]. Модель для вычисления напряженностей ЭМП промышленной частоты, создаваемых воздушной ЛЭП, описана в [16].

Анализ рассмотренных публикаций позволяет сделать вывод о том, что в них представлены разработки, направленные в основном на определение плоско-параллельных ЭМП, создаваемых ТС и ЛЭП. Для этих полей выполняются следующие соотношения:

$$\begin{aligned} E(x_k, y_k, z) &= \text{const}; H(x_k, y_k, z) = \text{const}; \\ x_k &= \text{const}; y_k = \text{const}; z = \text{var}; \end{aligned} \quad (1)$$

где  $E, H$  – напряженности электрического и магнитного поля в фиксированных точках с координатами  $x_k, y_k$  по осям  $X, Y$  (рис. 1);  $Z$  – ось, расположенная вдоль трассы дороги.

Одним из основных элементов любой ТС являются металлические или железобетонные опоры, вблизи которых характер распределения напряженностей ЭМП усложняется; при этом картина поля становится трехмерной и соотношения (1) не выполняются. Особенно заметные вариации ЭМП имеют место в режимах КЗ, когда в цепь замыкания включаются элементы опоры.

Для решения задачи определения ЭМП с учетом влияния опор или других металлических конструкций, находящихся на трассе ТС, например путепроводов, может использоваться подход, предложенный в работах [17–19].

### Постановка задачи и результаты моделирования

Ниже приведены результаты разработки цифровых моделей для определения ЭМП вблизи жестких поперечин, представляющих собой металлические конструкции portalного типа (рис. 1).

Рассматривалось два режима работы ТС двухпутного участка: нормальный при нагрузках по каждому пути  $8 + j8$  МВ·А в конце ТС при консольном питании контактных подвесок; короткое замыкание через элементы жесткой поперечины (рис. 2а); сопротивление ее заземления принято равным 10 Ом.

Моделирование включало следующие этапы:

- формирование цифровой модели системы тягового электроснабжения (СТЭ), в состав которой наряду с протяженными элементами (контактная сеть и рельсы) включался набор проводников ограниченной длины, моделирующих жесткую поперечину и примыкающий к ней участок ТС;

- расчет режима СТЭ;

- вычисление вертикальных и горизонтальных составляющих напряженностей ЭМП и определение на их основе амплитуд  $E_{\max}$  и  $H_{\max}$ ;

- формирование зависимостей  $E_{\max} = E_{\max}(x)$ ;  $H_{\max} = H_{\max}(x)$ ;  $E_{\max} = E_{\max}(z)$ ;  $H_{\max} = H_{\max}(z)$ ;

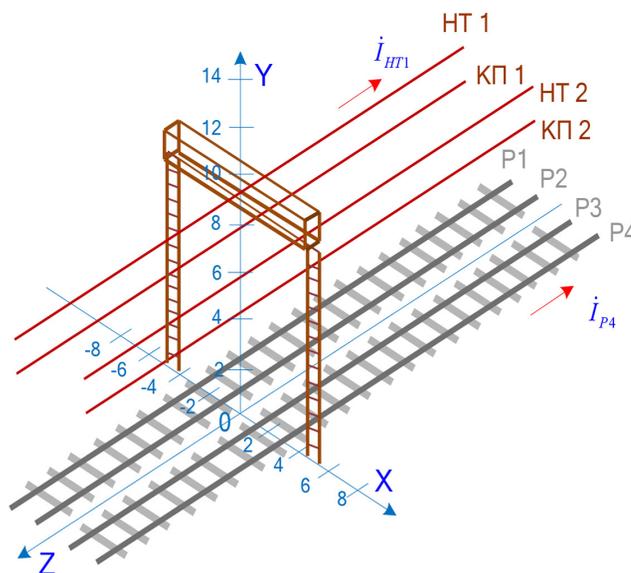


Рис. 1. Схема жесткой поперечины: НТ – несущие тросы; КП – контактные провода; Р – рельсовые нити

Fig. 1. Diagram of a rigid crossbar: НТ – load-bearing cables; КП – contact wires; Р – rail threads

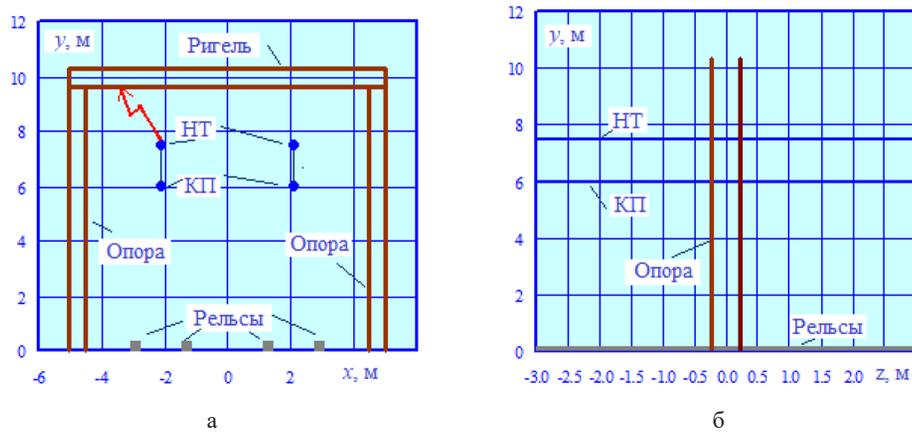


Рис. 2. Координаты токоведущих частей и элементов жесткой поперечины

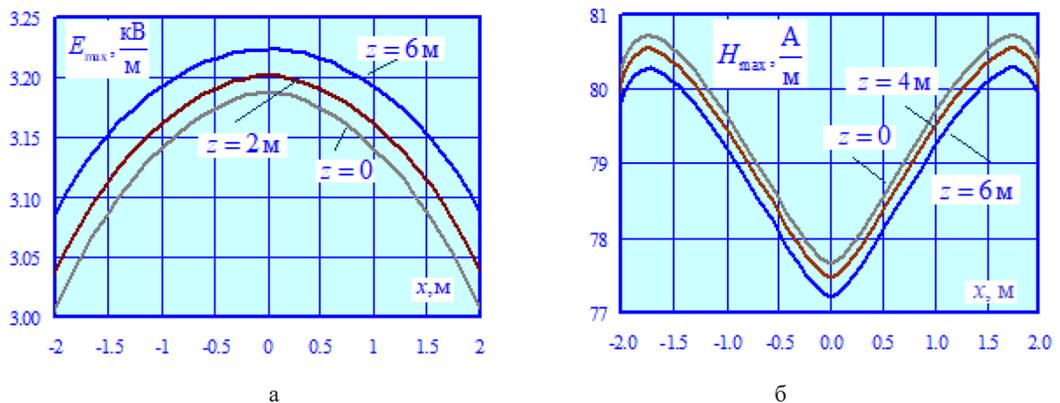
Fig. 2. Coordinates of the live parts and elements of the rigid crossbar

- построение объемных диаграмм ЭМП.

В результате моделирования были построены графики амплитуд напряженностей электрического  $E_{\max}$  и магнитного  $H_{\max}$  полей на высоте 1,8 м от координат  $x$  и  $z$  при нормальном режиме работы тяговой сети (рис. 3–6), а также при КЗ через элементы жесткой поперечины (рис. 8, 9). Пространственная структура распределения этих параметров при нормальном режиме работы ТС показана на рис. 7, при при КЗ – на рис. 10.

Из рис. 3а видно, что максимальное различие между кривыми  $E_{\max} = E_{\max}(x)$ , построенными при  $z=0$  и  $z=6$  м, достигает 21 %, что подтверждает важность учета опор при определении ЭМП ТС. Отличия в графиках  $H_{\max} = H_{\max}(x)$  значительно меньше, при этом

$$\max \left( \frac{H_{\max}(x)_{z=0} - H_{\max}(x)_{z=6}}{H_{\max}(x)_{z=0}} \cdot 100 \right) = 2,1\% \text{ (рис. 3б)}. \text{ Зависимости } E_{\max} = E_{\max}(z) \text{ и } H_{\max} = H_{\max}(z), \text{ полученные для разных значений координат } x, \text{ показаны на рис. 4.}$$

Рис. 3. Зависимости  $E_{\max} = E_{\max}(x)$  (а) и  $H_{\max} = H_{\max}(x)$  (б) при наличии жесткой поперечиныFig. 3. Dependencies  $E_{\max} = E_{\max}(x)$  (a) and  $H_{\max} = H_{\max}(x)$  (б) in the presence of a rigid crossbar

Результаты сравнения напряженностей ЭМП, полученные при наличии и отсутствии жесткой поперечины, приведены на рис. 5, 6.

Из рис. 5, 6 видно, что при учете жесткой поперечины картина напряженностей электрического поля заметно изменяется, а характер зависимостей  $H_{\max} = H_{\max}(x)$  и  $H_{\max} = H_{\max}(z)$  остается прежним. Распределение ЭМП в пространстве при нормальном режиме работы ТС показано на рис. 7

На рис. 8 и 9 представлены результаты расчетов КЗ при протекании токов замыкания через элементы опоры portalного типа. Из них видно, что картина распределения ЭМП в пространстве в этом режиме заметно усложняется. Результаты сравнения  $E_{\max} = E_{\max}(x)$  и  $H_{\max} = H_{\max}(x)$ , а также  $E_{\max} = E_{\max}(z)$  и  $H_{\max} = H_{\max}(z)$  представлены на рис. 11, 12.

Сводные данные, характеризующие результаты моделирования при коротком замыкании, приведены на рис. 13, 14.

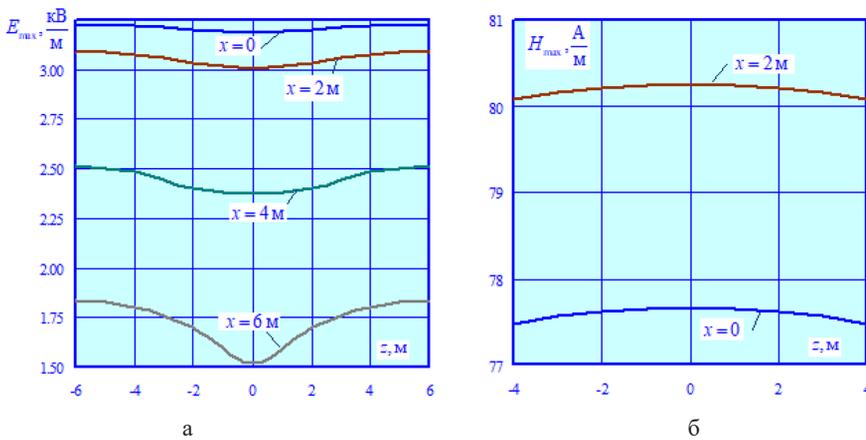


Рис. 4. Зависимости  $E_{\max} = E_{\max}(z)$  (а) и  $H_{\max} = H_{\max}(z)$  (б) при наличии жесткой поперечины

Fig. 4. Dependencies  $E_{\max} = E_{\max}(z)$  (a) and  $H_{\max} = H_{\max}(z)$  (б) in the presence of a rigid crossbar

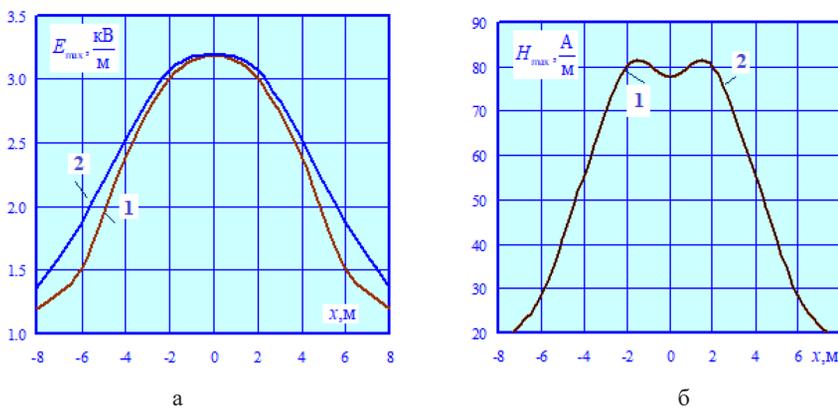


Рис. 5. Сравнение  $E_{\max} = E_{\max}(x)$  (а) и  $H_{\max} = H_{\max}(x)$  (б) при  $z = 0$ : 1 – при наличии жесткой поперечины; 2 – при ее отсутствии

Fig. 5. Comparison  $E_{\max} = E_{\max}(x)$  (a) and  $H_{\max} = H_{\max}(x)$  (б) at  $z = 0$ : 1 – in the presence of a rigid crossbar; 2 – in its absence

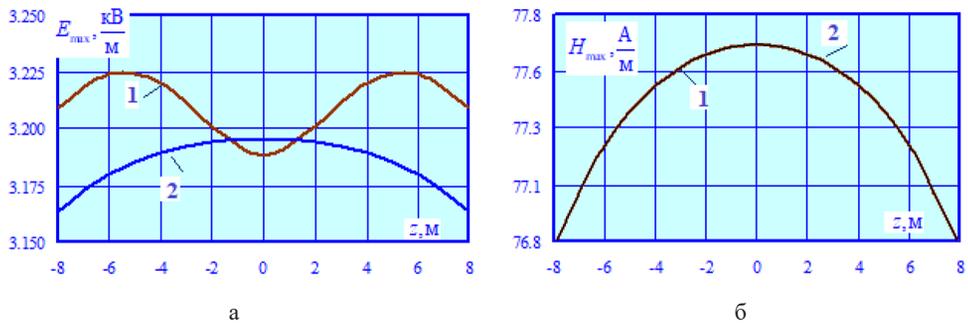


Рис. 6. Сравнение  $E_{\max} = E_{\max}(z)$  (а) и  $H_{\max} = H_{\max}(z)$  (б) при  $x = 0$ : 1 – при наличии жесткой поперечины; 2 – при ее отсутствии

Fig. 6. Comparison  $E_{\max} = E_{\max}(z)$  (a) and  $H_{\max} = H_{\max}(z)$  (б) at  $x = 0$ : 1 – in the presence of a rigid crossbar; 2 – in its absence

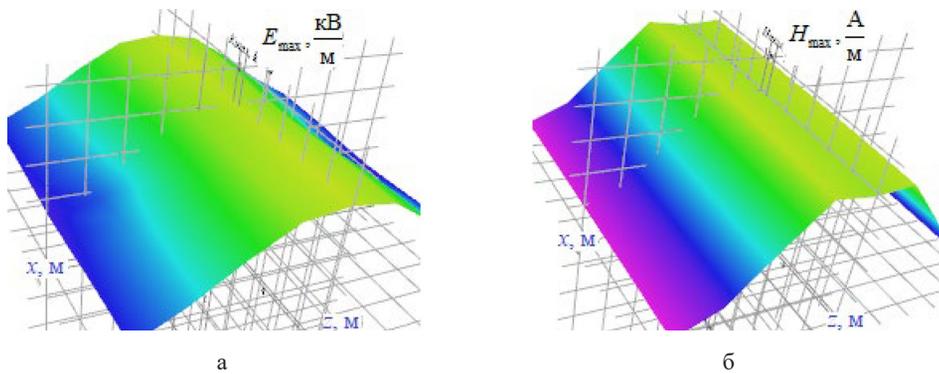


Рис. 7. Распределение ЭМП в пространстве при нормальном режиме работы ТС: а – электрическое поле; б – магнитное

Fig. 7. EMF distribution in space under normal vehicle operation mode: а – electric field; б – magneti

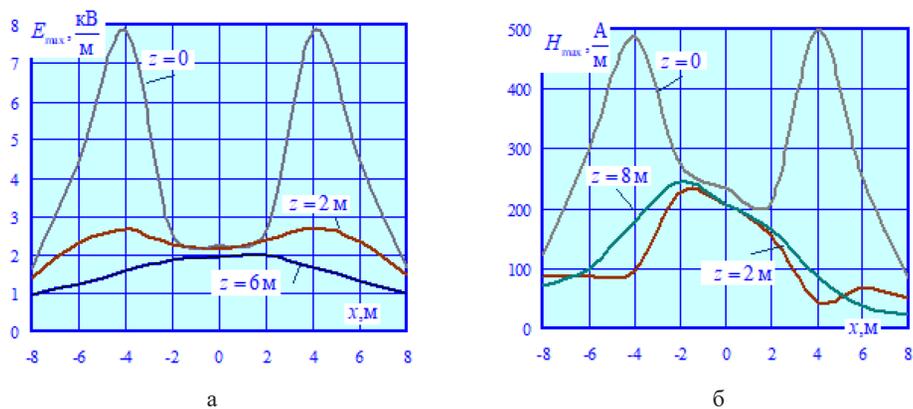


Рис. 8. Зависимости  $E_{\max} = E_{\max}(x)$  (а) и  $H_{\max} = H_{\max}(x)$  (б) при коротком замыкании

Fig. 8. Dependencies  $E_{\max} = E_{\max}(x)$  (а) and  $H_{\max} = H_{\max}(x)$  (б) in case of a short circuit

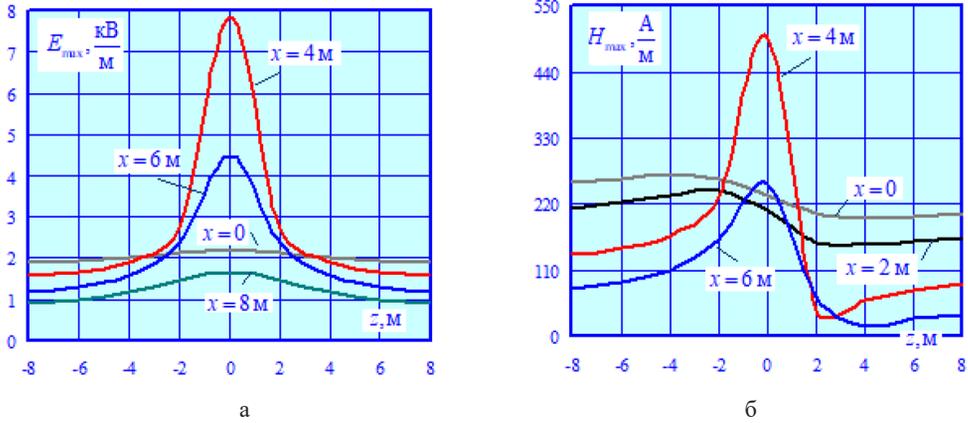


Рис. 9. Зависимости  $E_{\max} = E_{\max}(z)$  (а) и  $H_{\max} = H_{\max}(z)$  (б) при коротком замыкании  
 Fig. 9. Dependencies  $E_{\max} = E_{\max}(z)$  (a) and  $H_{\max} = H_{\max}(z)$  (б) in case of a short circuit

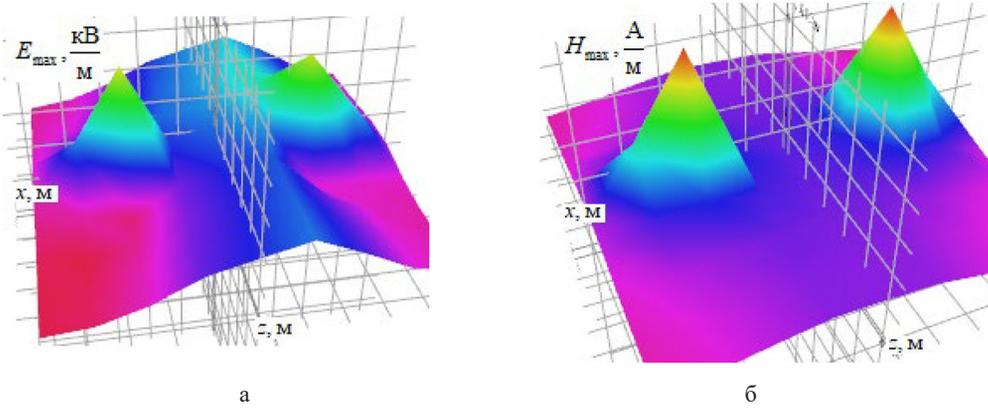


Рис. 10. Распределение ЭМП в пространстве при коротком замыкании вблизи конструкции порталного типа: а – электрическое поле; б – магнитное  
 Fig. 10. EMF distribution in space during a short circuit near a portal-type structure: a – electric field; б – magnetic

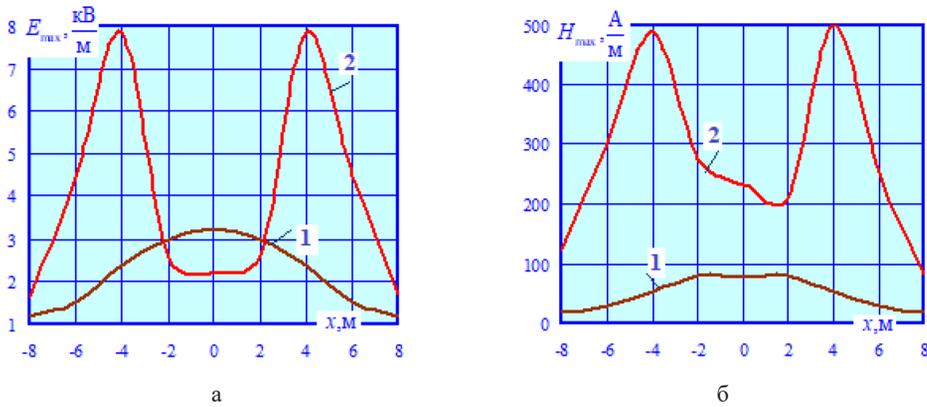


Рис. 11. Сравнение  $E_{\max} = E_{\max}(x)$  (а) и  $H_{\max} = H_{\max}(x)$  (б) при  $z = 0$ : 1 – нормальный режим; 2 – КЗ  
 Fig. 11. Comparison  $E_{\max} = E_{\max}(x)$  (a) and  $H_{\max} = H_{\max}(x)$  (б) at  $z = 0$ : 1 – normal mode; 2 – short circuit

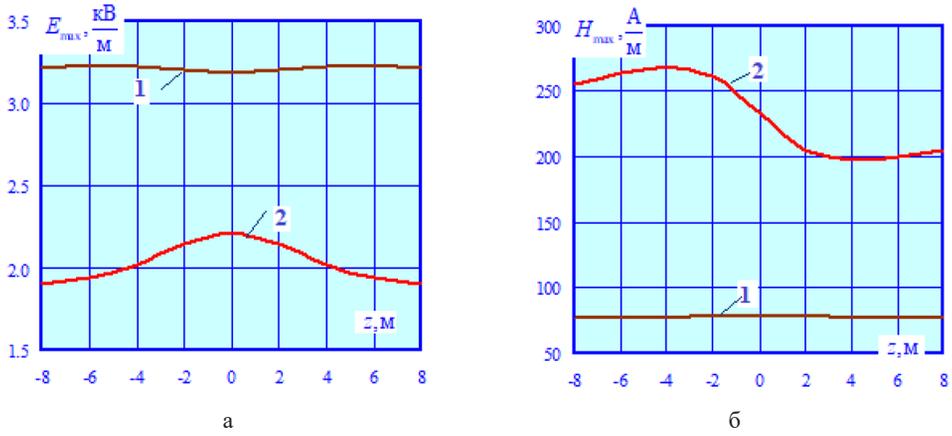


Рис. 12. Сравнение  $E_{\max} = E_{\max}(z)$  (а) и  $H_{\max} = H_{\max}(z)$  (б) при  $x = 0$ : 1 – нормальный режим; 2 – КЗ  
 Fig. 12. Comparison  $E_{\max} = E_{\max}(z)$  (a) and  $H_{\max} = H_{\max}(z)$  (б) at  $x = 0$ : 1 – normal mode; 2 – short circuit

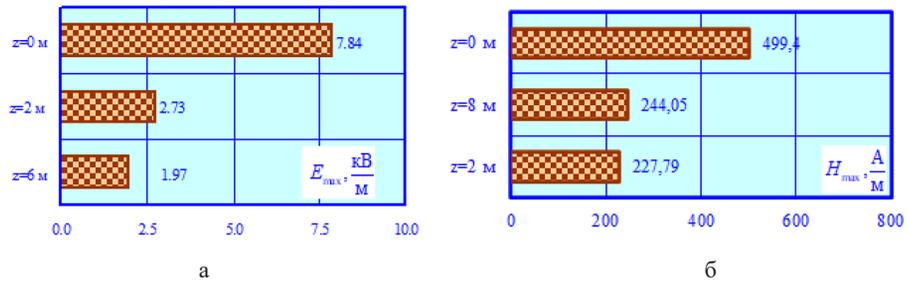


Рис. 13. Максимумы  $E_{\max} = E_{\max}(x)$  (а) и  $H_{\max} = H_{\max}(x)$  (б) при КЗ через элементы конструкции порталного типа

Fig. 13. Maxima  $E_{\max} = E_{\max}(x)$  (a) and  $H_{\max} = H_{\max}(x)$  (б) in case of short circuit through portal-type structural elements

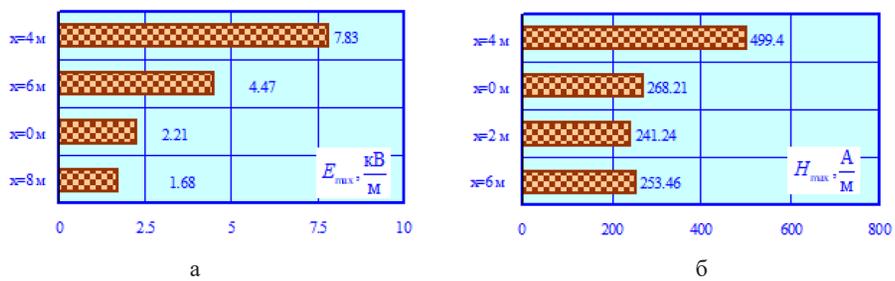


Рис. 14. Максимумы  $E_{\max} = E_{\max}(z)$  (а) и  $H_{\max} = H_{\max}(z)$  (б) при КЗ через элементы конструкции порталного типа

Fig. 14. Maxima  $E_{\max} = E_{\max}(z)$  (a) and  $H_{\max} = H_{\max}(z)$  (б) in case of short circuit through portal-type structural elements

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- в нормальном режиме значения  $E_{\max}$  под жесткой поперечиной уменьшаются; на ее оси ( $z = 0$ ) максимальное снижение  $E_{\max}$  достигает 24 %;
- при учете жесткой поперечины характер зависимости  $H_{\max} = H_{\max}(x)$  при  $z = 0$  не меняется;
- максимум амплитуды напряженности магнитного поля при замыкании контактной подвески на жесткую поперечину достигает 500 А/м; аналогичный параметр для электрического поля равен 7,8 кВ/м;
- наблюдается значительное увеличение  $E_{\max}$  и  $H_{\max}$  вблизи опор ( $x = 4$  м); так, например,  $E_{\max}$  достигает 7,8 кВ/м, а  $H_{\max} = 500$  А/м;
- трехмерное электромагнитное поле при замыкании контактной подвески через элементы жесткой поперечины приобретает сложную структуру.

### Заключение

Представлена методика и цифровые модели, позволяющие осуществлять корректный учет влияния жестких поперечин при моделировании электромагнитных полей тяговых сетей. Отличия предлагаемого подхода от известных состоят в следующем: расчеты ЭМП проводятся на основе результатов определения нормальных и аварийных режимов СТЭ; для учета жестких поперечин используется концепция проводников ограниченной длины, которые рассматриваются в виде единого объекта, формирующего ЭМП; в его состав входят следующие элементы: стержни опоры, ригель и набор коротких проводов, отвечающих контактной подвеске и рельсам.

Методика реализована в промышленном программном комплексе Fazonord, является универсальной и может применяться для определения ЭМП на любых объектах электроэнергетики и транспорта, вблизи которых находятся проводящие конструкции и сооружения.

### Список литературы / References

- [1] Blake Levit B. Electromagnetic Fields: A Consumer's Guide to the Issues and How to Protect Ourselves. iUniverse. 462.
- [2] Buyakova N. V., Zakaryukin V.P., Sereдкин D.A. Simulation of Electromagnetic Fields Generated by Overhead Power Lines and Railroad Traction Networks. *Energy Systems Research*, 2021, 4(2), 70–88.
- [3] Bulatov Yu., Kryukov A., Suslov K., Lombardi P., Komarnicki P. A cyber-physical approach to control and management of railway power supply systems. *International Scientific and Practical Conference "Young Engineers of the Fuel and Energy Complex: Developing the Energy Agenda of the Future" (EAF 2021)*, Dec. 10–11, 2022, St. Petersburg, Russia. Atlantis Press, 2022. 116–125.
- [4] Микаэльян Е. Ю., Черных В. Н. Исследование электромагнитных полей участка железной дороги переменного тока. *Инженерный вестник Дона*. 2019. 8(59). EDN ZZDXHO [Mikaelian, E. Y. Investigation of electromagnetic fields of an alternating current railway section. E. Y. Mikaelian, V.N. Chernykh. *Engineering Bulletin of the Don*. 2019. 8(59). EDN ZZDXHO (In Rus.)].
- [5] Apollonskii S. M. and Gorsky A.N. Calculation of electric and magnetic field strengths produced by a direct current traction network. *IEEE EUROCON 2009*, St. Petersburg, Russia, 2009, 873–880, doi: 10.1109/EURCON.2009.5167737.

[6] Oancea C. D., Calin F. and Golea V. On the Electromagnetic Field in the Surrounding Area of Railway Equipment and Installations. *2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*, Craiova, Romania, 2019, 1–5, doi: 10.1109/SIELMEN.2019.8905871.

[7] Zhang L., Zhu Y., Chen S. and Zhang D. Simulation and Analysis for Electromagnetic Environment of Traction Network. *2021 XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS)*, Rome, Italy, 2021, 1–4, doi: 10.23919/URSIGASS.51995.2021.9560338.

[8] Lu N., Zhu F., Yang C., Yang Y., Lu H. and Wang Z. The Research on Electromagnetic Emission of Traction Network With Short-Circuit Current Pulse. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, June 2022, 8(2), 2029–2036, doi: 10.1109/TTE.2021.3115578.

[9] Lu N., Zhu F., Yang C., Yang Y., Lu H. and Wang Z. «The Research on Electromagnetic Emission of Traction Network With Short-Circuit Current Pulse,». In: *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, June 2022, 8(2), 2029–2036, doi: 10.1109/TTE.2021.3115578.

[10] Kuznetsov K. and Zakirova A. «Systems and Devices for Protection of Personnel Against Electromagnetic Fields». *2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, Sochi, Russia, 2019, 1–5, doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867806.

[11] Kuznetsov K., Zakirova A. and Averyanov U. «Specific energy of 50 Hz electromagnetic field». *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, St. Petersburg, Russia, 2017, 1–4, doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076222.

[12] Kim J. H., Yoon H. -J., Kim D.-H. and Cho B.-K. «Effects of Magnetic Fields Around Contact Lines on Magnetometers». In: *IEEE Access*, 2020, 8, 132397–132403, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3009948.

[13] Serdiuk T., Ansari H. T. and Rodica B. «Electromagnetic Influence of AC Traction Network on the Railway Communication Lines». *2022 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI)*, Spokane, WA, USA, 2022, 326–329, doi: 10.1109/EMCSI39492.2022.9889435.

[14] Ali Rachedi B., Babouri A., Berrouk F. A study of electromagnetic field generated by high voltage lines using Comsol Multiphysics. *2014 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*, Nov. 03–06, 2014, Tunis, Tunisia: IEEE, 2014. DOI: 10.1109/CISTEM.2014.7076989.

[15] Al Dhalaan S. M., Elhirbawy M. A. A quantitative study of the electromagnetic field coupling between electric power transmission line and railway. *CCECE 2003 — Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Toward a Caring and Humane Technology*, May 04–07, 2003, Montreal, QC, Canada: IEEE, 2003. 1. 431–434. DOI: 10.1109/CCECE.2003.1226432.

[16] Xu L., Li Y., Yu J. X., Hou, An C. Research on electric field of high-voltage transmission line power frequency. *proc. 2006 International Conference on Power System Technology*, Oct. 22–26., 2006, Chongqing, China: IEEE, 2006. 1–4. DOI: 10.1109/ICPST.2006.321493.

[17] Закарюкин В. П., Крюков А. В. *Сложнонесимметричные режимы электрических систем*. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 [Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. *Complex symmetric modes of electrical systems*. Irkutsk: Publishing house of Irkut. Unita, 2005. 273 (In Rus.)].

[18] Закарюкин В. П., Крюков А. В. Моделирование электромагнитных полей, создаваемых системой коротких токоведущих частей [Modeling of electromagnetic fields generated

by a system of short current-carrying parts]. *System analysis and mathematical modeling*. 2021. 2. 145–163.

[19] Закарюкин В. П., Крюков А. В., Воронина Е. В. Моделирование электромагнитных полей тяговой сети 25 кВ с учетом металлических конструкций порталного типа. *Известия Транссиба*. 2024. 1(57). 131–141. [Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Voronina E.V. Modeling of electromagnetic fields of a 25 kV traction network taking into account portal-type metal structures. *Izvestiya Transsib*. 2024. 1(57). 131–141. (In Rus.)].