

Controlled Compact High Voltage Power Lines

Postolati V., Bycova E., Suslov V.

Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova
Republic of Moldova

Timashova L., Shakarian Yu., Kareva S.

Research and Development Center at Federal Grid Company of United Energy System,
Joint-stock company Russia

Abstract. Nowadays modern overhead transmission lines (OHL) constructions having several significant differences from conventional ones are being used in power grids more and more widely. Implementation of compact overhead lines equipped with FACTS devices, including phase angle regulator settings (compact controlled OHL), appears to be one of the most effective ways of power grid development. Compact controlled AC HV OHL represent a new generation of power transmission lines embodying recent advanced achievements in design solutions, including towers and insulation, together with interconnection schemes and control systems. Results of comprehensive research and development in relation to 110–500kV compact controlled power transmission lines together with theoretical basis, substantiation, and methodological approaches to their practical application are presented in the present paper.

Keywords: compact controlled OHL, transmission capacity, phase control.

Linii electrice compacte dirijate de tensiune înaltă

Postolati V., Bîcova E., Suslov V.

Institutul de Energetică al AŞM

Timaşova L., Şakarian Yu., Kareva S.

Societatea Deschisă pe Acţiuni "Centrul ştiinţific şi Tehnic al Companiei Reţelelor Federale de Transport a Sistemului electroenergetic unificat" Federaţia Rusă

Rezumat. În prezent pe o scară tot mai largă se utilizează construcţii noi ale liniilor electrice aeriene pentru transportul energiei electrice, ce diferă de cele tradiţionale. Una dintre cele mai eficiente soluţii pentru dezvoltarea reţelelor electrice se prezintă utilizarea liniei aeriene compacte, combinate cu dispozitivele FACTS, inclusiv dispozitivele de dirijare cu unghiul decalajului de fază (LEA compacte dirijate). Liniile compacte dirijate de înaltă tensiune prezintă o nouă generaţie a liniilor electrice pentru transportul energiei electrice, care au încorporat soluţii tehnice moderne privind realizarea lor constructivă, inclusiv a stâlpilor, izolaţiei, schemele de conexiune, sistemele de dirijare şi control. Liniile aeriene dirijate compacte pot fi utilizate ca linii de interconexiune şi linii interne de sistem de înaltă tensiune, precum şi pentru reţelele de distribuţie a energiei electrice, oferind în acelaşi timp un nivel calitativ nou de rezolvare a problemelor în domeniul transportului şi distribuţiei energiei electrice. În articolul sunt prezentate rezultatele cercetării şi dezvoltării liniilor electrice dirijate compacte cu tensiunea 110-500 kV include teoretică, argumentările şi abordările metodice întru aplicarea acestora.

Cuvinte cheie: LEA dirijate compacte, capacitatea de transmisie, dirijarea după unghiul de fază.

Управляемые компактные линии электропередачи высокого напряжения

Постолатий В.М., Быкова Е.В., Суслов В.М.

Институт Энергетики Академии наук Молдовы,
Республика Молдова

Тимашова Л.В., Шакарян Ю.Г., Карева С.Н.

Открытое акционерное общество «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы», Россия

Аннотация. В настоящее время все более широкое применение находят новые конструкции высоковольтных воздушных линий электропередачи (ВЛ), отличные от традиционных. Одним из наиболее эффективных средств развития электрических сетей является применение компактных ВЛ в сочетании с устройствами FACTS, в том числе с устройствами фазового регулирования (компактные управляемые ВЛ). Компактные управляемые высоковольтные линии электропередачи переменного тока (ВЛ) являются электропередачами нового поколения, воплотившими в себя современные технические решения по конструкции, включая опоры и изоляцию, схемам соединений, системам управления. В настоящей статье, изложены последние результаты авторов, касающиеся параметров, характеристик,

технико-экономических и экологических показателей управляемых компактных линий электропередачи различных классов напряжений.

Ключевые слова: управляемые компактные ВЛ, пропускная способность, фазовое регулирование, технические, экономические и экологические характеристики.

Введение

На современном этапе развития электроэнергетических систем актуальным является решение следующих основных проблем:

- повышение пропускной способности и управляемости магистральных и распределительных линий электропередачи и систем в целом;
- повышение экономических показателей электроэнергетических систем;
- уменьшение отчуждаемых площадей под линии электропередачи и выполнение всех требований по ограничению экологического влияния ВЛ.

Для решения этих проблем целесообразным представляется развитие электрических сетей 110-500 кВ на базе современных технических решений, как в области конструкций линий электропередачи, так и регулирующего оборудования и систем управления [1-4].

Создание компактных ВЛ, оснащенных устройствами FACTS, в том числе средствами фазового управления – компактных управляемых ВЛ – является одним из наиболее эффективных средств транспорта электроэнергии. Компактные ВЛ, с улучшенными по сравнению с ВЛ традиционной конструкции технико-экономическими показателями, позволяют снизить затраты на транспорт электрической энергии в расчете на единицу передаваемой мощности за счет повышения пропускной способности электрической сети, эффективного использования устройств регулирования, сокращения площадей отчуждаемых земель.

К настоящему времени выполнены комплексные теоретические и экспериментальные исследования компактных управляемых ВЛ и регулирующего оборудования, практические разработки, получен опыт проектирования, строительства и эксплуатации указанных линий электропередачи. Накоплен 30-летний положительный опыт эксплуатации в энергосистеме Молдовы двухцепных компактных управляемых самокомпенсирующихся ВЛ (УСВЛ) 110 кВ, общей протяженностью 56 км. С 1993

года в РФ находится в промышленной эксплуатации и успешно функционирует компактная ВЛ 330 кВ, протяженностью 146,7 км. Опыт создания и эксплуатации компактных управляемых линий электропередачи показал возможность получения по сравнению с ВЛ традиционной конструкции существенного технико-экономического эффекта при передаче заданной мощности.

При выполнении исследований выполнена классификация ВЛ различных типов, что позволяет провести их сопоставление и определить области применения.

На рис. 1 представлены различные типы линий электропередачи переменного тока в одноцепном и двухцепном исполнении.

Для сопоставления компактных управляемых ВЛ с линиями электропередачи других типов приняты следующие допущения:

- при выборе проводов принимается одинаковая плотность тока (A/mm^2);
- максимальная напряженность электрического поля (E_m) на поверхности проводов (в том числе на составляющих расщепленных фаз) не превышает заданной величины по отношению к начальной напряженности поля короны (E_n), $E_m \leq 0,9E_n$; Кроме указанных средств компенсации в случае необходимости регулирования по величине и направлению потока мощности в сложно замкнутой сети требуется установка устройств фазового регулирования – фазопоротных устройств (ФПУ), которые могут быть также трансформаторного типа (ФПТ). Их установленная мощность должна быть рассчитана на полную проходную мощность.

Компактные управляемые ВЛ отличаются от обычных тем, что повышенная пропускная способность у них достигается за счет компактной конструкции и фазового сдвига между векторами напряжений сближенных фаз, который для одноцепных трехфазных ВЛ будет равен 120° , а для двухцепных ВЛ может составлять $\theta=120^\circ$, $\theta=180^\circ$, и занимать промежуточные регулируемые значения в пределах $\theta=0^\circ \div 120^\circ (180^\circ)$.

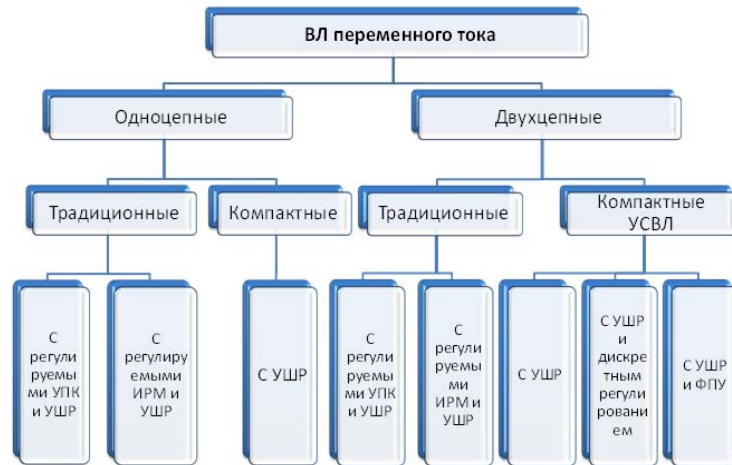


Рис.1. Классификация рассматриваемых ВЛ.

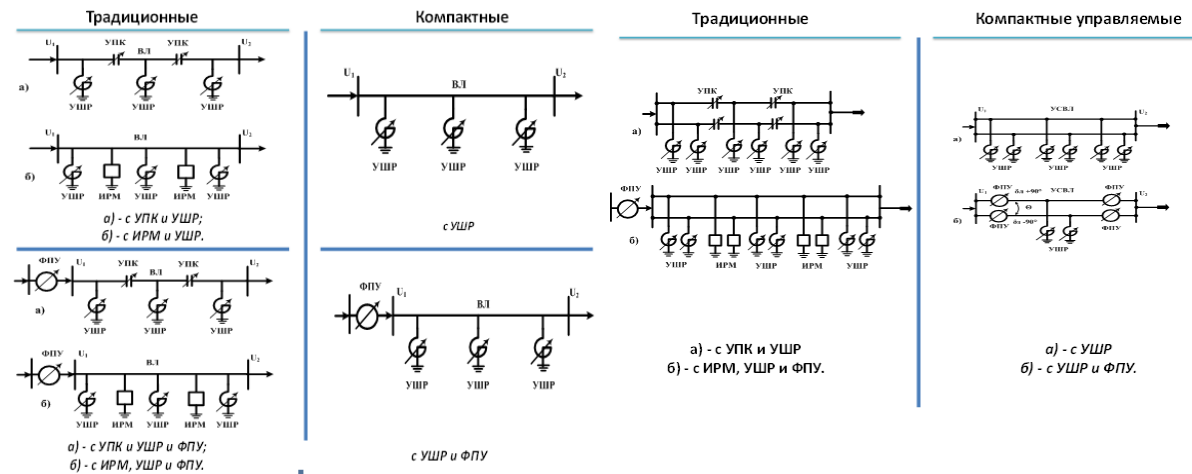


Рис.2. Однолинейные схемы одноцепных ВЛ.

Рис.3. Однолинейные схемы двухцепных ВЛ.

Увеличение пропускной способности ВЛ при сближении фаз вытекает из зависимости величины предела передаваемой мощности от основных параметров линии.

Максимальная величина передаваемой мощности определяется выражением:

$$P = \frac{|\dot{U}_1| |\dot{U}_2|}{Z_0 \sin \alpha_0 l} \sin \delta, \quad (1)$$

где \dot{U}_1 , \dot{U}_2 - векторы напряжения приложенного в начале и конце линии, соответственно;

δ - угол сдвига векторов напряжений начала и конца линии;

Z_0 - волновое сопротивление линии (Ом):

$$Z_0 = \sqrt{\frac{r_0 + jx_0}{g_0 + jb_0}}, \quad (2)$$

где $x_0 = \omega L_0$, - удельное индуктивное сопротивление проводов (фаз) линии (Ом/км); $b_0 = \omega C_0$ - удельная емкостная проводимость проводов (фаз) линии (См/км); r_0 - удельное активное сопротивление проводов (фаз) линии (Ом/км);

g_0 - активная поперечная проводимость проводов (фаз) линии (См/км), определяемая

выражением: $g_0 = \frac{\Delta P_{кор.сг}}{U_{ном}^2}$, где $\Delta P_{кор.сг}$ -

среднегодовые потери на корону;

$\alpha_0 l$ - волновая длина линии (электрических градусов),

где l – длина линии (км), α_0 – коэффициент изменения фазы (эл. град./км):

$$\alpha_0 = \omega \sqrt{L_0 C_0} \left(1 + \frac{r_0^2}{8x_0^2} \right) \quad (3)$$

Из выражения (1) следует, что при прочих равных условиях величина передаваемой по ВЛ мощности зависит от значения волнового сопротивления (Z_e), которое в свою очередь (2) определяется удельными параметрами (r_0, x_0, g_0, b_0).

Удельное активное сопротивление фаз r_0 для выбранной марки провода остается независимой величиной. При отсутствии потерь на корону может быть принято $g_0 = 0$.

Таким образом главными параметрами, от которых зависит волновое сопротивление ВЛ являются удельное индуктивное сопротивление x_0 и удельная поперечная проводимость b_0 .

Анализ факторов, от которых зависят значения x_0 и b_0 , показывает, что главными являются расстояния между фазами, параметры расщепленных фаз (радиус проводов r_{np} , число составляющих – n , эквивалентный радиус расщепления фазы r_s), а также конфигурации расположения фаз, и общие габариты опор ВЛ.

Для традиционных одноцепных ВЛ зависимости указанных параметров определяются следующими выражениями:

$$x_0 = 0.1445 \lg \frac{D}{r_s} + \frac{0,0157}{n}; \quad (4)$$

$$b_0 = \frac{7.58 \cdot 10^{-6}}{\lg \left(\frac{D}{r_s} \right)}. \quad (5)$$

Для создания компактных одноцепных ВЛ следует идти по пути уменьшения расстояний между фазами D и увеличения эквивалентного радиуса расщепления фазы r_s .

Для двухцепных ВЛ кроме указанных факторов основными влияющими являются – расстояние между цепями и угловой сдвиг

между системами векторов напряжений фаз цепей.

В рассматриваемых вариантах компактных двухцепных ВЛ предусматривается выполнение сближения цепей в виде сближения отдельных фаз одной цепи с фазами другой цепи, в результате чего УСВЛ представляет собой три пары сближенных фаз, каждая пара содержит одну фазу первой цепи и одну фазу второй цепи, между которыми устанавливается угловой сдвиг векторов напряжений (θ) фиксируемый 0° – $120^\circ(180^\circ)$ или регулируемый в пределах 0° – $120^\circ(180^\circ)$.

Основное принципиальное отличие компактных управляемых ВЛ от обычных двухцепных состоит в максимально возможном сближении трехфазных цепей, благодаря чему достигается увеличенное электромагнитное влияние цепей, а изменение углового сдвига трехфазных систем напряжений одной цепи по отношению к другой определяет знак этого влияния на эквивалентные параметры фаз. Наличие значительного и регулируемого электромагнитного взаимного влияния цепей создает эффект междуцепной самокомпенсации параметров линии, благодаря которому достигается увеличение пропускной способности каждой цепи и линии в целом, а также новые свойства регулируемых параметров собственно линии. Такие линии названы компактными самокомпенсирующими (УСВЛ).

Основная физическая сущность УСВЛ

Параметры фаз традиционных ВЛ цепей характеризовались собственными значениями (x_0, b_0 и Z_{C0}).

После сближения фаз (компактные ВЛ) появляются взаимные составляющие параметров (x_{0M}, b_{0M} и Z_{CM}). Результирующие параметры фаз принимают новые эквивалентные значения:

$$\dot{X}_{0Э} = x_0 + x_{0M} e^{j\theta}; \quad (6)$$

$$\dot{b}_{0Э} = b_0 - b_{0M} e^{j\theta}; \quad (7)$$

$$\dot{Z}_{CЭ} = Z_{C0} + Z_{CM} e^{j\theta}. \quad (8)$$

При $\theta = 0^\circ$ каждая из фаз линии будет обладать параметрами:

$$\dot{X}_{0Э} = x_0 + x_{0M}; \quad (9)$$

$$\dot{b}_{0Э} = b_0 - b_{0M}; \quad (10)$$

$$\dot{Z}_{CЭ} = Z_{C0} + Z_{CM}. \quad (11)$$

При $\theta = 180^\circ$ каждая из фаз линии будет обладать параметрами:

$$\dot{X}_{0Э} = x_0 - x_{0M}; \quad (12)$$

$$\dot{b}_{0Э} = b_0 + b_{0M}; \quad (13)$$

$$\dot{Z}_{CЭ} = Z_{C0} - Z_{CM}. \quad (14)$$

Принципиальным является вопрос, насколько можно сближать фазы, у одноцепных компактных ВЛ и двухцепных УСВЛ. При сближении фаз принимаемое между ними расстояние должно быть не меньше допустимого по условиям диэлектрической прочности промежутков «фаза-фаза» с учетом максимальных рабочих напряжений, грозовых и коммутационных перенапряжений. На рис. 4 показаны минимально допустимые согласно требованиям нормативных документов расстояния между фазами ВЛ напряжением 110-500 кВ.

Из приведенных данных следует, что при создании компактных ВЛ расстояния между фазами могут быть в 2 – 3 раза меньшими по сравнению с принимаемыми в настоящее время на ВЛ традиционной конструкции.

При этом важно принимать такие конфигурации расположения фаз на опорах, чтобы заземленные элементы опор (траверсы, стойки, арматура) были расположены вне пространства между сближаемыми фазами. Другим важным требованием является то, чтобы при выборе минимально допустимых расстояний между фазами в пролетах предусматривалась установка изоляционных элементов (междуфазных распорок), которые фиксируют расстояние между фазами и препятствуют дальнейшему сближению фаз при воздействии неблагоприятных атмосферных факторов. Для одноцепных компактных ВЛ могут быть приняты

конструкции опор с расположением всех трех фаз в окне опоры. При этом все заземленные элементы опоры вынесены за пределы пространства между фазами, что позволяет принимать расстояния между фазами, минимально допустимыми, с учетом указанных выше требований. Для двухцепных компактных ВЛ конструкции опор должны создавать возможности сближать фазы разных цепей. На рис. 5 показан вариант двухцепной опоры компактной ВЛ 220 кВ. На рис. 6 показан вариант двухцепной ВЛ 220 кВ традиционной конструкции. При анализе приведенных опор можно заметить, что высота опоры компактной двухцепной ВЛ 220 на 5 м меньше, чем высота традиционной, а расстояние от нижней траверсы до земли на 4 м больше. Последнее позволяет принимать на компактной ВЛ 220 кВ соответственно большие габаритные пролеты, что является резервом для дополнительного снижения капитальных затрат. На рис. 7а показана разработанная опора для двухцепной компактной УСВЛ на напряжение 500 кВ, а на рис. 7б – схемы различных режимов ее работы. Основные параметры УСВЛ 500 кВ в различных режимах работы приведены в таблице I.

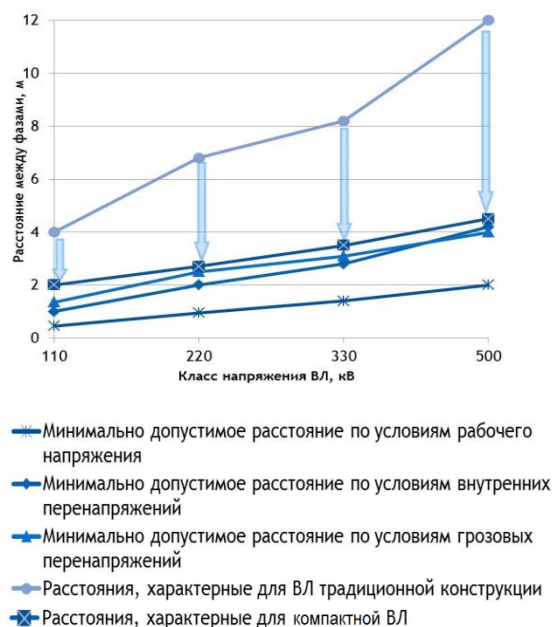


Рис.4. Минимально допустимые и принимаемые на практике расстояния между фазами ВЛ 110-500 кВ.

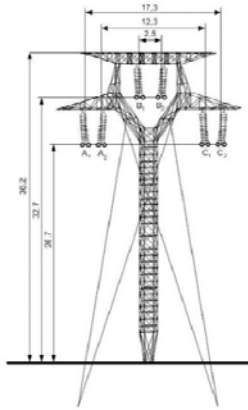


Рис. 5. Опора компактной ВЛ 220 кВ типа «Чайка».

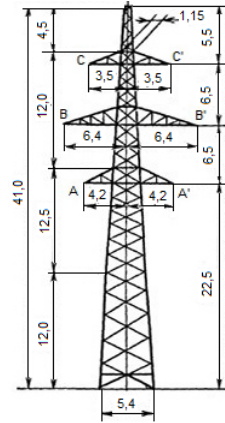


Рис.6. Двухцепная опора 220 кВ традиционной конструкции.

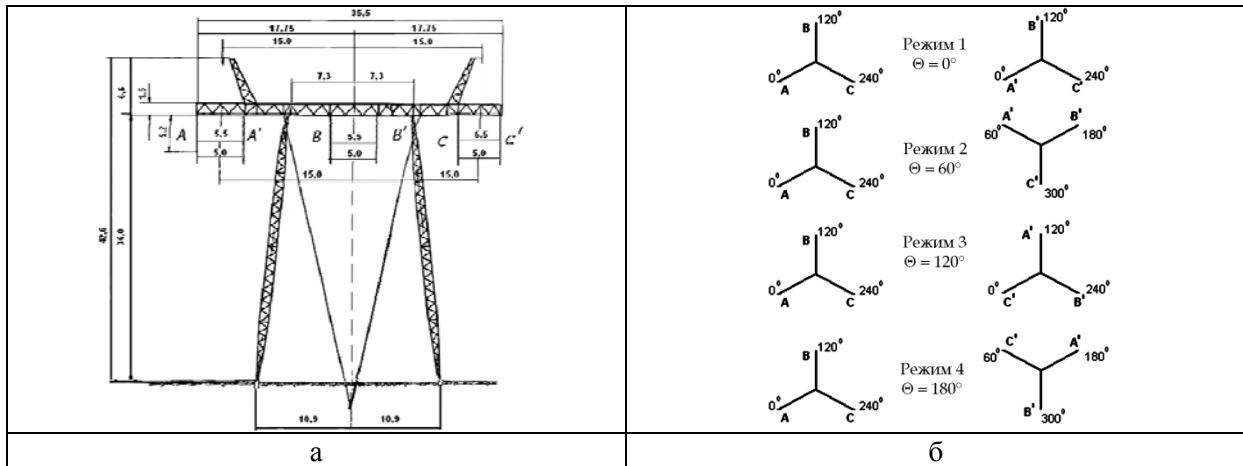


Рис.7. Опора двухцепной УСВЛ 500 кВ (а) и режимы ее работы (б).

Таблица I

Основные параметры УСВЛ 500 кВ в различных режимах работы

Вариант	Провод	Расстояние между сближенными фазами разных цепей, м	Радиус провода, м	Радиус расщепления, м	Режим	Волновое сопротивление одной цепи, Ом	Натуральная мощность на цепь, МВт
1	5 x AC 240/39	4,0	0,0108	0,3403	1	337	816,7
					2	257,4	1068
					3	187,7	1463
					4	179	1606
2	6 x AC 240/56	4,0	0,0112	0,4	1	322,2	854,9
					2	240,9	1142,6
					3	172,6	1594,2
					4	156,5	1758,2
3	6 x AC 240/56	4,0	0,0112	0,5	1	310,7	886
					2	220,1	1205
					3	169	1706,9
					4	145,4	1889

Схемная реализация компактных двухцепных УСВЛ 110-500 кВ иллюстрируются на рис. 8.

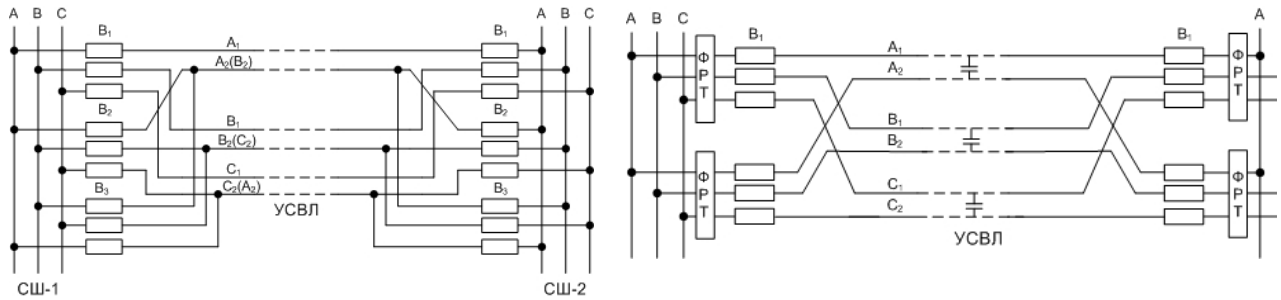


Схема дискретного регулирования угла
 $\theta=0^\circ$ – включены выключатели B_1 и B_2 (B_3 отключены)
 $\theta=120^\circ$ – включены B_1 и B_3 (B_2 отключены).

Схема непрерывного регулирования угла в широком диапазоне с помощью фазорегулирующих устройств и устройств FACTS.

Рис. 8. Регулирование углового сдвига фаз электропередачи.

Дискретное регулирование осуществляется путем переключения фаз по концам УСВЛ на одной из цепей, на которой предусмотрена установка дополнительных комплектов выключателей. При дискретном регулировании обеспечивается поочередно режим работы УСВЛ при $\theta = 0^\circ$ или $\theta = 120^\circ$, в зависимости от величины передаваемой по линии мощности. Для непрерывного регулирования углового сдвига систем векторов напряжений цепей УСВЛ – углы θ в пределах $0 \div 120(180)^\circ$ предусматривается установка по концам УСВЛ фазорегулирующих устройств. Могут предусматриваться и комбинированные схемы регулирования, сочетающие дискретное и непрерывное регулирование.

Основные технические параметры и характеристики компактных ВЛ

Характерной особенностью полученных результатов является то, что при предельном сближении фаз как одноцепных компактных ВЛ, так и в двухцепных УСВЛ при достижении допустимой величины напряженности электрического поля на поверхности проводов расщепленных фаз величина натуральной мощности в расчете на одну трехфазную цепь различается незначительно. Однако по сравнению с ВЛ традиционной конструкции величина натуральной мощности компактных ВЛ значительно больше в расчете на одну цепь.

В таблице II приведены данные расчетов основных электрических параметров и характеристик традиционных ВЛ и УСВЛ напряжением 110 кВ.

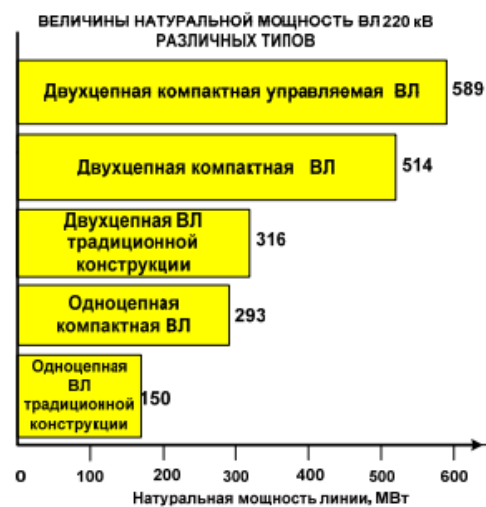


Рис.9. Натуральная мощность ВЛ 220 кВ различных типов.

Двухцепная компактная УСВЛ напряжением 110 кВ, как видно из таблицы II, превосходит двухцепную ВЛ традиционной конструкции в 1,3 раза по величине натуральной мощности.

Еще более значительного увеличения натуральной мощности, а соответственно и пропускной способности, удастся достичь для компактных ВЛ напряжением 220 кВ. Это наглядно показано на рис. 9.

Одноцепные и двухцепные компактные ВЛ 220 кВ почти в 2 раза превосходят по натуральной мощности ВЛ 220 кВ традиционной конструкции в расчете на одну цепь.

Величины натуральной мощности для вариантов двухцепных УСВЛ 500 кВ приведены в табл. I и показаны на рис. 10.

Основные электрические параметры и характеристики ВЛ 110 кВ различных типов

Наименование параметра	Традиционная двухцепная ВЛ 110 кВ	Двухцепная УСВЛ-110 кВ (АС-150/34)	
Натуральная мощность $P_{\text{нат}}$, МВт	55,6	74,4	1,34*
Натуральная мощность на одну цепь $P_{\text{ц}}$, МВт	27,8	37,2	1,34*
Ширина полосы отчуждения: $L_{\text{к}}$, м	67	67	1*
Суммарное сечение активной части проводов: $S_{\text{Al}} = \text{мм}^2$	900	900	1*
$P_{\text{нат}}/L_{\text{к}}$, МВт/м	0,83	1,11	1,34*
$P_{\text{нат}}/S_{\text{Al}}$, МВт/мм ²	0,0617	0,0826	1,34*

НАТУРАЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ ОДНОЙ ЦЕПИ 500 кВ, МВт

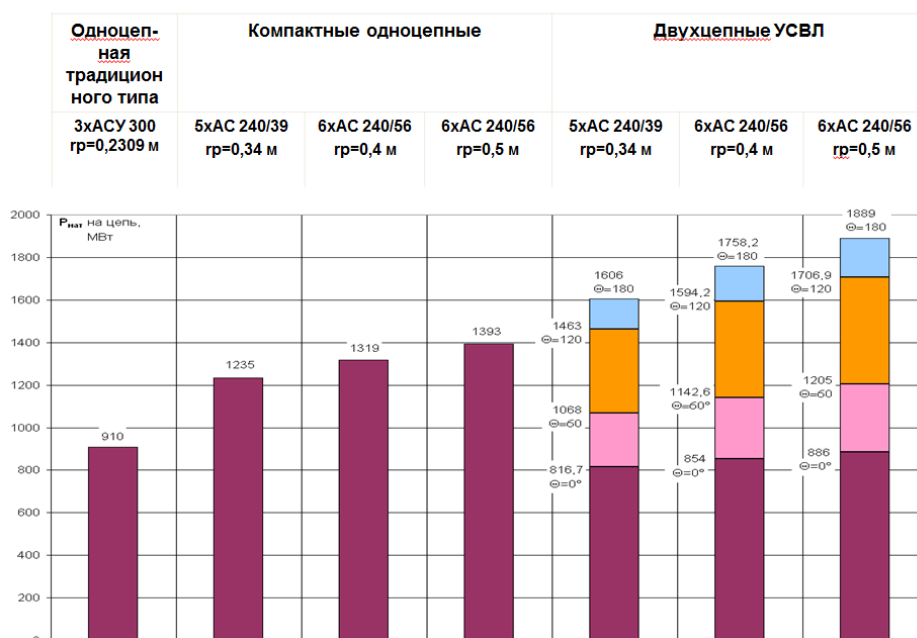


Рис. 10. Натуральная мощность одной цепи УСВЛ 500 кВ.

Одноцепные компактные ВЛ 500 кВ обеспечивают величину натуральной мощности в 1,3 – 1,4 раза большую, чем одноцепные ВЛ 500 кВ традиционной конструкции, а двухцепные компактные УСВЛ 500 кВ в 1,5 – 1,6 раза большую натуральную мощность, в расчете на одну цепь по отношению к ВЛ традиционной конструкции.

Столь значительное увеличение натуральной мощности компактных ВЛ достигается за счет соответствующего улучшения первичных параметров ВЛ,

снижения удельного индуктивного сопротивления, увеличения удельной емкостной проводимости и снижения волнового сопротивления.

Увеличить пропускную способность ВЛ традиционной конструкции до уровня пропускной способности компактных ВЛ можно путем применения соответствующих компенсирующих устройств.

Известными и применяемыми для этой цели являются устройства емкостного характера: устройства продольной компенсации (УПК), емкостной поперечной

компенсации – источники реактивной мощности. Однако, все они являются достаточно дорогостоящими, и их применение значительно увеличивает затраты на сооружение линии.

Компактные двухцепные УСВЛ располагают дополнительными возможностями снижения удельных затрат на управляемые шунтирующие реакторы (УШР), применяемые на ВЛ любой конструкции для компенсации избыточной зарядной мощности при режимах, когда по ним передается мощность, меньше величины натуральной.

Компактные двухцепные УСВЛ выгодно отличаются от остальных тем, что при малых нагрузках или холостом ходе они могут быть приведены в режим при $\theta = 0^\circ$, при котором между трехфазными системами векторов напряжений цепей отсутствует угловой сдвиг. Этот режим характеризуется тем, что зарядная мощность линии меньше, чем зарядная мощность ВЛ традиционной конструкции.

Зависимость величины зарядной мощности УСВЛ от изменения угла θ в пределах $0 \div 120^\circ (180^\circ)$ позволяет регулировать величину генерируемой линией зарядной мощности в соответствии с требуемым режимом линии по напряжению, при установленной мощности УШР меньшей, чем на ВЛ традиционной конструкции. С использованием этих особенностей компактных управляемых двухцепных УСВЛ были выполнены расчеты затрат на УШР и построены итоговые зависимости экономии удельных капитальных затрат для УСВЛ.

Показатели расчетной удельной экономии капитальных затрат, создаваемой благодаря использованию компактных управляемых ВЛ различных классов напряжения по сравнению с ВЛ традиционной конструкции, приведены на графиках на рис. 11. Экономия капитальных вложений, благодаря возможному внедрению компактных двухцепных УСВЛ оценивается на уровне от 2,7 тыс. долл./км для 110 кВ до 212 тыс. долл./км для 500 кВ.

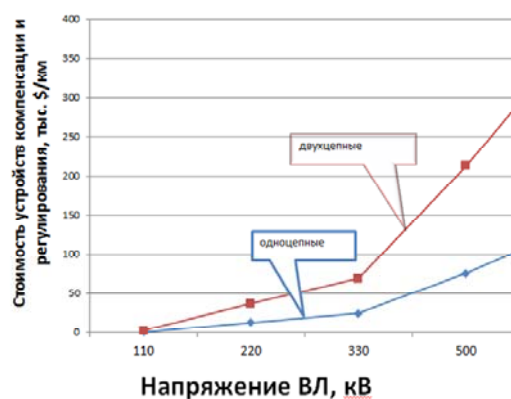


Рис.11. Стоимость устройств компенсации и регулирования параметров традиционных ВЛ, обеспечивающих величину натуральной мощности, равную натуральной мощности компактных ВЛ того же класса напряжения.

Эффективность применения компактных управляемых ВЛ в энергосистемах

Исследования по определению эффективности применения компактных управляемых ВЛ 220 и 500 кВ выполнены на примерах для ряда энергосистем России с учетом их перспективного развития.

Вариант А – ВЛ 220 кВ

Рассмотрена эффективность применения УСВЛ 220 кВ длиной 427 км с использованием опор, приведенных на рис. 5. Проведено сравнение с ВЛ традиционной конструкции (рис. 6) для различных значений передаваемой мощности.

Проведённые расчёты показали, что для рассматриваемого энергообъекта вариант сооружения двухцепной компактной УСВЛ 220 кВ при передаваемой мощности свыше 300 МВт по критерию минимума суммарных дисконтированных затрат является более эффективным по сравнению с вариантом сооружения двухцепной ВЛ в традиционном исполнении (рис. 12). При снижении передаваемой мощности ниже 300 МВт эффективнее становится вариант традиционной ВЛ. Уровень затрат на компенсацию потерь в энергосистеме, при применении ВЛ 220 кВ традиционной конструкции значительно выше, чем при применении УСВЛ 220 кВ.

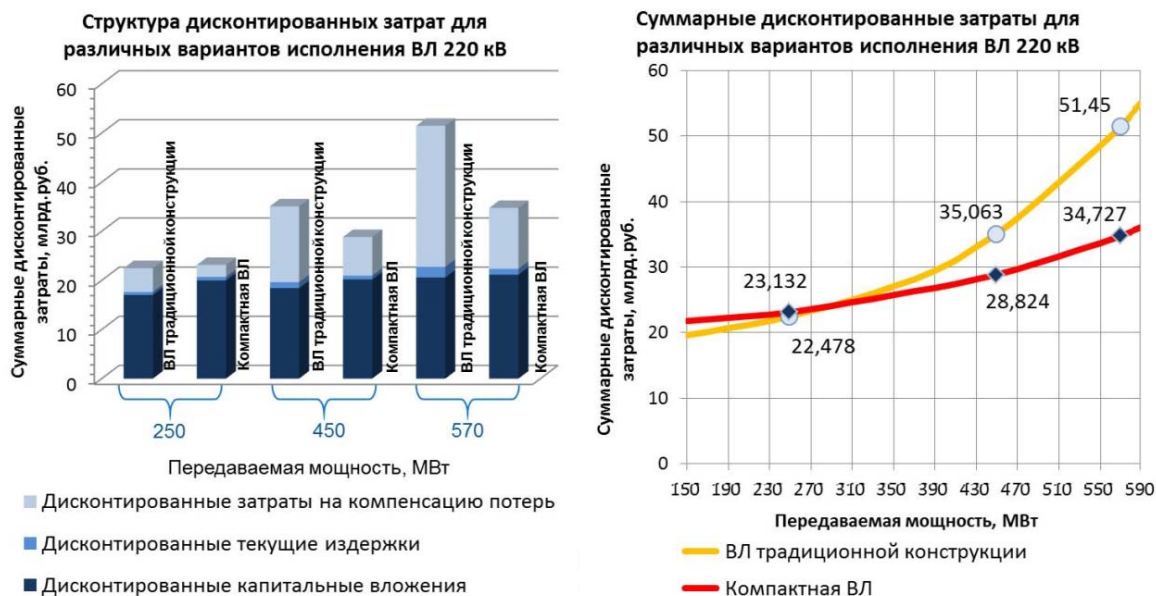


Рис.12 Затраты для различных вариантов исполнения ВЛ 220 кВ.

Вариант Б – ВЛ 500 кВ

Были рассчитаны варианты одноцепной ВЛ 500 кВ, связывающей две энергосистемы (ОЭС 1 и ОЭС 2) в традиционном и компактном исполнении. Результаты этих расчетов для режима передачи максимальных потоков мощности из ОЭС 1 в ОЭС 2 показаны на рис. 13.

Рассмотрены варианты без применения фазового управления, а также с применением установки ФРУ в начале рассматриваемой ВЛ. В варианте с фазовым управлением рассматривались режимы при изменении угла сдвига выходного напряжения относительно входного на ФРТ $\pm 60^\circ$. Режим при ФРТ $= 0^\circ$ соответствовал варианту отсутствия ФРТ.

Как можно видеть из приведенных на рис.13 данных, естественный поток мощности из ОЭС 1 в ОЭС 2 (при ФРТ $= 0^\circ$) по рассматриваемой ВЛ составляет 352 МВт.

При введении с помощью ФРТ углового сдвига $\pm 60^\circ$ наблюдается сильная зависимость изменения величины передаваемой мощности по рассматриваемой ВЛ (а также по другим ветвям сети). При значении угла, близком к значению ФРТ $= -30^\circ$ поток мощности составляет 974 МВт, что соответствует

величине натуральной мощности данной одноцепной ВЛ при традиционном ее исполнении.

В случае дальнейшего роста передаваемой мощности (сверх 974 МВт) пропускная способность данной ВЛ недостаточна. Выходом из положения является применение ВЛ 500 кВ в компактном исполнении, обеспечивающем величину натуральной мощности, равную 1480 МВт, или же путем установки УПК соответствующей мощности в варианте традиционной ВЛ 500 кВ. Указанную загрузку данной ВЛ до 1486 МВт можно осуществить путем введения угла ФРТ $= -60^\circ$. Эффективность фазового регулирования при изменении ФРТ в пределах $\pm 60^\circ$ определяется системными условиями.

При положительных значениях угла (ФРТ) происходит уменьшение передаваемой мощности по ВЛ 500 кВ в сторону ОЭС 2. Так при ФРТ $= +15^\circ$ величина передаваемой по ней мощности становится равной 0, (рис. 13), а при ФРТ $= +60^\circ$ передаваемая мощность будет в размере 876 МВт в обратную сторону, т.е. в сторону ОЭС 1.

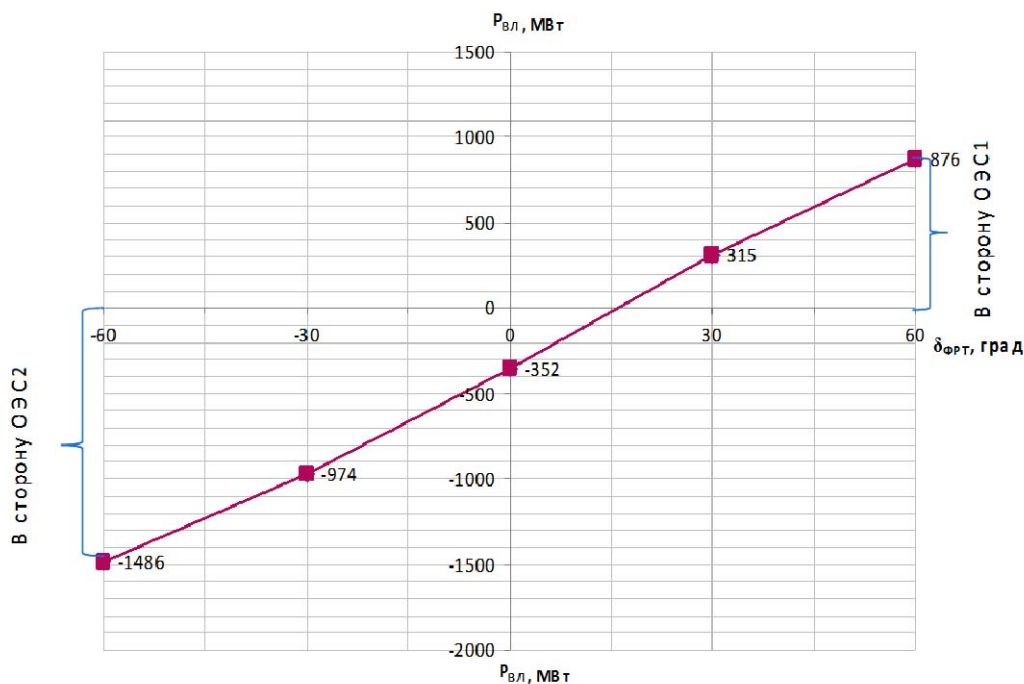


Рис. 13. Зависимость величины потока мощности по ВЛ 500 кВ от угла сдвига выходного напряжения относительно входного, создаваемого ФРУ (ФРТ), установленным в начале данной ВЛ.

Результаты исследования экологических характеристик компактных управляемых ВЛ

Оценка экологических характеристик компактных управляемых ВЛ является важным разделом проводимых исследований. К их числу относятся следующие характеристики:

- оценка влияния ВЛ на эффективность использования полосы отчуждения;
- уровень радиопомех;
- уровни акустических шумов;
- уровни напряженности электрического и магнитного поля, в пространстве, окружающем ВЛ и под линией вблизи поверхности земли.

Эффективность использования земель может быть оценена при помощи показателя, учитывающего одновременно пропускную способность ВЛ и ширину полосы отчуждения L_k . В качестве такого показателя в данной работе предлагается использовать отношение натуральной мощности ВЛ к ширине полосы отчуждения ВЛ $P_{нат}/L_k, МВт/м$. Чем больше значение этого

отношения, тем эффективнее использование земель, отчуждаемых под ВЛ.

Выполненные расчеты показали, что компактные ВЛ обеспечивают более эффективное использование полосы отчуждения (рис. 14).

На рис. 15 показаны распределения напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей на высоте 1,8 м от поверхности земли, рассчитанные для компактной управляемой ВЛ 220 кВ при различных значениях угла сдвига фаз векторов напряжений цепей. Как видно из этих рисунков напряженности электрического и магнитного полей под проводами крайней фазы для компактных управляемых ВЛ 220 кВ (при $\theta = 120^\circ$ и $\theta = 180^\circ$) не превышают 5 кВ/м и 16 А/м соответственно, что удовлетворяет существующим требованиям. Напряженности электрического поля под компактной управляемой ВЛ вблизи поверхности земли ниже, чем у традиционных ВЛ такого же класса напряжения.

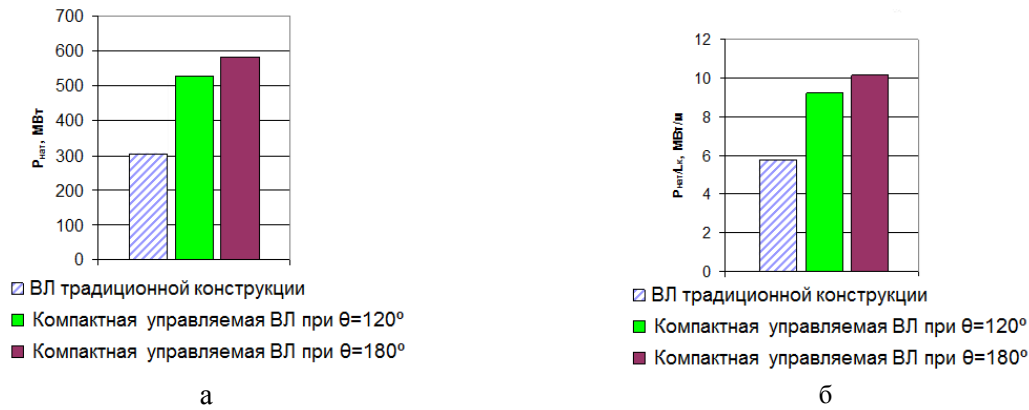


Рис.14 Величина натуральной мощности ВЛ 220 кВ различной конструкции (а) и отношение величины натуральной мощности ВЛ 220 кВ к ширине полосы отчуждения (б).

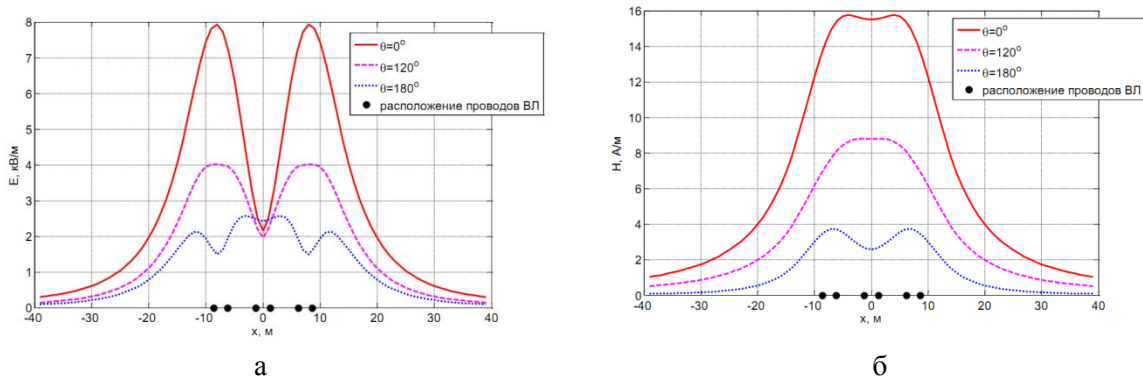


Рис.15. Распределение электрического и магнитного полей УСВЛ 220 кВ.

Все рассматриваемые ВЛ удовлетворяют требованиям нормативных документов по уровням создаваемых ими акустических шумов – уровень акустического шума на нормированном расстоянии от проекции крайней фазы ВЛ на землю не превышает 52 дБ (А).

Заключение

Применение компактных управляемых ВЛ позволяет по отношению к ВЛ традиционного исполнения обеспечить в расчете на 1 МВт натуральной мощности:

- экономию капитальных вложений до 37% для ВЛ 220 кВ и до 33% для ВЛ 500 кВ;
- сокращение площадей земельных угодий, отчуждаемых под воздушные линии, составляет до 36% для ВЛ 220 кВ и до 52% для ВЛ 500 кВ.

Мощность и стоимость устройств регулирования при обеспечении заданной пропускной способности значительно меньше, чем для ВЛ традиционной конструкции.

Пропускная способность компактных ВЛ, оснащенных устройствами FACTS, близка к пропускной способности ВЛ традиционной конструкции более высокого класса напряжения.

Компактные ВЛ 110, 220, 500 позволяют:

- повысить в 1,3–1,6 раза пропускную способность ВЛ;
- снизить удельные капитальные затраты на строительство в расчете на единицу передаваемой мощности на 15 – 30%;
- улучшить экологические показатели за счет уменьшения напряженности электромагнитного поля в коридоре прохождения ВЛ и вблизи границ зон отчуждения.

БИБЛИОГРАФИЯ (REFERENCES)

- [1] Postolaty V.M., Bykova E.V., Suslov V.M., Shakaryan Y.G., Timashova L.V., Kareva S.N. [Efficiency of the Compact Controlled High - Voltage Power Lines] *Effektivnosti kompactnih upravliaemih visokovolitnih linii electropredachi*. Problemele Energeticii Regionale №3 (29), p.1-17. 2015 (in Russian).

- [2] Astahov Iu.N., Postolatii V.M., Comendant I.T., Chalyi Gh.V. *Upravleaemye linii electropredachi*. [Controlled transmission lines] Pod red. V.A. Venikova. – Kishinev: Shtiintsa, 1984. – 296 pp. (in Russian)
- [3] Aleksandrov G.N., Evdokunin G.A. Podporkin G.V. *Parametry vozdushnyh linii electropredachi kompaktnoi konstruksii*. [Parameters of aerial transmission lines of compact construction] – Electrichestvo, 1982, N4, p. 10-17. (in Russian)
- [4] Postolatii V.M., Bycova E.V. *Efektivnosti primeneniya upravleaemyh samocompensiruiuschihsea visikovolithyh linii electropredachi i fazoreguliruiuschih ustroystv transformatornogo tipa*. [The efficiency of the use of controlled selfcompensated high voltage power lines with and phase controlled apparatus of transformer type] Electrichestvo, 2010, N2, pp. 7-14. (in Russian)

Сведения об авторах.



Постолатий Виталий Михайлович, д.х.т.н., академик, заведующий Лабораторией управляемых электропередач Института энергетики АНМ. Сфера научных интересов: управляемые, гибкие, компактные электропередачи, современные средства регулирования, энергетическая безопасность
postolatii@rambler.ru



Быкова Елена Витальевна, д.т.н., ведущий научный сотрудник Лаборатории управляемых электропередач Института энергетики АНМ. Сфера научных интересов: электрические сети и системы и управление ими, управляемые электропередачи, энергетическая безопасность, моделирование процессов в энергетике elena-bicova@rambler.ru



Суслов Виктор Миронович, научный сотрудник Лаборатории управляемых электропередач Института энергетики АНМ. Сфера научных интересов: электрические сети и системы и управление ими, управляемые электропередачи, моделирование процессов в энергетике.



Шакарян Юрий Гевондович, д.т.н., профессор, зам. директора "НТЦ Электроэнергетики" — ВНИИЭ. Сфера научных интересов: электромашиноинвентильные комплексы, электроэнергетические системы, электрические машины, автоматизированный электропривод, сверхпроводящие линии электропередач.



Тимашова Лариса Владимировна, к.т.н., заместитель научного руководителя, Центра электротехнического оборудования, "НТЦ Электроэнергетики" — ВНИИЭ. Область научных интересов: электромагнитная совместимость воздушных линий электропередачи и подстанций высокого напряжения с радиоэлектронными техническими средствами, техника высоких напряжений.



Карева Светлана Николаевна, инженер Центра электротехнического оборудования ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», Москва, РФ. Сфера научных интересов: техника и электрофизика высоких напряжений, воздушные компактные, управляемые линии электропередачи.