

УДК 621.331:621.311

Буякова Наталья Васильевна,

к.т.н., доцент, доцент кафедры «Электроэнергетики и электротехники»

ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,

e-mail: bn\_900@mail.ru

Крюков Андрей Васильевич,

д.т.н., академик Российской академии транспорта, член-корр. АН ВШ РФ и Российской инже-

нерной академии, заслуженный энергетик Республики Бурятия, профессор кафедры электро-

снабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»; профессор кафедры электроэнергети-

ки транспорта, ФГБОУ ВО «ИрГУПС», e-mail: and\_kryukov@mail.ru.

Лэ Ван Тхао,

магистр техники и технологии, аспирант кафедры электроснабжения и электротехники,

ФГБОУ ВО «ИРНИТУ», e-mail: vanthaoirk@mail.ru

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПАКТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ТРЕУГОЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ПРОВОДОВ

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

### MODELLING OF COMPACT POWER LINES WITH THE TRIANGULAR ARRANGEMENT OF WIRES

**Аннотация.** Разработаны компьютерные модели компактных линий электропередачи повышенной пропускной способности. Применялись методы определения режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) на базе фазных координат, в основу которых положены модели элементов в виде решетчатых схем замещения с полносвязной топологией. Эти модели и методы реализованы в программном комплексе Fazonord-APC, обеспечивающем моделирование стационарных режимов ЭЭС, а также определение напряженностей электромагнитного поля, которое создается линиями электропередачи различного конструктивного исполнения. В статье представлены результаты моделирования режимов и электромагнитных полей на трассах компактных воздушных линий (КВЛ) электропередачи 220 кВ с треугольным расположением проводов. Для сравнения выполнены аналогичные расчеты для линии электропередачи (ЛЭП) 220 кВ типовой конструкции (ТВЛ).

**Ключевые слова:** электроэнергетические системы, компактные линии электропередачи, электромагнитная безопасность.

**Abstract.** Development of methods and simulators of compact lines of an electricity transmission of the increased capacity. Methods of definition of the modes of electrical power systems (EPS) on the basis of phase coordinates which basis models of elements in the form of trellised equivalent circuits with full-coherent topology are were applied. These models and methods are realized in the program Fazonord-APC complex providing modeling of the EPS stationary modes and also definition of tensions of the electromagnetic field which is created by power lines of various design. Results of modeling of the modes and electromagnetic fields on routes of the compact power line (CPL) of an electricity transmission of 220 kV with a triangular arrangement of wires are presented. For comparison similar calculations for a standard power line (SPL) of 220 kV of a standard design are executed.

**Keywords:** electrical power systems, compact power lines, electromagnetic safety.

В настоящее время предложено большое число новых конструкций линий электропередачи (ЛЭП) повышенной пропускной способности, позволяющих существенно увеличить эффективность транспорта электроэнергии [1 – 16]. Особого внимания заслуживают компактные ЛЭП повышенной пропускной способности, позволяющие получить следующие положительные эффекты:

- снизить воздействие ЛЭП на природную среду и население за счет уменьшения уровней напряженностей электромагнитных полей;
- повысить пропускную способность электропередач в 1,2 ... 1,6 раза;
- снизить на 10...45 % удельные затраты, приходящиеся на 1 МВт передаваемой мощности;

• уменьшить потери электроэнергии и повысить надежность ЭЭС.

Для практического использования таких ЛЭП необходимы адекватные методы и средства для определения режимов электроэнергетических систем, включающих в свой состав линии подобного типа. Не менее актуальной является задача моделирования электромагнитных полей (ЭМП), создаваемых этими ЛЭП.

В статье представлены результаты разработки компьютерных моделей компактных линий электропередачи с треугольным расположением проводов расщепленных фаз.

Сформулированный выше комплекс задач по моделированию режимов и электромагнитных полей компактных ЛЭП может быть решен на основе методов моделирования ЭЭС в фазных координатах, предложенных в ИрГУПС [17]. Разработанный на их основе программный комплекс Fazonord [17] позволяет проводить расчеты режимов ЭЭС и электромагнитных полей ЛЭП нетрадиционных конструкций [16, 18 – 21]. В комплексе реализованы оригинальные идеи моделирования многопроводных элементов со взаимоиндуктивными и емкостными связями с помощью решетчатых схем замещения. Применение таких методик позволяет моделировать различные типы многопроводных линий с большим количеством проводов и любые, приемлемые на практике, типы трансформаторов.

При этом анализируемая ЛЭП рассматривается в неразрывной связи со сложной электроэнергетической системой. Ниже представлены результаты моделирования режимов и электромагнитных полей компактной воздушной линии электропередачи

220 кВ с расположением проводов, показанным на рис. 1, а. Для сравнения выполнено моделирование типовой воздушной линии 220 кВ (рис. 1, б). Сечение проводов КВЛ принято равным  $120 \text{ мм}^2$ , а ТВЛ –  $600 \text{ мм}^2$ . Таким образом, суммарное сечение ЛЭП в обоих вариантах остается одинаковым. Моделирование осуществлялось с помощью комплекса программ Fazonord-APC.

Результаты моделирования режимов представлены в табл. 1 и проиллюстрированы на рис. 2 в виде зависимостей потерь в ЛЭП, а также коэффициентов несимметрии по обратной и нулевой последовательностям от величины передаваемой мощности. Распределение токов по проводам ЛЭП показано на рис. 3. На рис. 5 – 8 представлены результаты моделирования электрического и магнитного полей в начале ЛЭП, на высоте 1,8 м от поверхности земли. Расчеты ЭМП проводились при нагрузке на приемном конце ЛЭП, равной  $50 + j50 \text{ МВ} \cdot \text{А}$  и длине ЛЭП в 50 км.

Рис. 4 иллюстрирует распределение составляющих напряженностей ЭМП по горизонтальной оси, перпендикулярной трассе ЛЭП. На рис. 5 представлено сопоставление амплитуд напряженностей для КВЛ и ТВЛ. На рис. 6 приведены аналогичные графики для плотности потока активной электромагнитной энергии на высоте 1,8 м. На рис. 7 показаны зависимости составляющих напряженностей ЭМП от времени и годографы векторов напряженностей в точке с координатами  $X = 0 \text{ м}$ ;  $Y = 1,8 \text{ м}$ . На рис. 8 представлены объемные диаграммы, характеризующие распределение напряженностей ЭМП в пространстве, окружающем провода ЛЭП.

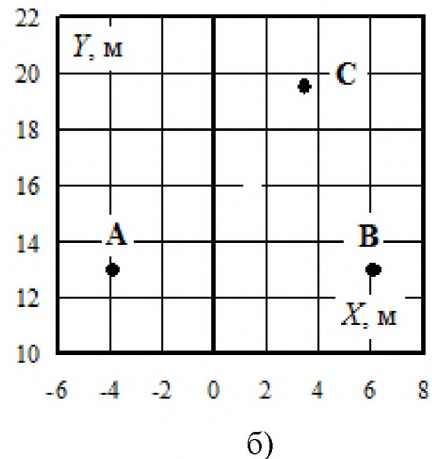
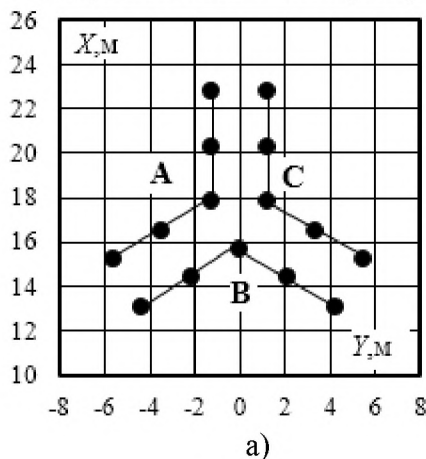


Рисунок 1 - Координаты проводов: а – КВЛ; б – ТВЛ

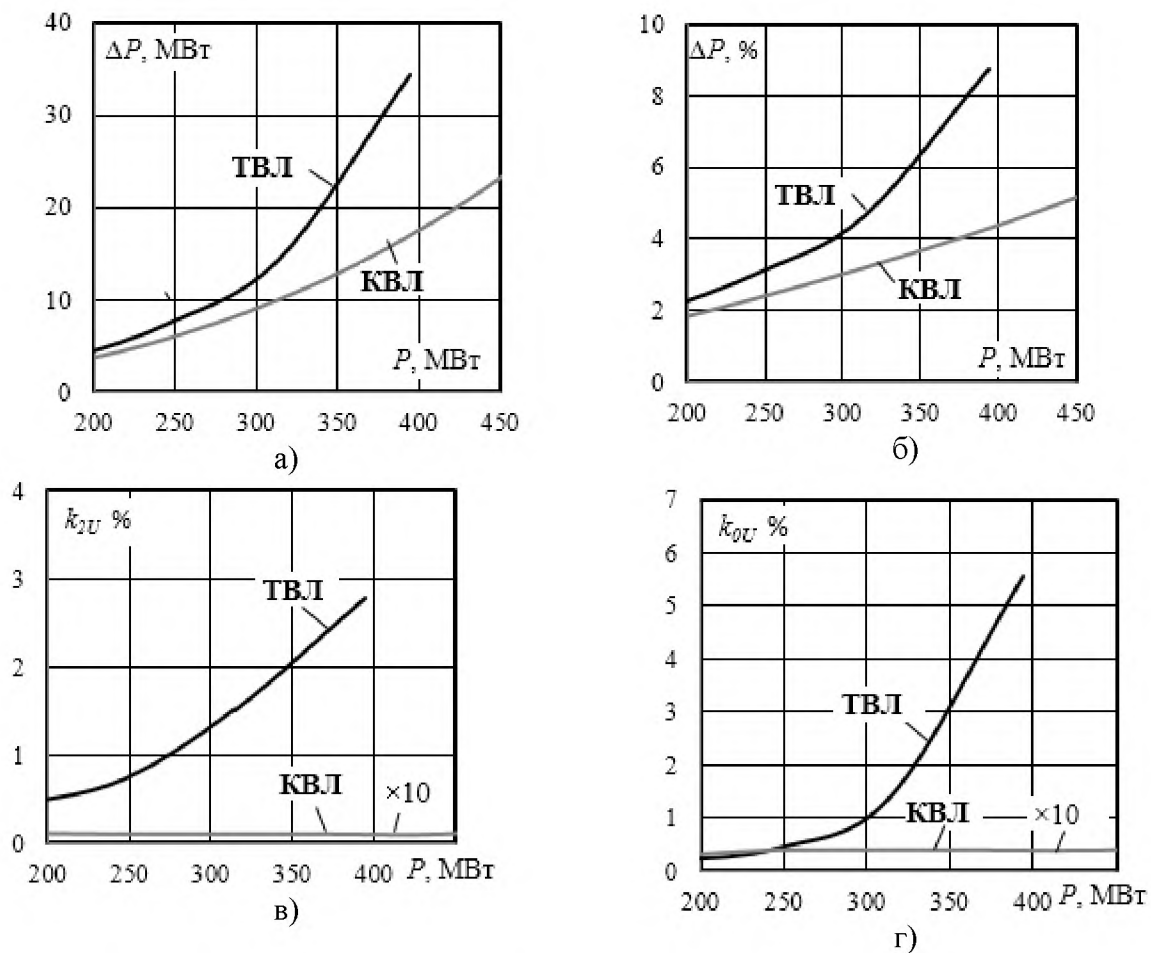


Рисунок 2 - Зависимости параметров режима от передаваемой мощности:  
 а – потери в МВт, б – потери в процентах; в – коэффициент несимметрии по обратной последовательности; г – коэффициент несимметрии по нулевой последовательности

Таблица 1 - Результаты расчета режимов

Тип ЛЭП	Узлы	$U$ , кВ	$U$ , град.	$I$ , А	$I$ , град.
KVЛ	6	136,117	118,241	477,01	79,7
	5	136,124	-121,748	475,55	-160,39
	4	136,142	-1,748	474,74	-40,14
	7	133,492	117,843	529,7	-107,16
	8	133,504	-122,123	529,65	12,88
	9	133,568	-2,136	529,4	132,86
ТВЛ	6	134,919	118,227	550,29	71,58
	5	134,907	-121,765	550,7	-168,6
	4	134,937	-1,755	547,31	-48,48
	7	125,402	115,321	563,8	-109,67
	8	125,395	-124,865	563,9	10,13
	9	126,251	-4,903	560,07	130,1

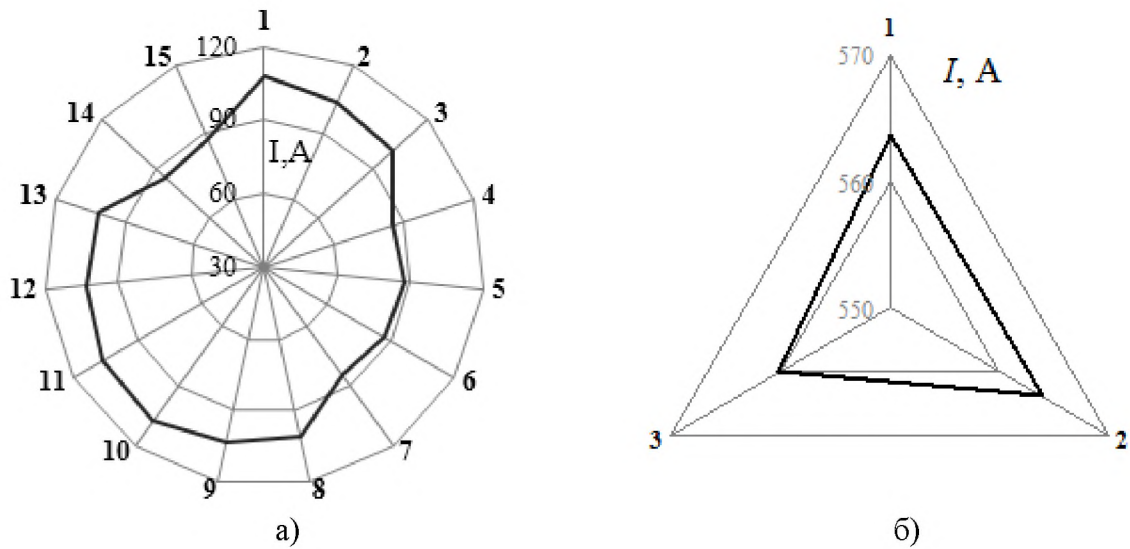
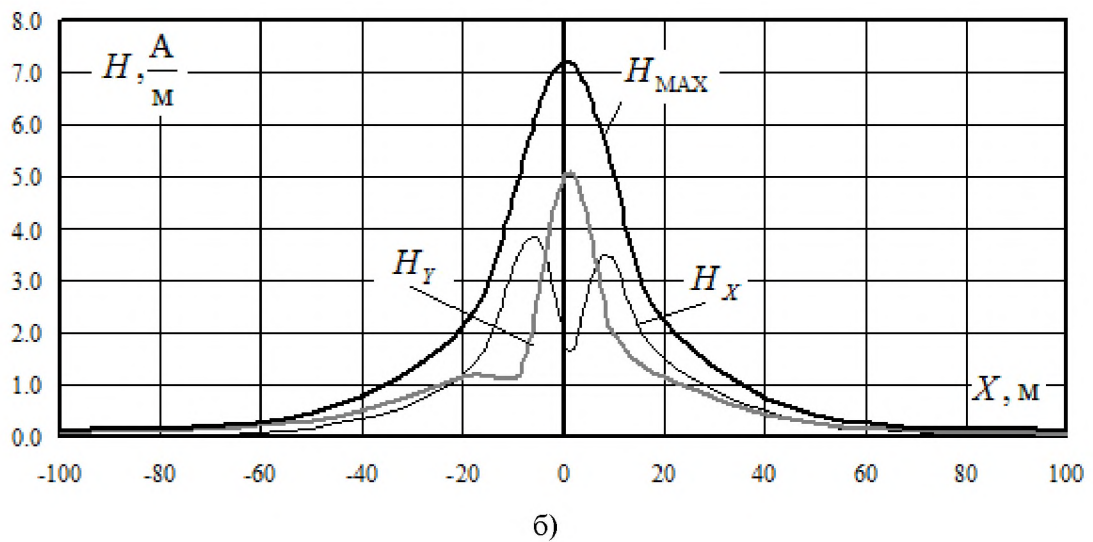
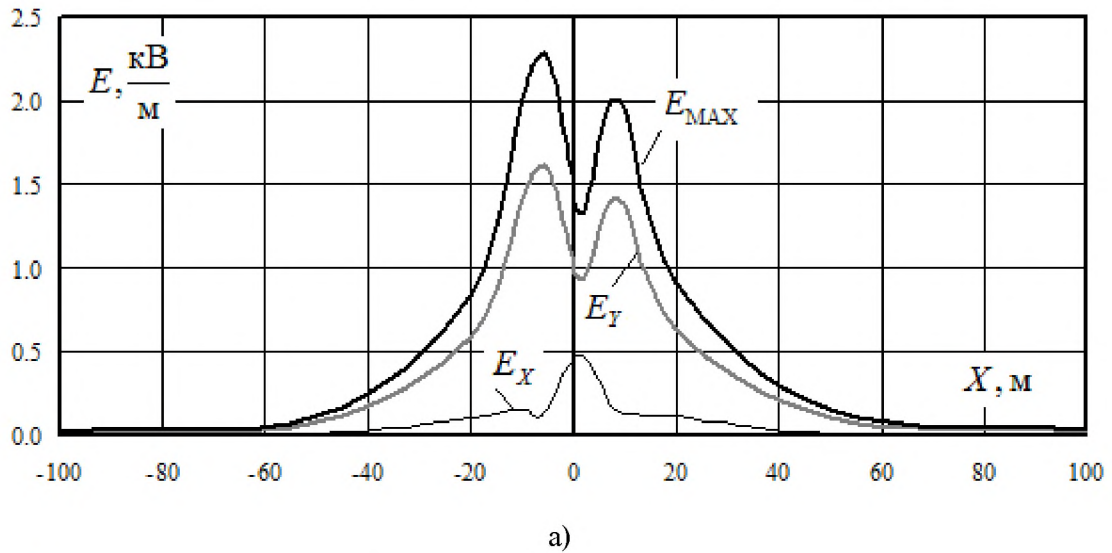
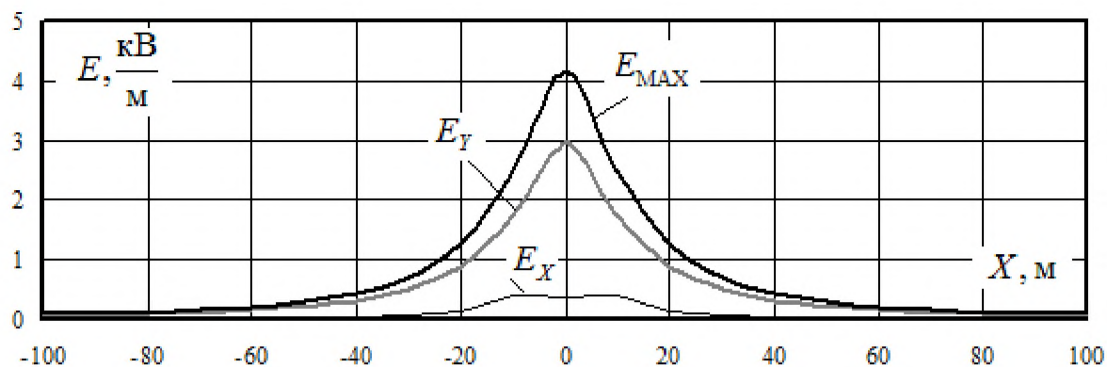
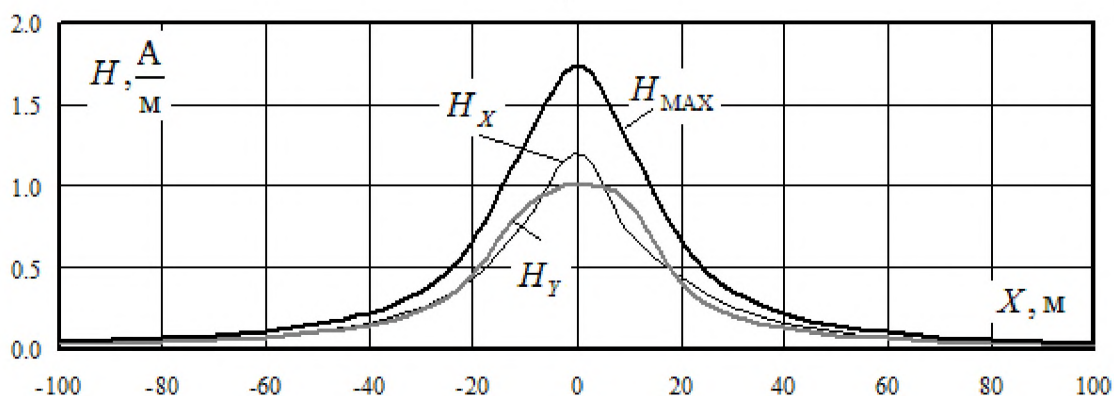


Рисунок 3 - Распределение токов по проводам:  
 а – КВЛ; б – ТВЛ (нагрузка на приемном конце ЛЭП принималась равной  $50 + j50$  МВ•А)



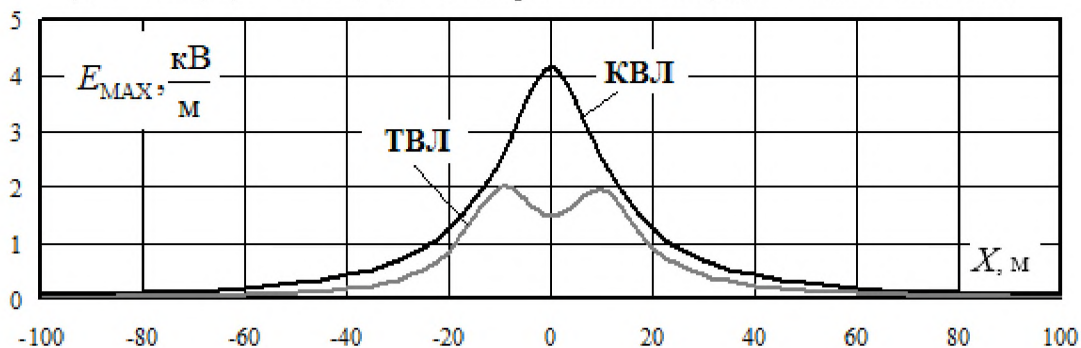


в)

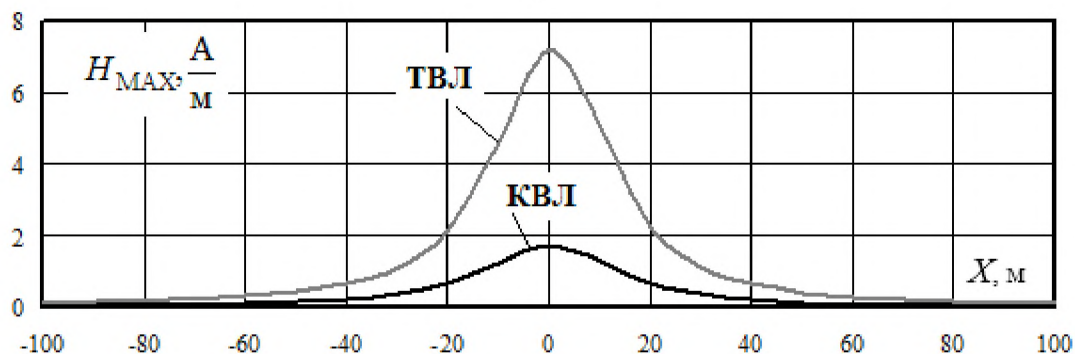


г)

Рисунок 4 - Распределение напряженностей по горизонтальной оси ЛЭП:  
а, б – ТВЛ; в, г – КВЛ; а, г – электрическое поле; б, г – магнитное поле



а)



б)

Рисунок 5 - Распределение напряженностей ЭМП по горизонтальной оси

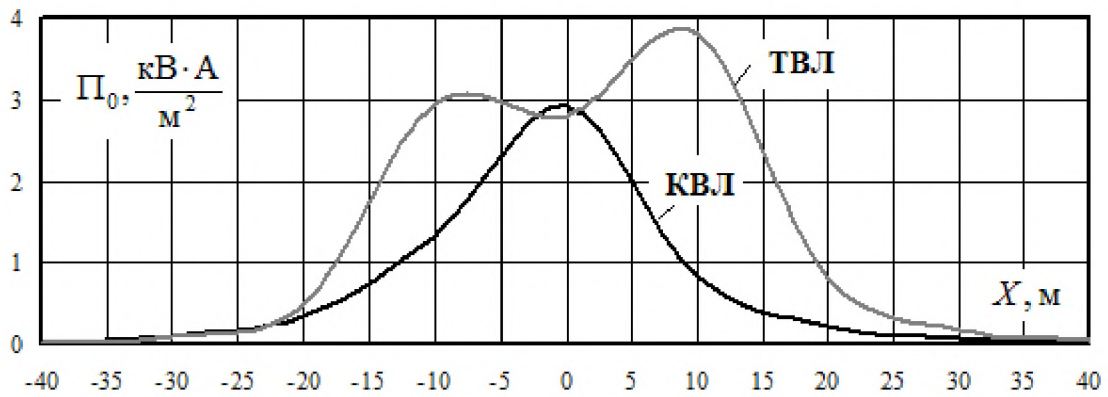
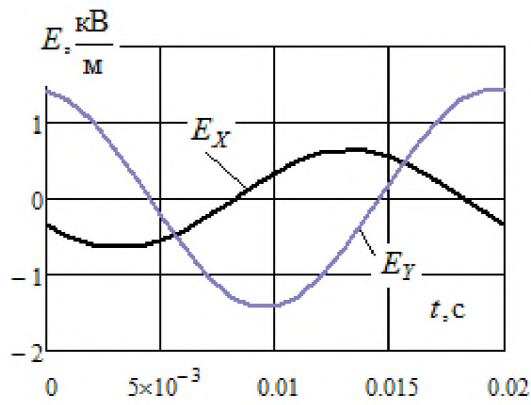
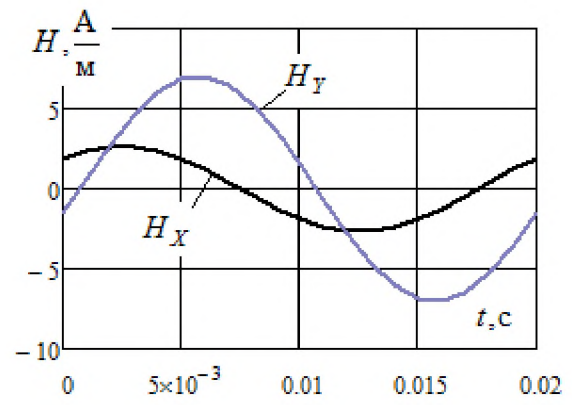


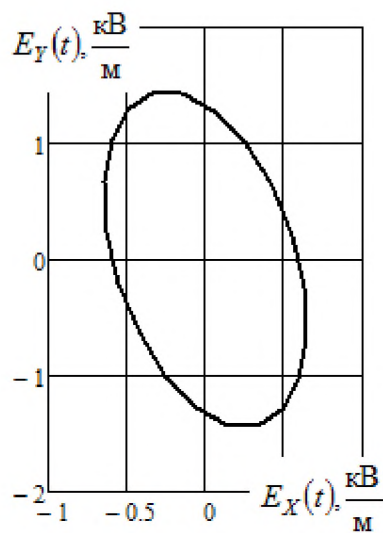
Рисунок 6 - Плотность потока активной электромагнитной энергии на высоте 1,8 м



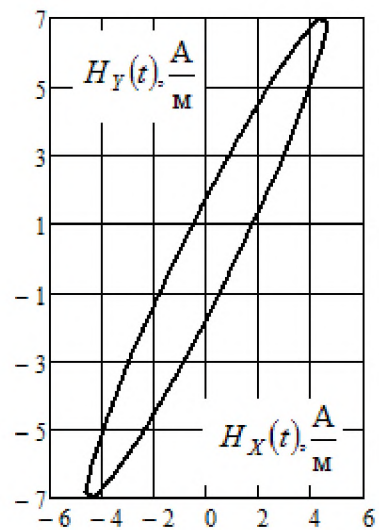
а)



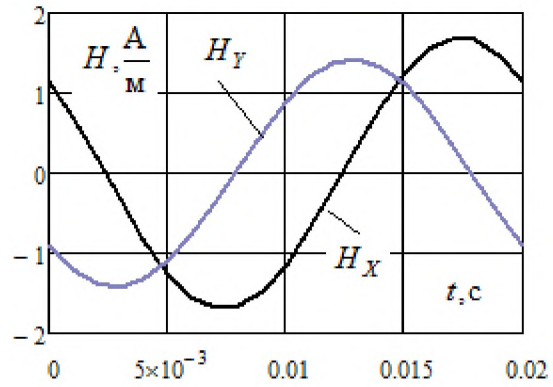
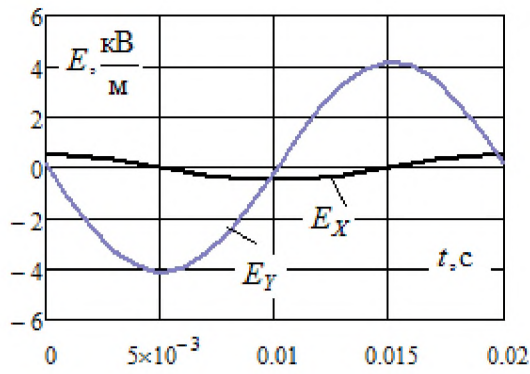
б)



в)

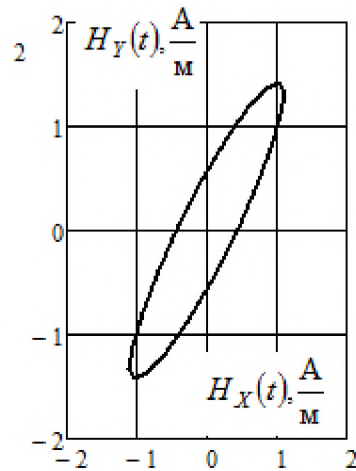
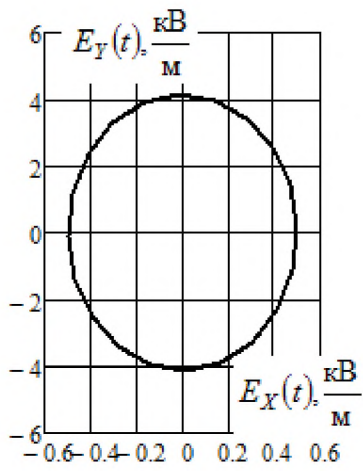


г)



д)

е)

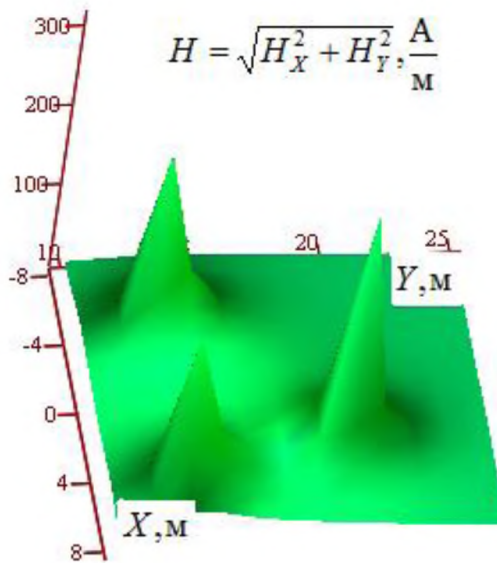
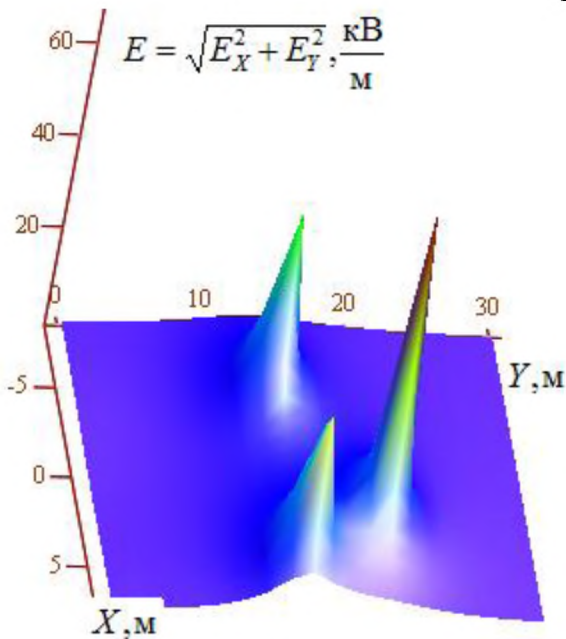


ж)

з)

Рисунок 7 - Зависимости составляющих напряженностей ЭМП от времени и годографы векторов напряженностей в точке с координатами  $X = 0$  м;  $Y = 1,8$  м:

а, в, д, ж – электрическое поле; б, г, е, з – магнитное поле; а, б, в, г – ТВЛ; д, е, ж, з – КВЛ



а)

б)

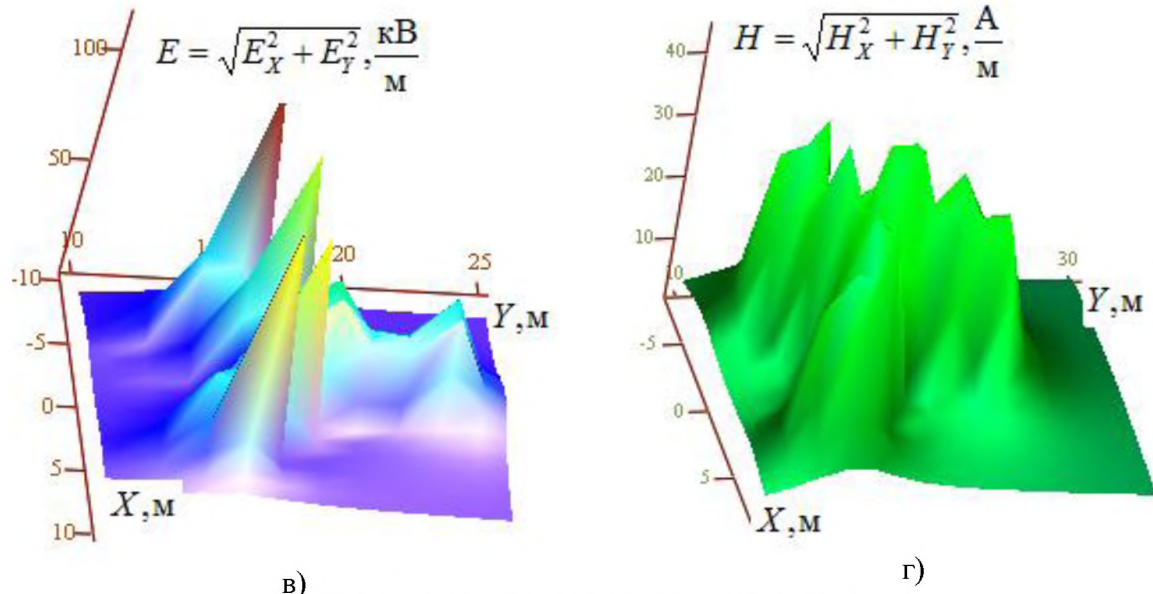


Рисунок 8 - Поверхности напряженностей ЭМП:  
 а, в – электрическое поле; в, г – магнитное поле  
 а, б – ТВЛ; в, г – КВЛ

Полученные результаты показывают следующее:

1. При одинаковом суммарном сечении проводов КВЛ и ТВЛ потери активной мощности в компактной ЛЭП существенно снижаются; так, например, при передаваемой мощности в 350 МВт потери в КВЛ уменьшаются на 43 % по сравнению с типовой ЛЭП 220 кВ.

2. На приемном конце компактной ЛЭП наблюдается более низкая несимметрия; КВЛ с треугольным расположением проводов обеспечивают лучшие условия электромагнитной безопасности по критерию напряженности магнитного поля, однако по электрическому полю условия безопасности на трассе данной КВЛ ухудшаются.

3. Компактная ЛЭП имеет значительно больший предел передаваемой мощности по сравнению с линией традиционной конструкции.

**Заключение**

Представлены методика и результаты моделирования электромагнитных полей, создаваемых компактными линиями электропередачи повышенной пропускной способности. Показано, что использование таких линий позволяет повысить мощности, передаваемые по ЛЭП, снизить потери электроэнергии и улучшить ее качество на приемном конце ЛЭП. За счет компактного расположения проводов примерно в два раза уменьшаются площади участков земли, отчуждаемых под строительство ЛЭП.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Александров Г.Н. Режимы работы воздушных линий электропередачи. СПб: ЦПКЭ, 2006. 139 с.  
 2. Электрические сети сверх- и ультравысокого напряжения ЕЭС России. Теоретические основы. Т. 3. М.: НТФ «Энергопрогресс» корпорации «ЕЭЭК», 2012. 368 с.  
 3. Степанов В.М., Карницкий В.Ю. Компактные линии электропередачи // Известия ТулГУ. Технические науки. № 3-5, 2010. С. 49-51.  
 4. Ю.Г. Шакарян, Л.В. Тимашова, С.Н. Карева, В.М. Постолатий / Эффектив-

ность передачи электрической энергии при применении компактных управляемых ВЛ // Энергия единой сети. № 3 (14), 2014. С. 4-15.  
 5. Ю.Г. Шакарян, Л.В. Тимашова, С.Н. Карева, В.М. Постолатий / Технические аспекты создания и режимные особенности работы в энергосистемах компактных управляемых ВЛ 220, 500 кВ // Энергия единой сети. № 4 (4), 2012. С. 36-43.  
 6. Зарудский Г.К., Самалюк Ю.С. О режимных особенностях компактных воздушных линий электропередачи напряжени-



ем 220 кВ // Электричество. № 5, 2013. С. 8-13.

7. Сотников В.В., Камаев В.В. Сравнительный анализ современных видов воздушных линий электропередачи и перспективы их развития // Электрика. № 9, 2013. С. 2-4.

8. Зувев Э.Н. Взгляд на проблемы передачи электроэнергии // Электро. № 2. 2005. С. 2-8. Эффективность компактных управляемых высоковольтных линий электропередачи / В.М. Постолатий, Е.В. Быкова, В.М. Суслов, Ю.Г. Шакарян, Л.В. Тимашова, С.Н. Карева // Проблемы региональной энергетики. № 3 (29), 2015. С. 1-17.

9. Селиверстов Г.И., Комар А.В., Петренко В.Н. Конструкции и параметры компактных одноцепных линий электропередачи с концентрическим расположением фаз // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. № 6, 2012. С. 41-45

10. Основные принципы создания и характеристики управляемых самокомпенсирующихся линий электропередачи / Постолатий, Е.В. Быкова, Ю.Г. Шакарян, Л.В. Тимашова // Электротехнічні та комп'ютерні системи. № 25(101), 2017. С. 216-229.

11. Чипизубов Д.И., Константинов А.М. Режимно-технические ограничения многоцепных компактных воздушных линий 220 кВ // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. Хабаровск: ДВГУПС. Т. 1, 2018. С. 257-264.

12. Методические подходы к выбору вариантов линий электропередачи нового поколения на примере ВЛ-220 кВ / В.М. Постолатий, Е.В. Быкова, В.М. Суслов, Ю.Г. Шакарян, Л.В. Тимашова, С.Н. Карева // Проблемы региональной энергетики. № 2, 2010. С. 1-18.

13. Петренко В.Н., Селиверстов Г.И. Физическая модель компактной электропередачи повышенной натуральной мощности // Вестник гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. № 3, 2003. С. 35-38.

14. Свешникова Е.Ю., Маколдин С.В. Техничко-экономическое сопоставление элек-

тропередач 220 кВ компактного четырехцепного исполнения и 500 кВ традиционного одноцепного исполнения // Потенциал современной науки. № 1 (32), 2018. С. 4-7.

15. Мурзин С.Г. Анализ различных конструкций и систем линий электропередач переменного тока по оптимальной пропускной способности и минимальным потерям электроэнергии // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. М.: ВНИИЭСХ. Т. 1, 2008. С. 206-213.

16. Моделирование электромагнитных полей, создаваемых компактными многосегментными линиями электропередачи / Н.В. Буякова, В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, Лэ Ван Тхао // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. Ангарск: Изд-во АГТУ, 2018. С. 152-161.

17. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.

18. Буякова Н.В., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Электромагнитная безопасность в системах электроснабжения железных дорог: моделирование и управление: монография / под общ. ред. А. В. Крюкова. Ангарск: РИО АНГТУ, 2018. 382 с.

19. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of electrical fields in railway engineering structures // Advances in Engineering Research. Vol. 158, 2018. Pp. 219-225.

20. Buyakova N., Zakarukin V., Kryukov A. Imitative Modelling of Electromagnetic Safety Conditions in Smart Power Supply Systems // Advances in Intelligent Systems Research. Vol. 158. Vth International workshop "Critical infrastructures: contingency management, intelligent, agent-based, cloud computing and cyber security" (IWCI 2018), 2018. С. 20-25.

21. Electromagnetic Safety Enhancing in Railway Electric Supply Systems / Natal'ya Buyakova, Vasilij Zakaryukin, Andrey Kryukov, Tu Nguyen // E3S, Web of Conferences 58, 01006(2018) RSES 2018, P. 1 – 6.