

Efficiency of the Compact Controlled High -Voltage Power Lines

Postolaty V.M., Bykova E.V., Suslov V.M.

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

Shakaryan Y.G., Timashova L.V., Kareva S.N.,

Scientific centre of Federal Grid Company of Unified Energy System of Russia, Moscow,
Russian Federation

Abstract. The basic theoretical principles to create compact controlled transmission lines are analyzed in the paper. The results of technical and project elaboration of some variants of such type of power transmission lines are presented and the comparison between their technical and economic indicators with those of traditional power transmission lines and foreign analogues is made in the paper. The efficiency of compact controlled transmission lines application to form power systems and to create intersystem ties as well as distribution electric network is also stated in the paper.

Keywords: compact controlled power lines, single circuit and multi circuit compact lines, controlled, self-compensating transmission lines, phase-shifting devices.

Eficiența liniilor electrice aeriene compacte dirijate

Postolatii V., Bîcova E., Suslov V.

Institutul de Energetică al AȘM
Chișinău, Republica Moldova

Șacarian Iu., Timașova L., Kareva S.

Centrul tehnico-științific de Electroenergetică SA CFR din Rusia, Moscova, Rusia

Rezumat. Sunt prezentate principiile teoretice de bază ale realizării liniilor electrice aeriene dirijate compacte, rezultatele elaborărilor tehnice și de proiectare a unui șir de variante ale LEA de acest tip, este efectuată compararea indicatorilor tehnico-economici cu cei ale liniilor electrice tradiționale și omologii străini, se argumentează eficiența utilizării liniilor electrice dirijate compacte în componența sistemelor electroenergetice și realizarea interconexiunilor cu sistemele electroenergetice ale țărilor vecine și dezvoltarea rețelelor electrice de distribuție.

Cuvinte-cheie: linii electrice compacte dirijate, linii compacte cu un singur circuit și cu mai multe circuite, linii electrice dirijate cu autocompensare, instalații de reglare a decalajului de fază.

Эффективность компактных управляемых высоковольтных линий электропередачи

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

Институт энергетики Академии наук Молдовы, Кишинев, Молдова

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

НТЦ Электроэнергетики Федеральной Сетевой Компании Единой Энергетической Системы России
Москва, Россия

Аннотация: Рассмотрены основные теоретические положения создания компактных управляемых линий электропередачи, приведены результаты технических и проектных разработок ряда вариантов электропередач данного типа, выполнены сопоставления их технико-экономических показателей с аналогичными показателями линий электропередачи традиционного исполнения и зарубежных аналогов, показана эффективность применения компактных управляемых линий электропередачи для формирования электроэнергетических систем, создания межсистемных связей и распределительных электросетей.

Ключевые слова: компактные управляемые линии электропередачи, одноцепные и многоцепные компактные линии, управляемые самокомпенсирующиеся линии электропередачи.

Введение

Основными проблемными вопросами, возникающими при дальнейшем формировании объединенных электроэнергетических систем, выборе межсистемных и межгосударственных связей и модернизации распределительных электрических сетей, являются:

- обоснование и создание электропередач в соответствии с заданными параметрами и пропускной способностью;
- обеспечение управляемости электропередач, регулирование режимных параметров, величины и направления потоков мощности;

- выполнение всех требований технического характера, а также ограничений по экологическим показателям, минимально возможному отчуждению земельных угодий под строительство;
- сооружение электропередач при минимально возможных капитальных вложениях при строительстве и минимальных затратах при эксплуатации.

Традиционные конструкции линий электропередач и регулирующее оборудование по целому ряду показателей не в полной мере отвечают существующим требованиям, а некоторые их показатели имеют противоречивый характер. Например, увеличить пропускную способность линий электропередач обычной конструкции можно путем перехода на более высокие классы напряжения. Однако при этом возникают проблемы экологического характера и увеличения стоимости. Другим способом увеличения пропускной способности линий электропередач (ВЛ) является применение устройств продольной компенсации. Однако это сопряжено со значительными дополнительными капитальными вложениями. Применение различных средств регулирования на ВЛ с недостаточно хорошими первичными параметрами сопровождается низкой эффективностью их использования и большими затратами.

В связи с указанными проблемами становится весьма актуальной задача поиска и разработки новых альтернативных технических решений в области транспорта электроэнергии, формирования электроэнергетических систем, создания межсистемных и межгосударственных связей с заданными техническими характеристиками, эффективной модернизации электрических сетей с существенно лучшими режимными, экологическими и технико-экономическими показателями по сравнению с традиционными технологиями.

К настоящему времени рядом отечественных и зарубежных научно-исследовательских, проектных и производственных организаций сделан большой научный и практический задел по созданию линий электропередачи переменного тока нового типа, обладающих существенно более высокими техническими и экономическими показателями: увеличенной при прочих равных условиях пропускной способностью, улучшенными регулировочными характеристиками и сниженным уровнем воздействия на окружающую среду. К числу

таких электропередач относятся рассматриваемые ниже управляемые компактные ВЛ переменного тока, исследуемые и разрабатываемые на протяжении ряда лет в Институте энергетики АН Молдовы и НТЦ «Электроэнергетики» при участии Института «Энергосетьпроект», Московского энергетического Института и других организаций.

Основные идеи создания управляемых компактных ВЛ состоят в использовании дополнительных технических возможностей ВЛ переменного тока, которые по целому ряду причин не были замечены и реализованы ранее.

Сущность новых идей по созданию электропередач нового типа, существенно превосходящих по своим основным показателям линии электропередачи обычного типа, состоит в:

- выборе оптимальной конструкции расщепленных фаз, числа и сечения составляющих;
- предельно возможном сближении фаз ВЛ, что становится возможным при выносе строительных элементов опор линии за пределы междуфазных воздушных промежутков;
- применении новых конфигураций расположения фаз, обеспечивающих равномерность значений напряженности электрического поля на всех фазах и их составляющих при предельно допустимом сближении фаз линии и оптимизации их конструкции;
- использовании эффекта регулирования взаимного электромагнитного влияния фаз и цепей линии путем изменения углового сдвига векторов напряжений фаз (и цепей) с помощью устройств фазового управления или применения соответствующих схем первичных соединений;
- комплексном применении средств регулирования параметрами и характеристиками электропередачи в целом, с учетом требований обеспечения как собственных, так и заданных общесистемных параметров и режимных характеристик.

В ряде публикаций [1-8, 12-17] изложена сущность указанных идей, результаты теоретических исследований и практических разработок, которые могут служить базой для принятия решений об использовании управляемых

компактных ВЛ различных классов напряжения в электросетевом строительстве, а также для создания межсистемных и межгосударственных транзитов мощности. Отечественная новизна компактных управляемых ВЛ защищена авторскими свидетельствами [1, 2, 18] и зарубежными патентами [19, 20].

Цель настоящей работы – изложение в обобщенном виде основных результатов исследований и разработок в области управляемых компактных линий электропередачи и обоснование предложений о возможном практическом использовании электропередач нового типа, называемых также электропередачами нового поколения.

Классификация ВЛ нового поколения

К категории воздушных линий электропередачи (ВЛ) нового поколения на современном этапе отнесены одноцепные и многоцепные ВЛ повышенной по сравнению с ВЛ традиционного типа пропускной способностью, оснащенные современными регулируемыми устройствами типа FACTS и отвечающими всем, наперед заданным, техническим и экономическим характеристикам и режимным параметрам:

- компактные одноцепные ВЛ с УШР;
- компактные двухцепные УСВЛ с УШР;
- компактные УСВЛ с дискретно регулируемыми параметрами;
- компактные двухцепные УСВЛ с плавно регулируемыми параметрами (с применением фазоповоротных устройств ФПТ) и УШР;

В линиях электропередач нового поколения предусматривается, прежде всего, создание компактных конфигураций расположения фаз с минимально допустимыми расстояниями между ними; выбор оптимальной конструкции расщепления фаз и линейной изоляции; применение новых типов опор, позволяющих создать компактные конструкции линии с минимально допустимыми расстояниями между фазами и обеспечить совместно с междуфазными изоляционными элементами, устанавливаемыми в про-

летах; механическую устойчивость линии в целом при воздействии неблагоприятных климатических факторов.

Компактность конструкций связана с уменьшением междуфазных расстояний и выбором оптимальной конфигурации расположения фаз на опорах и в пролетах.

Анализ показывает, что минимально допустимые расстояния между фазами ВЛ при линейном напряжении между ними при условии обеспечения диэлектрической прочности изоляционных промежутков «фаза-фаза» с учетом максимального рабочего напряжения, коммутационных и грозовых перенапряжений может быть принято на уровне 0,35-0,5 от величины расстояния, принимаемого между фазами в ВЛ традиционной конструкции, и это не противоречит существующим нормативам [ПУЭ]. На рис.1. показаны значения минимально допустимых расстояний для ВЛ 110-500 кВ. В дальнейшем при разработке вариантов конструкции компактных ВЛ приняты следующие значения междуфазных расстояний для:

- ВЛ-110 кВ -1,1-1,3 м;
- ВЛ-220 кВ -2,2-3,0 м;
- ВЛ-330 кВ -3,3-3,5 м;
- ВЛ-500 кВ -4,0-4,5 м;
- ВЛ-750 кВ -5,0-6,0 м.

Обязательным требованием при выборе минимально допустимых расстояний между фазами компактных ВЛ является принятие дополнительных мер по повышению механической устойчивости работы фаз в пролетах, что может быть достигнуто за счет установки между фазами в пролетах изоляционных распорок (или стяжек), выбора измененной конструкции расщепленных фаз и изоляционных подвесок на опорах и др. Возможны варианты компактных ВЛ, выполненных на опорах с изолирующими траверсами. Конструктивные особенности компактных управляемых ВЛ наглядно иллюстрируются на приведенных ниже рисунках.

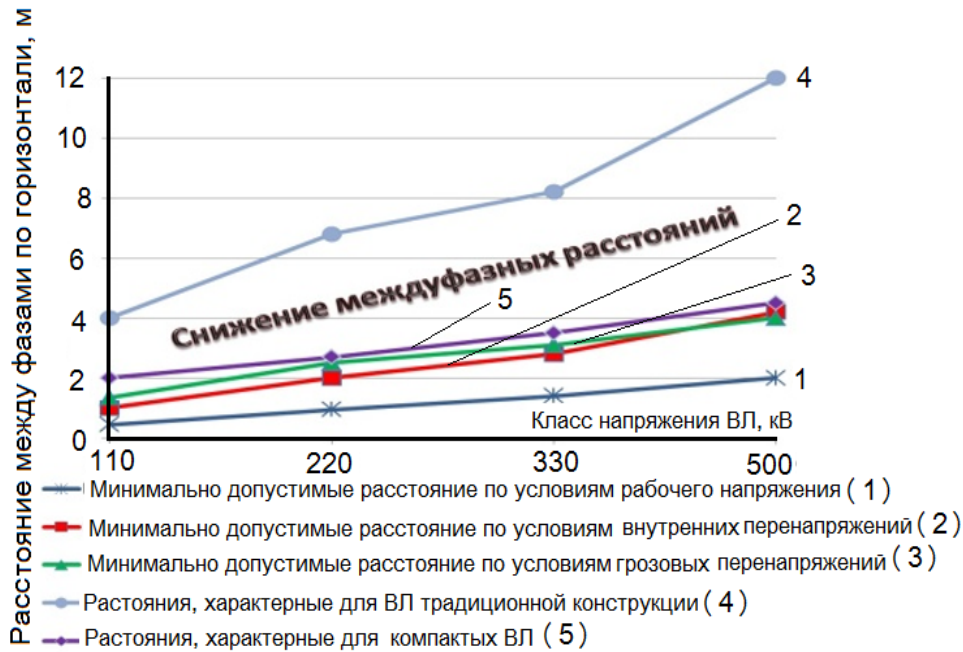


Рис .1 Минимально допустимые расстояния между фазами ВЛ.

Компактные одноцепные управляемые ВЛ

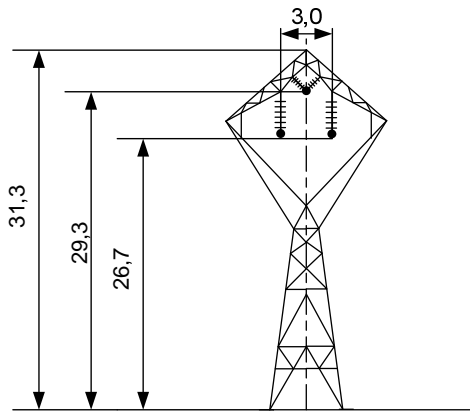


Рис. 2. Одноцепная компактная ВЛ 220 кВ.

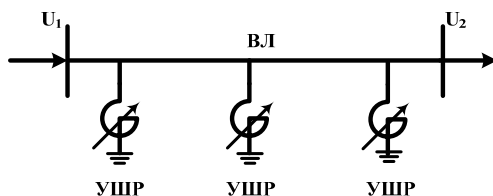


Рис. 3. Однолинейная схема компактной одноцепной управляемой ВЛ с УШР.

Расстояния между фазами на опоре для компактной ВЛ-220 кВ принято равным 3,0 м. Остальные габариты остаются такими же, как и у обычных ВЛ.

В схемном отношении одноцепные компактные ВЛ не отличаются от обычных с применением шунтирующих реакторов (УШР) для компенсации зарядной мощности линии, если она будет избыточна при холостом ходе или небольших величинах передаваемой по ВЛ мощности (рис.3)

В большинстве случаев на компактной ВЛ не требуется установка средств продольной или поперечной емкостной компенсации. Компактные ВЛ, благодаря компактной конструкции, обеспечивают заданную величину пропускной способности в 1.2-1.4 раза выше, чем ВЛ традиционной конструкции, если этого будет достаточно по исходным требованиям.

Если на компактную одноцепную ВЛ возлагаются еще и функции регулирования величины и направления перетока мощности, то последовательно в линию должно быть включено устройство, обеспечивающее соответствующую величину и знак углового сдвига векторов напряжений, изменяемых в соответствии с заданным режимом. Один из вариантов схемы одноцепной компактной ВЛ с устройством фазового регулирования (ФПУ) показан на схеме рис.4.

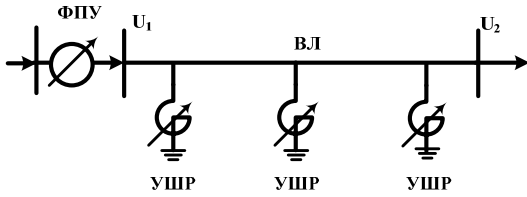


Рис. 4. Схема компактной одноцепной ВЛ с УШР и ФПУ.

Выбор параметров и соответствующих технических решений компактных управляемых ВЛ связан, прежде всего, с обеспечением заданной пропускной способности ВЛ, величина которой определяется большим числом различных факторов. Задача состоит в том, чтобы выбрать наиболее влияющие из них и обосновать возможности их реализации.

Пропускная способность ВЛ переменного тока.

При выборе тех или иных вариантов ВЛ и их пропускной способности, как правило, исходят, прежде всего, от заданной величины передаваемой мощности и дальности передачи.

В общем виде величина передаваемой по ВЛ мощности определяется выражением [9]:

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

где $|\dot{U}_1|, |\dot{U}_2|$ – вектор напряжения, приложенного в начале линии и в ее конце, соответственно;
 δ – угол сдвига векторов напряжений начала и конца линии;

Z_B – волновое сопротивление линии (Ом), определяемое по формуле:

$$Z_B = \sqrt{\frac{r_0 + jx_0}{g_0 + jB_0}}, \quad (2)$$

где $x_0 = \omega L_0$ – удельное индуктивное сопротивление проводов (фаз);

$B_0 = \omega C_0$ – удельная емкостная проводимость проводов (фаз) линии;

r_0 – удельное активное сопротивление проводов (фаз), Ом/км;

g_0 – удельная активная поперечная проводимость проводов (фаз) линии, определяемая выражением: (См/км), где

$\Delta P_{\text{корр.ср}}$ – среднегодовые потери на корону;

$\alpha_0 l$ – волновая длина линии (электрических градусов); здесь l – длина линии (км), α_0 – коэффициент изменения фазы (эл. град./км), определяемый по формуле:

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

При фиксированных значениях напряжения линии, ее длины и волнового сопротивления предельная величина мощности (P_m), которую можно передать по линии, достигается при $\sin \delta = 1$, т.е. когда разность углов между векторами напряжений U_1 и U_2 достигает 90° . В данном случае выражение (1) примет вид:

$$P = \frac{|\dot{U}_1| \cdot |\dot{U}_2|}{Z_B \cdot \sin \alpha_0 l} \cdot \sin \delta. \quad (4)$$

При волновой длине ВЛ, равной 90 эл. град., $\sin \alpha_0 l = 1$, и при равенстве модулей напряжений U_1 и U_2 выражение (4) принимает вид:

$$P_m = \frac{\dot{U}^2}{Z_B} = P_{\text{нат}}, \quad (5)$$

которое является выражением натуральной мощности линии.

Выражение (5) представляется весьма удобным для сопоставления при заданном классе напряжения различных типов ВЛ, отличающихся друг от друга только волновым сопротивлением.

Анализ различных влияющих факторов показал, что именно благодаря воздействию на величину волнового сопротивления можно изменять при прочих равных условиях характеристики линии и ее режимные параметры.

При передаче по линии мощности, равной величине ее натуральной мощности, имеет место режим натуральной мощности линии, характеризующийся практически постоянным уровнем напряжения вдоль линии.

Приведенные выражения величины натуральной мощности и волновых параметров могут быть использованы при исследованиях как одноцепных трехфазных ВЛ, так и двухцепных и многоцепных, а также в общем случае многофазных многопроводных линий

электропередачи, в зависимости от того, какие первичные параметры будут использоваться.

Как следует из выражения (5) увеличить значение натуральной мощности линии можно за счет уменьшения волнового сопротивления, что может быть достигнуто путем уменьшения удельного индуктивного сопротивления линии (x_0) и соответствующего увеличения удельной емкостной проводимости (B_0), как это следует из выражения (2).

Индуктивное сопротивление многоцепной многопроводной линии определяется геометрическими параметрами линии и векторными соотношениями токов, протекающих по рассматриваемой фазе и остальным фазам, тросам и по «земляному» проводу [10].

Вместе с тем, в ряде работ приведены другие выражения для определения величины натуральной мощности линии, с выделением влияющих факторов, на которые можно воздействовать для увеличения натуральной мощности линии.

Например, согласно работе [11] величину натуральной мощности трехфазной линии электропередачи можно определять по формуле:

$$P_H = \frac{n \cdot r_0 \cdot E_{\text{доп}} \cdot U_{\phi}}{20K_H}, \quad (6)$$

где n и r_0 – число и радиус составляющих расщепленной фазы;

$E_{\text{доп}}$ – допустимая величина напряженности электрического поля на поверхности проводов;

U_{ϕ} – фазное напряжение;

K_H – коэффициент неравномерности распределения напряженности электрического поля на поверхности проводов фазы.

Выражение (7) наглядно показывает, что величина натуральной мощности линии электропередачи прямо пропорциональна числу проводов, их радиусу, напряжению линии и допустимой величине напряженности электрического поля на поверхности проводов.

Путем соответствующего выбора указанных параметров может быть обеспечена любая заданная величина натуральной мощности линии.

При заданной допустимой величине напряженности электрического поля ($E_{\text{доп}}$) согласно [11] может быть определен допустимый суммарный электрический заряд линии по условию ограничения коронного разряда:

$$q_{\text{доп}} = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot n \cdot r_0 \cdot E_{\text{доп}}}{K_H}, \quad (7)$$

Другим весьма удобным и наглядным выражением натуральной мощности является выражение, приведенное в работе [12]:

$$P_H = v \cdot U \sum_{i=1}^n q_i \cos(\gamma_i - \alpha_i), \quad (8)$$

где v – скорость распространения электромагнитной волны;

U – фазное напряжение линии;

q_i – заряд i -го провода (или фазы).

γ_i и α_i – аргументы напряжения (U_i) и тока (I_i), соответственно.

Приведенное выражение наглядно показывает, зависимость величины натуральной мощности многопроводной (многофазной) линии от значений электрических зарядов, которые могут быть созданы на проводах, составляющих фазы и линию в целом.

Указанные выражения (7), (9) позволяют выполнить оптимизационные расчеты конфигураций расположения фаз и их конструкций, обеспечивающих максимум функции (P_H), а также определить обобщенные характеристики линий различного типа и провести их сопоставление.

Параметры одноцепных компактных ВЛ

Для трехфазных одноцепных ВЛ при условии симметричных и равных по модулю протекающих по фазам токов при частоте $f=50$ Гц выражения погонных параметров имеют следующий общеизвестный вид [5]:

$$\begin{aligned} r_0' &= r_{\text{оп}}' / n; \\ X_0 &= 0,1445 \cdot \lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_3} + \frac{0,0157}{n} \\ B_0 &= \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg(D_{\text{ср}} / r_3)}; \\ g_0 &= \Delta P_{\text{корр.ср}} / U_{\text{ном}}^2, \end{aligned} \quad (9)$$

где $r_{\text{оп}}'$ и r_0' – удельное погонное активное сопротивление фазы и провода соответственно при заданной температуре воздуха, Ом/км.

$D_{\text{ср}}$ – среднегеометрическое расстояние между фазами ВЛ, м;

r_3 – эквивалентный радиус расщепленной фазы, м;

$\dot{X}_{\text{ом}}, \dot{b}_{\text{ом}}, \dot{Z}_{\text{см}}$ – индуктивное сопротивление, емкостная проводимость и волновое сопротивление.

Из выражений (10) следует, что уменьшить удельное индуктивное сопротивление и увеличить удельную емкостную проводимость, а, следовательно, снизить величину волнового сопротивления и увеличить величину натуральной мощности ВЛ, можно идя по пути уменьшения среднегеометрического расстояния между фазами (D_{cr}), т.е. выполнения линии в виде компактной с предельно сближенными между собой фазами.

При этом предполагается соответствующее изменение конструкции опор, числа и сечения составляющих расщепленных фаз и обязательного выполнения нормируемых требований и ограничений.

Выполненные исследования показали, что не нарушая правила устройства электроустановок и соблюдая другие технические ограничения, речь может идти о создании компактных одноцепных трехфазных ВЛ различных классов напряжения с уменьшенными расстояниями между фазами до величины $0,35 \div 0,5$ от принимаемых в настоящее время при проектировании и строительстве ВЛ традиционных типов. Благодаря этому можно обеспечить увеличение натуральной мощности компактной ВЛ в 1,2-1,4 раза по сравнению с величиной натуральной мощности ВЛ обычного (традиционного) исполнения.

Физическая сущность УСВЛ

Управляемые самокомпенсирующиеся высоковольтные линии электропередачи переменного тока (УСВЛ) могут быть выполнены в воздушном или кабельном вариантах. На первых этапах разработок рассматриваются двухцепные воздушные УСВЛ, как наиболее доступные для практического исполнения.

Физическая сущность данных линий состоит в том, что у них сближены между собой трёхфазные цепи (путем попарного сближения фаз разных цепей) на расстояния, минимально допустимые по электрической прочности воздушных промежутков «фаза-фаза». Благодаря этому создается большое взаимное электромагнитное влияние цепей друг на друга. Если до сближения фаз разных цепей, параметры фаз цепей (индуктивное сопротивление, емкостная проводимость, волновое сопротивление) характеризовались практически только собственными значениями (x_0 , b_0 , Z_{c0}), то после сближения появляются взаимные составляющие параметров цепей, а именно

(X_{om}, b_{om}, Z_{cm}), и результирующие параметры фаз принимают новые эквивалентные значения:

$$\begin{aligned} \dot{X}_{o3} &= X_0 + X_{om} \cdot e^{j\theta}; \\ \dot{b}_{o3} &= b_0 - b_{om} \cdot e^{j\theta}; \\ \dot{Z}_C &= Z_{c0} + Z_{cm} \cdot e^{j\theta}. \end{aligned} \quad (10)$$

Величины взаимных составляющих сопротивлений в зависимости от степени сближения цепей могут составлять 25-30 % от собственных значений указанных параметров, а их знак зависит от углового сдвига (θ) между протекающими по цепям трехфазными системами векторов токов, который в режиме натуральной мощности ВЛ может быть принят равным величине углового сдвига приложенных к цепям трехфазных систем напряжений.

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

$$\begin{aligned} \dot{X}_{o3} &= X_0 + X_{om}; \\ \dot{b}_{o3} &= b_0 - b_{om}; \\ \dot{Z}_C &= Z_{c0} + Z_{cm}. \end{aligned} \quad (11)$$

При $\theta=180^\circ$ параметры фаз будут иметь следующие значения:

$$\begin{aligned} \dot{X}_{o3} &= X_0 - X_{om}; \\ \dot{b}_{o3} &= b_0 + b_{om}; \\ \dot{Z}_C &= Z_{c0} - Z_{cm}. \end{aligned} \quad (12)$$

При углах в диапазоне $\theta=0 \div 180^\circ$ эквивалентные значения параметров принимают промежуточные значения:

$$Q_{om} = U^2 \cdot b_{o3}. \quad (13)$$

При принятии минимальных допустимых значений расстояний между сближенными фазами $d_c=(0,25-0,3)D$, где D – принимаемые на практике расстояния между фазами обычных линий электропередач того же класса напряжения, удастся в УСВЛ при $\theta=180^\circ$ (120°) обеспечить благодаря минимальному при этом индуктивному сопротивлению и максимальной емкостной проводимости снижение волнового сопротивления фаз на 30-40 % по сравнению с исходными значениями до сближения. В результате это обеспечивает увеличение на 30-40 % величины натуральной мощности линии, а соответственно и ее пропускной способности.

Режим при $\theta=180^\circ$ (120°) необходим при максимальной передаваемой мощности (P_m). При уменьшении передаваемой мощности целесообразно регулировать угол (θ) в меньшую сторону, а в пределе при холостом ходе линии - устанавливать значение $\theta=0^\circ$. При этом фазы линии обладают минимальной удельной зарядной мощностью, что создает возможности обеспечить поддержание заданного уровня напряжения вдоль линии при минимальных величинах мощности шунтирующих реакторов.

Значения угловых сдвигов между системами векторов напряжений цепей могут быть фиксированными ($0, 120, 180^\circ$), или регулируемые, как показано на рис. 6. Фазовый сдвиг между системами векторов напряжений цепей (0° и 120°) может быть создан с помощью соответствующих схем присоединения фаз к шинам подстанций, угловой сдвиг 180° - с помощью применения трансформаторов с соответственно разными группами соединения, а регулируемый в пределах $\theta=180^\circ$ или в другом диапазоне - с помощью фазорегулирующих устройств трансформаторного или автотрансформаторного типов. Применение средств фазового регулирования в сочетании с управляемыми устройствами компенсации позволяет осуществлять глубокое регулирование эквивалентных параметров электропередачи во всех нормальных и аварийных режимах работы электропередачи.

Основные технические решения по созданию двухцепных и многоцепных управляемых ВЛ с использованием эффекта взаимной самокомпенсации параметров цепей

Используя основные подходы к созданию одноцепных компактных ВЛ может быть сделан следующий шаг к созданию двухцепных и многоцепных компактных ВЛ.

Наиболее простым способом является создание многоцепных компактных ВЛ с фиксированными параметрами трехфазных цепей путем расположения на одной опоре двух и более одноцепных компактных ВЛ.

Варианты расположения компактных цепей на одной опоре могут быть различными - с горизонтальным расположением фаз, треугольным и произвольным.

При этом исполнении параметры каждой компактной цепи являются независимыми от режима других компактных цепей, а пропускная способность электропередачи в целом

определяется суммой пропускной способности цепей.

Выполненные исследования и разработки показали, что в случае необходимости создания многоцепных компактных ВЛ более целесообразно применение управляемых самокомпенсирующихся высоковольтных линий электропередачи (УСВЛ).

Варианты конструкций и схем компактных управляемых самокомпенсирующихся двухцепных ВЛ (УСВЛ)

Примененные схемные решения двухцепных компактных УСВЛ поясняются на рис.5 и 6. Для УСВЛ предусматривается применение схем дискретного регулирования углового сдвига между системами векторов напряжений в пределах $0-120^\circ$, путем схемных переключений, или непрерывного - в диапазоне $0-180$ (120°) с помощью фазоповоротных устройств (ФПУ), (рис.6).

В обоих вариантах схем УСВЛ предусматривается применение управляемых шунтирующих реакторов (УШР). Основные конструктивные особенности УСВЛ состоят в том, что цепи УСВЛ, как правило, располагаются на общих опорах (одно, двух, четырехстоечных), возможно расположение пар сближенных фаз на отдельных опорах. Сближенные фазы в пролетах фиксируются друг относительно друга с помощью изоляционных элементов - гирлянд изоляторов (стяжек) или изоляционных распорок, которые при воздействии неблагоприятных атмосферных факторов практически снимают проблему пляски и вибрации проводов линии. Возможны варианты нетрадиционных подвесок фаз на опорах, что при определенных расчетных условиях может обеспечить работоспособность конструкций сближенных фаз без установки между ними в пролетах изоляционных элементов.

Ниже на рис 7-9 показаны разработанные варианты конструкций управляемых компактных ВЛ (УСВЛ). Вариант двухцепной компактной УСВЛ-110 кВ реализован и находится в эксплуатации более 30 лет в энергосистеме Молдовы. Первый участок УСВЛ-110 кВ построен на одностоечных опорах, а второй - на двухстоечных опорах (рис.7). Расстояние между сближенными фазами разных цепей на опоре приняты 2,2 м, а в пролете, благодаря установленным стягивающим гирляндам

изоляторов – 1.1 м. Общая протяженность УСВЛ-110 кВ составляет 54 км.

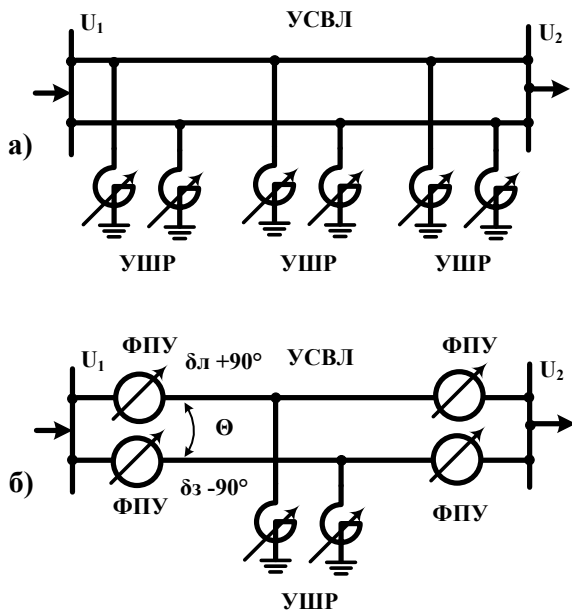


Рис. 5. Двухцепная компактная УСВЛ:
а) - с УШР; б) - с УШР и ФПУ.

Опыт работы данной УСВЛ положителен. Натурные эксперименты подтвердили правильность расчетных параметров и режимных характеристик.

Величина натуральной мощности УСВЛ-110 кВ в 1,3 раза выше в сравнении с двухцепными ВЛ обычного типа.

На основе анализа отечественных и зарубежных работ в области компактных ВЛ предлагается использовать варианты ВЛ нового поколения:

- двухцепная компактная УСВЛ 220 кВ с проводами в расщепленных фазах 2хАС-300/66 с горизонтальным расположением фаз (рис.10);

- двухцепная ВЛ 220 кВ с проводами в расщепленных фазах 2хАС-300/66 с расположением фаз типа «дельта», которая может быть выполнена с применением опор типа «Чайка» (рис.11).

Приведенные на рис. 12 данные показывают, что величина натуральной мощности компактных одноцепных и двухцепных ВЛ 220 кВ почти в два раза выше, чем у ВЛ традиционной конструкции.

Основные удельные параметры двухцепной УСВЛ-330 кВ приведены в таблице 1. Данный вариант УСВЛ был использован в расчетной схеме замещения энергосистемы Молдовы, Украины и Румынии при включении в ее состав УСВЛ-330 кВ на участках Сучава-Бельцы-Рыбница-Котовск- Южно-Украинская АЭС.



Рис. 7. Опытно-промышленная УСВЛ-110 кВ в Молдавской энергосистеме.

Регулирование углового сдвига фаз электропередачи

Способы достижения фазового сдвига систем напряжений цепей

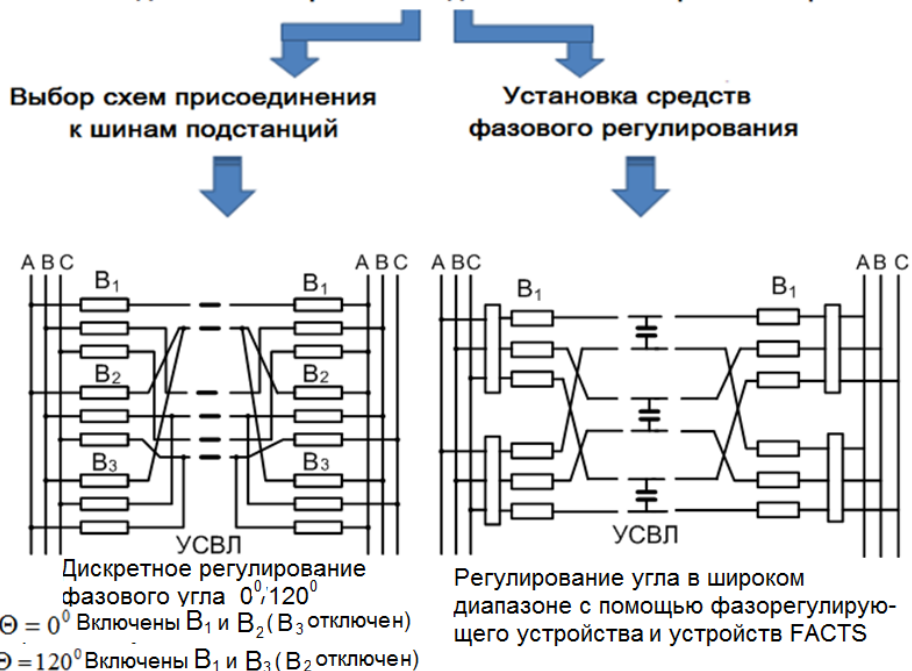


Рис.6. Схемы двухцепных УСВЛ с дискретным и непрерывным регулированием параметров

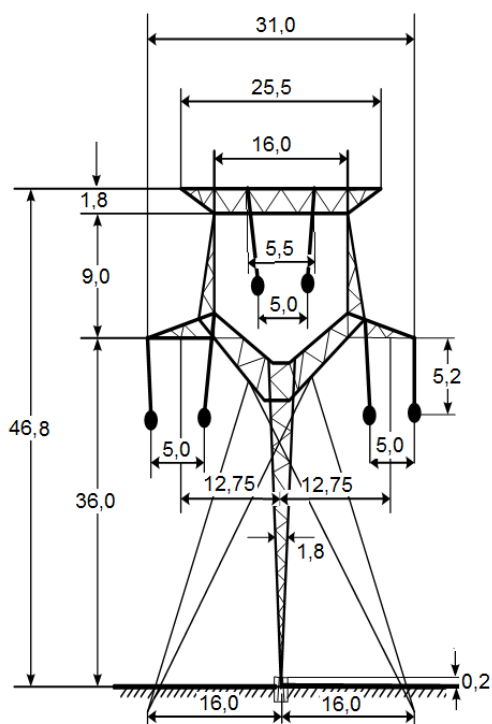


Рис. 8. Промежуточная опора УСВЛ -500/500 кВ типа «Чайка» на оттяжках

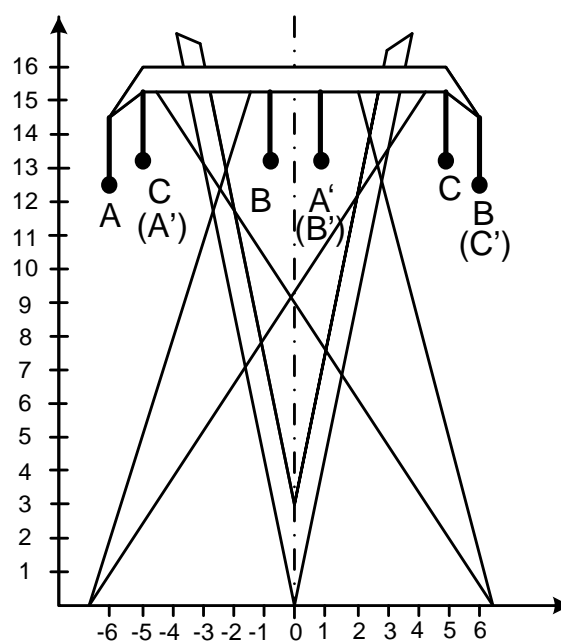


Рис. 9. Двухцепные компактные УСВЛ 330 кВ

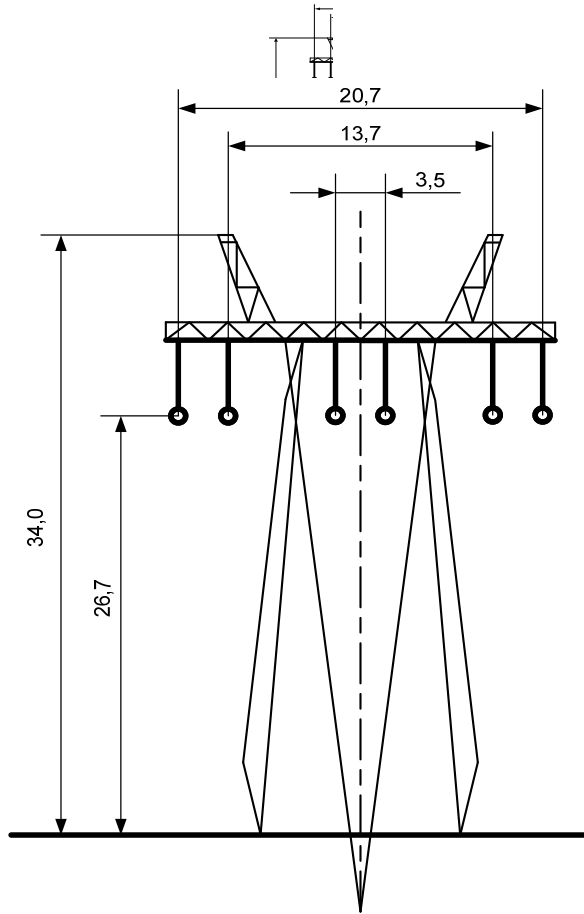


Рис. 10. Опора двухцепной компактной УСВЛ 220 кВ с горизонтальным расположением фаз

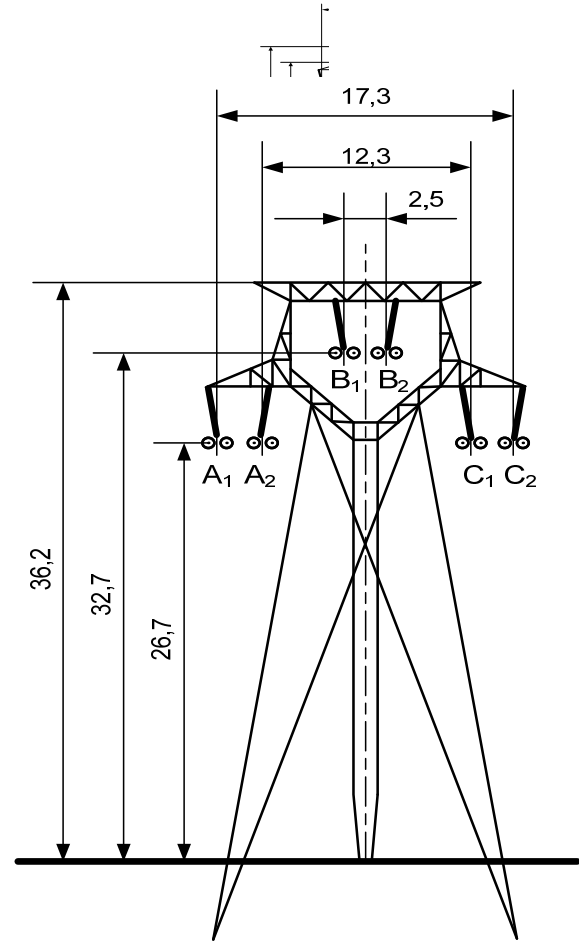


Рис. 11. Опора двухцепной УСВЛ 220 кВ «Чайка»

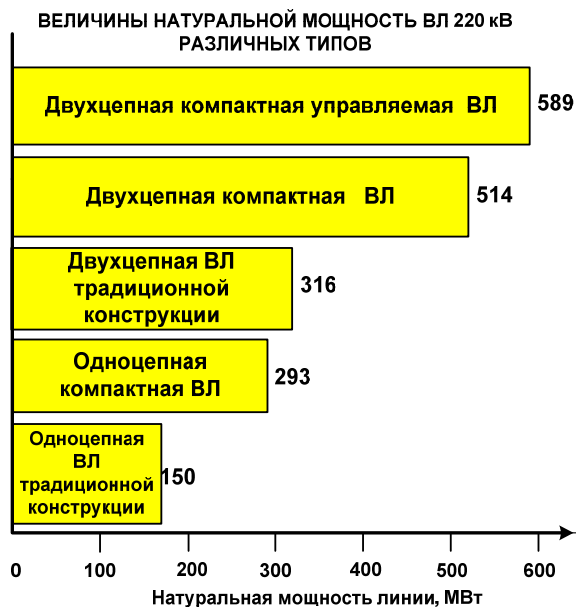


Рис. 12. Величины натуральной мощности ВЛ 220 кВ различных типов

Таблица 1

Параметры компактной двухцепной УСВЛ-330 кВ (в расчете на одну цепь).

| Параметр | Наименование УСВЛ 330 кВ | | |
|-----------------|--------------------------|---------------|-----------------------------|
| | Сучава-Бэлць | Бэлць-Рыбница | Котовск-Южно-Украинская АЭС |
| Длина, км | 128 | 104,4 | 150 |
| R_0 , Ом/км | 0,032 | 0,032 | 0,032 |
| X_0 , Ом/км | 0,22 | 0,22 | 0,22 |
| B_0 , мкСм/км | -5,57 | -5,57 | -5,57 |
| Z_0 , Ом | 198,3 | 198,3 | 198,3 |
| P_H , МВт | 664,6 | 664,6 | 664,6 |
| R , Ом | 4,096 | 3,34 | 4,8 |
| X , Ом | 28,16 | 22,96 | 33,41 |
| B , мкСм | -712,96 | -581,5 | -846,1 |

Конструкция и параметры варианта двухцепной УСВЛ-500 кВ.

В качестве конструкции опоры для двухцепной УСВЛ-500 кВ принята двухстоечная порталная металлическая опора, показанная на рис.12. Данная конструкция опоры была разработана Северо-Западным Отделением ВГПИ и НИИ «Энергосетьпроект» по исходным данным Института энергетики АН Молдовы.

Для выбранного варианта УСВЛ-500 кВ предусмотрено горизонтальное расположение фаз. На опоре расстояние между сближенными фазами принято равным 5,5 м. В каждом пролете на расстоянии от опор $\frac{1}{4}$ длины пролета установлены стягивающие изоляционные элементы, с помощью которых расстояние между сближенными фазами устанавливается равным 4,0 м. На рис. 8 был представлен вариант промежуточной опоры 500/500 кВ типа «Чайка» на оттяжках. Данный тип опоры также может рассматриваться как перспективный.

В качестве проводов для УСВЛ-500 кВ приняты провода АС-240/39. Рассмотрены два варианта УСВЛ-500 кВ. Для первого – каждая

фаза является расщепленной на 6 составляющих и содержит провода 6хАС-240/56; радиус расщепления принят равным $r_p=0,5$ м, для второго 5хАС-240/39, с радиусом расщепления $r_p=0,34$ м. Кроме этого, рассмотрен вариант расщепленной фазы, состоящей из проводов 6хАС-300/39, с радиусом расщепления $r_p=0,34$ м. Выбор проводов и конструкции расщепленной фазы УСВЛ-500 кВ осуществлен по действующей методике с учетом условия $E_m \leq 0,9 E_n$, где E_m – максимальная величина напряженности электрического поля на поверхности проводов (среднее амплитудное значение), E_n – величина напряженности электрического поля, соответствующая началу возникновения короны.

При выбранной конструкции промежуточной порталной опоры и принятых геометрических расстояниях были рассчитаны параметры двухцепной УСВЛ-500 кВ. Их значения для варианта УСВЛ-500 кВ с проводами 6хАС-300/39, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные параметры двухцепной УСВЛ напряжением 500 кВ (с проводами 6хАС-300/39, $d_{np}=24$ мм)*.

| <i>Наименование параметров</i> | <i>Един. измерения</i> | <i>УСВЛ, в целом</i> | <i>На одну цепь</i> | <i>Удельные на фазу</i> |
|---|--|---|---------------------------|---------------------------|
| Напряжение | кВ | 500 | 500 | 289 |
| Провода фазы | | 6хАС-240/39 | 6хАС-240/39 | 6хАС-240/39 |
| Количество фаз | | 6 | 6 | 1 |
| Активное сопротивление фазы (r_0) | Ом/км | 0,0099 | 0,0198 | 0,0198 |
| Радиус расщепления фазы | м | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| Расстояние между сближенными фазами | м | 4,0 | | |
| Расположение фаз | Горизонтальное | | | |
| Удельное индуктивное сопротивление фаз (X_0): при $\theta=0^\circ$ при $\theta=120^\circ$ при $\theta=180^\circ$ | Ом/км Ом/км Ом/км | 0,1797(0,181)* 0,0947(0,097) 0,0818(0,0839) | 0,3594 0,189 0,1636 | 0,3594 0,189 0,1636 |
| Удельная емкостная проводимость фаз (ν_0): при $\theta=0^\circ$ при $\theta=120^\circ$ при $\theta=180^\circ$ | См/км·10 ⁻⁶ См/км·10 ⁻⁶ См/км·10 ⁻⁶ | 6,68 (6,59) 11,789 (11,5) 13,49 (13,14) | 3,34 5,89 6,745 | 3,34 5,89 6,745 |
| Волновое сопротивление фаз (Z_b): при $\theta=0^\circ$ при $\theta=120^\circ$ при $\theta=180^\circ$ | Ом/км Ом/км Ом/км | 164 (166) 89,75 (91,9) 77,9 (80) | 328 179,5 155,8 | 328 179,5 155,8 |
| Натуральная мощность, (S_b) при $\theta=0^\circ$ при $\theta=120^\circ$ | МВт МВА | 1522 (1504) 2779 (2714) | 761 1389 | |

| при $\theta=180^\circ$ | МВт | 3197 (3117) | 1598,5 | |
|---------------------------------|---------|-------------|--------|-------|
| Удельная зарядная мощность (Qс) | | | | |
| при $\theta=0^\circ$ | МВАр/км | 1,674 | 0,837 | 0,279 |
| при $\theta=120^\circ$ | МВАр/км | 2,946 | 1,473 | 0,491 |
| при $\theta=180^\circ$ | МВАр/км | 3,378 | 1,689 | 0,563 |

В скобках приведены данные для УСВЛ-500 кВ с проводами в фазах 6хАС-240/56, $d_{пр} = 22,4$ мм, радиус расщепления $r_p=0,4$ м; Активное сопротивление провода $r_0=0,1218$ Ом/км.

Данные, приведенные в табл.2, показывают большую зависимость основных параметров УСВЛ от угла сдвига (θ) систем векторов напряжений сближенных цепей при регулировании угла (θ) в пределах от 0 до 180° . Это изменение достигает почти двухкратной величины. Данные свойства УСВЛ целесообразно использовать для управления параметрами режима электропередачи и, в первую очередь, для регулирования зарядной мощности линии с целью поддержания требуемого уровня напряжения вдоль линии при изменении величины передаваемой по ней мощности.

Сопоставление вариантов ВЛ - компактных управляемых и традиционных

Основными условиями при сопоставлении вариантов ВЛ являются следующие:

- соблюдение принятых допущений, одинаковых для всех рассматриваемых типов в ВЛ;
- в качестве лучших, принимаются одноцепные компактные ВЛ и компактные УСВЛ (в расчете на одну цепь), которые обладают наибольшей величиной натуральной мощности ($P_{нат}$).

Задача состоит в том, чтобы с помощью дополнительных средств компенсации увеличить пропускную способность традиционных ВЛ до уровня компактных одноцепных и двухцепных УСВЛ (в расчете на одну цепь), и, в итоге, определить мощность и стоимость этих средств, которые следует рассматривать как дополнительные для обычных ВЛ, уравнивающих их с компактными управляемыми ВЛ. Величина этих затрат может рассматриваться как экономия средств при использовании компактных ВЛ по сравнению с обычными. Показателем пропускной способности принята величина натуральной мощности. Принципиальные однолинейные схемы обычных ВЛ с установками компенсации и регулирования приведены на рисунках 13-15.

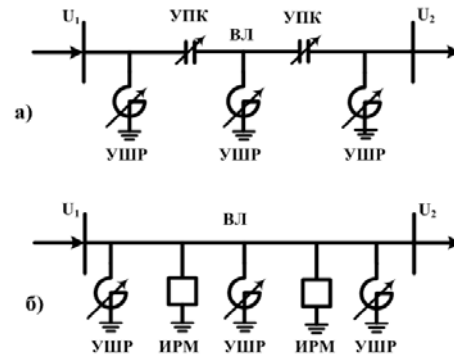


Рис. 13. Обычные одноцепные ВЛ: а) - с УПК и УШР; б) - с ИРМ и УШР.

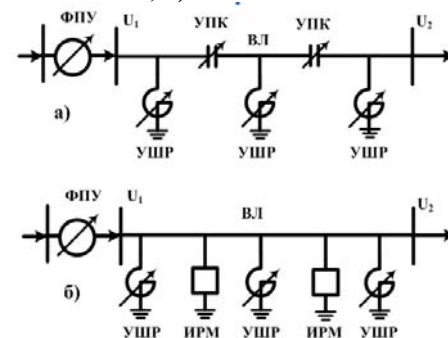


Рис. 14. Обычные одноцепные ВЛ : а) - с УПК и УШР и ФПУ; б) - с ИРМ, УШР и ФПУ

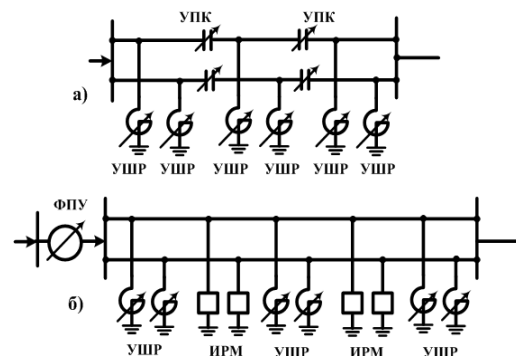


Рис. 15. Обычные двухцепные ВЛ: а) с УПК и УШР; б) с ИРМ, УШР и ФРТ

Итоговые данные сопоставительного анализа рассмотренных вариантов ВЛ 110-750 кВ приведены в таблице 3. Согласно приведенным выше обоснованиям затраты на ФПУ, предназначенные для регулирования величины и

PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE 3 (29) 2015
ELECTROENERGETICĂ

направления потоков мощности, передаваемой по ВЛ, приняты одинаковыми для рассмотренных сопоставляемых вариантов ВЛ (в расчете на одну цепь), и поэтому в суммарные затраты не включены. В расчетах в качестве исходных были приняты следующие данные удельной стоимости средств компенсации и регулирования: источники реактивной мощности типа ИРМ (СТК) ≈ 50 евро/кВАр; УШР – 25 евро/кВАр; нерегулируемые УПК (конденсаторные батареи – КБ для неуправляемой продольной компенсации) 15 \$/кВАр; ФПУ - 40 \$/кВА.

При выполнении сопоставлений использованы некоторые данные из литературных источников [21,22].

На основании данных, приведенных в таблице 3, построены на рис. 16 зависимости экономии удельных капитальных затрат (тыс. \$/км) при создании одноцепных компактных ВЛ (зависимость 1) и двухцепных компактных УСВЛ (зависимость 2 на обе цепи) по сравнению с ВЛ обычного типа - одноцепных и двухцепных, соответственно, при принятых сопоставимых условиях.

Таблица 3

Данные экономического сопоставления вариантов ВЛ различных типов

| № п/п | Наименование показателей | Ед. измер. | Напряжение ВЛ, кВ | | | | |
|-------|--|------------|-------------------|---------------|-------------|-----------------|---------------|
| | | | 110 | 220 | 330 | 500 | 750 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1. | Напряжение ВЛ | кВ | 110 | 220 | 330 | 500 | 750 |
| 2. | Удельная экономия затрат за счет создания одноцепных компактных ВЛ по сравнению с одноцепными ВЛ обычного типа с ИРМ или УПК (регулируемыми) | тыс.\$/км | 0,998-0,92 | 13,296-12,56 | 24,75-24,57 | 76,04-75,57 | 133,7-132,09 |
| 3. | Удельная экономия затрат за счет создания компактных двухцепных УСВЛ по сравнению с двумя одноцепными ВЛ обычного типа с регулируемыми ИРМ или УПК | тыс.\$/км | 1,996-1,84 | 26,592-25,12 | 49,5-49,14 | 152,08-151,14 | 267,4-264,18 |
| 4. | Удельная экономия затрат за счет уменьшения стоимости УШР на двухцепных компактных УСВЛ с ФПУ | тыс.\$/км | 0,796 | 10,637 | 19,8 | 60,836 | 106,95 |
| 5. | Удельная суммарная экономия затрат за счет создания компактных двухцепных УСВЛ по сравнению с двумя одноцепными ВЛ обычного типа с регулируемыми ИРМ или УПК | тыс.\$/км | 2,792-2,636 | 37,229-35,757 | 69,3-68,94 | 212,916-211,976 | 374,35-371,13 |

Результаты сопоставления различных вариантов ВЛ

Условия сопоставления:

- одноцепных компактных ВЛ с ВЛ обычного типа с применением на них дополнительных устройств компенсации

для увеличения натуральной мощности до уровня компактных;

- двухцепных компактных УСВЛ – с двумя двухцепными ВЛ обычного типа с установкой на них дополнительных устройств компенсации, обеспечивающих увеличение их

натуральной мощности до уровня двухцепной компактной УСВЛ;

- на всех ВЛ обеспечивается регулирование напряжения вдоль линии при изменении величины передаваемой мощности от значения натуральной мощности до холостого хода с помощью УШР;



Рис.16. Экономия удельных затрат при создании компактных одноцепных и двухцепных ВЛ

- для придания всем рассматриваемым вариантам ВЛ функций регулирования величины и направления передаваемых по ним потоков мощности для всех вариантов предусматривается установка фазопоротных устройств (ФПУ), мощность которых принята равной величине натуральной мощности ВЛ, как расчетной мощности, передаваемой по ВЛ.
- отношение величины установленной мощности ФПУ к значению натуральной мощности для всех вариантов ВЛ одинаково;
- для возможности осуществления фазового регулирования величины и направления передачи по ВЛ мощности во всех вариантах ФПУ включаются последовательно в линию, со стороны отправной или приемной подстанций;
- для двухцепных УСВЛ не выходя из условия суммарной величины мощности ФПУ, равной натуральной мощности УСВЛ в целом, ФПУ устанавливаются на каждой цепи в начале и в конце, что позволяет управлять потоками передаваемой мощности, и также регулировать величину и знак взаимного электромагнитного влияния сближенных цепей, и при этом обеспечить также

дополнительную экономию установленной мощности УШР.

Полученные результаты являются наглядным свидетельством того, что компактные управляемые одноцепные ВЛ и компактные управляемые двухцепные УСВЛ (а также управляемые многоцепные ВЛ) создают возможности создания электропередач с новыми качествами и достижения при этом значительной экономии капитальных вложений.

Важными также являются дополнительные преимущества рассматриваемых ВЛ нового типа по сравнению с обычными в части управления режимами, повышения надежности, снижения экологического влияния, а также экономии земельных угодий, отводимых под строительство ВЛ. Учет этих дополнительных преимуществ способствует достижению соответственно еще большей экономической и технической эффективности компактных управляемых электропередач по сравнению с ВЛ обычного типа.

Заключение

Результаты проведенных на конкретных примерах исследований отражают эффективность применения в энергосистемах компактных ВЛ 110, 220, 500, которые по сравнению с традиционными электропередачами позволяют:

- повысить в 1,3-1,6 раза пропускную способность высоковольтных линий и электросетей;
- существенно улучшить регулировочные свойства электропередач;
- снизить удельные капитальные затраты на строительство в расчете на единицу передаваемой мощности в пределах на 15-30%;
- уменьшить потери электроэнергии и эксплуатационные затраты;
- улучшить экологические показатели за счет сокращения на 20-40% земельных площадей, отводимых под строительство ВЛ, а также уменьшения напряженности электромагнитного поля в коридоре прохождения ВЛ и вблизи границ зон отчуждения.

Рассмотренные варианты новых технических решений в области создания компактных управляемых линий электропередачи могут послужить аналогами при проектировании и строительстве целого ряда объектов из большого перечня, строительство которых планируется на

ближайший период и на перспективу. По предварительной оценке около половины планируемых электропередач может быть сооружено в виде компактных управляемых электропередач с достижением значительного экономического эффекта и качественно нового технического уровня в области формирования энергосистем, управления режимами, повышения надежности работы энергосистем и охраны окружающей среды.

Выполненные к настоящему времени технические и проектные разработки, а также уже накопленный в предыдущий период положительный опыт позволяют сделать вывод о технической и экономической целесообразности и реальности практического применения ВЛ нового поколения – компактных управляемых ВЛ различных классов напряжения, регулирующего электрооборудования и систем. При развитии и соответствующей координации работ может быть создана платформа для отечественного международного лидерства в области создания компактных управляемых электропередач и новых средств регулирования, принимая во внимание актуальность тематики и важность решаемых проблем развития электроэнергетики в части эффективности транспорта и распределения электроэнергии, а также формирования объединенных энергосистем.

Литература (References)

- [1] Venikov V.A. e.a. Sposob peredachi electroenerghii Sposob peredachi electroenerghii/ [The mode of transmission of energy]. Certificate of the author (former USSR) no 218294, 1968.
- [2] Venikov V.A. e.a Sposob peredachi electroenerghii Sposob peredachi electroenerghii/ [The mode of trans-mission of energy]. Certificate of the author (former USSR) 266924, 1968.
- [3] 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.
- [4] Aleksandrov G.N., Evdokunin G.A. Podporkin G.V. Parametry vozduzhnyh linii electropredachi kmpaktoi konstruksii. [Parameters of aerial transmission lines of compact construction] – Electrichestvo, 1982, N4, p. 10-17.
- [5] Ryjov Iu.P. Dalnie electropredachi sverhvyssokogo napreajenaaa. [Long-distance high voltage power lines]– Moskow, 2007.
- [6] Postolatii V.M., Bycova E.V. Efectivnosti primenienia upravleaemyh samocompensiruiuschihsea visikovolithyh linii electropredachi i fazore-

guliruiuschih ustroystv transformatornogo tipa. [The efficiency of the use of controlled self-compensated high voltage power lines with and phase controlled apparatus of transformer type] Electrichestvo, 2010, N2, pp. 7-14.

- [7] Upravleaemye electropredachi. Nr.8 (23), Trudy Instituta energhetiki AN Moldovi za 2001-2007. [Proceedings of the Institute of Power Engineering of the ASM], 2007. 234 s.
- [8] Postolatii V.M. Nauchnaia shkola v oblasti upravleaemyh electropredach. Etapi issledovaniia i bibliografia. [Scientific school in the field of controlled transmission lines], Vol.1.Chisinau, 2012.
- [9] Venikov V.A. Dalnie electropredachi. [Long distance power transmission lines] Gosenergoizdat, 1960.
- [10] Postolatii V.M., Radcenco N.P. Inductivnosti mnogotsepyh linii electropredachi. Izvestia ANM, 1979. Nr.1, s. 55-63.
- [11] Aleksandrov G.N. Propusknaiia sposobnosti vozduzhnyh linii electropredachi s rascheplennymi provodami. [Bandwidth of air power transmission lines with splited wires] «Linii electropredachi povyshennoi propusknoi sposobnosti». Chisinau, 1982. p. 24-33.
- [12] Postolatii V.M. Tehniceskie harakteristiki upravleaemih samokompensiruiuschehsea linii elektropredaci i telesoobraznosti primenienia ih dlea formirovania sistemobrazuiuschei seti Edinoi energheticeskoi sistemí SSSR. [Technical data of self-compensated transmission lines and the feasibility of their application for the formation of a backbone network of the Unified Energy System of the USSR.] Izvestia Akademii nauk SSSR "Energetica i transport ". Moskva, 1989, p.54-64.
- [13] Sakarean Iu.G., Timasova L.V., Kareva S.N., Postolatii V.M., Bicova E.V., Suslov V.M. Effektivnosti primenetia kompaktnih upravleaemih linii elektriperedaci. [Efficiency of the use of compact power transmission lines] Sbornik trudov NIT "Electroenergetiki" FSK EES №1.(prilojenie c jurnalu «Energhia edinoi seti»).
- [14] Postolatii V.M., Sakarean Iu.G., Timasova L.v., Bycova E.V. Tehniceskie vozmojnosti electropredaci povisennoi propusknoi sposobnosti dlea obiedinenia OES Sibiri i OES Vostoka. [Technical possibilities of increased power capacity to join the ECO and ECO East Siberia] Sbornik naucinuh trudov naucinoprakticeskoi konferentii « Problemi i puti reseniaia effectivnogo ispolizovania toplivno-energheticeskih resursov», 22-23 dekabrea 2015, p 18-28.
- [15] Sakarean Iu.G., Timasova L.V.,Kareva C.N., Postolatii V.M. Effektivnosti peredaci elektriceskoi energii pri primenenii kompaktnih upravleaemih VL.[The efficiency of transmission of electrical energy by controlled application of

PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE 3 (29) 2015
ELECTROENERGETICĂ

- compact high-voltage lines] «Energia edinoi seti», 2014, nr.3(14), pp. 4-16.
- [16] Dementiev Iu. A., Goriusin Iu. A., Sakarean Iu.G., Timasova L.V., Postolatii V.M., Bycova E.V., Bobiliova N.V. Effektivnie sredstva transporta elektroenergii. Doklad na XI Mejdunarodnoi naucno-tehniceskoi ronferenčij TRAVEK «Intelectualinaia elektroenergetika, avtomatika i visokovolitnoe kommutačionnoe oborudovanie», [Effective means of transport of electricity], 2011, Moskva.
- [17] Sakarean Iu.G., Timasova L.V., Kareva C.N., Postolatii V.M., Bycova E.V., Suslov V.M., Bobiliova N.V., Uts N.N. Effektivnosti primeneniia kompaktnih upravleaemih linii elektropredaci dlea formirovaniia mejsistemnih i mejsudarstvennih tranzitov. [The effectiveness of the compact controlled transmission lines to form the interconnection and inter-state transit]. Doklad na sectsionnom zasedanie naucno-tehniceskogo Soveta InterRAO EES, 15 april 2013, Moskva.
- [18] Postolaty V.M. e.a. Patent nr. 566288 (USSR) Electropredacea peremennogo toka [Alternating current electric power transmission line].
- [19] Postolaty V.M. e.a. Electropredacea peremennogo toka.[Alternating current electric power transmission line] Patent of USA №4001672, 1977; Patent GDR №116990, 1976; Patent of France №7508749, 1977; Patent of Great Britain №1488442, 1978; Patent of Sweden №75032268, 1978; Patent of Canada №10380229, 1978; Patent FRG №2511928, 1979; Patent of Japan №1096176, 1982.
- [20] Bosneaga V.A., Kalinin L.P., Postolatii V.M. Ustroistvo izmeneniia fazovogo sdviga [he phase shift measuring apparatus] Patent of USA № 3975673, 1976; Patent of GDR № 119494, 1976.; Patent USA № 4013942, 1977; Patent of GDR № 123846, 1977; Patent of Great Britain № 1484522, 1977; Patent of France № 7522737, 1977; Patent of Great Britain № 1493652, 1978; Patent of Sweden № 7508349, 1978; Patent of Sweden № 7508350, 1978; Patent of FRG № 2531578, 1978; Patent of FRG № 2531644, 1978; Patent of France № 7522615, 1978; Patent of Canada № 1045202, 1978; Patent of Canada № 1041172, 1978.
- [21] Venikov V.A., Stroiev V.A., Glazunov A.A., Jukov L.A. Electricieskie sistemi. Elektriceskie seti. [Electrical Systems. Electric nets.], Moscow 1998.
- [22] Ersevici V.V., Zeiliger A.N., Illarionov G.A. Spravocinik po proiektirovaniu electroenergeticeskih sistem. [Guide to the design of electric power systems], Moscow 1985.

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 E-mail: postolati@rambler.ru



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



Быкова Елена Витальевна, д.т.н., ведущий научный сотрудник Лаборатории управляемых электропередач Институт энергетики АНМ. Сфера научных интересов: электрические сети и системы и управление ими, управляемые электропередачи, энергетическая безопасность, 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.