



УПРАВЛЯЕМЫЕ КОМПАКТНЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Постолатий В.М.¹, Быкова Е.В.¹, Суслов В.М.¹
Шакарян Ю.Г.², Тимашова Л.В.², Карева С.Н.²,
¹Институт энергетики Академии Наук Молдовы
²НТЦ Электроэнергетики, г. Москва, Россия

Аннотация. Выполнены теоретические исследования возможностей кардинального улучшения основных показателей и характеристик линий электропередачи переменного тока. Установлено, что характеристики одноцепных воздушных линий (ВЛ) могут быть существенно улучшены за счет применения новых конструкций, предусматривающих сближение фаз, изменения радиуса расщепления и применения специальных изолирующих подвесок на опорах. Применение данных технических решений в комплексе позволяет создавать одноцепные компактные ВЛ переменного тока, существенно (в 1,2 - 1,3 раза) превосходящие по пропускной способности ВЛ традиционного исполнения. Регулирование режимных характеристик компактных одноцепных ВЛ осуществляется с помощью дополнительных средств компенсации и регулирования.

В двухцепном исполнении компактные ВЛ могут быть созданы путем подвески на общих опорах двух одноцепных компактных ВЛ, не оказывающих друг на друга существенного взаимного электромагнитного влияния. Характеристики каждой из двух компактных ВЛ (трехфазных цепей) определяются параметрами собственных фаз. Пропускная способность двухцепных компактных ВЛ является суммой пропускной способности двух компактных одноцепных ВЛ. Регулирование параметров режимов двухцепных компактных ВЛ, как и одноцепных компактных ВЛ, осуществляется с помощью дополнительных средств компенсации и управления.

Наиболее эффективным способом улучшения характеристик двухцепных и многоцепных ВЛ является создание двухцепных и многоцепных управляемых самокомпенсирующихся ВЛ переменного тока (УСВЛ), которые воплощают в себя технические решения по компактным конструкциям, а также усиленное электромагнитное влияние цепей друг на друга, обеспечивающее повышенную (в 1,3 – 1,5 раза) пропускную способность и изменяемую в процессе работы для регулирования в широком диапазоне эквивалентных параметров и характеристик линий электропередачи. В УСВЛ применен новый принцип фазового регулирования углового сдвига трехфазных систем напряжений, примененных к сближенным цепям.

Ключевые слова: линии электропередач переменного тока, сближение фаз, регулирование режимных характеристик, пропускная способность, управляемые самокомпенсирующиеся ВЛ, принцип фазового регулирования, элемент электрических сетей SMART GRID.

CONTROLLED COMPACT AC TRANSMISSION LINES

POSTOLATI V.M.¹ BYKOVA E.V.¹, SUSLOV V.M.¹
SHAKARIAN Y.G.², TIMASHOVA L.V.², KAREVA S.N.²

¹Institute of Power Engineering of Academy of Sciences of Moldova

²«Research and Development Center at Federal Grid Company of United Energy System», JSC.

Abstract. Theoretical research opportunities cardinal improvement of key indicators and characteristics of the AC power lines. Found that the characteristics of single-circuit overhead transmission lines (VL) can be significantly improved through the use of new designs involving the convergence phase, the radius of splitting and the use of special insulation hangers on support. The application of these technical solutions in the complex allows you to create compact single circuit overhead AC significantly (1.2 - 1.3 times) in excess of the bandwidth overhead of traditional performances. Regulation regime characteristics of compact single-circuit overhead line by using additional means of compensation and regulation.

In the double-circuit overhead line compact design can be created by the suspension on the same poles of two compact single-circuit overhead line, do not have on one another substantial mutual electromagnetic interference. Characteristics of each of the two compact overhead (three-phase) on the parameters of its own phases. The capacity of the compact double circuit overhead line is the sum of the bandwidth of two compact single-circuit overhead line. Regulation mode parameters double circuit overhead compact as compact single-circuit overhead line, by using additional means of compensation and governance.

The most effective way to improve the performance of double-circuit overhead line and multichain double circuit is to create a self-compensating and multichain driven overhead alternating current (USVL) that embody a technical solution to a compact design, as well as increased influence of electromagnetic circuits on each other, which provides higher (1.3 - 1.5) and variable bandwidth in the process to regulate a wide range of equivalent parameters and characteristics of transmission lines. In USVL apply a new principle of phase shift of phase angle control system voltages applied to draw together circuits.

Keywords: AC power line, the draw together of phases, regulation of regime performance, capacity, self-compensating controlled overhead power lines, the principle of a phase control element electrical networks SMART GRID.

LINII ELECTRICE DE TRANSPORT DIRIJATE COMPACTE DE CURENT ALTERNATIV

Postolati Vitalie¹, Bicova Elena¹, Suslov Victor¹
Şakarian Iurii², Timaşova Larisa², Kareva Svetlana²,
¹ Institutul de Energetică al Academiei de Ştiinţe a Moldovei
²NTTS Electric, Moscova, Rusia

Rezumat. Teoretic au fost cercetate posibilităţile de îmbunătăţire cardinală a indicilor şi caracteristicilor liniilor electrice de transmisie de curent alternativ. S-a constatat, că caracteristicile LEA cu un singur circuit pot fi îmbunătăţite în mod semnificativ prin utilizarea de noi construcţii, care prevăd apropierea fazelor, modificarea razei de divizare şi utilizarea izolatoarelor de suspensie specializate pe suport. Aplicarea în complex a acestor soluţii tehnice vă permite crearea LEA compacte cu un singur circuit, ce depăşesc esenţial (1,2 – 1,3 ori) după capacitatea de transport LEA cu executare tradiţională. Reglarea caracteristicilor de regim se face prin intermediul echipamentelor suplimentare de compensare şi reglare.

LEA compacte cu executare în două circuite pot fi realizate prin suspensia pe suporturile comune a două LEA compacte cu un singur circuit, ce au o influenţă electromagnetică mutuală nesemnificativă. Caracteristicile fiecăreia din aceste două LEA compacte (circuitelor trifazate) se determină prin parametrii fazelor proprii. Capacitatea LEA compacte cu două circuite este suma capacităţilor a două LEA compacte cu un singur circuit. Reglarea parametrilor regimurilor LEA compacte cu două circuite, precum şi a celor cu un singur circuit se realizează cu ajutorul mijloacelor de compensare şi dirijare.

Una din metodele eficiente de îmbunătăţire a caracteristicilor LEA cu un singur circuit şi cu multe circuite este crearea LEA dirijate cu autocompensare cu două circuite şi multe circuite (LEDA), care includ în sine soluţiile tehnice pentru construcţiile compacte, precum şi influenţa electromagnetică mutuală majorată, ce asigură o capacitate majorată (cu 1,3 – 1,5 ori) şi care se modifică în procesul funcţionării pentru reglarea în diapazon extins a parametrilor echivalenţi şi a caracteristicilor liniilor electrice. În LEDA este aplicat principiul de reglare a decalajului de fază a sistemelor trifazate de tensiune aplicate la circuitele apropiate.

Cuvinte cheie: linie electrică de curent alternativ, apropierea fazelor, reglarea caracteristicilor de regim, capacitate de transport, LEDA, decalaj de fază

ВВЕДЕНИЕ

В последний период развитие электроэнергетики в передовых странах характеризуются интенсивным поиском новых технологий для решения дальнейшего повышения эффективности энергосистем, снижения затрат на строительство и эксплуатацию электросетевых объектов, повышения надежности электроснабжения, повышения энергетической безопасности и улучшения экологических показателей.

Традиционные технологии в ряде случаев себя исчерпали, и дальнейшее успешное развитие энергосистем может быть осуществлено только на базе новых технических решений с применением комплекса современных технических средств, устройств и систем.

В области электроэнергетики весьма актуальной являются задача совершенствования способов передачи и распределения электроэнергии, управления режимами энергосистем и снижения затрат на строительство и эксплуатацию.

Применяемые в настоящее время электропередачи не всегда отвечают необходимым требованиям, главным образом из-за недостаточной пропускной способности, несовершенства систем управления, значительной стоимости и ощутимого экологического влияния.

В ряде работ, выполненных в последние десятилетия, показано, что наиболее эффективным в электросетевом строительстве для формирования энергосистем является применение электропередач нового типа, выполненных на базе компактных воздушных линий (ВЛ) [1-8], с применением современных регулирующих устройств [9,10]. Такие электропередачи получили название компактных управляемых линий электропередач нового поколения повышенной пропускной способности. Свойства

повышенной пропускной способности указанные электропередачи приобрели благодаря их новой компактной конструкции, а управляемости – благодаря использованию современных устройств регулирования. Основные принципы регулирования режимных параметров могут быть использованы в таких электропередачах при выполнении их как в воздушном, так и в кабельном вариантах.

Компактные управляемые ВЛ могут быть созданы в виде одноцепных, а также двухцепных и многоцепных.

Варианты одноцепных компактных ВЛ позволяют использовать предельно большую пропускную способность, а двухцепные и многоцепные, кроме того, еще и регулирующую пропускную способность в пределах от минимальной до предельной, в зависимости от величины передаваемой по ВЛ мощности. На тех и других типах компактных ВЛ предусматривается использование устройств регулирования различных типов, как новых, так и традиционных.

Ниже приводятся результаты теоретических исследований и разработок управляемых компактных ВЛ в вариантах одноцепного и многоцепного исполнения, а также некоторые результаты практического применения данных ВЛ и показатели их эффективности.

Управляемые компактные ВЛ нового поколения предусматривают, прежде всего, создание компактных конфигураций расположения фаз с минимально допустимыми расстояниями между ними, выбор оптимальной конструкции расщепления фаз и линейной изоляции, применения новых типов опор, позволяющих создать компактные конструкции линии с минимально допустимыми расстояниями между фазами и обеспечить совместно с междуфазными изоляционными элементами,

устанавливаемыми в пролётах, механическую устойчивость линии в целом при воздействии неблагоприятных климатических факторов.

За счет сближения фаз и создания компактных конфигураций их расположения в одноцепных и многоцепных ВЛ обеспечивается улучшение электрических параметров линий и, прежде всего, повышение пропускной способности, благодаря изменению параметров электромагнитного поля в междуфазном и окружающем линию пространстве. Усиление параметров поля внутри линии за счет сближения фаз позволяет улучшить электрические параметры, увеличить пропускную способность, и, соответственно, технические характеристики линии, а ослабление поля во внешнем пространстве – улучшить экологические показатели ВЛ.

Основной вклад в развитие работ в области управляемых компактных ВЛ внесли Отдел энергетической кибернетики Академии наук Молдовы, ныне Институт Энергетики АН Молдовы, осуществлявший исследования в течение всего периода и продолжающий их в настоящее время. В последние годы исследования в области компактных управляемых ВЛ интенсивно ведутся в НТЦ «Электроэнергетики» (ВНИИЭ). Исследования и разработки велись при участии кафедры электрических систем Московского энергетического Института, Ленинградского политехнического университета, ВГПИ и НИИ «Энергопроект» и его Сибирского и Северо – Западного и ряда других отделений, ГП «Молдэнерго», Молдавского института «Энергопроект», ПО «Союзтехэнерго» и других.

Главная сущность и достоинства компактных управляемых ВЛ состоят в том, что они, будучи многопроводными и многофазными, позволяют увеличить пропускную способность электропередач переменного тока, благодаря увеличенной плотности потока энергии в поперечном сечении, ограниченном высотой и шириной опоры, за счет новой конструкции исполнения линий и ее фаз. Будучи дополнительными современными устройствами фазового управления и средствами регулирования параметров режимов управляемые компактные ВЛ становятся электропередачами качественно нового типа, позволяющими обеспечить любую заданную пропускную способность, управление величиной и направлением потока мощности в соответствии с режимными требованиями энергосистемы и электрической сети, работать в оптимальном по минимуму потерь режиме, соблюдать все требования к качеству параметров режимов, снизить влияние на окружающую среду, благодаря сокращению полосы отчуждения и уменьшению напряженности поля в окружающем линию внешнем пространстве.

Реализация технических преимуществ компактных управляемых ВЛ по сравнению с ВЛ традиционного исполнения позволяет получить заметный технико-экономический эффект, выражающийся в снижении удельных затрат на строительство, эксплуатацию сетей, на передачу электроэнергии, а также в улучшении общесистемных показателей.

Рассматриваемые компактные управляемые ВЛ следует отнести в электропередачам нового поколения, отвечающим высоким требованиям и имеющим перспективу для широкого внедрения в практику.

Анализируя современные тенденции развития научно-исследовательских работ в области электроэнергетики и, в частности, электроэнергетических систем, следует отметить, что идеи компактных управляемых ВЛ оказались в струе интенсивно развивающегося в последние десятилетия во всем мире направления преобразования электроэнергетики, получившего название SMART GRID «умная сеть», «умная энергетическая система» [11]. Основываясь на оценках ряда специалистов, апробации на международных конференциях и совещаниях можно полагать, что компактные управляемые ВЛ являются одним из основополагающих элементов создания систем типа SMART GRID в области транспорта и распределения электроэнергии, существенно превосходящих по техническим и экономическим показателям электропередач традиционного исполнения.

Решение данной проблемы возможно на базе использования новых результатов исследований и разработок в области высоковольтных линий электропередач переменного тока и современного регулирующего оборудования, открывающих принципиально новые технические возможности эффективного транспорта и распределения электроэнергии на переменном токе.

Создание электропередач новых типов основывается на комплексном применении высоковольтных компактных по своей конструкции линий (ВЛ) повышенной пропускной способности с улучшенными технико-экономическими показателями и современных средств быстродействующего регулирования FACTS, обеспечивающих требуемое регулирование параметрами режимов электропередач и энергосистем в целом, повышение их надежности, экономичности, бесперебойности энергоснабжения потребителей, энергетической и экологической безопасности.

В результате выполненных научных исследований и разработок, выявлены значительные резервы для повышения технических показателей электропередач переменного тока, а также новые возможности их применения: 1) увеличение пропускной способности; 2) обеспечение широкого диапазона регулирования основных режимных параметров и характеристик; 3) создание электропередач с заранее заданными техническими и экономическими характеристиками и свойствами; 4) снижение удельных капитальных вложений в расчете на единицу передаваемой мощности; 5) компактизация конструкций линий электропередач и сокращение площадей земельных угодий, отчуждаемых под их строительство; 6) снижение экологического воздействия ВЛ на окружающую среду.

Реализация каждой из указанных новых возможностей электропередач переменного тока зависит от ряда основополагающих факторов, влияющих на параметры линий и оборудования.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОМПАКТНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЛ

Основными параметрами ВЛ переменного тока являются: 1) индуктивное и активное сопротивление; 2) емкостная проводимость; 3) активная проводимость; 4) волновое сопротивление, и волновые параметры; 5) зарядная и натуральная мощность; 6) поток вектора мощности; 7) напряженность электрического и магнитного полей на поверхности проводов и в пространстве, окружающем линию; 8) уровни акустических шумов и радиопомех.

Указанные параметры находятся в зависимости от следующих факторов: 1) конфигурации расположения фаз; 2) сечения выбранных проводов; 3) количества составляющих в расщепленных фазах; 4) выбранных величин и векторной ориентации друг по отношению к другу напряжений фаз; 5) влияния генераторных и трансформаторных параметров, параметров дополнительных средств компенсации и регулирования, а также в определенной мере от воздействия средств защиты и автоматики.

Задача сводится к выбору технических решений, обеспечивающих качественно новый уровень и показатели электропередач переменного тока, при соблюдении действующих нормативов и ограничений.

При выборе новых конструкций, прежде всего, необходимо учитывать ограничения по электрической прочности промежутков «фаза-фаза», «фаза - заземленный элемент опоры», при различных расчетных условиях и с учетом уровней максимальных рабочих напряжений, грозовых и коммутационных перенапряжений. Необходимо также учитывать целый ряд и других ограничений и требований.

Электроэнергетические системы относятся к классу больших динамических систем, и для обеспечения статической и динамической устойчивости их работы необходимо осуществление быстродействующего регулирования в нормальных и переходных режимах. Это накладывает дополнительные требования к устройствам FACTS и другим устройствам по обеспечению стабилизации параметров режимов в узлах системы, на шинах генерирующих источников и приемников, ограничению уровней перенапряжений в переходных режимах по условию надежной работы изоляции.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КОМПАКТНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЛ

В настоящей работе рассматриваются электропередачи переменного тока, содержащие многопроводные линии которые, как на отправном так и приемном концах и в промежуточных узлах подсоединены к трехфазным системам шин переменного тока. Основными видами рассматриваемых линий электропередач являются:

- компактные трехфазные одноцепные ВЛ;
- компактные двухцепные ВЛ;

- двухцепные управляемые самокомпенсирующиеся ВЛ (УСВЛ).

Сущность и принципиальные отличия указанных видов линий электропередач от обычных состоит в следующем.

Компактные одноцепные трехфазные ВЛ переменного тока выполняются в виде новых конструкций, отличающихся от обычных ВЛ тех же классов напряжений главным образом тем, что у них уменьшены расстояния между фазами, изменены конструкция расщепленных фаз, число составляющих и конфигурация их расположения, применены новые типы изоляционных подвесок на опорах. Благодаря этим техническим решениям обеспечивается улучшение параметров и повышение пропускной способности линий. Регулирование режимных параметров электропередачи осуществляется с помощью традиционных или новых средств управления типа FACTS, устанавливаемых в узлах электропередачи. Электрические схемы компактных трехфазных ВЛ практически не отличаются от схем трехфазных линий электропередачи традиционного исполнения. В процессе работы с помощью регулирующих устройств осуществляется регулирование режимных параметров электропередачи в целом. Что касается параметров самих линий они остаются при этом неизменными.

Компактные двухцепные ВЛ переменного тока отличаются от обычных двухцепных линий электропередачи тем, что у них каждая трехфазная цепь выполнена в виде компактной трехфазной линии, аналогичной описанной выше одноцепной компактной ВЛ. Регулирование режимных параметров двухцепных компактных ВЛ также, как и одноцепных, может осуществляться с помощью регулирующих устройств типа FACTS, установленных в отдельных узлах электропередачи. Собственные параметры трехфазных цепей компактных двухцепных ВЛ в процессе работы остаются неизменными.

Управляемые самокомпенсирующиеся двухцепные ВЛ переменного тока (УСВЛ) содержат две трехфазные цепи, но отличаются от обычных двухцепных ВЛ в конструктивном, схемном и режимном отношении. Главные отличия конструкции двухцепных УСВЛ состоят в том, что у них принято попарное сближение фаз разных цепей таким образом, что двухцепная УСВЛ будет состоять из трех пар сближенных фаз. Расстояние между сближенными фазами разных цепей принимается равным минимально допустимому значению, рассчитанному с учетом максимальных рабочих напряжений, которые могут быть приложены к этим фазам, а также коммутационных и грозовых перенапряжений. Остальные геометрические размеры в УСВЛ могут быть приняты как у обычных ВЛ, или также уменьшены, с учетом ограничений, обусловленных конструкцией опор. Сближение фаз разных цепей создает явно выраженное увеличенное взаимное электромагнитное влияние цепей, знак которого зависит от углового сдвига между приложенными векторами напряжений, т.е. углового сдвига (θ) трехфазной системы векторов напряжений одной цепи по отношению к другой. Этот эффект

используется для изменения и регулирования в глубоком диапазоне эквивалентных параметров и характеристик каждой цепи и линии в целом. Целенаправленное изменение данного угла (θ) обеспечивает требуемую пропускную способность и заданные режимные параметры электропередачи. Линии типа УСВЛ также относятся к типу компактных ВЛ. Главным отличием УСВЛ от других типов компактных ВЛ состоит в том, что можно в глубоком диапазоне регулировать собственные параметры линии. Конструкции фаз в УСВЛ также принимаются измененными. Соответственно, и подвеска их на опорах может быть специальной, аналогично, как у одноцепных компактных. Между сближенными фазами на опоре конструктивные заземленные элементы опоры должны отсутствовать. Для фиксации расстояния между сближенными фазами в пролетах могут предусматриваться междуфазные изоляционные элементы (стержневые изоляционные распорки, стягивающие гирлянды изоляторов). В схемном отношении отличия двухцепных УСВЛ от обычных состоят в том, что присоединения цепей к трехфазным системам шин на отправном и приемном концах осуществляются таким образом, чтобы между векторами напряжений сближенных фаз был обеспечен определенный угловой сдвиг (θ). Величина этого угла (θ) изменяется в процессе работы в пределах 0-180°, или является фиксированной (0; 120°), в зависимости от величины передаваемой мощности. Указанные угловые сдвиги систем векторов напряжений цепей могут быть созданы путем соответствующей фазировки в схемах присоединения УСВЛ к шинам подстанций, или же с помощью установки специальных фазорегулирующих устройств трансформаторного или автотрансформаторного типов (ФРТ). На УСВЛ, как и на компактных одноцепных ВЛ, предусматривается установка регулирующих средств типа FACTS. Регулирующие устройства могут быть подключены на УСВЛ традиционно – на фазное напряжение и нетрадиционно – на междуфазное напряжение. Применение на УСВЛ фазорегулирующих устройств (ФРТ) и других устройств FACTS позволяет создавать электропередачи переменного тока повышенной пропускной способности с любыми заданными регулируемыми характеристиками. Теоретической базой для анализа характеристик многопроводных линий электропередачи переменного тока и выбора наиболее эффективных способов и обоснования технических решений для кардинального повышения их пропускной способности и улучшения других показателей является использование теории электромагнитного поля и разработка таких расчетных моделей, которые позволяют устанавливать во взаимосвязи главные зависимости основных параметров линий электропередач и указывать на целенаправленные способы их изменения. На основании выполненных ранее научно-исследовательских работ показано, что основные параметры и характеристики высоковольтных линий электропередач зависят от конструктивного их

исполнения, от класса напряжения от схем электрических соединений, от наличия и функционального воздействия средств регулирования и управления.

Главными характеристиками высоковольтных линий электропередачи, определяющих целесообразность их применения для передачи и распределения электроэнергии, в соответствии с требованиями электроэнергетических систем, являются их пропускная способность и регулировочные свойства.

ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ ЛИНИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Основное назначение линии электропередачи – передача активной и реактивной мощности от источника к потребителю. К ним предъявляются определенные требования по обеспечению качества параметров режима, которые определяются пропускной способностью линии.

Максимальная пропускная способность линии – это наибольшая активная мощность, которая может быть передана по линии, определяемая выражением [12,13]:

$$P_{\max} = \frac{|U_1||U_2|}{Z_e \sin \alpha_0 l} \sin \delta, \quad (1)$$

где: U_1, U_2 – напряжение, приложенное в начале и в конце линии, соответственно, (кВ); Z_e – волновое сопротивление линии, (Ом); $\alpha_0 l$ – волновая длина линии, (электрических градусов); α_0 – коэффициент изменения фазы (угол поворота вектора напряжения при распространении волны напряжения вдоль линии, эл. град/км); l – длина линии, (км); δ – угол сдвига напряжений начала и конца линии электропередачи (градусов).

Напряжения U_1, U_2 являются режимными параметрами в узлах, системы присоединений линии в начале и в конце, включая генерирующие источники, а также различные средства регулирования типа FACTS (УШР, СТК, СТАТКОМ). В идеальном случае $U_1 = U_2$.

Режимные требования сводятся к поддержанию заданных уровней напряжения в узлах подключения и вдоль линии электропередачи. При изменении величины передаваемой мощности изменяются уровни напряжений в узлах и вдоль ЛЭП из-за увеличения потерь напряжения на активном и реактивном продольных сопротивлениях линии. Поэтому поддержание необходимых напряжений с помощью компенсирующих устройств направлено на то, чтобы компенсировать эти потери и обеспечить заданное постоянство напряжения, от которого зависит величина передаваемой мощности.

Волновое сопротивление является одной из основных характеристик линии электропередачи. Его величина определяется параметрами:

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

где: r_0 - удельное активное сопротивление проводов (Ом/км), которое определяется материалом и суммарным сечением проводов фаз ЛЭП; g_0 - удельная активная поперечная проводимость (См/км), которая определяется в основном величиной потерь на корону; x_0 - удельное продольное индуктивное сопротивление фаз линии, которое равно:

$$x_0 = \omega L_0, \quad (3)$$

где: L_0 - индуктивность провода, зависящая от параметров магнитного поля линии, а также от конструкции линии, сечения проводов, количества проводов и геометрических размеров расщепленных фаз, расстояний между фазами и габаритов линии;

b_0 - удельная емкостная проводимость, которая равна:

$$b_0 = \omega C_0, \quad (4)$$

где: C_0 - электрическая емкость проводов линии, которая зависит от параметров электрического поля линии.

Эти параметры, указанные в формулах (3) и (4) являются для многопроводных (многофазных) линий электропередачи эквивалентными параметрами, определяемыми как собственными величинами, так и взаимными составляющими, отражающими влияние проводов и других конструктивных факторов.

При прочих равных условиях, как видно из (2), волновое сопротивление тем меньше, чем меньше продольное индуктивное сопротивление и чем больше поперечная емкостная проводимость.

Из приведенного выше выражения (1), следует, что величина максимальной передаваемой по линии мощности является обратно пропорциональной значению волнового сопротивления. Таким образом, для повышения пропускной способности необходимо стремиться к максимально возможному снижению волнового сопротивления путем уменьшения индуктивного сопротивления и соответствующего увеличения поперечной емкостной проводимости (2). В режиме передачи максимальной мощности генерируемая реактивная (зарядная) мощность линии (Q_{c0}) полностью компенсирует потери реактивной мощности на продольном индуктивном сопротивлении ΔQ_{L0} , которые имеют место при передаче активной мощности по линии, то есть:

$$\Delta Q_{L0} = Q_{c0}; \quad (5)$$

$$\text{где: } Q_{c0} = U^2 \cdot b_0, \quad (6)$$

$$\Delta Q_L = I_n^2 \cdot x_0, \quad (7)$$

где I_n - ток нагрузки линии.

С учетом сказанного, можно записать:

$$U^2 \cdot b_0 = I_n^2 \cdot x_0. \quad (8)$$

Как видно из выражения (8), при уменьшении тока нагрузки снижаются потери реактивной мощности на продольном индуктивном сопротивлении линии, и, как видно из выражения (5), нарушается баланс, что приводит к избытку зарядной мощности линии, что, в свою очередь, сопровождается увеличением напряжения на линии и примыкающих узлах от заданных величин.

В связи с этим необходимо осуществлять такие регулирующие воздействия на величину зарядной мощности линии, чтобы соответственно при увеличении тока нагрузки изменять её величину.

Регулирование величины зарядной мощности линии может осуществляться за счет двух факторов: изменение собственной проводимости линии b_0 путем изменения эквивалентной емкости C_0 и за счет дополнительных средств поперечной компенсации, которыми в частности могут быть устройства FACTS. Входящая в знаменатель выражения (1) величина ($\sin \alpha_0 l$) является характеристикой электрической длины линии. Коэффициент изменения фазы (α_0) определяется выражением:

$$\alpha_0 = \sqrt{x_0 b_0} \left(1 + \frac{r_0^2}{8x_0^2} \right) \quad (9)$$

или:

$$\alpha_0 = \omega \sqrt{L_0 \cdot C_0} \left(1 + \frac{r_0^2}{8x_0^2} \right), \quad (9')$$

где L_0 , C_0 - погонные удельные индуктивность и емкость фаз линии.

Произведение $L_0 \cdot C_0$, определяющее скорость распространения электромагнитной волны, является величиной постоянной для воздушных линий электропередач переменного тока независимо от их типа. Однако $\sin \alpha_0 l$ определяется длиной линии l , и, как видно из выражения (1), чем меньше длина, тем меньше $\sin \alpha_0 l$, а, следовательно, выше пропускная способность. Если $l=0$, то линия обладает бесконечно большой пропускной способностью (но ограничена другими факторами), а при $l=1500$ км ($\sin \alpha_0 l=1$) линия по данному показателю обладает минимальной пропускной способностью.

Следующим параметром в формуле (1), определяющим максимальную величину передаваемой мощности, является $\sin \delta$, который отражает угловой сдвиг между векторами напряжения начала и конца линии. При $\sin \delta=0$ $P_m=0$. Максимальная величина передаваемой мощности обеспечивается при $\delta=90^\circ$. Угол δ определяет величину передаваемой мощности. На его значение могут также влиять устройства регулирования типа FACTS.

В частности, при значениях $\sin \alpha_0 l=1$ и $\sin \delta=1$ выражение (1) принимает вид:

$$P_{\max} = \frac{|U_1| |U_2|}{Z_e} = P_{\text{нат}} \quad (10)$$

и является выражением натуральной мощности линии $P_{\text{нат}}$.

При равенстве модулей напряжений по концам линий натуральная мощность равна

$$P_{\text{нат}} = \frac{U^2}{Z_e}. \quad (11)$$

Использование понятия натуральной мощности удобно для проведения анализа и сопоставления различных вариантов и типов электропередач, так как

она тоже может считаться показателем пропускной способности. В настоящей работе используется как та, так и другая величина.

Описанные зависимости P_{\max} и $P_{\text{нат}}$ являются характеристиками линии электропередачи. В расчетных же схемах режимов сложных энергосистем учитываются и другие устройства компенсации и регулирования, параметры которых отражаются в схемах замещения с соответствующими параметрами многополюсника. При этом и линия электропередачи будет представлена одним из многополюсников. Режимные характеристики линии электропередач, в частности распределение напряжений и токов вдоль линии, описываются соответствующими системами уравнений, которые используются для определения и некоторых параметров линии, в частности, электрических зарядов, емкостных и потенциальных коэффициентов.

Указанные взаимосвязи параметров позволяет качественно определить факторы, влияющие на отдельные составляющие выражения максимальной пропускной способности (1). Следует отметить, что величины напряжения линии и угла δ являются режимными параметрами. Что касается волнового сопротивления Z_0 , то его величина определяется конструктивными, а также режимными факторами. В дальнейшем на основе более подробного анализа определены пути создания электропередач повышенной пропускной способности с улучшенными техническими и экономическими характеристиками.

Приведенные выражения дают возможность оценить влияние факторов системного характера на пропускную способность линий электропередач переменного тока. Более наглядные зависимости влияния конструктивных факторов на величину натуральной мощности и пропускной способности получены на основании теории поля многопроводных линий электропередачи.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СВЯЗИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЛ С ЕЕ ВОЛНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ ПРИ НОРМИРУЕМОЙ ВЕЛИЧИНЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ СОСТАВЛЯЮЩИХ РАСЩЕПЛЕННЫХ ФАЗ

Определение необходимой связи различных геометрических параметров линий между собой произведены при условии фиксации максимальной величины напряженности электрического поля на поверхности расщепленных фаз на уровне 27 кВ/см. При этом выдерживается условие отсутствия общей короны на поверхности фаз линии. Определение параметров линии произведено упрощенно без учета влияния земли, тросов и пренебрегая магнитным полем внутри составляющих расщепленных фаз.

ОДНОЦЕПНЫЕ ВЛ

Средняя напряженность на поверхности расщепленной фазы определяется известным соотношением:

$$E = \frac{\tau_0}{2 \cdot \pi \cdot \xi_0 \cdot n \cdot r}, \quad (12)$$

где: τ_0 – удельный заряд фазы; $\pi = 3.1416$; ξ_0 – диэлектрическая постоянная; n – количество составляющих расщепленной фазы; r – радиус составляющих расщепленной фазы.

Средняя величина амплитуд удельных зарядов расщепленных фаз линии определяется из следующего соотношения:

$$\tau_{0\text{ср}} = C_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_n, \quad (13)$$

где: C_0 – средняя удельная емкость линии на одну фазу; U_n – номинальное напряжение линии.

Средняя удельная емкость линии на одну фазу определится из следующего уравнения.

$$C_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}{\ln \frac{D_{\text{сз}}}{R_{\text{экв}}}}, \quad (14)$$

где $D_{\text{сз}}$ – среднегеометрическое расстояние между фазами; $R_{\text{экв}}$ – эквивалентный радиус расщепленной фазы.

Среднегеометрическое расстояние между фазами определится из следующего выражения

$$D_{\text{сз}} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}}, \quad (15)$$

где D_{ij} – расстояние между i -ой и j -ой фазами.

Эквивалентный радиус расщепленной фазы определится из следующего выражения:

$$R_{\text{экв}} = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot R_p^{n-1}}, \quad (16)$$

где R_p – радиус расщепления расщепленной фазы.

Используя выражения (12-14) определяем среднюю величину амплитуд напряженности электрического поля на поверхности составляющих расщепленных фаз, имеем:

$$E_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{U_n}{\ln \frac{D_{\text{сз}}}{R_{\text{экв}}} \cdot n \cdot r}. \quad (17)$$

С учетом влияния друг на друга зарядов составляющих расщепленных фаз максимальная напряженность электрического поля на их поверхности определится следующим соотношением.

$$E_{\text{макс}} = E_{\text{ср}} \cdot k_n, \quad (18)$$

где k_n – коэффициент неравномерности электрического поля на поверхности составляющих расщепленных фаз.

Коэффициент неравномерности электрического поля на поверхности составляющих расщепленных фаз определяется из следующего выражения:

$$k_n = 1 + \frac{(n-1) \cdot r}{R_p}. \quad (19)$$

Используя выражения (17,18) и нормируя максимальную напряженность электрического поля на поверхности расщепленных фаз, определяем зависимость среднегеометрического расстояния между фазами от остальных количественных

характеристик линии (номинальное напряжение, радиус составляющей, количество расщеплений фаз, коэффициент неравномерности электрического поля на поверхности составляющих фаз и нормативная величина максимальной напряженности электрического поля на поверхности составляющих расщепленных фаз), имеем:

$$D_{сз} = e^{\left(\log(R_{\text{нор}}) + \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{U_n \cdot k_n}{E_n \cdot n \cdot r}\right)}, \quad (20)$$

Волновое сопротивление линии определится из следующего выражения:

$$z = 60 \cdot \ln \frac{D_{сз}}{R_{\text{экв}}}. \quad (21)$$

На основании последних (20-21) выражений для целого ряда одноцепных линий построены соответствующие графики связи радиуса расщепления фаз с остальными параметрами линии.

УПРАВЛЯЕМЫЕ САМОКОМПЕНСИРУЮЩИЕСЯ ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ (УСВЛ)

Так как УСВЛ может работать с любыми углами сдвига напряжений сближенных фаз цепей, то для нее выделяем режим работы с максимальной пропускной способностью, то есть режим противофазы напряжений сближенных фаз. Легко показать, что в этом режиме на электромагнитное поле на поверхности составляющих расщепленных фаз главным образом влияют заряды и токи только собственной фазы одной цепи и сближенной с нею фазы второй цепи, и практически не влияют заряды и токи не сближенных разноименных фаз. Проводя аналогию с ранее рассмотренным случаем одноцепной ВЛ для УСВЛ можно получить следующие выражения.

Для зависимости среднегеометрического расстояния между фазами от остальных количественных

характеристик линии (номинальное напряжение, радиус составляющей, количество расщеплений фаз, коэффициент неравномерности электрического поля на поверхности составляющих фаз и нормативная величина максимальной напряженности электрического поля на поверхности составляющих расщепленных фаз) имеем:

$$D_{сбл} = e^{\left(\log(R_{\text{нор}}) + \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{U_n \cdot k_n}{E_n \cdot n \cdot r}\right)}, \quad (22)$$

где $D_{сбл}$ – расстояние между сближенными одноименными фазами УСВЛ.

Для волнового сопротивления линии (на одну цепь):

$$z = 60 \cdot \ln \frac{D_{сбл}}{R_{\text{экв}}}. \quad (23)$$

Как видно из (23), для УСВЛ, работающей в режиме противофазы, применимо выражение (21), полученное для одноцепных линий, только вместо среднегеометрического расстояния между фазами (для одноцепных линий) нужно подставлять расстояние между сближенными фазами разных цепей УСВЛ.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТОВ ВАРИАНТОВ ВЛ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

В качестве рассматриваемых приняты следующие классы номинальных напряжений воздушных линий электропередачи (ВЛ): 220, 330, 500, 750 и 1150 кВ.

При выполнении расчетов параметров и характеристик учтены нормативы по максимальному допустимому превышению рабочих напряжений по отношению к номинальным значениям. Учтены также новые нормативы по габаритам воздушных линий электропередачи для условий прокладки в населенной и ненаселенной местности. Отмеченные данные указаны в таблице 1.

Таблица 1. Основные исходные данные для ВЛ переменного тока

№ п/п	U _{ном} , кВ	% повышения напряжения	U _{max} , кВ	Габарит, м		
				В населенной местности	В ненаселенной местности	В трудно-доступной местности
1	110	14,5	126	7	6	5
2	154			7,5	6,5	5,5
3	220	14,5	252	8	7	6
4	330	10	363	11	7,5	6,5
5	500	5	525	15	8	7
6	750	5	788	23	12	10
7	1150	5	1208	23	12	10

Выбор проводов воздушных линий осуществлен с учетом ограничения $E_m \leq E_n$, где E_m – максимально допустимая величина напряженности электрического поля на поверхности проводов (амплитудное значение), E_n – начальная напряженность возникновения короны.

Для ВЛ различных классов напряжений принимались конструкции расщепленных фаз, состоящих из проводов АС-240/39, АС-300/39, АС-330/43, АС-400/51. Количество составляющих в расщепленных фазах выбиралось с учетом напряжения линии и основных геометрических размеров.

Изменяемые и выбираемые были: радиус расщепления (r_p) фаз с дискретным изменением 0,1 м; 0,2 м; 0,4 м; 0,8 м обозначаемыми соответственно цифрами 1, 2, 3, 4, а также расстояние между фазами. Расчеты выполнялись для одноцепных компактных ВЛ, для двухцепных компактных ВЛ и для двухцепных самокомпенсирующихся ВЛ (УСВЛ).

В качестве конфигураций расположения фаз были приняты:

- горизонтальное для всех фаз;
- горизонтальное со смещением средней фазы у одноцепных ВЛ;

- горизонтальное со смещением двух средних сближенных фаз в УСВЛ.

Для всех указанных выше классов напряжений результаты расчетов представлены в приложении на графиках 1-20. На каждом из графиков представлены зависимости среднегеометрического расстояния между фазами и волнового сопротивления линии для различных значений радиуса расщепления (1 – 0,1 м; 2 – 0,2 м; 3 – 0,4 м; 4 – 0,8 м). При этом соблюдается во всех вариантах условие $E_m \leq 0,9 E_n$. Для каждого класса напряжения конструкция фаз выполнена из соответствующего числа составляющих и их сечения.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ

Полученные результаты наглядно показывают, что основная характеристика ВЛ различных типов – волновое сопротивление линии, которое определяет пропускную способность линии, находится в сложной зависимости от радиуса расщепления фаз, числа составляющих, среднегеометрического расстояния между фазами и сечения проводов.

При увеличении радиуса расщепления происходит снижение волнового сопротивления, что является весьма благоприятным фактором. При прочих равных условиях, чем меньше значение волнового сопротивления, тем больше величина натуральной мощности линии и, соответственно, ее пропускная способность. Вместе с тем обращает на себя внимание тот факт, что увеличение радиуса расщепления сопровождается вынужденным разнесением фаз, т.е. увеличением среднегеометрического расстояния между фазами у одноцепных компактных ВЛ и расстояния между сближенными фазами двухцепных УСВЛ. Это обусловлено автоматическим выполнением расчетного условия $E_m \leq 0,9 E_n$. Однозначно эти зависимости наблюдаются для ВЛ-220, 330, 500 кВ с исходными конструктивными данными, указанными в приложении на графиках 1-5. Для вариантов, указанных в приложении на графиках 6-20, замечена неоднозначность увеличения среднегеометрического расстояния между фазами при изменении радиуса расщепления фаз. Для этих вариантов при увеличении радиуса расщепления в

пределах 0,1÷0,4 (0,8) м происходит вначале уменьшение среднегеометрического расстояния до некоторого минимального значения, а затем его рост. Следует отметить, что это не меняет характер снижения волнового сопротивления линии.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в зависимости от поставленной цели конструкцию линии можно оптимизировать по одному или нескольким заданным критериям. Между величиной радиуса расщепления и среднегеометрическим расстоянием между фазами существует зависимость, имеющая явно выраженный минимум. Это указывает на то, что, при данных условиях, конструкция линии может рассматриваться, как оптимальная по критерию минимума расстояний между фазами, а, соответственно, и затрат на конструкции опор, на строительство и достижения минимальной ширины коридора и земельной полосы, отводимой под строительство линии. Если же главным выступает увеличенная пропускная способность, то надо идти на отступление от данного условия.

Характерным является и то, что при увеличении числа составляющих в расщепленных фазах указанный минимум смещается в сторону больших значений радиуса расщепления, что является благоприятным фактором по снижению волнового сопротивления линии, увеличению ее пропускной способности и созданию возможностей дальнейшего улучшения характеристик линий электропередач переменного тока в соответствии с заданными требованиями.

На основании проведенного анализа удалось из большого многообразия рассчитанных вариантов осуществить выборку наиболее представительных вариантов одноцепных компактных ВЛ и двухцепных УСВЛ для различных классов напряжения (220, 330, 500, 750 и 1150 кВ). Их характеристики приведены в таблице 2. Для УСВЛ параметры приведены на одну цепь. Данные варианты могут служить в качестве базовых, наиболее приближающихся к оптимальным по указанным выше критериям.

Таблица 2. Представительные варианты одноцепных компактных и двухцепных УСВЛ

Напряжение, кВ	252	363	525	788	1208
Расстояние от фазы до стойки опоры, м	3,2	3,8	5,25	8,8	11
Ширина трассы, м	УСВЛ	19,4	26,6	34,5	53,2
	Одноцепная ВЛ	12,8	15,2	21	35,2
Провода	УСВЛ	2АС240	3АС400	6АС240	7АС400
	Одноцепная ВЛ		2АС300	3АС400	5АС300
Расстояние между фазами (сближенными или средне-геометрическое), м	УСВЛ	2,2	3	4,5	6
	Одноцепная ВЛ	8,1	9,6	13,2	22,2
Волновое сопротивление, Ом	УСВЛ	223	190	180	210
	Одноцепная ВЛ		288	275	290
Удельное активное сопротивление, Ом/км	УСВЛ	0,062	0,025	0,021	0,011
	Одноцепная ВЛ		0,051	0,025	0,02
Удельное индуктивное сопротивление, Ом/км	УСВЛ	0,234	0,199	0,188	0,22
	Одноцепная ВЛ		0,302	0,288	0,304
Удельная емкостная проводимость мкСм/км	УСВЛ	4,7	5,51	5,82	4,99
	Одноцепная ВЛ		3,64	3,81	3,61
Натуральная мощность на одну цепь, МВт	УСВЛ	284	693	1531	2956
	Одноцепная ВЛ		457	1002	2141

Полученные результаты являются весьма полезными для выбора вариантов конструктивного исполнения компактных одноцепных и управляемых самокомпенсирующихся двухцепных ВЛ на стадии проектирования и обоснования применения их в энергосистемах.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ВЫБОРУ ВАРИАНТОВ КОМПАКТНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЛ НА ПРИМЕРЕ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ НАПРЯЖЕНИЕМ 220 КВ

Технические характеристики наиболее представительных вариантов ВЛ-220 кВ нового поколения.

На основе анализа отечественных и зарубежных работ в области новых разработок ВЛ-220 кВ отобраны наиболее представительные варианты ВЛ-220 кВ нового поколения. Конструкции опор данных вариантов показаны на рис. 1-3, а основные параметры и характеристики приведены в таблице 3. На рис. 1-3 показаны соответственно: одноцепная компактная трехфазная ВЛ (ОКВЛ); двухцепная компактная ВЛ(ДКВЛ) и двухцепная управляемая самокомпенсирующаяся ВЛ (УСВЛ). Опора, показанная на рис. 2, применима как для двухцепной компактной ВЛ, так и для двухцепной УСВЛ.

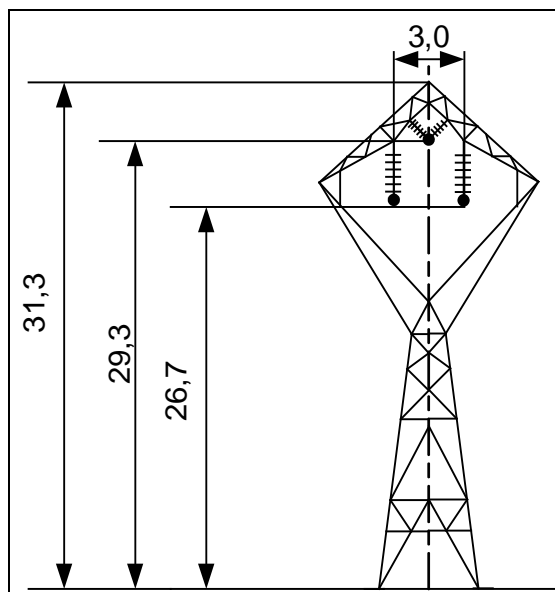


Рис. 1. Одноцепная компактная ВЛ 220 кВ

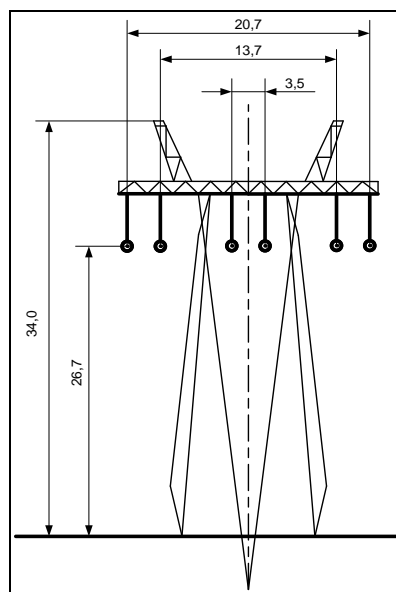


Рис. 2. Двухцепная компактная ВЛ 220 кВ

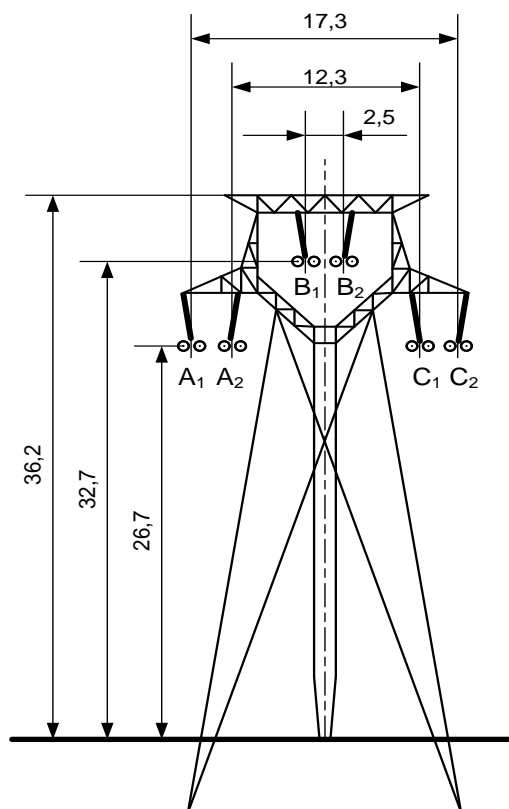


Рис. 3. Двухцепная УСВЛ 220 кВ на опорах типа «Чайка»

Таблица 3. Технические параметры ВЛ нового поколения

Тип ВЛ		Одноцепная компактная	Двухцепная компактная	Двухцепная УСВЛ	
Число цепей		1	2	2	
Марка провода		АС-300/66			
Число проводов в фазе		2			
Угол сдвига фаз θ°			120°	120°	180°
Удельные параметры линии	r_0 , Ом/км	0,0511	0,049	0,049	0,049
	x_0 , Ом/км	0,236	0,262	0,248	0,248
	$b_0 \cdot 10^{-6}$, См/км	4,66	4,32	4,44	4,44
Волновое сопротивление, Ом		226,4	123,7	118,9	107,8
Натуральная мощность, МВт		277,9	509,0	529,0	583,0
Удельная зарядная мощность, МВАр/км		0,296	0,548	0,564	0,621
Ширина коридора L_k , м		43,0	60,7	57,3	
Суммарное сечение алюминиевой части проводов S_{Al} , мм ²		1731	3462		
$P_{нат}/L_k$, МВт/м		6,46	8,39	9,23	10,17
$P_{нат}/S_{Al}$, МВт/мм ²		0,161	0,147	0,153	0,168
Базовые показатели стоимости, тыс. руб./км		1650	2613,6	2578,8	
Стоимость одного километра в расчете на 1 МВт, тыс.руб./МВт		5,93	5,13	4,87	4,42

Основными электрическими параметрами ВЛ-220 кВ нового поколения, как и ВЛ традиционного типа, являются: удельное активное сопротивление, удельное индуктивное сопротивление, удельная емкостная проводимость. Указанные параметры определяют величину натуральной мощности, которой оказалось удобно пользоваться для сопоставления различных вариантов и типов ВЛ на стадии выбора предпроектных решений. В таблице 3 приведены упомянутые параметры и характеристики рассматриваемых вариантов ВЛ-220 кВ, а также дополнительные характеристик, которые

могут приниматься во внимание при выборе вариантов ВЛ, такие как отношение величины натуральной мощности к ширине земельной полосы отчуждения, к суммарному сечению проводов, а также удельные стоимостные показатели 1 км ВЛ и отношения удельных капитальных вложений на единицу величины натуральной мощности (тыс. руб./МВт).

На рис. 4. представлены результаты сопоставлений ВЛ-220 кВ нового поколения и ВЛ-220 кВ традиционной конструкции по величине натуральной мощности.

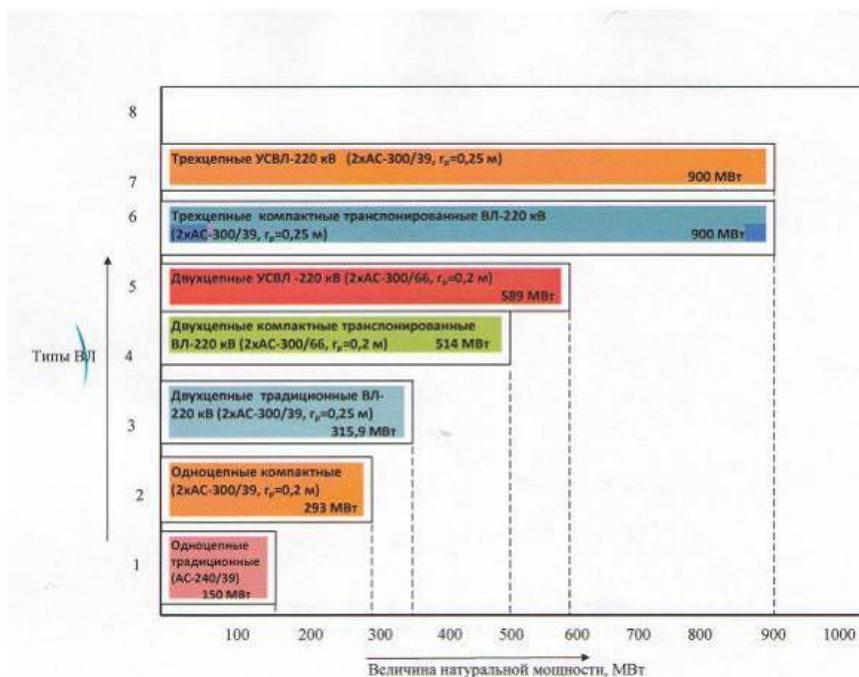


Рис. 4. Величины натуральной мощности ВЛ – 220 кВ различных типов

Приведенные данные показывают, что при принятых сопоставимых условиях ВЛ-220 кВ нового поколения по величине натуральной мощности превосходят аналогичные ВЛ-220 кВ (одноцепные и двухцепные традиционного типа) в 1,5-2 раза.

Расчетные данные свидетельствуют и о том, что двухцепные компактные ВЛ-220 кВ и двухцепные УСВЛ-220 кВ и, особенно трехцепные УСВЛ-220 кВ, по величине натуральной мощности приближаются к одноцепным трехфазным ВЛ-500 кВ обычного типа.

Проведенные предварительные технико-экономические сопоставления показали, что удельные капитальные вложения, необходимые для двухцепных и трехцепных УСВЛ, не превышают величину удельной стоимости одноцепных ВЛ-500 кВ традиционной конструкции. При этом, за счет разности стоимости регулирующего и подстанционного оборудования, выполненных на класс напряжения 220 кВ и 500 кВ, может быть получена значительная экономия затрат, если отдать предпочтение выбору вариантов ВЛ-220 кВ нового поколения.

К настоящему времени отработаны методики и программы расчетов электрических параметров ВЛ нового поколения, их технических и технико-экономических показателей, а также экологических параметров, таких как радиопомехи, акустические шумы, уровни напряженности электрического и магнитного поля в пространстве, окружающем ВЛ.

Представленные варианты ВЛ-220 кВ нового поколения удовлетворяют всем установленным нормативам и требованиям действующих правил устройства электроустановок (ПУЭ).

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ВЫБОРУ СРЕДСТВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ВЛ-220 КВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Неотъемлемыми элементами электропередач нового поколения являются устройства регулирования, относящиеся к категории FACTS. Классификация устройств FACTS представлена на рис. 5, их общие технические характеристики и функциональные возможности даны в таблице 4, а ориентировочные стоимостные показатели – на рис. 6. (на период 2009г.)

Выбор типов устройств FACTS для ВЛ 220 кВ определяется той ролью, которая возлагается на ВЛ данного класса напряжения. ВЛ 220 кВ нового поколения могут выполнять различные функции в энергосистемах:

- служить в качестве межсистемных связей для осуществления обменных потоков мощности между автономно работающими энергосистемами;
- быть внутрисистемными линиями и осуществлять передачу заданной мощности между узлами сложной замкнутой системы;
- применяться для выдачи мощности электростанций в энергосистему;
- использоваться в качестве радиальных ВЛ для электроснабжения отдаленных крупных потребителей;
- выполнять роль глубоких вводов в крупных городах и густо населенных жилых районах.

В каждом из рассмотренных случаев применения ВЛ 220 кВ необходимо учитывать конкретные требования к электропередачам данного класса напряжения и существующие общие технические ограничения (ограничения по допустимым отклонениям напряжения, ограничения по короне, акустическим шумам и радиопомехам, по уровню

напряженности поля под ВЛ вблизи поверхности земли и др.).

Выбор тех или иных устройств FACTS, их мощности и характеристик в каждом из перечисленных основных 5-ти случаев применения ВЛ 220 кВ определяется с учетом конкретных требований:

Например, в 1-ом случае применение ВЛ 220 кВ в качестве межсистемных связей устройства FACTS должны обеспечить:

- увеличение пропускной способности линии до заданного уровня, если естественная пропускная способность недостаточна, что может быть достигнуто с помощью следующих типов устройств FACTS:

УУПК - управляемые устройства продольной компенсации;

БСК - батареи статических конденсаторов;

СК - синхронные конденсаторы;

СТК - статические компенсаторы;

СТАТКОМ - статические компенсаторы реактивной мощности;

ФРТ - фазорегулирующие устройства.

- регулирование заданного уровня напряжения в примыкающих к линии узлах, достигаемое с помощью:

СТК, СТАТКОМ, СК - при необходимости повышения напряжения в узлах); при необходимости ограничения напряжения требуется установка шунтирующих реакторов (ШР), управляемых шунтирующих реакторов (УШР), СК, СТАТКОМ, реакторных групп (ВРГ).

Во втором случае применение ВЛ 220 кВ в качестве межсистемных связей отличается от первого тем, что, помимо устройств, указанных для первого варианта, необходима установка:

ФРТ - фазорегулирующих устройств;

ОРПМ - объединенных регуляторов потока мощности;

ВПТ - вставка постоянного тока;

УПК-ФРТ - комбинированных устройств УПК и ФРТ;

АСК - асинхронизированных компенсаторов.

В остальных случаях применения ВЛ 220 кВ необходима выборочно соответствующая комбинация устройств FACTS, перечисленных выше.

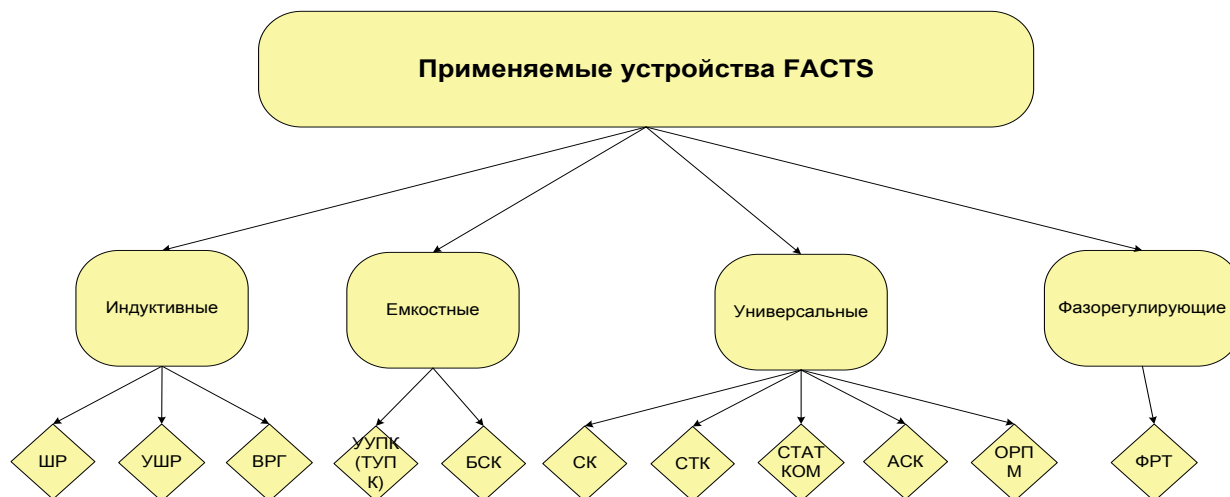


Рис.5. Классификация устройств FACTS

Таблица 4. Технические характеристики и области применения устройств FACTS различных типов

№ п/п	Название	Характеристика устройства	Область применения
1	2	3	4
1	Шунтирующий реактор (ШР)	Нерегулируемые масляные шунтирующие реакторы	Применяется для ступенчатого регулирования реактивной мощности, снижения уровней коммутационных перенапряжений, гашения дуги в паузе ОАПВ.
2	Управляемый шунтирующий реактор с подмагничиванием постоянным током (УШР)	Выполняется на основе специального трансформатора с масляным охлаждением, в составе УШР на общем сердечнике содержится сетевая обмотка реактора, компенсирующая обмотка, обмотка управления, и вне бака с УШР тиристорное выпрямительное устройство и фильтр. Быстродействие УШР определяется степенью форсировки и расфорсировки подмагничивания постоянным током и мощности выпрямительного устройства.	УШР предназначены для плавного регулирования напряжения (реактивной мощности) при мощностях, протекающих по линиям электропередачи, не превышающих натуральную, УШР могут устанавливаться как на линиях электропередачи (линейные УШР), так и на шинах подстанции, не предназначены для обеспечения требований по устойчивости. Предпочтительная область применения - распределительные сети. Возможна комбинация, когда параллельно УШР подключается компенсаторная батарея (БСК).
3	Реакторные группы, коммутируемые выключатели	Ступенчато-регулируемые реакторы, подключаемые к третичной обмотке автотрансформаторов (трансформаторов) посредством вакуумных выключателей с числом коммутаций 5000 - 10000,	Применяются для компенсации зарядной мощности линий электропередачи и узлах нагрузки для поддержания напряжения в требуемых пределах в установившихся режимах. ВРГ предназначены для

№ п/п	Название	Характеристика устройства	Область применения
1	2	3	4
	(ВРГ)	временем включения/отключения выключателя $\Delta t = 0,02 - 0,12 \text{ с}$.	ступенчатого регулирования напряжения (реактивной мощности) при мощностях, протекающих по линиям электропередачи, не превышающих натуральную. Предпочтительная область применения - распределительные сети. Возможны комбинации, когда параллельно ВРГ подключаются конденсаторные батареи (БСК).
4	Синхронные компенсаторы (СК)	Является комплексом, состоящим из синхронных машин и возбуждателя. Имеется модификация СК с бесщеточным возбуждением. Способны обеспечить регулирования реактивной мощности в пределах 100% выдача 30-50% потребления. Обладает высокой перегрузочной способностью 2-3 кратная перегрузка по току в течение 30 с.	Применяется для регулирования напряжения и повышения пределов статической и динамической устойчивости, увеличением пропускной способности электропередачи. Применим в любых электрических сетях.
5	Статические тиристорные компенсаторы (СТК)	В составе СТК реактор с воздушным охлаждением и тиристорный вентиль с воздушным или водяным охлаждением, образующие тиристорные группы (ТРГ) с плавным регулированием угла зажигания тиристоров. Параллельно с ТРГ подключена конденсаторная батарея (КБ), а иногда и фильтро-компенсирующие цепи (ФКУ). Подключается к сети ВН через третичную обмотку НН автотрансформатора или через блочный повышающий трансформатор. Минимальная величина постоянной времени регулирования реактивной мощности составляет. $\tau_{p\Sigma} = 0,01 - 0,02 \text{ с}$	Обеспечивают регулирование напряжения (реактивной мощности) при мощностях в линиях электропередачи как ниже, так и выше натуральной. Предназначены также для повышения устойчивости и пределов передаваемой по линиям электропередачи мощности. Предпочтительная область применения: распределительные и магистральные сети, межсистемные связи для целей глубокого регулирования реактивной мощности и обеспечения устойчивости. Не эффективны в «слабых» сетях.
6.	Статический компенсатор реактивной мощности на базе преобразователя напряжения (СТАТКОМ)	Состоит из преобразователя напряжения, выполненного на силовых транзисторах, обеспечивающего генерацию и потребление реактивной мощности в диапазоне $\pm 100\%$ установленной мощности устройства, без дополнительных силовых реакторов и конденсаторных батарей. Подключение к сети ВН через третичную обмотку НН автотрансформатора или через отдельный повышающий трансформатор НН/ВН.	Применяются для динамической стабилизации напряжения, увеличения пропускной способности электропередачи, уменьшения колебаний напряжения, повышения устойчивости при электромеханических переходных процессах, улучшения демпфирования колебаний в энергосистеме. Применяется в любых электрических сетях, особенно эффективен в «слабых» сетях.
7.	Фазоповоротное устройство (ФПУ)	Устройство, переключающее посредством выключателей или тиристорных ключей отпайки трансформатора, обеспечивающее регулирование фазы входного напряжения по отношению к выходному	Применяется для оптимизации в установившихся режимах потоков мощности по параллельным ЛЭП, повышения пропускной способности. Могут применяться для повышения статической и динамической устойчивости энергосистем.
8.	Асинхронизированные компенсаторы (АСК)	Является комплексом состоящим из асинхронизированных электрических машин переменного тока и статических преобразователей частоты. Содержит на роторе две и более обмоток возбуждения, благодаря чему обеспечивается возможность регулирования реактивной мощности в пределах 100% колебания. Обеспечивается также возможность регулирования не только величины, но и фазы вектора напряжения в энергосистеме. Обладают высокой перегрузочной способностью (двух – трех кратная перегрузка) по току в течение 300 сек. Возможна работа с переменной частотой вращения с маховиком на валу с целью повышения пределов динамических характеристик энергосистем.	Применяется для регулирования напряжения и повышения пределов статической и динамической устойчивости, увеличения пропускной способности электропередачи, улучшения демпфирования энергосистемы. Применяются в любых электрических сетях, особенно эффективен в «слабых» сетях.
9.	Батарея статических конденсаторов (БСК)	Устройства емкостного типа для параллельного подключения к линиям	Для увеличения их пропускной способности, сверх натуральной мощности, и регулирования уровня напряжения
10.	Управляемые устройства продольной компенсации) (УУПК, ТУПК)	Тиристорно-управляемые устройства продольной компенсации	Емкостная продольная компенсация для увеличения пропускной способности ВЛ, сверх значения натуральной мощности, регулирования параметров режимов и повышения динамической устойчивости
11.	Объединенные регуляторы потока мощности (ОРПМ)	Устройства, обеспечивающие изменение фазы напряжения на выходе по отношению к входу.	Позволяют осуществлять регулирование величины передаваемой по ВЛ мощности.

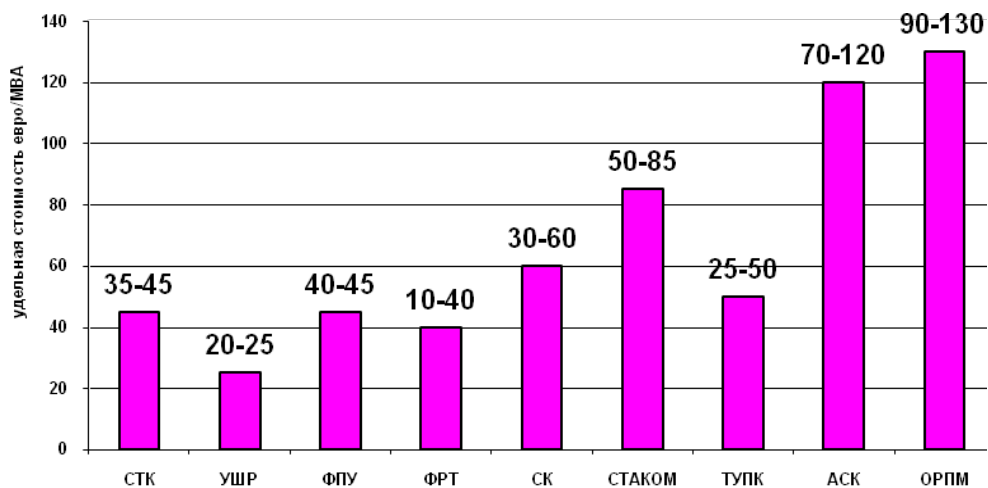


Рис. 6. Компенсирующие и управляющие устройства типа FACTS

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УСТРОЙСТВ ТИПА FACTS ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ВЛ-220 КВ

Линии электропередачи нового поколения (компактные одноцепные, двухцепные, многоцепные, а также УСВЛ) обеспечивают при сопоставимых условиях существенно большую по сравнению с ВЛ обычного типа пропускную способность, благодаря улучшенным параметрам и увеличенной натуральной мощности линии.

Естественно полагать, что применение устройств типа FACTS на ВЛ нового поколения для дальнейшего повышения пропускной способности, сверх естественного значения, будет более эффективным, чем на ВЛ традиционных типов. Доказательством этого может служить, например, критерий эффективности применения устройств FACTS

емкостного типа для увеличения пропускной способности ВЛ различного исполнения, выраженный в виде показателя:

(24)

где P_{Σ} – суммарная величина передаваемой по линии мощности, достигнутая с участием устройств FACTS;
 $P_{\text{нат}}$ – величина натуральной мощности линии;
 R – реактивная мощность компенсирующих устройств FACTS емкостного типа.

Применяя изложенный подход и используя расчетные данные режимов одной из энергосистем удалось оценить эффективность применения устройств типа FACTS на примере ВЛ-220 кВ различных типов для достижения одного и того же эффекта повышения их пропускной способности.

Данные для анализа эффективности применения устройств типа FACTS сведены в таблицу 5.

Таблица 5. Сопоставительные данные расчета эффективности применения устройств FACTS емкостного типа для увеличения передаваемой мощности на ВЛ-220 кВ различных типов

№ п/п	Наименование	Ед. изм.	Типы ВЛ-220 кВ				
			Двухцепные ВЛ-220 обычного типа	Двухцепные компакт-ные ВЛ-220	Двух-цепные УСВЛ-220	Трехцепные компакт-ные ВЛ-220	Трехцепные компакт-ные ВЛ-220
1.	Протяженность ВЛ	км	427	427	427	427	427
2	Количество цепей		2	2	2	3	3
3	Провода в фазах		1хАС-300	2хАС-300	2хАС-300	2хАС-300	2хАС-300
4	Величина натуральной мощности линии при U=220 кВ	МВт	240	391	448	563	563
5	Передаваемая мощность	МВт	570	570	570	570	870
6	Превышение передаваемой мощности по отношению к натуральной мощности ВЛ	МВт	330	179	122	0	307
7	Мощность компенсирующих устройств FACTS емкостного типа	МВАр	302	138	101	0	198
8	Коэффициент эффективности применения устройств FACTS емкостного типа	МВт/МВАр (о.е)	1,09	1,29	1,2	-	1,55

Благодаря улучшенным параметрам линии одноцепные, двухцепные, а также УСВЛ) электропередачи нового поколения (компактные одноцепные, двухцепные, а также УСВЛ) обеспечивают при сопоставимых условиях

существенно большую по сравнению с ВЛ традиционного типа пропускную способность (натуральную мощность). Поэтому применение устройств типа FACTS на ВЛ нового поколения для повышения пропускной способности более эффективно, чем применение устройств FACTS на ВЛ традиционных типов. Данные, приведенные в таблице 5, показывают, что при принятых расчетных условиях коэффициент эффективности применения устройств типа FACTS для обычных ВЛ составляет 1,09 МВт/МВАр, а для ВЛ нового поколения (1,2 – 1,5) МВт/МВАр.

Для повышения пропускной способности воздушных линий электропередачи нового поколения, сверх естественного значения, наиболее эффективно применение устройств FACTS емкостного типа: УУПК, БСК, СК, СТК, СТАТКОМ, АСК.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ УПРАВЛЯЕМЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА БАЗЕ ВЛ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Выполненные расчеты, сопоставления полученных результатов и их анализ позволяют сформулировать ряд основных технических предложений по применению ВЛ нового поколения.

Прежде всего надо отметить, что при принятии решений о применении ВЛ новых типов следует принимать во внимание то, что они обладают повышенной пропускной способностью, благодаря чему область их целесообразного применения отличается от области применения ВЛ традиционных конструкций. Основным показателем, характеризующим сопоставляемые типы ВЛ, является величина их натуральной мощности. В качестве других, не менее важных, следует также считать такие важные показатели, как удельные капитальные вложения на единицу величины передаваемой мощности, удельную площадь и ширину полосы отчуждения, а также экологические параметры, и, в первую очередь, акустические шумы, радиопомехи, уровни напряженности электрического поля под ВЛ вблизи поверхности земли.

В зависимости от значений параметров ВЛ нового поколения, конкретных расчетных и режимных условий определяются требования и к устройствам FACTS, их типу и мощности.

Технические требования к управляемым ВЛ нового поколения, созданным на базе ВЛ повышенной пропускной способности, определяются той ролью, которая возлагается на ВЛ, а также расчетными условиями и ограничениями.

В зависимости от локальных или системных требований к электропередачам должен производиться и выбор устройств FACTS, с учетом их технических и технологических возможностей.

При сопоставлениях и обосновании вариантов целесообразно рассматривать следующие типы ВЛ переменного тока:

- обычные трехфазные, одноцепные ВЛ (ООВЛ);
- обычные двухцепные ВЛ (ОДВЛ);
- одноцепные компактные трехфазные ВЛ (ОКВЛ);

- двухцепные компактные ВЛ с транспозицией фаз цепей, обеспечивающей между любыми соседними фазами угловой сдвиг векторов напряжений $\theta=120^\circ$ (ДКВЛ);

- двухцепные управляемые самокомпенсирующиеся ВЛ (УСВЛ), работающие в режимах при различных угловых сдвигах трехфазных систем векторов напряжений цепей: при фиксированных значениях $\theta=0^\circ$, $\theta=120^\circ$, $\theta=180^\circ$; или регулируемых - $\theta=0^\circ \div 120^\circ$; $\theta=0^\circ \div 180^\circ$.

- трехцепные компактные ВЛ с транспозицией фаз цепей, обеспечивающей между любыми соседними фазами угловой сдвиг напряжений $\theta=120^\circ$ (ТКВЛ), а также трехцепные УСВЛ при $\theta=0^\circ \div 120^\circ$.

Для обеспечения требуемых параметров режимов указанных ВЛ при различных рассмотренных условиях необходимо применение в том или ином сочетании устройств FACTS, обладающих свойствами емкостной или индуктивной компенсации. Под емкостной компенсацией подразумевается возможность устройств FACTS генерировать реактивную мощность, с целью покрытия недостающей зарядной мощности линии для компенсации ее потерь в линии при передаче по ней активной мощности. Под индуктивной компенсацией понимается возможность устройств FACTS потреблять избыточную зарядную мощность линии для поддержания заданных уровней напряжений в узлах энергосистемы.

Проведенные исследования позволяют на данном этапе сформулировать технические предложения по созданию и применению ВЛ различных типов и выбору для них устройств FACTS, которые по своим функциональным возможностям наиболее эффективно могут быть применены в сочетании с ВЛ повышенной пропускной способности.

Устройства FACTS в своем большинстве могут быть применены в электроэнергетических системах в сочетании с ВЛ любых типов. Все устройства FACTS, носящие емкостной характер, обеспечивают дополнительную генерацию реактивной мощности и соответствующее повышение пропускной способности ВЛ, сверх величины их натуральной мощности.

Применение устройств FACTS индуктивного типа, как правило, обусловлено необходимостью компенсации избыточной зарядной мощности, с целью поддержания заданных уровней напряжения при передаче по ВЛ активной мощности, величина которой ниже, чем значение натуральной мощности.

Применение устройств FACTS, обладающих как емкостными, так и индуктивными техническими свойствами, должно определяться на основе конкретных расчетов режимных характеристик электропередачи, а также с учетом их стоимости.

Устройства FACTS, обеспечивающие регулирование угла сдвига между системами векторов напряжений на входе и выходе, имеют свою область применения, в частности, для управления потоками мощности в замкнутых контурах энергосистемы, а также для регулирования режимов УСВЛ.

Выбор типов ВЛ в сочетании с устройствами FACTS основывается на расчетах параметров, режимных и стоимостных показателей в соответствии с заданными исходными данными и намеченной функциональной ролью электропередач.

На основании проведенного анализа функциональных признаков были сформулированы области применения ВЛ-220 кВ и выше различных типов, основными из которых являются:

1. Применение ВЛ-220 кВ и выше в качестве межсистемных транспортных связей, в том числе – для осуществления обменных перетоков мощности между автономно работающими энергосистемами или между узлами сложно замкнутой энергосистемы.
2. Применение ВЛ-220 кВ в качестве внутрисистемных распределительных ВЛ.
3. Использование ВЛ-220 кВ и выше для выдачи мощности от удаленных электростанций. При этом эффективной может оказаться замена существующих ВЛ традиционной конструкции на ВЛ нового поколения при увеличении генерируемых мощностей.
4. Применение ВЛ-220 кВ для электроснабжения удаленных крупных потребителей, в том числе замена существующих ВЛ традиционной конструкции на ВЛ нового поколения при увеличении потребляемой мощности и невозможности строительства дополнительных ВЛ.
5. Осуществление с помощью ВЛ-220 кВ глубоких вводов в крупных городах и населенных пунктах.

Каждая из указанных областей применения ВЛ-220 кВ имеет свои отличительные особенности, а также диапазоны передаваемых мощностей.

Общими требованиями к ВЛ-220 кВ во всех случаях их применения являются:

- удовлетворять всем нормативам по уровням напряжения вдоль ВЛ и в узлах примыкания;
- не превышать нормативные ограничения по экологическим параметрам;
- обеспечивать заданные величины пропускной способности при минимальных потерях мощности;
- обеспечивать заданные показатели надежности работы.

Специальными требованиями к ВЛ-220 кВ, вытекающими из особенностей указанных областей применения ВЛ-220 кВ, могут быть:

- обеспечение заданного запаса статической и динамической устойчивости электропередачи (области 1, 3);
- создание возможностей регулирования величины передаваемой мощности, включая и изменение направления передачи мощности (области 1, 2);
- изъятие минимально возможных земельных полос отчуждения под строительство ВЛ (области 4, 5).

Указанным требованиям можно удовлетворить путем выбора тех или иных типов ВЛ нового поколения и соответствующих средств регулирования типа FACTS.

Рекомендуемыми областями применения ВЛ нового поколения напряжением 220 кВ с учетом требований по пропускной способности могут служить данные по их параметрам и величине натуральной мощности. В таблице 6 приведены величины натуральной мощности для различных типов ВЛ-220.

Таблица 6. Значение натуральной мощности ВЛ-220 кВ различных типов (при $U_{расч.} = 252$ кВ)

№ п/п	Наименование типов ВЛ-220 кВ	Размерность	Величина натуральной мощности, МВт	
			На одну цепь	На линию в целом
1.	Одноцепные ВЛ-220 кВ традиционной конструкции (провода АС-330/66)	МВт	155,1	155,1
2.	Компактная одноцепная ВЛ-220 кВ (провода 2АС-300/66)	МВт	277,9	277,9
3.	Двухцепная ВЛ-220 кВ традиционной конструкции (провода АС-300/66)	МВт	152,3	304,6
4.	Двухцепная компактная транспонированная ВЛ-220 кВ (провода 2хАС-300/66)	МВт	254,5	509,0
5.	Двухцепные управляемые самокомпенсирующиеся ВЛ-220 кВ (УСВЛ-220) (провода 2хАС-300/39): при $\theta = 120^\circ$ при $\theta = 180^\circ$	МВт	264,5	529
		МВт	291,5	583
6.	Трехцепные компактные транспонированные ВЛ-220 кВ (провода 2хАС-300/39)	МВт	300	900
7.	Трехцепные управляемые самокомпенсирующиеся ВЛ-220 кВ (трехцепные УСВЛ-220 кВ с проводами 2хАС-300/39): при $\theta = 120^\circ$	МВт	300	900

Для увеличения пропускной способности приведенных типов ВЛ-220 кВ, сверх величины натуральной мощности, необходимо применение устройств FACTS емкостного типа. Расчетная мощность таких устройств может быть определена с учетом полученных результатов, а именно - каждый МВАр устройств FACTS емкостного типа обеспечивает увеличение пропускной способности ВЛ-220 кВ:

- двухцепных ВЛ обычной конструкции – на 1,09 МВт/МВАр;

- двухцепных компактных ВЛ и двухцепных УСВЛ – на 1,2÷1,3 МВт/МВАр;

- трехцепных компактных ВЛ и трехцепных УСВЛ – на 1,3÷1,5 МВт/МВАр.

Для регулирования уровня напряжения ВЛ-220 кВ при изменении величины передаваемой мощности от величины максимальной до минимальной, включая режим холостого хода, на ВЛ-220 кВ рассматриваемых типов должны быть установлены устройства FACTS индуктивного характера.

На УСВЛ-220 кВ целесообразно устанавливать, кроме указанных устройств FACTS, фазоворотные устройства (ФПУ), что позволяет в комплексе осуществлять управление параметрами режимов электропередачи, а также выполнять управление потоками мощности в замкнутых контурах энергосистемы.

ВЫВОДЫ

1. Выполнены теоретические исследования возможностей кардинального улучшения основных показателей и характеристик линий электропередачи переменного тока.

2. Одноцепные воздушные линии (ВЛ) могут быть существенно улучшены за счет применения новых конструкций, предусматривающих сближение фаз, изменения радиуса расщепления и применения специальных изолирующих подвесок на опорах. Применение данных технических решений в комплексе позволяет создавать одноцепные компактные ВЛ переменного тока, существенно (в 1,2 - 1,3 раза) превосходящие по пропускной способности ВЛ традиционного исполнения. Регулирование режимных характеристик компактных одноцепных ВЛ осуществляется с помощью дополнительных средств компенсации и регулирования.

3. В двухцепном исполнении компактные ВЛ могут быть созданы путем подвески на общих опорах двух одноцепных компактных ВЛ, не оказывающих друг на друга существенного взаимного электромагнитного влияния. Характеристики каждой из двух компактных ВЛ (трехфазных цепей) определяются параметрами собственных фаз. Пропускная способность двухцепных компактных ВЛ является суммой пропускной способности двух компактных одноцепных ВЛ. Регулирование параметров режимов двухцепных компактных ВЛ, как и одноцепных компактных ВЛ, осуществляется с помощью дополнительных средств компенсации и управления.

4. Наиболее эффективным способом улучшения характеристик двухцепных и многоцепных ВЛ является создание двухцепных и многоцепных управляемых самокомпенсирующихся ВЛ переменного тока (УСВЛ), которые воплощают в себя технические решения по компактным конструкциям, а также усиленное электромагнитное влияние цепей друг на друга, обеспечивающее повышенную (в 1,3 – 1,5 раза) пропускную способность и используемое в процессе работы для регулирования в широком диапазоне эквивалентных параметров и характеристик линий электропередачи. В УСВЛ применен новый принцип фазового регулирования углового сдвига трехфазных систем напряжений, приложенных к сближенным цепям.

5. Разработанные математические расчетные модели позволили выполнить серию расчетов для ВЛ различных типов и классов напряжений в пределах от 220 до 1150 кВ. При этом выявлены следующие закономерности:

- при увеличении радиуса расщепления фаз требуется изменение среднегеометрического расстояния между фазами компактных ВЛ и между сближенными фазами разных цепей в вариантах УСВЛ, по условиям выполнения основного требования не превышения уровня напряженности электрического поля на поверхности проводов, сверх заданного. Для дальнейшего снижения волнового сопротивления линии с целью соответствующего увеличения натуральной мощности и пропускной способности, а также достижения при этом максимально возможной компактности линии электропередачи, необходимо идти на увеличение числа составляющих в расщепленных фазах.

6. Выявлены возможности оптимизации конструкций ВЛ рассматриваемых типов по различным критериям и создания электропередач новых типов с наперед заданными улучшенными параметрами, характеристиками и качественно новыми свойствами.

7. Использование многоцепных ВЛ нового поколения позволяет осуществлять передачу большей мощности без увеличения класса напряжения. Исследования показали, что натуральная мощность трехцепной УСВЛ-220 кВ достигает мощности одноцепной ВЛ-500 кВ традиционной конструкции. Удельная стоимость одноцепной ВЛ-500 кВ и стоимость трехцепной УСВЛ-220 кВ в расчете на 1 МВт/км практически одинаковы. Однако при использовании УСВЛ экономия земельных угодий составляет около 40 %. При указанных условиях основной выигрыш достигается за счет удешевления стоимости подстанций 220 кВ более чем в 1,5 раза по отношению к подстанциям 500 кВ.

8. Увеличение пропускной способности электрической сети за счет применения ВЛ нового поколения в сочетании с устройствами FACTS оказывается одним из наиболее экономичных средств развития электрических сетей, поскольку позволяет снизить затраты на передачу мощности и энергии за счет уменьшения удельных затрат на строительство ВЛ и более эффективного использования устройств регулирования. При этом надо учитывать

дополнительные эффекты, за счет повышения эффективности использования проводникового материала линии и сокращения площади земельных угодий, отчуждаемых под ВЛ. Таким образом,

создание электропередач нового поколения может быть рекомендовано для дальнейшего развития энергосистем.

ПРИЛОЖЕНИЕ

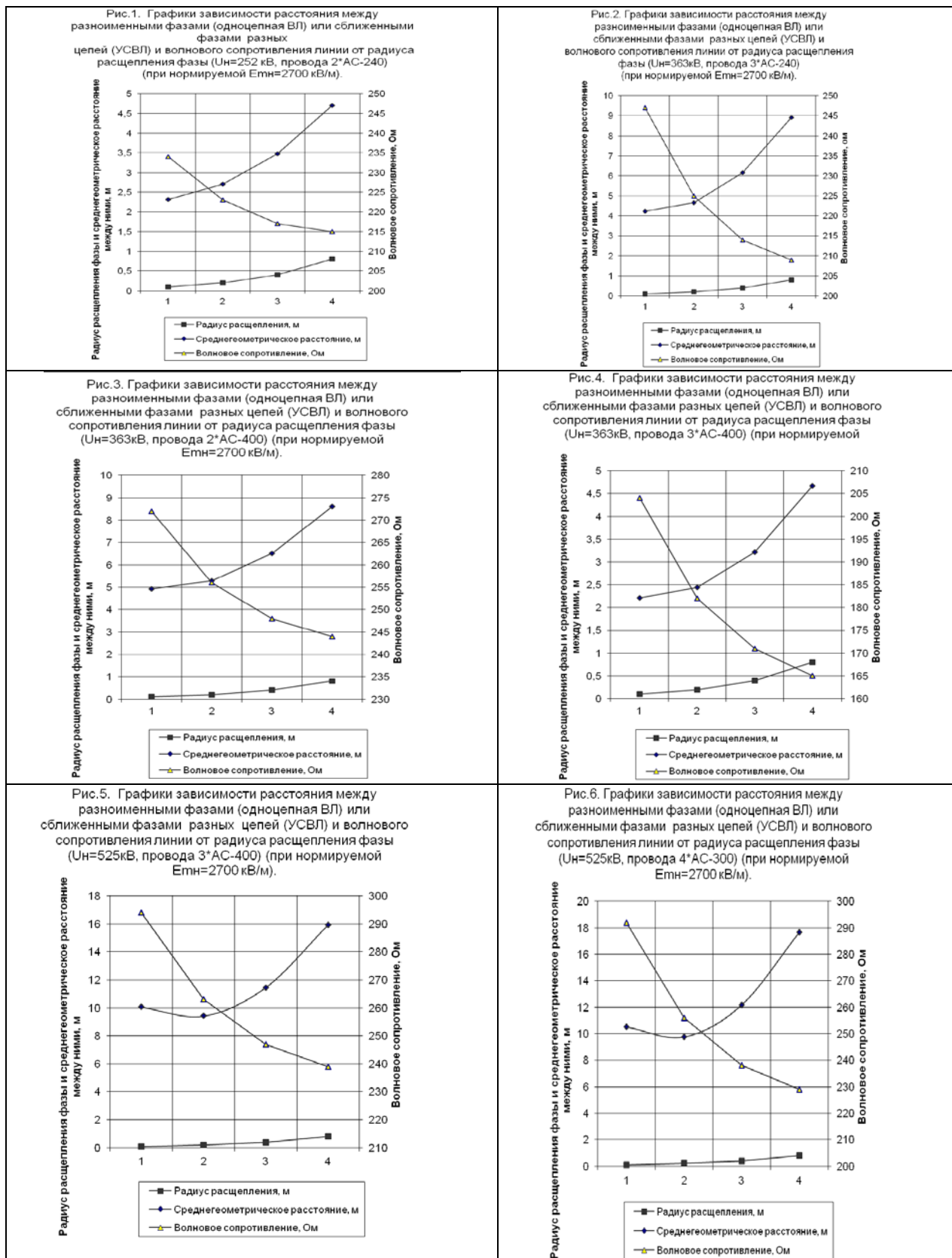


Рис. 13. Графики зависимости расстояния между разноименными фазами (одноцепная ВЛ) или сближенными фазами разных цепей (УСВЛ) и волнового сопротивления линии от радиуса расщепления фазы ($U_n=788\text{кВ}$, провода $7^*AC-400$) (при нормируемой $E_{\text{нн}}=2700\text{кВ/м}$).

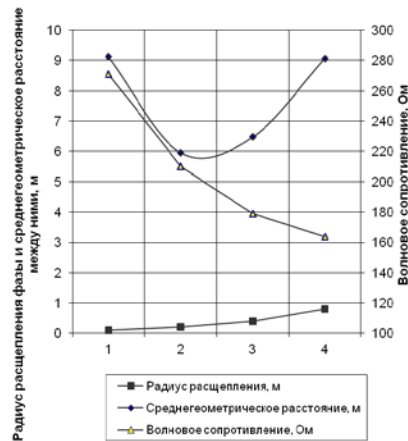


Рис. 14. Графики зависимости расстояния между разноименными фазами (одноцепная ВЛ) или сближенными фазами разных цепей (УСВЛ) и волнового сопротивления линии от радиуса расщепления фазы ($U_n=1208\text{кВ}$, провода $9^*AC-400$) (при нормируемой $E_{\text{нн}}=2700\text{кВ/м}$).

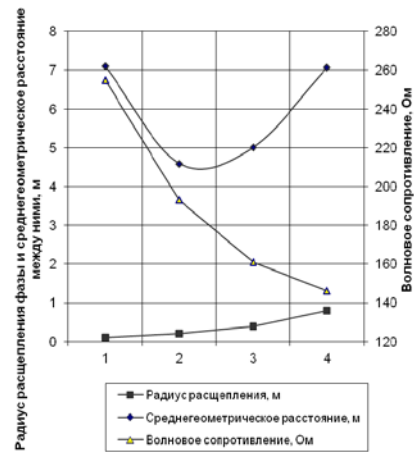


Рис. 15. Графики зависимости расстояния между разноименными фазами (одноцепная ВЛ) или сближенными фазами разных цепей (УСВЛ) и волнового сопротивления линии от радиуса расщепления фазы ($U_n=1208\text{кВ}$, провода $8^*AC-400$) (при нормируемой $E_{\text{нн}}=2700\text{кВ/м}$).

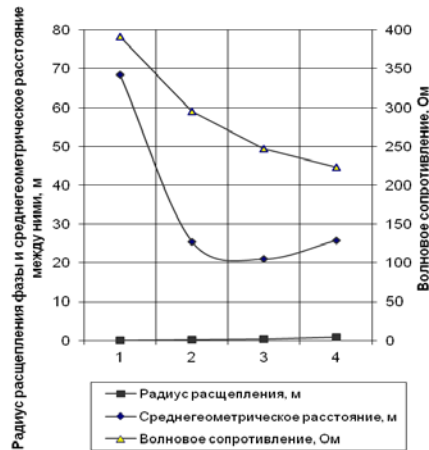


Рис. 16. Графики зависимости расстояния между разноименными фазами (одноцепная ВЛ) или сближенными фазами разных цепей (УСВЛ) и волнового сопротивления линии от радиуса расщепления фазы ($U_n=1208\text{кВ}$, провода $9^*AC-400$) (при нормируемой $E_{\text{нн}}=2700\text{кВ/м}$).

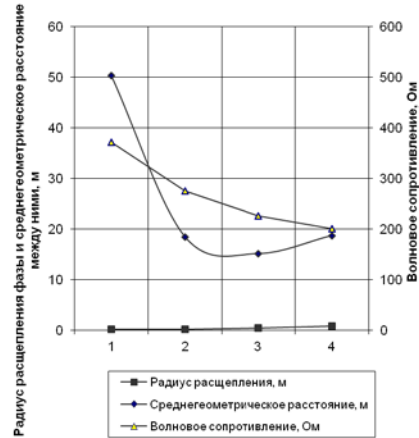


Рис. 17. Графики зависимости расстояния между разноименными фазами (одноцепная ВЛ) или сближенными фазами разных цепей (УСВЛ) и волнового сопротивления линии от радиуса расщепления фазы ($U_n=1208\text{кВ}$, провода $10^*AC-400$) (при нормируемой $E_{\text{нн}}=2700\text{кВ/м}$).

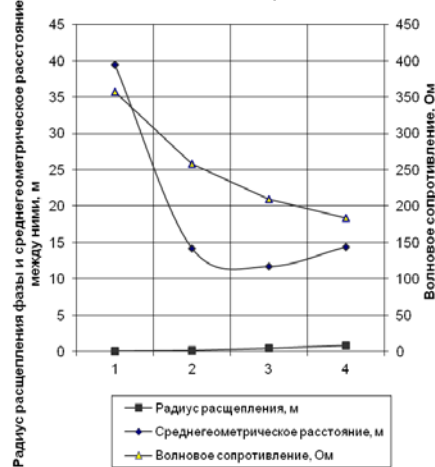
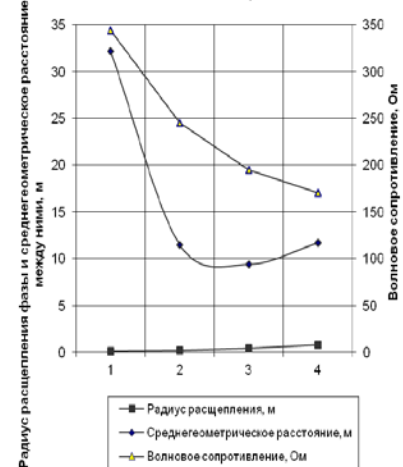
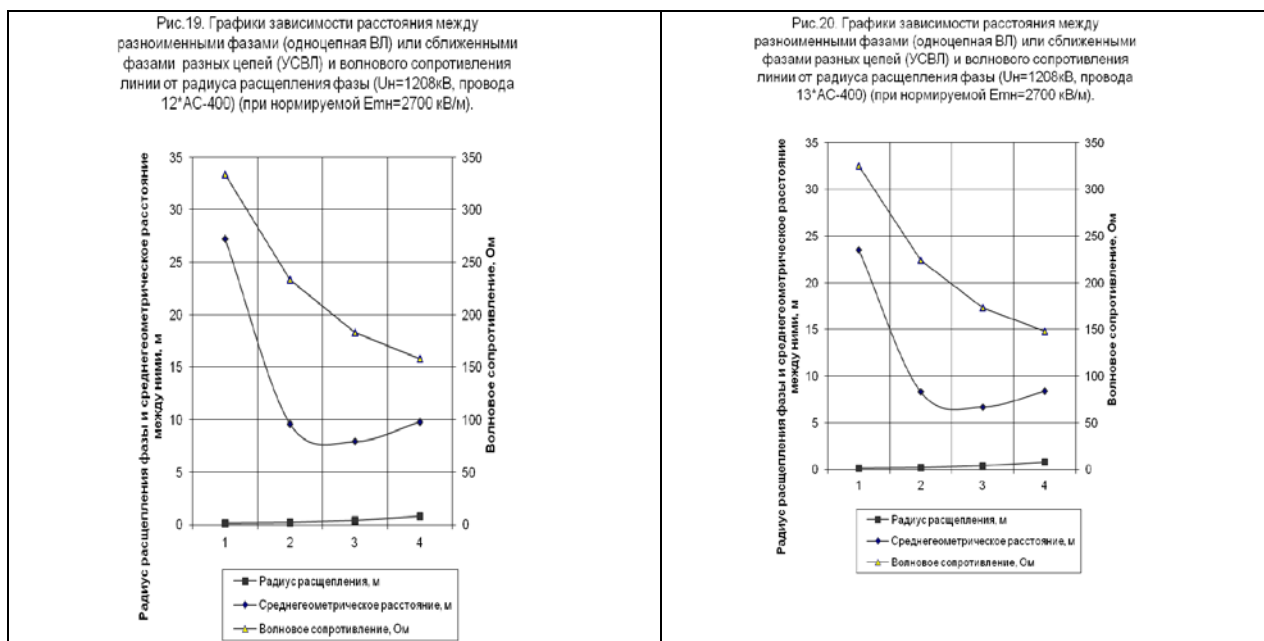


Рис. 18. Графики зависимости расстояния между разноименными фазами (одноцепная ВЛ) или сближенными фазами разных цепей (УСВЛ) и волнового сопротивления линии от радиуса расщепления фазы ($U_n=1208\text{кВ}$, провода $11^*AC-400$) (при нормируемой $E_{\text{нн}}=2700\text{кВ/м}$).





ЛИТЕРАТУРА

- [1]. *Электропередача переменного тока* / В.М. Постолатий, В.А. Веников, Ю.Н. Астахов, Г.В. Чалый, Л.П. Калинин. А.с. 566288 (СССР). / Заявл. 21.03.74. № 2006496. Оpubл. В Б.И., 1977, № 27.
- [2]. *Электропередача переменного тока* / Постолатий В.М., Веников В.А., Астахов Ю.Н., Чалый Г.В., Калинин Л.П.
- [3]. Патент США № 4001672, 1977; Патент ГДР № 116990, 1976; Патент Франции № 7508749, 1977; Патент Англии № 1488442, 1978; Патент Швеции № 75032268, 1978; 3. Патент Канады № 10380229, 1978; Патент ФРГ № 2511928, 1979; Патент Японии № 1096176, 1982.
- [4]. *Управляемые линии электропередачи* / Ю.Н. Астахов, В.М. Постолатий, И.Т. Комендант, Г.В. Чалый. Под ред. В.А. Веникова. – Кишинев: Штиинца, 1984. – 296 с.
- [5]. Александров Г.Н., Евдокунин Г.А., Подпоркин Г.В. *Параметры воздушных линий электропередачи компактной конструкции*. – Электричество, 1982, № 4, с. 10-17.
- [6]. Ю.П. Рыжов. *Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения*: учебник для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 488 с., ил.
- [7]. В.М. Постолатий, Е.В. Быкова. Эффективность применения управляемых самокомпенсирующихся высоковольтных линий электропередачи и фазорегулирующих устройств трансформаторного типа. *Электричество*, 2010 г., №2, стр. 7-14.
- [8]. *Управляемые электропередачи*. Выпуск № 8 (23), труды Института энергетики АН Молдовы за 2001-2007 гг. Составители: д.х.т.н., академик Постолатий В.М., д.т.н. Быкова Е.В. Кишинев, 2007. 234 с.
- [9]. Постолатий В.М. *Научная школа в области управляемых электропередач. Этапы исследований и библиография*. Акад. наук Молдовы, Ин-т энергетики. – К.: Б.И., 2012 (Tipogr. AŞM). - 200 с. (Серия управляемые электропередачи, книга № 1, ISBN 978-9975-62-317-9).
- [10]. Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г. *Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах*. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011, - 312 с. ил.
- [11]. Долгополов А.Г., Кондратенко Д.В., Уколов С.В., Постолатий В.М. *Управляемые шунтирующие реакторы для электрических сетей*. Problemele Energeticii Regionale. Акад. Наук Молдовы, Ин-т энергетики. Tipogr. AŞM, 2011, № 3 (17), p. 3-23.
- [12]. В.В. Дорофеев. Развитие электроэнергетической системы России с использованием принципов активно – адаптивной сети. Доклады 6-ой Международной конференции ТРАВЭК, Москва, 2010.
- [13]. Веников В.А. *Дальние электропередачи*. Госэнергоиздат, 1960, 311 с.
- [14]. Ботвинник М.М., *Сильное регулирование возбуждения и асинхронизированные машины*. Предисловие к книге Э.Л. Бронштейн, Ю.Г. Шакарян. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. -160 с.

Сведения об авторах:

Постолатий Виталий Михайлович, д.х.т.н, академик АН Молдовы, заведующий Лабораторией управляемых электропередач Института энергетики АНМ. Сфера научных интересов: электрические станции, сети и системы и управление ими, управляемые, гибкие, компактные электропередачи, современные средства регулирования, энергетическая безопасность, общие вопросы энергетики.

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.

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, заместитель генерального директора НТЦ «Электроэнергетика» (ВНИИЭ), г. Москва, д.т.н., профессор. Сфера научных интересов: электрические станции, сети и системы и управление ими, управляемые электропередачи, современные средства и системы регулирования, сверхпроводящие кабельные линии электропередачи, электропривод, моделирование процессов в энергетике.

Тимашова Лариса Владимировна, начальник центра электротехнического оборудования НТЦ «Электроэнергетика» (ВНИИЭ), г. Москва. Сфера научных интересов: электрические сети и системы и управление ими, управляемые электропередачи, современные средства регулирования, электротехническое оборудование, климатология, проблемы экологии.

Карева Светлана Николаевна, инженер Центра электротехнического оборудования НТЦ «Электроэнергетика», (ВНИИЭ), г. Москва. Сфера научных интересов: электрические сети и системы и управление ими, управляемые электропередачи, современные средства регулирования, электротехническое оборудование, техника высоких напряжений..