

УДК 612.315.1

DOI 10.62595/1819-5245-2026-3-98-107

КОМПАКТНЫЕ ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ – ПЕРСПЕКТИВНОЕ РЕШЕНИЕ ТРАНСПОРТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Г. И. СЕЛИВЕРСТОВ, М. С. БУЧКОВ, Т. Н. САВКОВА

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

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

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

Для цитирования. Селиверстов, Г. И. Компактные воздушные линии электропередачи – перспективное решение транспорта электроэнергии / Г. И. Селиверстов, М. С. Бучков, Т. Н. Савкова // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2026. – № 3 (106). – С. 98–107. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2026-3-98-107>

COMPACT OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINES: A PROMISING SOLUTION FOR ELECTRICITY TRANSMISSION

G. I. SELIVERSTOV, M. S. BUCHKOV, T. N. SAVKOVA

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

Studies on the electrical and operating parameters of compact overhead power lines have been carried out. An option for a compact overhead power line with improved parameters, connecting a high-capacity power plant to a backbone high-voltage substation, is proposed.

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

For citation. Seliverstov G. I., Buchkov M. S., Savkova T. N. Compact overhead power transmission lines: a promising solution for electricity transmission. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2026, no. 3 (106), pp. 98–107 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2026-3-98-107>

Введение

Широкое использование электроэнергии в промышленности, сельском хозяйстве и быту объясняется удобством применения и простотой ее преобразования в другие виды энергии: механическую, тепловую, световую.

Современная электроэнергетика – это отрасль, обеспечивающая развитие и функционирование всех отраслей экономики страны.

Электроэнергия на пути от источника питания до электроприемника на современных промышленных предприятиях (независимо от их энергоемкости и характера производства), как правило, трансформируется один или несколько раз: по напряже-

нию и току, а потоки ее по мере приближения к потребителям дробятся на более мелкие и разветвленные каналы.

Первое место по количеству потребляемой электроэнергии занимает промышленность, на долю которой приходится более 50 % всей потребляемой в стране электроэнергии. С помощью электрической энергии приводятся в движение миллионы станков и механизмов, освещаются помещения, осуществляется автоматическое управление производственными процессами и др. В настоящее время существуют технологии (электрофизические и электрохимические способы обработки металлов и изделий), где электроэнергия является единственным энергоносителем.

Энергетическая безопасность и развитие отраслей промышленности и социальной сферы общества невозможны без совершенствования и опережающего развития электроэнергетики, в том числе без такой ее составляющей, как системы передачи и распределения электроэнергии.

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 [2–5].

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

Основная часть

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, 5].

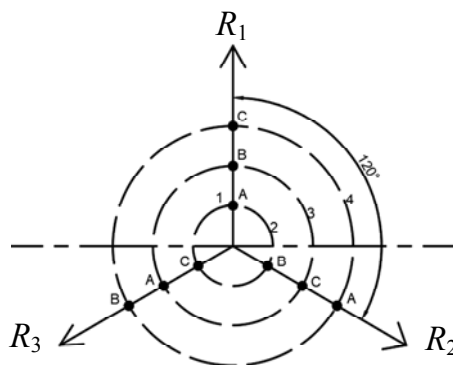


Рис. 1. Схема расположения проводов компактной воздушной линии

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.

Конструктивные и электрические параметры вариантов компактных ВЛ напряжением 110 и 220 кВ приведены в табл. 1 [5].

Таблица 1

Параметры компактных воздушных линий 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	$L, \cdot 10^{-4}$, Гн	$C, \cdot 10^{-9}$, Ф/км	Z_b , Ом	$P_{\text{нат}}$, МВт	P_i , МВт
$U = 110$ кВ $n = 3$ АС 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 $n = 3$ АС 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

Примечание. L_s и C_s – эквивалентные индуктивности и емкости линии соответственно; Z_b – волновое сопротивление линии; $P_{\text{нат}}$ и P_i – полная и удельная натуральная мощность линии соответственно.

На основе исследования конструктивных и электрических параметров (табл. 1) [5] 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 $P_{\text{нат}}$ компактных 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 компактных линий.

Для исследования зависимости потерь активной мощности и потерь напряжения от передаваемой мощности и длины ее передачи L от одного до 80 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 [5, 6]. Электрические параметры вариантов компактных ВЛ приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Удельные параметры вариантов компактных воздушных линий
для различных сечений проводов воздушных линий 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	0,102	0,083	0,066	0,054	0,04
x_0 , м/км	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 как предельно передаваемая мощность для различных сечений проводов с коэффициентом мощности, равным 0,93.

На начальном 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.

Таблица 3

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

Конструктивные и электрические параметры линий электропередачи												
L , км	$R_{\text{л}}$, Ом	$X_{\text{л}}$, Ом	$B_{\text{л}}, 10^{-6}$, см	$Q_{\text{с}}$, Мвар	$R_{\text{л}}$, Ом	$X_{\text{л}}$, Ом	$B_{\text{л}}, 10^{-6}$, см	$Q_{\text{с}}$, Мвар	$R_{\text{л}}$, Ом	$X_{\text{л}}$, Ом	$B_{\text{л}}, 10^{-6}$, см	$Q_{\text{с}}$, Мвар
	Компактная ВЛ				Традиционная одноцепная ВЛ				Традиционная двухцепная ВЛ			
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

Из табл. 3 видно, что активные сопротивления компактной ВЛ в три раза меньше, чем у традиционной линии; индуктивное сопротивление компактной линии в четыре раза меньше по сравнению с традиционной одноцепной линией и в два 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.

В качестве примера расчеты потерь активной мощности и напряжения ΔU для различных типов линий с сечением проводов АС 150/24 приведены в табл. 4. Результаты анализа расчетов режимов компактной ВЛ и традиционных линий показы-

вают, 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.

Более полно преимущества компактных ВЛ электропередач характеризует степень использования ширины трассы и коридора линий [7] 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 $P_{\text{нат}}/\text{м}^2$.

Таблица 4

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

Длина линии L , км	Режимные параметры линии электропередачи					
	ΔP , МВт	ΔU , кВ	ΔP , МВт	ΔU , кВ	ΔP , МВт	ΔU , кВ
	Компактная ВЛ		Традиционная одноцепная ВЛ		Традиционная двухцепная ВЛ	
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

Величина натуральной мощности на единицу ширины трассы, МВт/м и площади поперечного сечения, МВт/м² 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 одноцепных ВЛ с проводами марки АС 300/39, построенных в 1981 г.).

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.

В основу проектирования компактной ВЛ положены следующие исходные данные: максимальная передаваемая мощность – 200 МВА; 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.

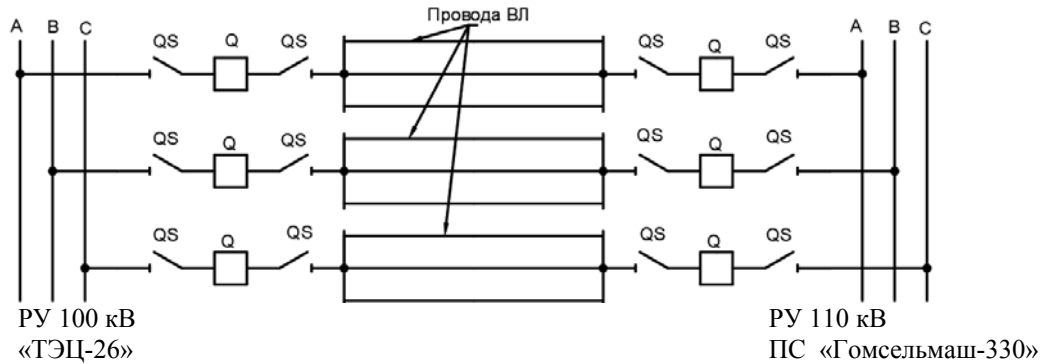


Рис. 2. Электрическая схема проектируемой электропередачи
«Гомельская ТЭЦ-26» – ПС «Гомсельмаш-330»

На основании выполненных расчетов для компактной ВЛ электропередачи выбраны: провода марки АС 150/24; для подвески проводов в пролете компактной ВЛ с тремя проводами в расщепленной фазе – железобетонные опоры П-образного типа со стойками марки СПБ110-4 (рис. 3, а); для подвески проводов по концам электропередачи – металлические анкерные башенные опоры с охватывающим окном (рис. 3, б); по концам линии электропередачи выбраны элегазовые выключатели Q марки ВГТ-110, разъединители QS марки РГН-110, измерительные трансформаторы тока TA марки ТОЛ-110 и трансформаторы напряжения TU марки ЗНОГ-110 (на рис. 2 не показаны).

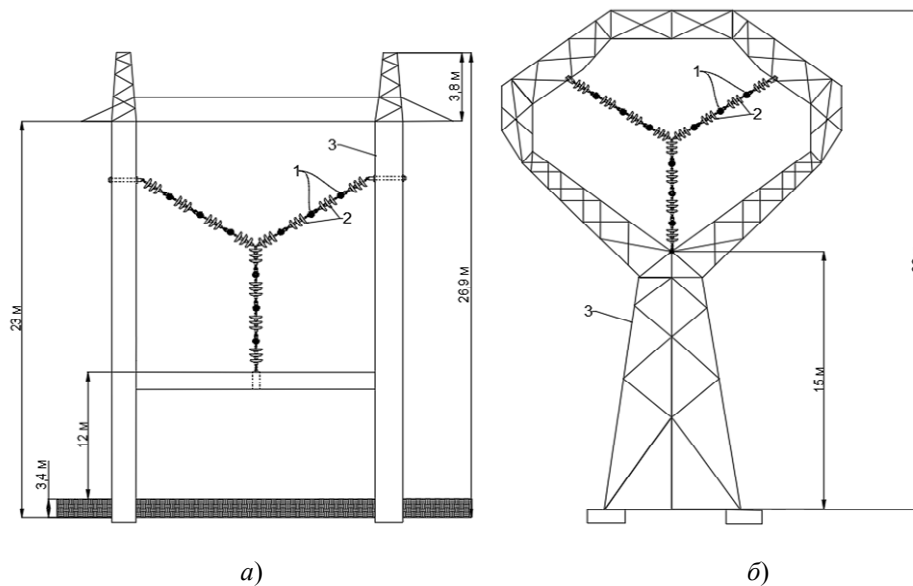


Рис. 3. Схема подвески проводов на промежуточной (а) и анкерной (б) опорах компактной воздушной линии:
1 – провода; 2 – изоляционные элементы; 3 – стойки опоры

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

$$Z = E_n K_{\text{сум}} + I_{\text{сум}}, \quad (1)$$

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

Капитальные затраты $K_{\text{вл}}$ в ВЛ электропередачи определяются по выражению [6]:

$$K_{\text{вл}} = K_{\text{влуд}} L, \quad (2)$$

где $K_{\text{влуд}}$ – удельные капиталовложения в сооружение ВЛ электропередачи; L – протяженность ВЛ.

Капитальные затраты на закупку оборудования – разъединители QS , трансформаторы тока TA и напряжения TV , выключатели Q определяются по выражению [6]:

$$K_{\text{об}} = K_{QS} + K_{TA} + K_{TV} + K_Q, \quad (3)$$

где K_{QS} – затраты на разъединители; K_{TA} и K_{TV} – затраты на измерительные трансформаторы тока и напряжения; K_Q – затраты на выключатели.

Для участка электрической сети годовые эксплуатационные расходы находятся по выражению [6]:

$$I_{\text{сум}} = I_a + I_{\text{э}} + I_{\Delta W}, \quad (4)$$

где I_a – издержки на амортизацию; $I_{\text{э}}$ – издержки на ремонт и обслуживание линии ВЛ электропередачи; $I_{\Delta W}$ – затраты на возмещение потерь электроэнергии.

Ежегодные издержки на амортизацию определяются по формуле [6]:

$$I_a = I_{a,\text{лэп}} + I_{a,\text{об}} = \left(\frac{p_{a,\text{лэп}}}{100} \right) K_{\text{вл}} + \left(\frac{p_{a,\text{об}}}{100} \right) K_{\text{об}}. \quad (5)$$

Здесь $p_{a,\text{лэп}}$ – норма амортизации для воздушных линий; $p_{a,\text{об}}$ – норма амортизации для силового оборудования и распределительных устройств.

Издержки на эксплуатацию объекта определяются по выражению [6]:

$$I_{\text{э}} = I_{\text{э,лэп}} + I_{\text{э,об}} = \left(\frac{p_{\text{э,лэп}}}{100} \right) K_{\text{вл}} + \left(\frac{p_{\text{э,об}}}{100} \right) K_{\text{об}}. \quad (6)$$

Здесь $p_{\text{э,лэп}}$ – норма амортизации для ВЛ; $p_{\text{э,об}}$ – норма амортизации для силового оборудования и распределительных устройств [6].

Затраты на возмещение потерь электроэнергии находятся по формуле [8]:

$$I_{\Delta W} = \beta \Delta W, \quad (7)$$

где β – стоимость 1 кВт · ч электроэнергии; ΔW – расчетные годовые потери электроэнергии в линии электропередачи [9].

Параметр ΔW определяется по выражению [8]:

$$\Delta W = \Delta P_{\text{л}} \tau, \quad (8)$$

где $\Delta P_{\text{л}}$ – потери мощности в линии электропередачи; τ – время максимальных потерь.

Параметр $\Delta P_{\text{л}}$ определялся по формуле

$$\Delta P_{\text{л}} = \left(\frac{S_{\text{макс}}^2}{U_{\text{ном}}^2} \right) R_{\text{л}}, \quad (9)$$

где $S_{\text{макс}}$ – максимальная нагрузка, передаваемая по линии электропередачи; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение сети.

Параметр τ находился по выражению [8]:

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_{\text{макс}}}{10000} \right)^2 8760, \quad (10)$$

где $T_{\text{макс}}$ – число часов использования максимальной нагрузки.

Приведенные затраты на проектируемую электропередачу составили 2736,86 тыс. руб., капитальные затраты и ежегодные издержки – 7139,24 и 1880,15 тыс. руб. соответственно (табл. 5).

Таблица 5

**Технико-экономические показатели компактной
воздушной линии электропередачи**

Наименование показателя	Обозначение	Значение показателя
Потери активной мощности в линии, МВт	$\Delta P_{\text{л}}$	0,658
Годовые потери электроэнергии, МВт · ч	ΔW	5764,08
Сумарные капиталовложения, тыс. бел. руб.	$K_{\text{сум}}$	7139,24
Капиталовложения на сооружение воздушной линии, тыс. бел. руб.	$K_{\text{вл}}$	6755,84
Капиталовложения в электрооборудование, тыс. бел. руб.	$K_{\text{об}}$	383,4
Затраты на разъединители, тыс. бел. руб.	K_{QS}	45,0
Затраты на трансформаторы тока, тыс. бел. руб.	$K_{\text{ТА}}$	159,0
Затраты на трансформаторы напряжения, тыс. бел. руб.	$K_{\text{ТВ}}$	164,4
Затраты на выключатели, тыс. бел. руб.	K_{Q}	150,0
Годовые эксплуатационные расходы, тыс. бел. руб.	$I_{\text{сум}}$	1880,15
Амортизационные отчисления, тыс. бел. руб./год	$I_{\text{а}}$	148,54
Расходы по ремонту и эксплуатации, тыс. бел. руб./год	$I_{\text{э}}$	76,67
Стоимость потерь электроэнергии, тыс. бел. руб./год	$I_{\Delta W}$	1654,94

Стоимость строительства одного километра компактной ВЛ принималась на основании укрупненных стоимостных показателей линий электропередачи и подстанций напряжением 35–1150 кВ [10], приведенных к ценам 2025 г., стоимость оборудования (разъединителей, измерительных трансформаторов тока и напряжения, выключателей) – на основании информации филиалов РУП электроэнергетики «Гомельэнерго».

Заключение

В связи со значительным 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, а также увеличить пропускную способность линий.

Литература

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 от 1 марта 2016 г. № 169 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 28.03.2025).
2. Селиверстов, Г. И. Разработка новых воздушных компактных электропередач : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Селиверстов Георгий Иванович ; Мин. политехн. ин-т. – Минск, 1986. – 19 с.
 3. Электропередачи переменного тока повышенной мощности / В. Т. Федин, Ю. Д. Головач, Г. И. Селиверстов, М. С. Чернецкий. – Минск : Навука і тэхніка, 1993. – 224 с.
 4. Пospelov, Г. Е. Передача энергии и электропередачи : учеб. пособие для студентов энергет. специальностей вузов / Г. Е. Пospelov, В. Т. Федин. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2003. – 544 с.
 5. Селиверстов, Г. И. Конструкции и параметры компактных одноцепных линий электропередачи с концентрическим расположением проводов фаз / Г. И. Селиверстов, А. В. Комар, В. Н. Петренко // Энергетика. Известия высших учебных заведений энергетических объединений СНГ. – 2012. – № 6. – С. 41–45.
 6. Карапетян, И. Г. 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.
 7. Правила устройства электроустановок : ПУЭ-6 : утв. решением М-ва энергетики и электрофикации СССР от 1 янв. 1985 г. : введ. 31 авг. 1985. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 648 с.
 8. Пospelov, Г. Е. Электрические системы и сети : учебник / Г. Е. Пospelov, В. Т. Федин, П. В. Лычев. – Минск : Технопринт, 2004. – 710 с.
 9. Тарифы на электрическую энергию для юридических лиц и индивидуальных предпринимателей в Республике Беларусь с 01.01.2025 г. / Офиц. сайт М-ва энергетики Респ. Беларусь. – URL: <https://www.minenergo.gov.by/activities/tseny-tarify-na-energoresursy> (дата обращения: 17.02.2025).
 10. Укрупненные стоимостные показатели линий электропередачи и подстанций напряжением 35–1150 кВ : СТО 56947007-29.240.124-2012. – Введ. 07.09.2012. – М. : ОАО «ФСК ЕЭС», 2012. – 34 с.

References

1. Comprehensive plan for the development of the electric power sector through 2025, taking into account the commissioning of the Belarusian Nuclear Power Plant, and an inter-sectoral set of measures to increase electricity consumption through 2025: approved by Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus no. 169 dated March 1, 2016. *Natsional'nyi tsentr pravovoi informatsii Respubliki Belarus, 2016* (accessed 28 March 2025) (in Russian).
2. Seliverstov G. I. *Development of new compact overhead power transmission systems*. Minsk, 1986. 19 p. (in Russian).
3. Fedin V. T., Golovach Yu. D., Seliverstov G. I., Chernetskii M. S. *High-capacity AC power transmission lines*. Minsk, Navuka i tehnik Publ., 1993. 224 p. (in Russian).
4. Pospelov G. E., Fedin V. T. *Energy and Power Transmission*. Minsk, Adukatsyya i vykhavanne Publ., 2003. 544 p. (in Russian).
5. Seliverstov G. I., Komar A. V., Petrenko V. N. Designs and parameters of compact single-circuit power transmission lines with a concentric arrangement of phase conductors. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii energeticheskikh ob"edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, 2012, no. 6, pp. 41–45 (in Russian).
6. Karapetyan I. G., Faibisovich D. L., Shapiro I. M. *Handbook on electrical network design*. Ed. Faibisovicha D. L. Moscow, ENAS Publ., 2012. 376 p. (in Russian).

7. *Electrical Installation Rules*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 648 p. (in Russian).
8. Pospelov G. E., Fedin V. T., Lychev P. V. *Electric Power Systems and Networks*. Minsk, Tekhnoprint Publ., 2004. 710 p. (in Russian).
9. Electricity tariffs for legal entities and individual entrepreneurs in the Republic of Belarus effective January 1, 2025. *Ofitsial'nyi sait Ministerstva energetiki Respubliki Belarus'*. Available at: <https://www.minenergo.gov.by/activities/tseny-tarify-na-energoresursy> (accessed 17 February 2025) (in Russian).
10. STO 56947007-29.240.124-2012. *Aggregated cost indicators for 35–1150 kV power transmission lines and substations*. Moscow, FSK EES Publ., 2012. 34 p. (in Russian).

Поступила 20.07.2026 г.