

А.В. Крюков¹, Д.А. Серёдкин¹

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, СОЗДАВАЕМЫХ ЛИНИЯМИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПРИ ОБРЫВЕ ФАЗЫ С ЗАМЫКАНИЕМ НА ЗЕМЛЮ

Аннотация. Высоковольтные линии электропередачи (ЛЭП) генерируют электромагнитные поля (ЭМП) в пространстве, окружающем провода. Анализ напряженностей ЭМП обычно проводят на нормированной высоте 1,8 м в охранной зоне ЛЭП. В симметричных рабочих режимах уровни напряженностей ЭМП, создаваемых линиями электропередачи 110-220 кВ, обычно не превышают допустимых значений. Однако в практике эксплуатации возможны экстремальные ситуации, в которых уровни напряженностей существенно возрастают. Такие режимы характеризуются, как правило, значительными поперечными и продольными несимметриями. Поэтому для анализа таких режимов и создаваемых при этом ЭМП целесообразно использовать фазные координаты.

В статье исследованы условия электромагнитной безопасности на трассе высоковольтной ЛЭП при обрыве фазы с коротким замыканием на землю. Такие режимы быстро устраняются релейной защитой и не могут оказывать заметного негативного влияния на персонал. Однако в результате генерации ЭМП возможно появление опасных наведенных напряжений на смежных линиях электропередачи и связи. Кроме того, наведенные напряжения могут приводить к повреждению низковольтного оборудования проводной связи.

В результате моделирования в программном комплексе Fazonord показано, что обрыв одной из фаз с коротким замыканием на землю приводит к существенному увеличению напряженностей электромагнитного поля под проводами ЛЭП на нормированной высоте 1,8 м. Максимальное значение амплитуды напряженности магнитного поля возрастает более чем в 15 раз по сравнению с симметричным нагрузочным режимом.

Ключевые слова: линии электропередачи, электромагнитная безопасность, неполнофазные режимы и короткие замыкания, моделирование.

A.V. Kryukov¹, D.A. Seredkin¹

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

MODELING OF ELECTROMAGNETIC FIELDS CREATED BY POWER LINES AT CUTTING THE PHASE WITH CLOSING TO THE EARTH

Abstract. High-voltage power lines generate electromagnetic fields (EMF) in the space surrounding the wires. Analysis of EMF stresses is usually carried out at a normalized height of 1.8 m in the protected area of power lines. In symmetrical operating modes levels EMF voltages generated by power lines 110-220 kV, usually do not exceed the permissible values. However, in operating practice, there may be extreme situations in which the levels of tensions significantly increase. Such regimes are characterized, as a rule, by significant transverse and longitudinal asymmetries. Therefore, for the analysis of such modes and created at the same time EMF is advisable to use phase coordinates.

The article investigates the conditions of electromagnetic safety on the route of high-voltage power lines at phase breakage with a short circuit to the ground. Such modes are quickly eliminated by relay protection and can not have a noticeable negative impact on the staff. However, as a result of the generation of such fields, dangerous induced voltages may appear on adjacent power and communication lines. In addition, induced voltages can damage low-voltage wired equipment.

As a result of modeling in the software package Fazonord shown that the breakage of one of the phases short to ground fault leads to a substantial increase of the intensities of the electromagnetic field under wires of the transmission line normalized to a height of 1.8 m. In particular, the maximum value of the amplitude of the magnetic field increases more than 15 times.

Keywords: power lines, electromagnetic safety, incomplete-phase modes and short circuits, simulation.

Введение. Высоковольтные воздушные линии электропередачи (ЛЭП) являются источниками электромагнитных полей (ЭМП) промышленной частоты, которые могут генерировать помехи, вызывающие сбои в работе и повреждения электрических и электронных устройств [1 – 3]. Кроме того, возможны тяжелые несчастные случаи при работе электротехнического персонала на отключенных линиях электропередачи или связи из-за воздействия наведенных напряжений.

В симметричных рабочих режимах уровни напряженностей ЭМП, создаваемых линиями электропередачи 110-220 кВ, обычно не превышают допустимых значений. Однако в практике эксплуатации возможны экстремальные ситуации, в которых уровни напряженностей существенно возрастают. Такие режимы характеризуются, как правило, значительными поперечными и продольными несимметриями. Поэтому для анализа таких режимов и создаваемых при этом ЭМП целесообразно использовать фазные координаты.

Одной из разновидностей экстремальных режимов является обрыв одного из проводов ЛЭП, подключенной к трансформатору с эффективно заземленной нейтралью, и падение его на землю; при этом возникает режим, характеризующийся продольной и поперечной несимметриями. Ниже рассматриваются условия электромагнитной безопасности в таких режимах сети 220 кВ.

Методика моделирования. Моделирование с помощью программного комплекса Fazonord осуществлялось в два этапа:

1. Расчет режима ЭЭС в фазных координатах, по результатам которого определялись потенциалы и токи всех проводов ЛЭП [4].

2. Вычисление вертикальных и горизонтальных составляющих напряженностей электрического и магнитного полей: $\dot{E}_x, \dot{E}_y, \dot{H}_x, \dot{H}_y$.

3. Расчет амплитудных значений напряженностей $E_{\text{max}}, H_{\text{max}}$ с учетом возможной эллиптической поляризации полей [3 – 5].

Результаты моделирования. Схема исследуемой сети представлена на рис. 1, а. Моделирование осуществлялось для следующих режимов:

- исходный симметричный режим;
- обрыв фазы А в начале линии с КЗ на землю;
- обрыв фазы А в конце линии с КЗ на землю.

Расположение проводов на опоре линии показано на рис. 1, б. Параметры ЛЭП приведены в табл. 1.

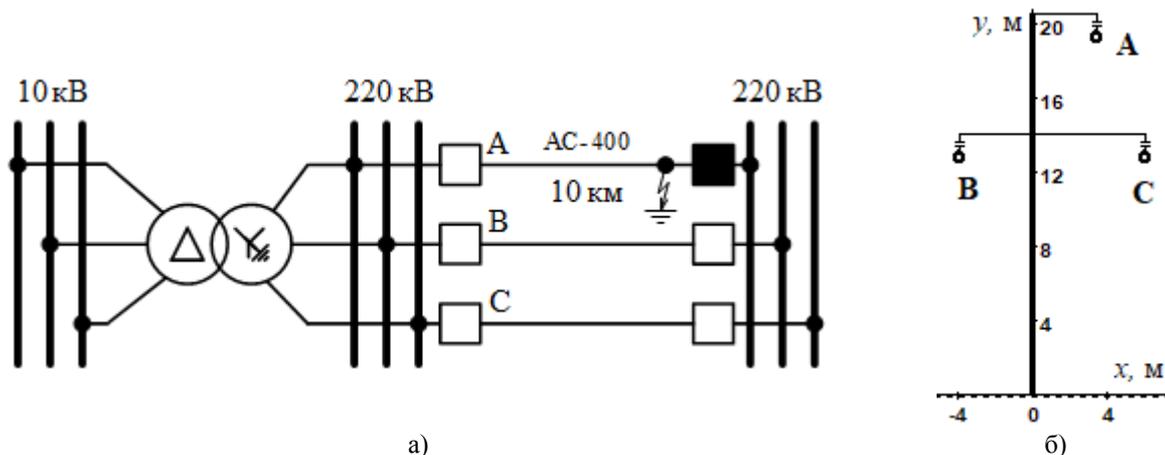


Рис. 1. Схема электрической сети (а) и расположение проводов на опоре ЛЭП (б)

Таблица 1

Фаза	Омическое сопротивление, Ом/км	Радиус, см	Координаты		Площадь сечения, мм ²
			x, м	y, м	
			А	0,051	
В	0,051	1,66	-3,9	13	652
С	0,051	1,66	6,1	13	652

Результаты расчетов напряжений и токов для заданных режимов представлены в табл. 2 - 4. Результаты расчета напряженностей электрического и магнитного полей на высоте 1,8 метра для различных значений горизонтальной координаты x представлены на рис. 2 - 4.

Таблица 2

Напряжения и токи на отправном конце ЛЭП для исходной схемы

Фаза	U , кВ	U , град	I , А	I , град.
А	136,8	118,3	440,7	85,0
В	136,8	-121,7	440,7	-155,1
С	136,8	-1,7	440,0	-35,4

Таблица 3

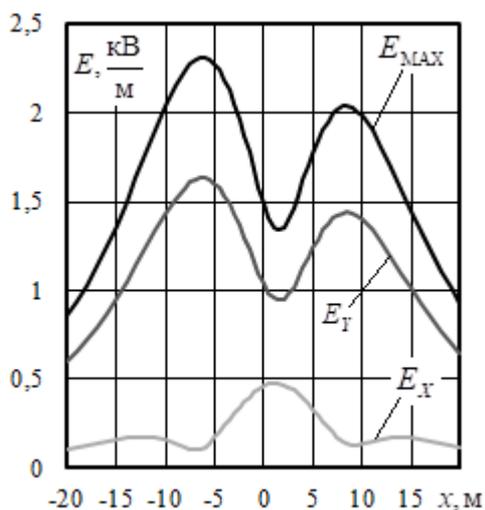
Напряжения и токи на отправном конце ЛЭП при обрыве фазы А с КЗ на землю в начале линии

Фаза	U , кВ	U , град	I , А	I , град.
А	1,5	34,7	1489	-145,3
В	133,2	-126,4	1490	-145,3
С	131,2	6,0	1489	-145,2

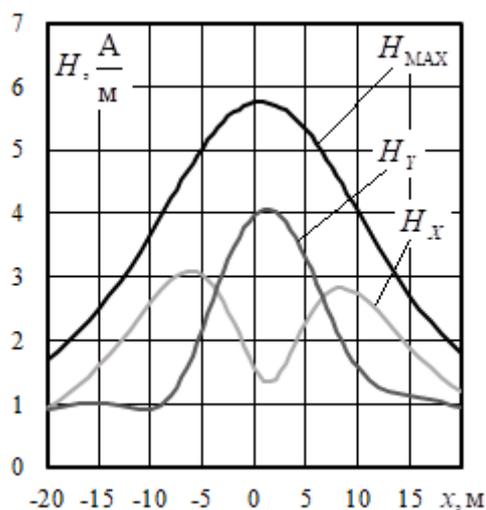
Таблица 4

Напряжения и токи на отправном конце ЛЭП при обрыве фазы А с КЗ на землю в конце линии

Фаза	U , кВ	U , град	I , А	I , град.
А	55,2	110,9	7526	36,8
В	138,9	-120,7	9,43	-135,5
С	138,6	0,6	10,5	-125,2

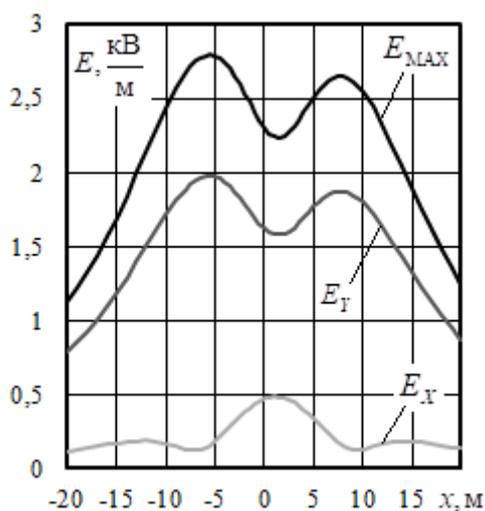


а)

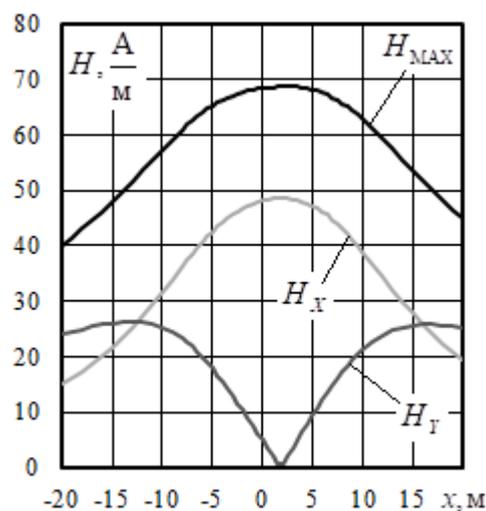


б)

Рис. 2. Напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей исходной схемы на высоте 1,8 м



а)



б)

Рис. 3. Напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей на высоте 1,8 м при обрыве фазы А с КЗ на землю в начале линии

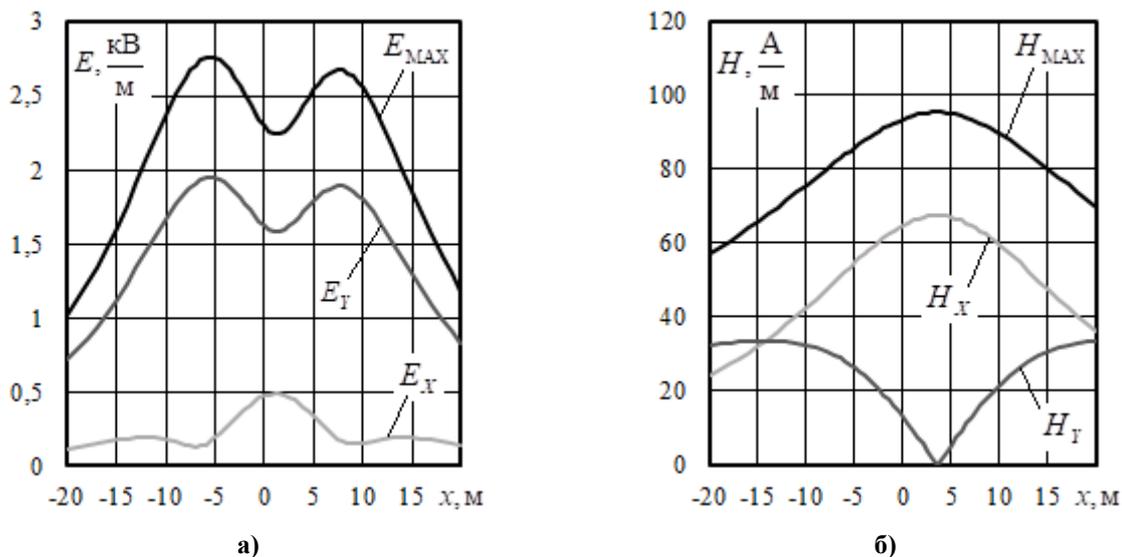


Рис. 4. Напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей на высоте 1,8 м при обрыве фазы А с КЗ на землю в конце линии

Максимальные значения амплитуд электрического и магнитного полей на высоте 1,8 м от земли приведены в табл. 5. Результаты расчета амплитуд напряженностей электрического и магнитного полей для различных значений горизонтальной координаты x представлены на рис. 5.

Таблица 5

Максимальные значения амплитуд напряженностей ЭМП

Параметр	Исходная схема	Обрыв фазы А с КЗ в начале	Обрыв фазы А с КЗ в конце	Различие, %	
				Между столбцами 2 и 3	Между столбцами 2 и 4
1	2	3	4	5	6
E_{max} , кВ/м	2,31	2,80	2,76	21,2	19,5
H_{max} , А/м	5,76	68,6	95,4	1091	1556

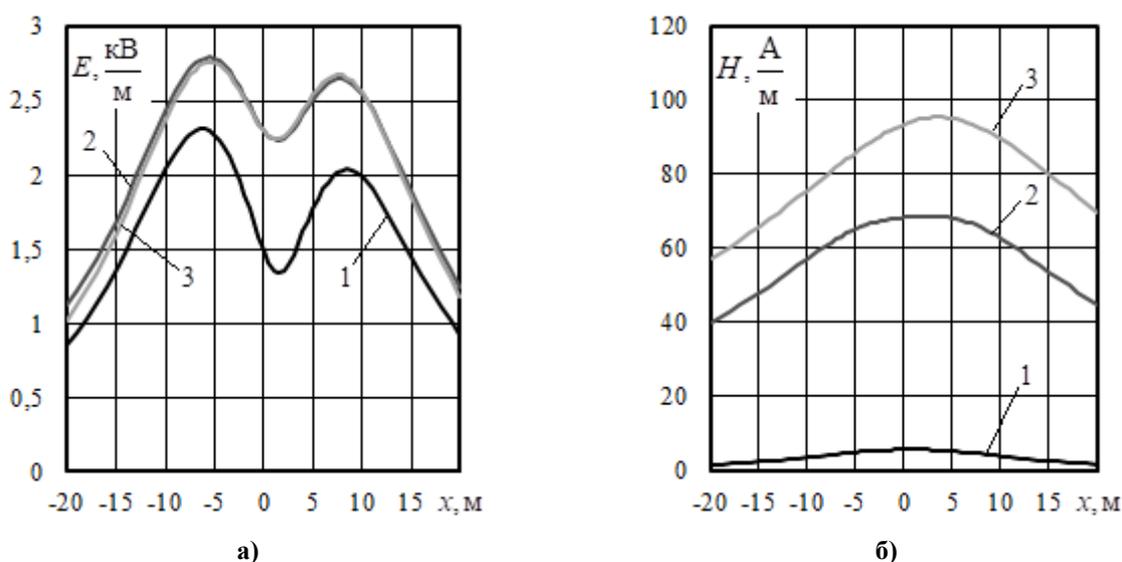


Рис. 5. Амплитуды напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей на высоте 1,8 м: 1 – исходная схема; 2 – обрыв фазы А с КЗ в начале линии; 3 – обрыв фазы А с КЗ в конце

Заключение. По результатам моделирования можно сделать следующие выводы по величинам напряженностей электромагнитного поля на высоте 1,8 м от поверхности земли.

1. Обрыв фазы с коротким замыканием на землю приводит к резкому увеличению токов ЛЭП и уменьшению напряжения оборванной фазы; вследствие возникшей электромагнитной неуравновешенности напряженность ЭМП увеличивается.

2. Обрыв фазы А с одновременным замыканием на землю в начале ЛЭП (при сопротивлении заземления в один Ом) приводит к снижению напряжения фазы А до 1,5 кВ, при этом токи ЛЭП увеличиваются в 3,5 раза. Напряженность электрического поля возрастает на 21 %, а напряженность магнитного поля повышается почти в 11 раз и достигает 69 А/м.

3. Обрыв фазы А с коротким замыканием на землю в конце ЛЭП приводит к уменьшению напряжения фазы А до 55 кВ, токи фаз В и С снижаются до 10 А, а ток фазы А увеличивается в 17 раз и достигает 7,5 кА. Напряженность электрического поля увеличивается на 20 %, напряженность магнитного поля увеличивается в 15 раз.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сидоров А.И., Окраинская И.С. Электромагнитные поля вблизи электроустановок сверхвысокого напряжения. Челябинск: ЮУрГУ, 2008. 204 с.

2. Аполлонский С.М. Электромагнитная совместимость и функциональная безопасность в электроэнергетике. М.: РУСАЙНС, 2016. 326 с.

3. Буюкова Н.В., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Электромагнитная безопасность в системах электроснабжения железных дорог: моделирование и управление. Ангарск: АнГТУ, 2018. 382 с.

4. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Иркут. ун-т, 2005, 273 с.

5. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of electrical fields in railway engineering structures // Advances in Engineering Research. Vol. 158. International Conference on AviaMechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018). 2018. P. 219-225.

REFERENCES

1. Sidorov A.I., Okrainskaya I.S. Electromagnetic fields near electroinstallations of ultrahigh tension. Chelyabinsk, 2008. 204 p.

2. Apollonsky S.M. Electromagnetic compatibility and the functional safety in power industry. – М.: RUSAYNS, 2016. – 326 p.

3. Buyakova N.V., Zakaryukin V. P., Kryukov A.V. Electromagnetic safety in power supply systems of the railroads: model operation and management. Angarsk, 2018. 382 p.

4. Zakaryukin V. P., Kryukov A.V. Asymmetrical modes of electric systems. Irkutsk, 2005. 273 p.

5. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of electrical fields in railway engineering structures // Advances in Engineering Research. Vol. 158. International Conference on AviaMechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018). 2018. P. 219-225.

Информация об авторах

Крюков Андрей Васильевич – д.т.н., профессор кафедры «Электроэнергетика транспорта», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: and_kryukov@mail.ru

Середкин Дмитрий Александрович – студент группы СОД. 1-14-2, факультет «Системы обеспечения движения поездов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: dmitriy987@mail.ru