

УДК 612.315.1

## КОМПАКТНЫЕ ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ – НОВОЕ РЕШЕНИЕ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

М. С. Бучков

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель Г. И. Селиверстов

*Выполнены исследования электрических и режимных параметров компактных воздушных линий электропередачи, предложен вариант исполнения компактной воздушной линии электропередачи с улучшенными параметрами, связывающей мощную электрическую станцию с системообразующей подстанцией высокого напряжения.*

**Ключевые слова:** энергетическая безопасность, компактная воздушная линия электропередачи, электрические и режимные параметры, коммутационные аппараты, приведенные затраты.

## COMPACT OVERHEAD POWER LINES – A NEW SOLUTION FOR ELECTRIC POWER TRANSMISSION

M. S. Buchkov

*Sukhoi State Technical University of Gomel, Republic of Belarus*

Scientific supervisor G. I. Seliverstov

*The article presents studies of the electrical and operating parameters of compact overhead power transmission lines, and proposes a design option for a compact overhead power transmission line with improved parameters, connecting a powerful electrical station with a system-forming high-voltage substation.*

**Keywords:** energy security, compact overhead power line, electrical and operating parameters, switching devices, reduced costs.

Энергетическая безопасность – состояние защищенности граждан, общества, государства, экономики от угроз дефицита в обеспечении их потребностей в энергии экономически доступными энергетическими ресурсами приемлемого качества, от угроз нарушения бесперебойности энергоснабжения [1].

В настоящее время в связи с вводом в эксплуатацию Белорусской атомной электрической станции построены и реконструированы тысячи километров высоковольтных линий электропередачи.

В целях ускоренного развития систем передачи электроэнергии следует создавать воздушные линии (ВЛ) электропередачи с улучшенными удельными технико-экономическими показателями. Актуальность работы обусловлена поиском новых типов ВЛ, отличающихся повышенной мощностью и сниженным экологическим влиянием.

Цель работы – исследование электрических, режимных и технико-экономических показателей трехкоаксиальных радиальных компактных ВЛ (далее – компактные ВЛ).

В исследованиях ставилась задача рассчитать и оценить электрические параметры компактных ВЛ, исследовать их режимные параметры, разработать схему

электропередачи с компактной ВЛ на примере реального участка электрической сети и определить ее технико-экономические показатели.

В основу исследований положена конструкция ВЛ, провода которой расположены по контуру трех концентрических окружностей  $1, 2, 3$ , причем провода разных фаз  $A, B, C$ , разных окружностей расположены на линии одного радиуса  $R_1$  ( $R_2, R_3$ ) (рис. 1) [2, 3].

В компактной ВЛ максимально возможно сближены провода разноименных фаз и максимально удалены друг от друга провода одноименных фаз. Результатом этого является максимальная компенсация разнонаправленных сил электромагнитного поля, создаваемого проводами разных фаз, и как следствие – улучшение электрических параметров линий.

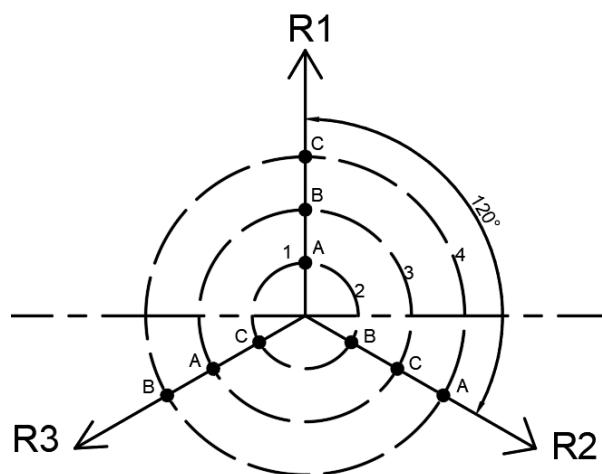


Рис. 1. Схема расположения проводов трехлучевой компактной ВЛ

Конструктивные и электрические параметры вариантов компактных ВЛ напряжением 110 и 220 кВ приведены в табл. 1 [3].

Таблица 1

Параметры трехлучевых компактных ВЛ напряжением 110, 220 кВ

Напряжение $U$ , число $n$ и марки проводов линии	Расстояние между проводами $d_i$ , см	Габариты линий, м			Электрические параметры				
		$R_1$	$R_2$	$R_3$	$L_i \cdot 10^{-4}$ , Гн	$C_i \cdot 10^{-9}$ , Ф/км	$Z_b$ , Ом	$P_{нат}$ , МВт	$P_i$ , МВт
$U = 110$ кВ $n = 3$ AC-185/29	1,0	0,58	1,58	2,58	3,340	35,94	102,38	118,2	13,13
	1,2	0,69	1,89	3,09	3,460	34,59	105,83	114,3	12,7
	1,4	0,80	2,20	3,60	3,560	33,50	108,71	111,3	12,37
$U = 220$ кВ $n = 3$ AC-400/51	1,7	0,98	2,69	4,38	3,420	35,25	99,88	484,2	53,80
	1,9	1,10	3,00	4,90	3,530	33,82	103,47	467,7	51,97
	2,1	2,10	3,31	5,41	3,590	33,15	105,39	459,2	51,03

В табл. 1 обозначено:  $L_3$  и  $C_3$  – эквивалентные индуктивности и емкости линии соответственно;  $Z_b$  – волновое сопротивление линии;  $P_{\text{нат}}$  и  $P_i$  – полная и удельная натуральная мощности линии соответственно.

На основе исследования конструктивных и электрических параметров (табл. 1) [3] установлено следующее: во-первых, при общих равных условиях: одинаковых радиусах проводов расщепленных фаз, одинаковом расстоянии между соседними проводами по контуру внутренней окружности радиуса  $R_1$  и в каждом из лучей удельная натуральная мощность трехлучевых линий одного класса напряжения пропорциональна числу составляющих в расщепленных фазах; во-вторых, при изменении расстояния между соседними проводами разноименных фаз  $d$  величина натуральной мощности  $P_{\text{нат}}$  практически не изменяется, что является хорошим фактором при конструктивном исполнении линии.

Для исследования зависимости потерь активной мощности и потерь напряжения от передаваемой мощности и длины ее передачи  $L$  от 180 км рассматривались компактные ВЛ с тремя проводами в расщепленной фазе с сечением проводов – АС-95/16, АС-120/19, АС-150/24, АС-185/29 и АС-240/32, а также для сопоставительной оценки – традиционные одноцепные и двухцепные линии такой же длины и таких же сечений проводов. Удельные параметры рассматриваемых вариантов линий ( $r_0$ ,  $x_0$  – активное и индуктивное сопротивления,  $b_0$  – емкостная проводимость) принимались на основании данных [3, 4]. Электрические параметры вариантов компактных ВЛ приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Удельные параметры вариантов компактных ВЛ для различных сечений проводов ВЛ напряжением 110 кВ**

Удельные параметры	Параметры компактных ВЛ для различных сечений проводов				
	АС-95/16	АС-120/19	АС-150/24	АС-185/29	АС-240/32
$r_0$ , Ом/км $r_0$	0,102	0,083	0,066	0,054	0,04
$x_0$ , Ом/км $x_0$	0,106	0,106	0,105	0,104	0,103
$b_0 \cdot 10^{-6}$ , См/км	11,0	11,13	11,13	11,43	11,66

Исходные данные для исследования режимов электропередачи: напряжение источника питания 115 кВ; максимальная передаваемая мощность по линии электропередачи принята предельно передаваемая мощность для различных сечений проводов с коэффициентом мощности, равным 0,93.

На первом этапе исследований были определены погонные электрические параметры линий – активное сопротивление  $R_{\text{л}}$ , индуктивное сопротивление  $X_{\text{л}}$ , емкостная проводимость  $B_{\text{л}}$ , зарядная мощность  $Q_{\text{с}}$ . Результаты расчета параметров для линий различных конструкций с сечением провода АС-150/24 приведены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что активные сопротивления компактной ВЛ в 3 раза меньше, чем у традиционной линии, индуктивное сопротивление компактной линии в 4 раза меньше по сравнению с традиционной одноцепной линией и в 2 раза меньше, чем у двухцепной линии, зарядная мощность компактной линии в 4,5 и 2 раза больше в отличие от традиционной одноцепной и двухцепной линий соответственно.

Таблица 3

**Электрические параметры компактной ВЛ, традиционной одноцепной  
и двухцепной линий с проводами марки АС 150/24**

Конструктивные и электрические параметры линий электропередачи												
<i>L</i> , км	<i>R<sub>л</sub></i> , Ом	<i>X<sub>л</sub></i> , Ом	<i>B<sub>л</sub></i> , 10 <sup>-6</sup> , см	<i>Q<sub>с</sub></i> , Мвар	<i>R<sub>л</sub></i> , Ом	<i>X<sub>л</sub></i> , Ом	<i>B<sub>л</sub></i> , 10 <sup>-6</sup> , см	<i>Q<sub>с</sub></i> , Мвар	<i>R<sub>л</sub></i> , Ом	<i>X<sub>л</sub></i> , Ом	<i>B<sub>л</sub></i> , 10 <sup>-6</sup> , см	<i>Q<sub>с</sub></i> , Мвар
	Компактная ВЛ				Традиционная одноцепная				Традиционная двухцепная			
1	0,06	0,10	11,29	0,14	0,20	0,42	2,70	0,03	0,10	0,21	5,40	0,07
10	0,66	1,05	112,9	1,37	1,98	4,20	27,00	0,33	0,99	2,10	54,0	0,65
20	1,32	2,10	225,8	2,73	3,96	8,40	54,00	0,65	1,98	4,20	108,0	1,31
30	1,98	3,15	338,7	4,10	5,94	12,60	81,00	0,98	2,97	6,30	162,0	1,96
40	2,64	4,20	451,6	5,47	7,92	16,80	108,00	1,31	3,96	8,40	216,0	2,61
50	3,30	5,24	564,4	6,83	9,90	21,00	135,00	1,63	4,95	10,5	270,0	3,27
60	3,96	6,29	677,3	8,20	11,88	25,20	162,00	1,96	5,94	12,6	324,0	3,92
70	4,62	7,34	790,2	9,57	13,86	29,40	189,00	2,29	6,93	14,7	378,0	4,57
80	5,28	8,39	903,1	10,9	15,84	33,60	216,00	2,61	7,92	16,8	432,0	5,23

В качестве примера расчеты потерь активной мощности  $\Delta P$  и напряжения  $\Delta U$  для различных типов линий с сечением проводов АС-150/24 приведены в табл. 4. Результаты анализа расчетов режимов компактной ВЛ и традиционных линий показывают, что потери активной мощности в компактной линии в 3,13 раза ниже, чем в традиционной одноцепной, и в 1,53 ниже, чем в традиционной двухцепной линии при длине передачи электроэнергии 80 км.

Таблица 4

**Результаты расчета потерь мощности и напряжения  
для различных типов ВЛ сечением АС-150/24**

Длина линии <i>L</i> , км	Режимные параметры линии электропередачи					
	$\Delta P$ , МВт	$\Delta U$ , кВ	$\Delta P$ , МВт	$\Delta U$ , кВ	$\Delta P$ , МВт	$\Delta U$ , кВ
	Компактная одноцепная		Традиционная одноцепная		Традиционная двецепная	
1	0,199	0,189	0,604	0,68	0,302	0,339
10	1,987	1,93	5,979	6,76	2,987	3,38
20	3,961	3,847	11,950	13,51	5,963	6,745
30	5,920	5,752	17,900	20,25	8,929	10,1
40	7,865	7,645	23,850	26,98	11,890	13,44
50	9,796	9,516	29,790	33,7	14,830	16,77
60	11,710	11,38	35,720	40,4	17,770	20,1
70	13,620	13,24	41,630	47,09	20,690	23,4
80	15,510	15,08	47,540	53,77	23,610	26,69

Более полно преимущества компактных ВЛ электропередач характеризует степень использования ширины трассы и коридора линий [5] при передаче через них максимального потока электрической энергии в натуральном режиме – удельная величина натуральной мощности, рассчитанная на единицу ширины трассы  $P_{\text{нат}}/\text{м}$  и площади поперечного сечения  $P_{\text{нат}}/\text{м}^2$ .

Величина натуральной мощности на единицу ширины трассы, МВт/м, и площади поперечного сечения, МВт/м<sup>2</sup>, для компактной ВЛ напряжением 110 кВ составляет 8,2 и 0,47, для традиционной одноцепной – 2,3 и 0,17, для традиционной двухцепной – 4,4 и 0,24 соответственно; для компактной ВЛ напряжением 220 кВ – 17,9 и 0,72, для традиционной одноцепной – 6 и 0,30, для традиционной двухцепной – 11,47 и 0,53 соответственно.

В качестве примера на базе компактной ВЛ разработана схема электропередачи Гомельская «ТЭЦ-26» – электрическая подстанция (ПС) «Гомсельмаш-330» (вместо двух устаревших одноцепных ВЛ с проводами марки АС-300).

На рис. 2 изображена электрическая схема проектируемой компактной ВЛ электропередачи между распределительными устройствами (РУ) 110 кВ Гомельской «ТЭЦ-26» и электрической ПС «Гомсельмаш-330» с выключателями Q и разъединителями QS по ее концам.

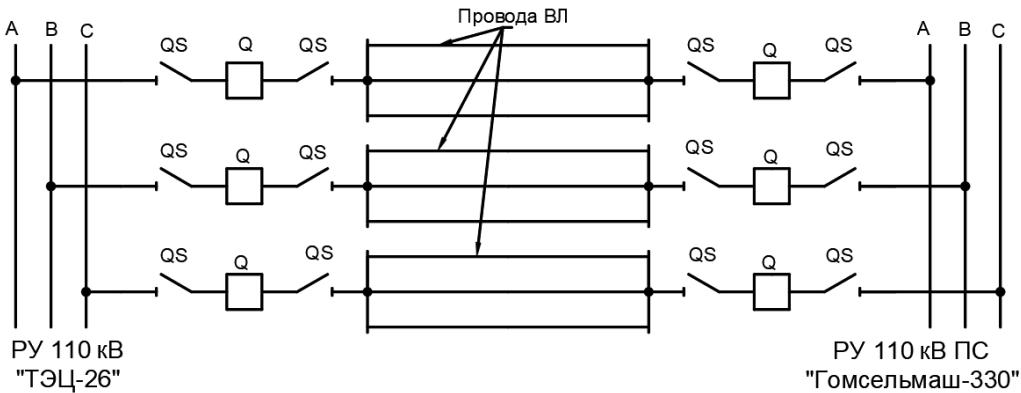


Рис. 2. Электрическая схема проектируемой электропередачи  
Гомельская «ТЭЦ-26» – ПС «Гомсельмаш-330»

В основу проектирования компактной ВЛ положены следующие исходные данные: максимальная передаваемая мощность 200 МВ · А; длина линии электропередачи 9,1 км; второй район по ветру и гололеду; максимальный ток короткого замыкания на шинах РУ ТЭЦ-26 – 22,6 кА; минимальный ток короткого замыкания – 14,3 кА.

На основании выполненных расчетов для компактной ВЛ выбраны провода марки АС-150/24, промежуточные и анкерные опоры (рис. 3), по концам линии электропередачи выбраны элегазовые выключатели Q марки ВГТ-110, разъединители QS марки РГН-110, измерительные трансформаторы тока марки СВЭЛ-110 и трансформаторы напряжения марки ЗНОГ-110.

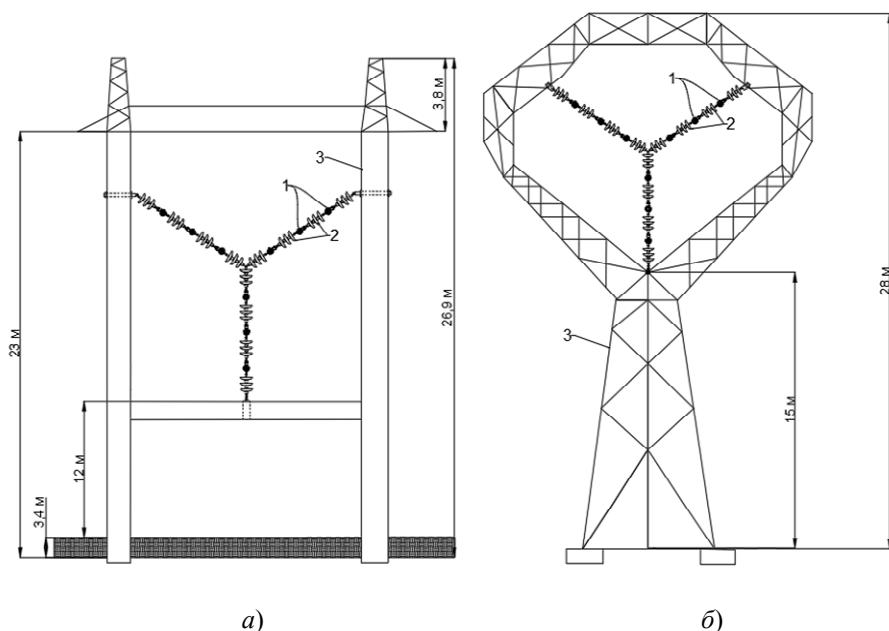


Рис. 3. Схема подвески проводов трехкоаксиальной радиальной трехлучевой линии:

1 – провода; 2 – изоляционные элементы; 3 – стойки опоры

Для промежуточных опор для компактной ВЛ электропередачи принята железобетонная опора П-образного типа со стойками марки СПБ110-4 (рис. 3, а), для анкерных опор – металлическая башенная опора с охватывающим окном (рис. 3, б).

Для проектируемой электропередачи были определены технико-экономические показатели – приведенные затраты З, рассчитанные по формуле

$$Z = E_h K_{\text{сум}} + I_{\text{сум}},$$

где  $E_h$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;  $K_{\text{сум}}$ ,  $I_{\text{сум}}$  – капитальные затраты и ежегодные расходы (издержки) на проектируемую электропередачу.

Приведенные затраты на проектируемую электропередачу составили 1996,6 тыс. руб., капитальные затраты и ежегодные издержки – 7751,7 и 1144,2 тыс. руб. соответственно.

В связи с существенным износом электросетевого комплекса Республики Беларусь на данный момент необходимо продолжать модернизацию электрических сетей для сохранения высоких показателей работы энергосистемы страны. Замена устаревших линий электропередач на новые – перспективные – позволит повысить их экономические показатели за счет снижения потерь активной мощности, увеличить пропускную способности линий и их надежность.

#### Л и т е р а т у р а

1. Комплексный план развития электроэнергетической сферы до 2025 года с учетом ввода Белорусской атомной электростанции и межотраслевого комплекса мер по увеличению потребления электроэнергии до 2025 г. : утв. постановлением Совета Министров Респ. Беларусь, 1 марта 2016 г., № 169 / ООО «ЮрСпектр», Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь (дата обращения: 28.03.2021).
2. Селиверстов, Г. И. Разработка новых воздушных компактных электропередач : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Селиверстов Георгий Иванович. – Минск : БПИ, 1986. – 19 с.

3. Селиверстов, Г. И. Конструкции и параметры компактных одноцепных линий электропередачи с концентрическим расположением проводов фаз / Г. И. Селиверстов, А. В. Комар, В. Н. Петренко // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2012. – № 6. – С. 41–45.
4. Справочник по проектированию электрических сетей / И. Г. Карапетян, Д. Л. Файбисович, И. М. Шапиро ; под ред. Д. Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : ЭНАС, 2012. – 376 с.
5. Правила устройства электроустановок. Минэнерго СССР. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 648 с.

УДК 004.896

## **ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РОБОМОБИЛЯ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ЛЮДЕЙ В ШАХТНОЙ РАЗРАБОТКЕ**

**В. А. Пракопович**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель М. И. Михайлов

*Рассмотрены особенности проектирования робомобилей для экстремальных условий, а именно для работы в шахтной разработке. Представлены основные проблемы в данной сфере и технико-экономические показатели подобных проектов.*

**Ключевые слова:** робототехника, робомобиль, шахта, привод, система управления.

## **DESIGN FEATURES OF A ROBOMOBILE FOR TRANSPORTATION PEOPLE IN MINING**

**V. A. Prakopovich**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, Republic of Belarus*

Scientific supervisor M. I. Mikhailov

*The features of designing robomobiles for extreme conditions, namely for work in mining, are considered. The main problems in this area and the technical and economic indicators of such projects are presented.*

**Keywords:** robotics, robomobile, shaft, drive, control system.

Нельзя отрицать важность роботов и робототехники в современном мире. Роботы буквально везде вокруг нас. Даже там, где мы, на первый взгляд, их не замечаем. О действиях и существовании некоторых роботов мы можем и не знать. Эти роботы могут выполнять важные и нестандартные задачи, оставаясь для нас в тени. Почему же такая интересная сфера науки и жизни остается неизвестной большинству? На мой взгляд, самая главная причина этому – малые познания о видах и формах роботов. Первое, что приходит в голову человеку, услышавшему слово «робот», – манипулятор, состоящий из нескольких звеньев, имеющий захват и выполняющий функции руки человека. Или же робот-пылесос, белый кусок пластика, катающийся взад-вперед по комнате.

В статье изложена информация о самой интересной и сложной сфере использования робототехники, а именно о роботах в экстремальных условиях и о задаче из этой сферы, с которой я столкнулся лично.