

Буякова Наталья Васильевна,

к.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,
e-mail: bn_900@mail.ru

Закарюкин Василий Пантелеймонович,

д.т.н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения,
e-mail: zakar49@mail.ru

Крюков Андрей Васильевич,

д.т.н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения,
Иркутский национальный исследовательский технический университет
e-mail: and_kryukov@mail.ru

Лэ Ван Тхао,

аспирант, магистр техники и технологии,
Иркутский национальный исследовательский технический университет
e-mail: vanthaoirk@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, СОЗДАВАЕМЫХ КОМПАКТНЫМИ МНОГОСЕКМЕНТНЫМИ ЛИНИЯМИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Le Van Thao

MODELLING OF THE ELECTROMAGNETIC FIELDS CREATED BY COMPACT MULTI SEGMENT POWER LINES

Аннотация. В статье предложена методика анализа условий электромагнитной безопасности на трассах компактных линий электропередачи (КВЛ). В качестве инструмента для моделирования режимов и электромагнитных полей КВЛ применен программный комплекс Fazonord.

Результаты моделирования показали, что средние уровни напряженностей электрического поля КВЛ превышают аналогичный показатель для типовой ЛЭП на 25...145 %, различия по максимумам лежат в пределах 7...150 %. Особенно значительные превышения напряженности имеют место у трехсекментной КВЛ. По критерию напряженности магнитного поля наблюдается обратная картина: уровни напряженности магнитного поля КВЛ на 70...90 % ниже, чем ЛЭП традиционной конструкции, а наилучшими показателями по условиям электромагнитной безопасности обладает четырехсекментная КВЛ.

Ключевые слова: компактная линия электропередачи, электромагнитное поля, моделирование.

Abstract. In the article analysis technique of electromagnetic safety conditions on routes of compact power lines (CPL) is offered. As the tool the program complex Fazonord was applied to modeling of CPL modes and electromagnetic fields.

Results of modeling show that the average levels of CPL electric field strengths exceed a similar indicator for the standard power line by 25...145 %, distinctions of maximums lie within 7... 150 %. Especially considerable strength excesses take place at three-segment CPL. By criterion of magnetic field strength the return picture is observed: levels of CPL magnetic field strength on 70 ... 90 % below than in traditional power line, and the best picture of electromagnetic safety possesses the four-segment power line.

Keywords: compact power line, electromagnetic field, modeling.

В настоящее время наблюдается увеличение потребления электрической энергии, как в промышленной, так и в социальной сферах [1]. В этих условиях

приобретает актуальность задача создания новых, более эффективных средств транспорта электроэнергии. Одно из возможных решений этой задачи может быть основано на применении компактных воздушных линий (КВЛ).

КВЛ с минимально допустимыми расстояниями между проводами, оптимальной конструкцией расщепленной фазы и рациональным расположением фаз обеспечивает улучшение параметров за счет изменения характера распределения электромагнитного поля (ЭМП) в междуфазном и окружающем линию пространстве [2 – 5]. Увеличение напряженностей ЭМП внутри ЛЭП позволяет увеличить пропускную способность, а их ослабление во внешнем пространстве приводит к улучшению экологических показателей. В статье рассматриваются результаты анализа режимов и ЭМП компактных ЛЭП с расщепленными фазами.

Постановка задачи и методика моделирования. С помощью комплекса Fazonord [6] проанализированы режимы работы ЛЭП 220 кВ различных конструкций:

- компактной коаксиальной двухсегментной ЛЭП (КВЛ-2) с пятью проводами АС-120/19 в каждой фазе (рисунок 1а),
- компактной трехсегментной ЛЭП (КВЛ-3) с восемью проводами АС-95/16 в каждой фазе (рисунок 1б);
- компактной коаксиальной четырехсегментной ЛЭП (КВЛ-4) с шестью проводами АС-95/16 в каждой фазе (рисунок 1в),
- типовой ЛЭП (ТВЛ) с одним проводом АС-600/72 в каждой фазе (рисунок 1г).

Методика моделирования описана в работах [6 – 10]. Она позволяет проводить расчеты режимов при многократных несимметриях с учетом взаимовлияний токоведущих частей, оценивать токораспределение в проводах расщепленных фаз и определять напряженности ЭМП, которые создаются на трассах линий. Методика реализована в программном комплексе Fazonord [6], предназначенном для моделирования электрических систем в фазных координатах.

Результаты моделирования ЛЭП протяженностью 50 км при питающем напряжении 236 кВ и нагрузках $50+j50$ МВА представлены в таблицах 1, 2 и проиллюстрированы на рисунках 2–10. В таблице 2 показаны величины напряженности электрического поля (ЭП) и магнитного поля (МП) линий. Отображенные на рисунках положительные значения вектора Пойтинга P_0 отвечают направлению вектора к нагрузке.

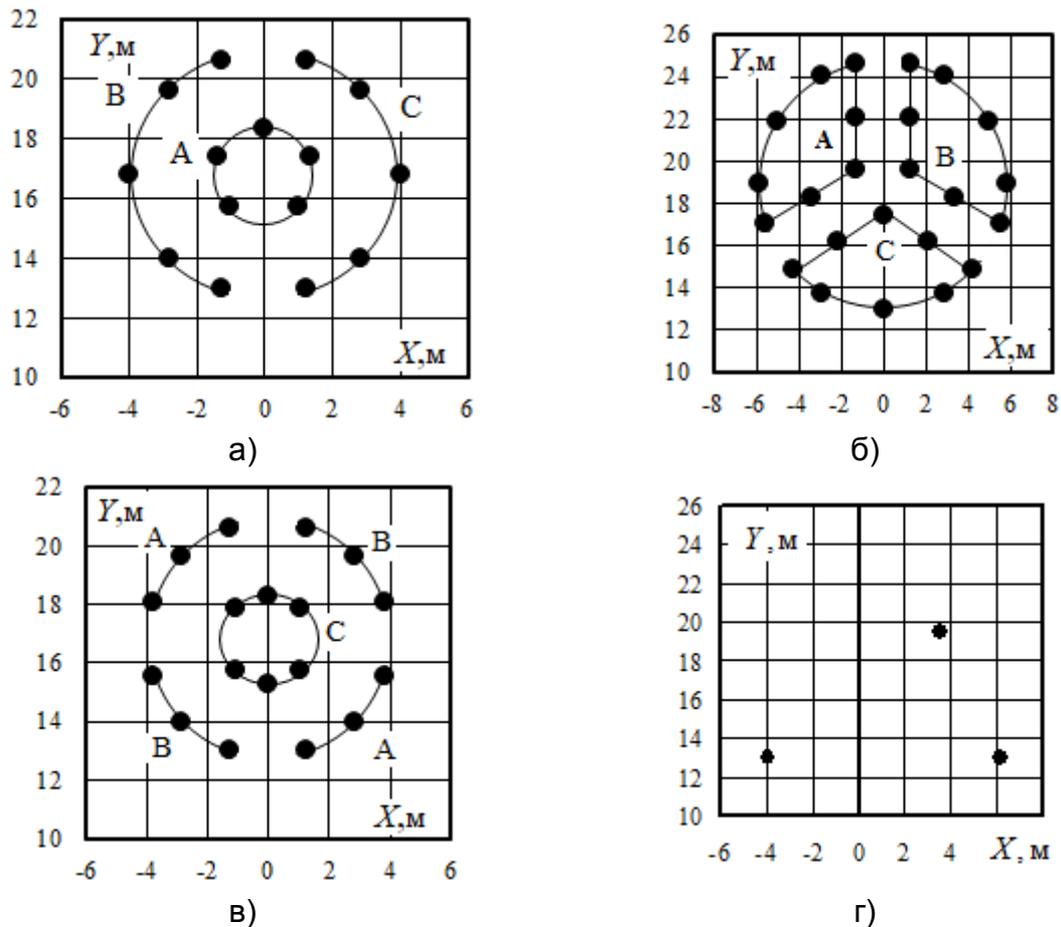


Рисунок 1 – Координаты расположения проводов в пространстве:
а – КВЛ-2; б – КВЛ-3; в – КВЛ-4; г – ТВЛ

Таблица 1
Статистические показатели по токам проводов фаз ЛЭП

Параметр	Конструкция ЛЭП			
	КВЛ-2	КВЛ-3	КВЛ-4	ТВЛ
Дисперсия, A^2	74,60	98,18	12,46	3,44
Максимум, А	107,49	72,99	83,61	550,70
Минимум, А	82,84	46,88	70,90	550,29
Ср. значение \bar{I} , А	95,42	59,57	77,35	550,50
Размах $R(I)$, А	24,65	26,11	12,71	0,41
С.к.о. $\sigma(I)$, А	8,64	9,91	3,53	1,85
Коэффициент осцилляции V_R	0,26	0,44	0,16	0,00
Коэффициент вариации V_σ	0,09	0,17	0,05	0,00

Примечание: $V_R = \frac{R(I)}{\bar{I}}$; $V_\sigma = \frac{\sigma(I)}{\bar{I}}$.

Таблица 2

Сводные показатели по амплитудам напряженностей ЭП (кВ/м) и МП (А/м)

Показатель	Конструкция ЛЭП				Различия, %		
	КВЛ-2	КВЛ-3	КВЛ-4	ТВЛ	2-5	3-5	4-5
1	2	3	4	5	6	7	8
Ср. значение ЭП	1,77	3,03	1,54	1,24	43,2	145,1	24,5
Максимум ЭП	2,82	5,73	2,45	2,28	23,7	151,2	7,2
Ср. значение МП	1,10	1,18	0,34	4,03	-72,6	-70,8	-91,5
Максимум МП	1,96	1,96	0,66	7,19	-72,7	-72,7	-90,8

Примечание: в столбцах 6-8 представлены различия между значениями, представленными в столбцах 2-5, 3-5 и т.д.

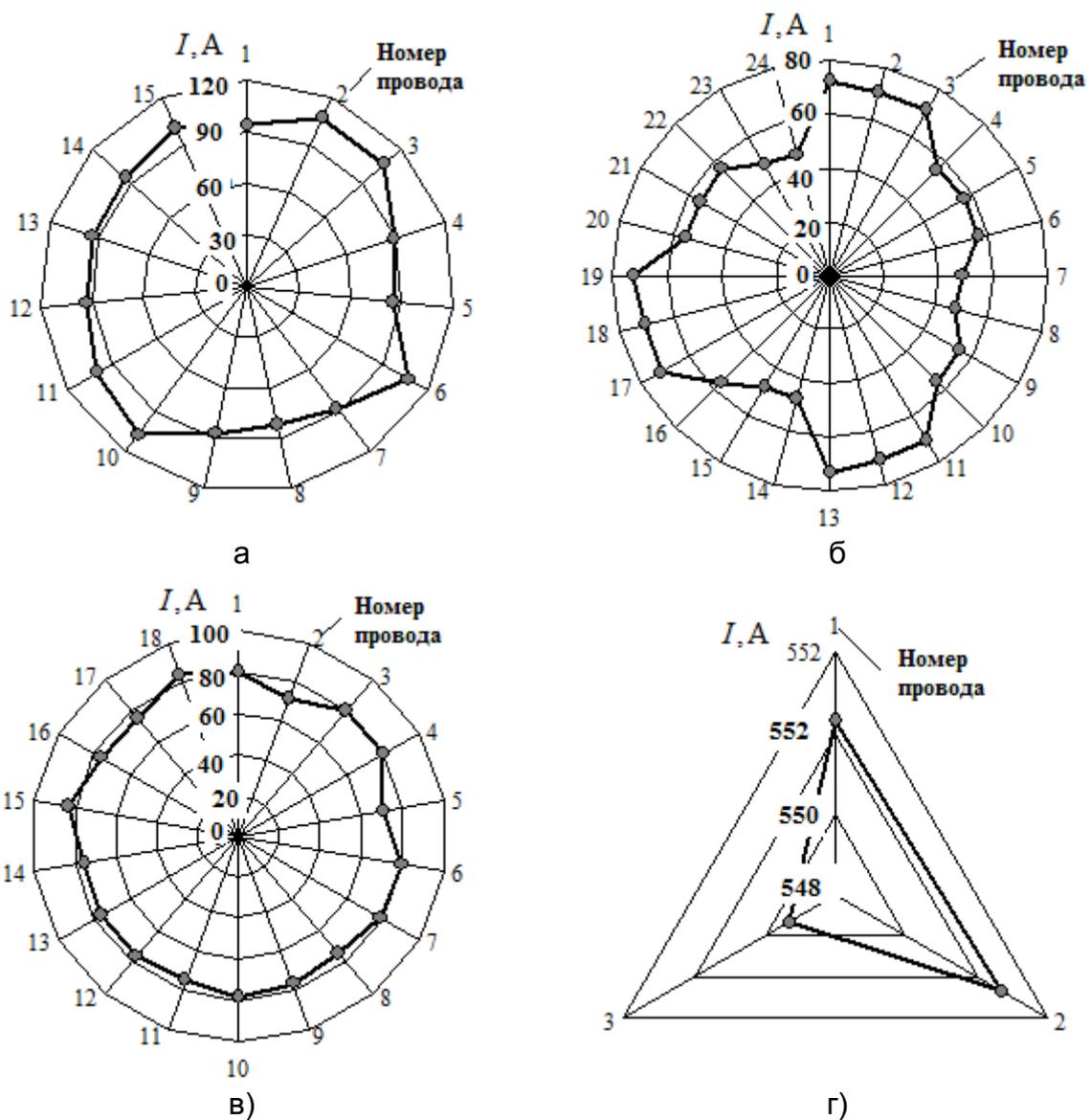
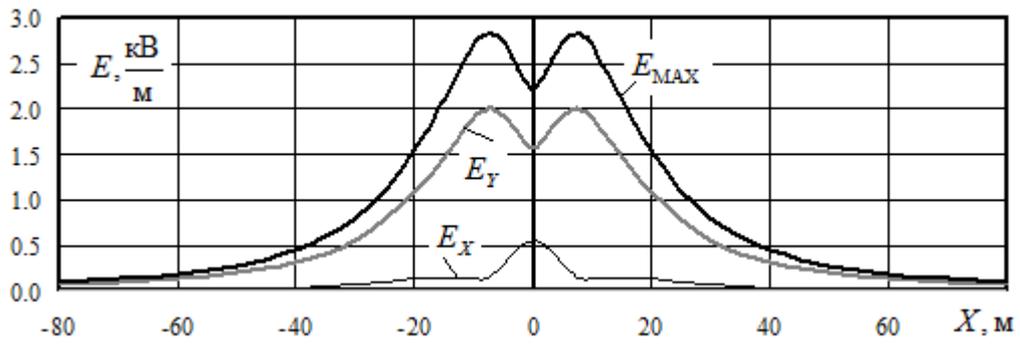
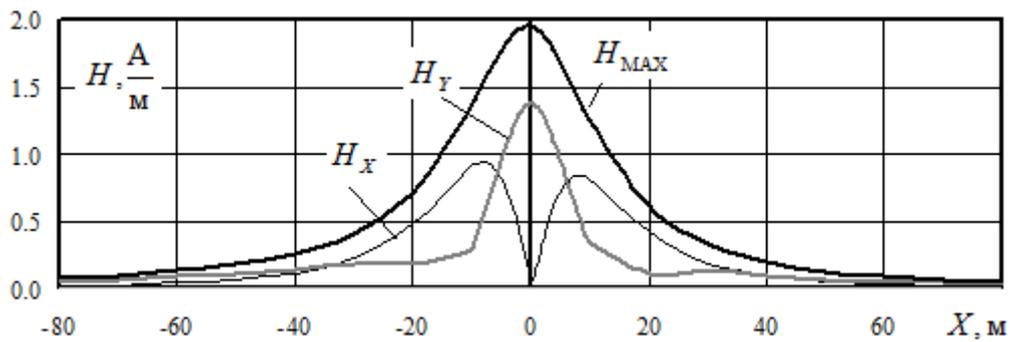


Рисунок 2 – Распределение токов по проводам:

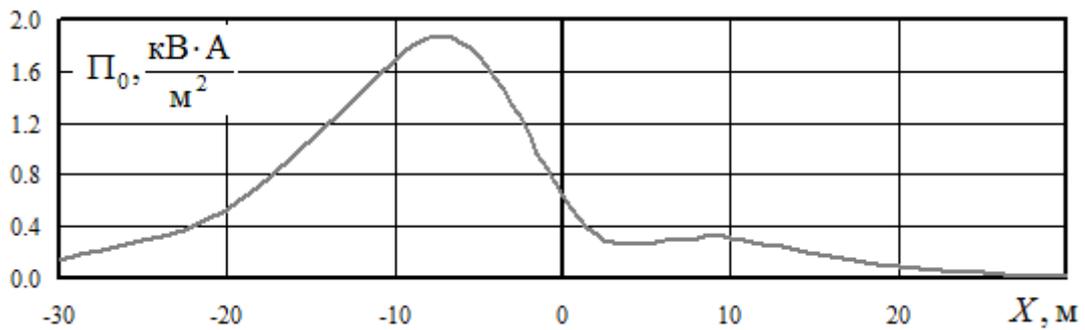
а – КВЛ-2; б – КВЛ-3; в – КВЛ-4; г – ТВЛ



а)

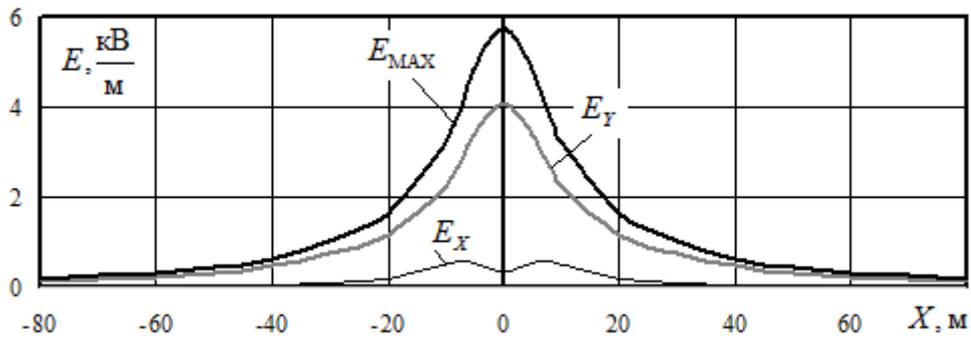


б)

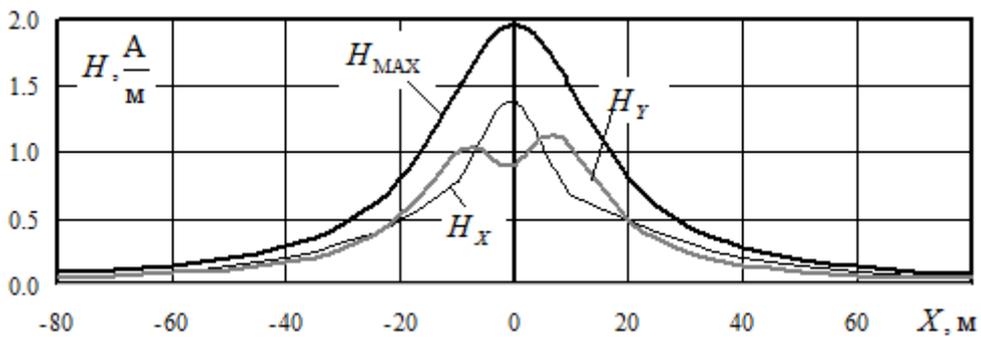


в)

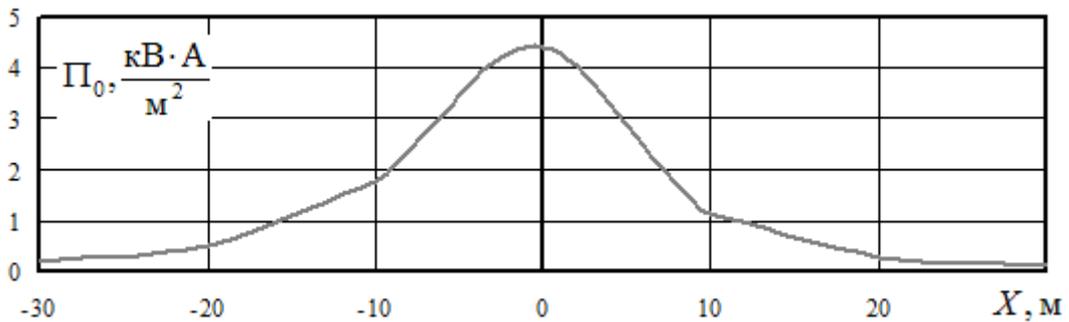
Рисунок 3 – Амплитуда, составляющие напряженности ЭМП и плотность потока активной электромагнитной энергии на высоте 1,8 м для КВЛ-2:
а – электрическое поле; б – магнитное поле; в – плотность потока активной электромагнитной энергии



а)

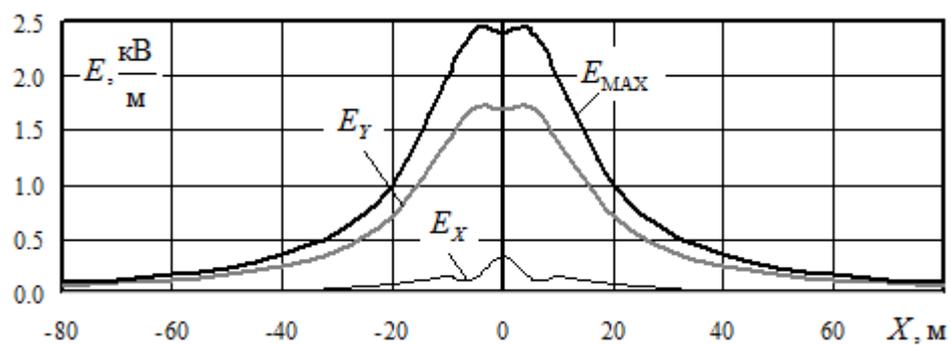


б)

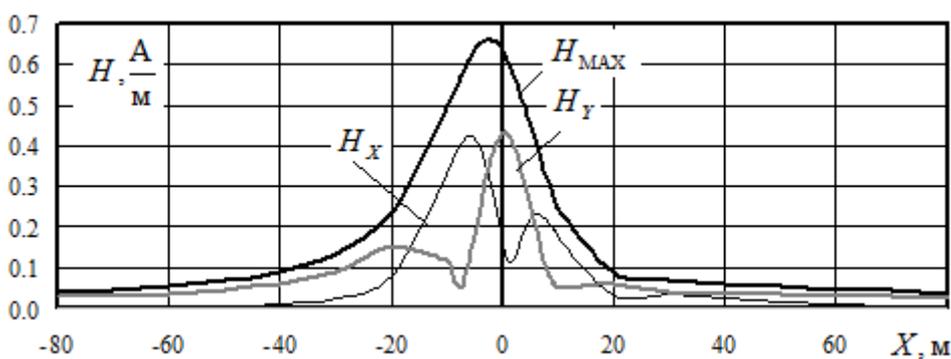


в)

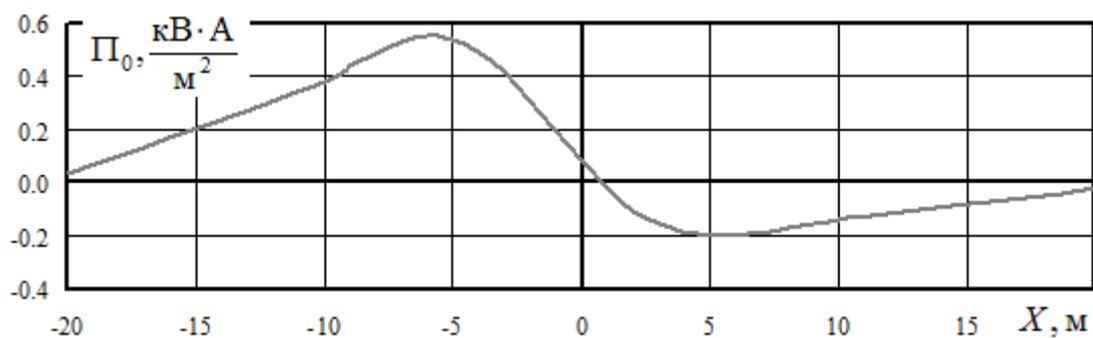
Рисунок 4 – Амплитуда, составляющие напряженности ЭМП и плотность потока активной электромагнитной энергии на высоте 1,8 м для КВЛ-3



а)

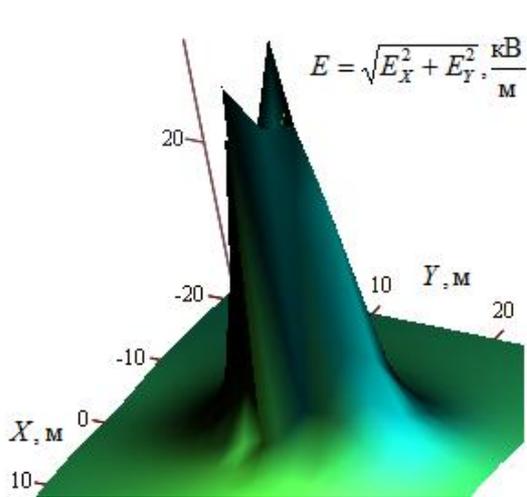


б)

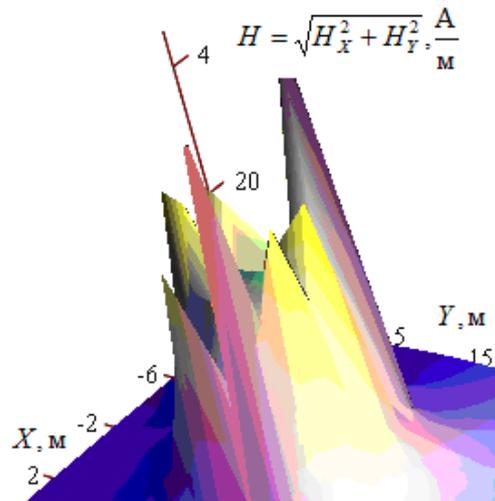


в)

Рисунок 5 – Амплитуда, составляющие напряженности ЭМП и плотность потока активной электромагнитной энергии на высоте 1,8 м для КВЛ-4

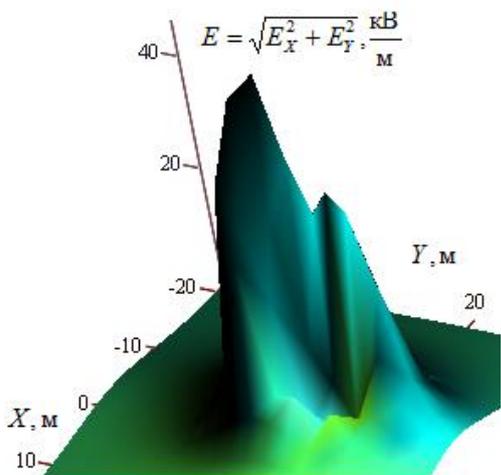


а)

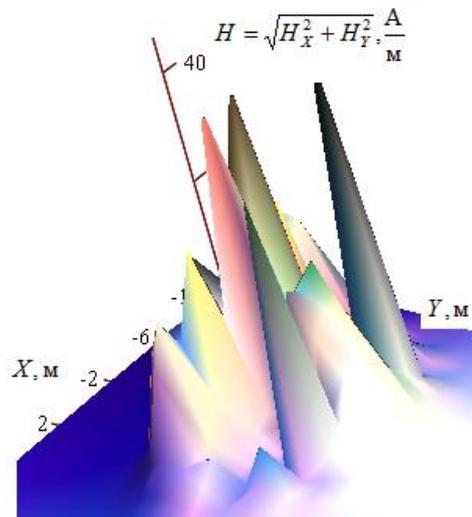


б)

Рисунок 6 – Поверхность напряженностей ЭМП КВЛ-2: а – ЭП; б – МП

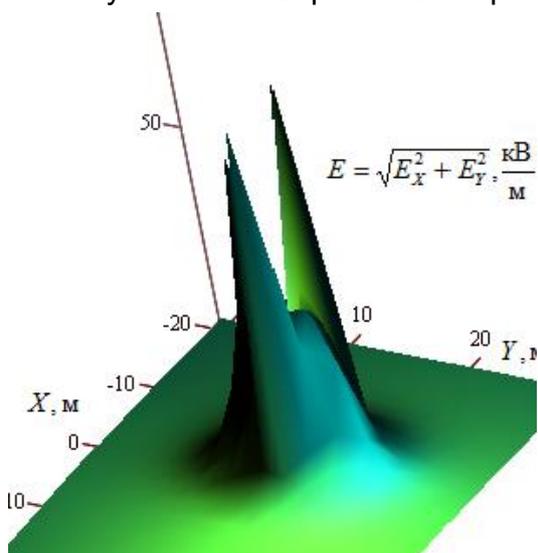


а)

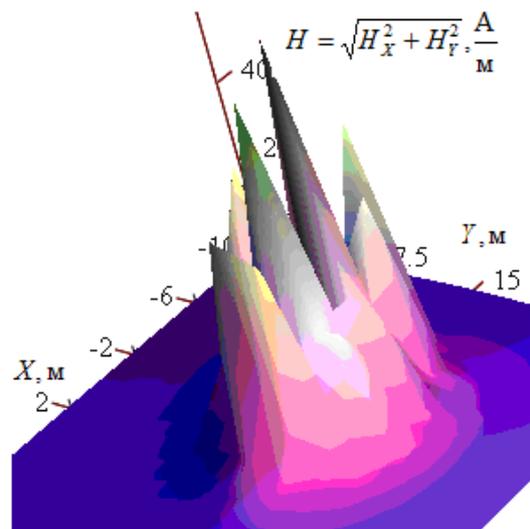


б)

Рисунок 7 – Поверхность напряженностей ЭМП КВЛ-3: а – ЭП; б – МП



а)



б)

Рисунок 8 – Поверхность напряженностей ЭМП КВЛ-4: а – ЭП; б – МП

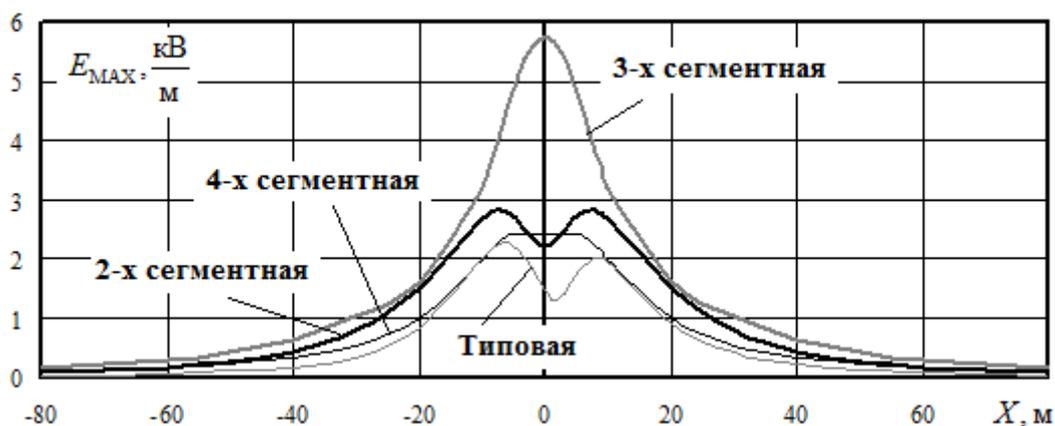


Рисунок 9 – Амплитуда напряженности электрического поля на высоте 1,8 м

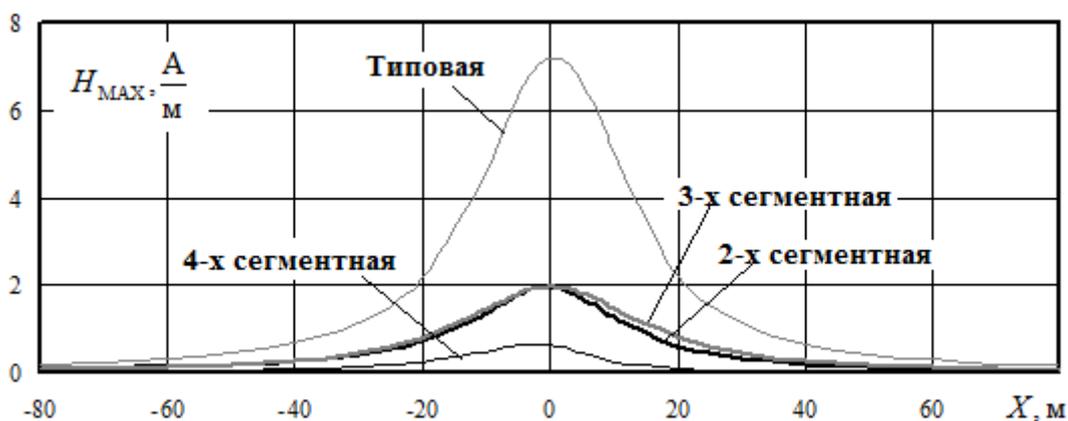


Рисунок 10 – Амплитуда напряженности магнитного поля на высоте 1,8 м

Полученные результаты показывают следующее.

1. Из-за значительно большего числа проводов в КВЛ средние уровни напряженностей электрического поля превышают аналогичный показатель для типовой ЛЭП на 25...145 %; различия по максимумам лежат в пределах 7...150 %; особенно значительные превышения напряженности имеют место у трехсегментной КВЛ.

2. По критерию напряженности магнитного поля наблюдается обратная картина: уровни напряженности магнитного поля в КВЛ на 70...90 % ниже, чем в ЛЭП традиционной конструкции.

3. Наилучшими показателями по условиям электромагнитной безопасности обладает 4-х сегментная КВЛ: при превышении среднего значения E_{MAX} на 7 % аналогичный показатель по магнитному полю снижается на 90 % по сравнению с типовой ЛЭП.

4. Токи в проводах КВЛ распределяются неравномерно: наибольшую неравномерность, характеризуемую коэффициентами осцилляции и вариации, имеет трехсегментная КВЛ.

Моделирование режимов и электромагнитных полей по методике, разработанной в ИрГУПС, показало, что наименьшие электромагнитные поля создаст четырехсегментная компактная воздушная линия электропередачи. Трехсегментная КВЛ создает относительно большое электрическое поле и характеризуется большой неравномерностью распределения токов в проводах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коновалов Ю.В., Дудко А.А. Исследование свойств генерирующих электротехнических комплексов // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Иркутск. 2014. В 2-х т. Т. 1. С. 88-92.
2. Александров Г.Н. Режимы работы воздушных линий электропередачи. СПб: ЦПКЭ, 2006. 139 с.
3. Электрические системы. Электрические сети / В.А. Веников, А.А. Глазунов, Л.А. Жуков и др. М.: Высшая школа, 1998. 511 с.
4. Новые средства передачи электроэнергии в энергосистемах / Г.Н. Александров, Г.А. Евдокунин, Т.В. Лисочкина и др. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. 232 с.
5. Электрические сети сверх- и ультравысокого напряжения ЕЭС России. Теоретические основы. Т. 3. М.: НТФ «Энергопрогресс» корпорации «ЕЭЭК», 2012. 368 с.
6. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. унта. 2005. 273 с.
7. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Буюкова Н.В. Электромагнитная обстановка на объектах железнодорожного транспорта. Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2011. 130 с.
8. Zakaryukin V., Kryukov A., Cherepanov A. Intelligent Traction Power Supply System // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport. EMMFT 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 692. Springer, Cham. P. 91-99.
9. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Multifunctional Mathematical Models of Railway Electric Systems // Innovation & Sustainability of Modern Railway – Proceedings of ISMR'2008. Beijing: China Railway Publishing House, 2008. P. 504-508.
10. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Buyakova N.V. Improvement of Electromagnetic Environment in Traction Power Supply Systems // The power grid of the future / Proceeding № 2. Otto–von–Guericke University Magdeburg. Magdeburg. 2013. P. 39–44.