



УДК 621.311

КОМПАКТНЫЕ УПРАВЛЯЕМЫЕ САМОКОМПЕНСИРУЮЩИЕСЯ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Постолатий В.М., д.т.н.,

Быкова Е.В., к.т.н.

Институт Энергетики Академии Наук Молдовы,

Тел: +373 22 735388; E-mail: vpostolati@rambler.ru

Аннотация - изложены принципиальные основы создания и приведены результаты исследований и разработок линий электропередачи нового типа – компактных управляемых самокомпенсирующихся высоковольтных линий электропередач и дана оценка возможных перспектив и эффективности применения предложенных вариантов электропередач нового типа в энергосистемах.

Ключевые слова: компактные управляемые самокомпенсирующиеся линии электропередачи, фазорегулирующие устройства, средства регулирования.

Проблемы в области передачи электроэнергии

Основными техническими проблемами развития современных электроэнергетических систем являются проблемы повышения пропускной способности электропередач, управление режимами энергосистем, обеспечение статической и динамической устойчивости, снижение потерь мощности и энергии, уменьшение экологического влияния.

Проблема снижения капитальных вложений на строительство линий электропередач, сетей и подстанций и другие энергетические объекты, уменьшение потерь электроэнергии и эксплуатационных затрат, являются основным экономическими проблемами.

Выполненные исследования и анализ показали, что реально имеются значительные возможности улучшения технических и экономических показателей линий электропередач переменного тока.

Это предлагается реализовать путем создания управляемых многоцепных (и в частности – двухцепных) самокомпенсирующихся высоковольтных линиях электропередачи (УСВЛ).

Цель работы Настоящая работа имеет своей целью изложить результаты исследований электропередач нового типа – управляемых самокомпенсирующихся высоковольтных линий (УСВЛ).



Они позволяют значительно повысить пропускную способность, создать принципиально новые возможности управляемости энергосистем и улучшения их технико – экономических показателей.

Тематика УСВЛ особенно актуальна в настоящее время в связи с интенсивным развитием исследований и разработок так называемых гибких электропередач переменного тока FACTS [1].

Формированию основных концептуальных положений создания УСВЛ предшествовали работы в области исследований разомкнутых линий [2, 3], а также результаты теоретических и экспериментальных исследований разомкнутых и полуразомкнутых линий электропередач [4-8] дальнейших работ в области управляемых самокомпенсирующихся линий электропередачи [9-11] и фазорегулирующих устройств [12, 13].

Большое значение для разработок вариантов УСВЛ и предложений по их практическому использованию имеют результаты исследований и разработок современных средств компенсации и регулирования [13-15].

Благодаря этому удается обеспечить эффективное управление режимами УСВЛ и замыкающих узлов энергосистем при любом заданном диапазоне величины и направлении передаваемой мощности.

В данной работе освещается ряд аспектов, связанных с направлением исследований и разработок в области УСВЛ.

Основные результаты исследований, этапы исследований

Исследования в области УСВЛ были начаты в 1966 г. Отделом Энергетической кибернетики Академии наук Молдовы, совместно с кафедрой электрических систем Московского Энергетического Института (МЭИ).

В дальнейшем они были продолжены с участием ряда других научно-исследовательских, проектных и производственных организаций. Работы в области УСВЛ велись при активной поддержке Отделения физико-технических проблем энергетики Академии наук, а также Государственного Комитета по науке и технике СССР.

К настоящему времени выполнены научные исследования и разработки вариантов двухцепных УСВЛ различных классов напряжения. Сопоставлены их технических и экономических показателей с другими вариантами. Показано преимущество УСВЛ по целому ряду основных показателей по сравнению с традиционными ВЛ.

Известно, что предел передаваемой по линии мощности, являющийся показателем величины пропускной способности линии электропередачи, определяется выражением

$$P_m = \frac{|\dot{U}_1| \cdot |\dot{U}_2|}{Z_c \cdot \sin \alpha_0 l} \cdot \sin \delta. \quad (1)$$



Различные средства регулирования (относящиеся к оборудованию FACTS) применяют для воздействия на параметры режимов в отдельных узлах энергосистемы, в том числе и в узлах присоединения линий электропередачи.

При этом они могут оказывать влияние:

- на напряжение в начале (\dot{U}_1) и в конце (\dot{U}_2) линии электропередачи (УШР, ИРМ, СТК, СТАТКОМ и др.);

- на величину угла (δ) сдвига напряжений начала и конца линии электропередачи (объединенные регуляторы потока мощности – ОРПМ, тиристорно-управляемые последовательно включенные компенсаторы – ТУПК, УРК, ФРТ-УПК и др.).

Однако ни одно из указанных средств не может воздействовать на значение волнового сопротивления линии (Z_C). Его величина зависит только от параметров самой линии электропередачи и, в первую очередь, от удельного индуктивного сопротивления и удельной емкостной поперечной проводимости. Они определяются типом линии, ее конструкцией и параметрами электромагнитного поля.

При прочих равных условиях эффект от регулирующих воздействий указанных выше средств находится в обратнопропорциональной зависимости от величины (Z_C), т.е. чем меньше величина (Z_C) тем больший эффект по увеличению P_m линии электропередачи достигается при одном и том же регулирующем воздействии с помощью того или иного устройства регулирования (УР), и наоборот.

Проведенный анализ показал, что создавать эффективные управляемые электропередачи большой пропускной способности с глубоким диапазоном регулирования параметров и режимных характеристик становится возможным на базе применения электропередач нового типа с уменьшенным и регулируемым волновым сопротивлением в комплексе с установкой современных устройств и систем регулирования. Одним из перспективных направлений решения указанных задач является создание компактных управляемых самокомпенсирующихся высоковольтных линий электропередачи переменного тока (УСВЛ).

Принципиальная новизна и основная физическая сущность компактных управляемых самокомпенсирующихся линий электропередачи.

Компактные управляемые самокомпенсирующиеся высоковольтные линии электропередачи (УСВЛ) являются многопроводными многоцепными линиями переменного тока.

Для них применимы основы теории электропередач переменного тока, а именно: для описания происходящих в них процессов, проведения расчетов режимов, выбора основных технических решений. Вместе с тем, УСВЛ имеют свои особенности и отличия. Это по-



требовало дополнительных разработок новых методик расчета и новых подходов к выбору основных схем, конструкции и аппаратного оснащения.

Известно, что основные технические характеристики многопроводных линий электропередач определяются свойствами проводниковых материалов и параметрами электромагнитного поля, образуемого вокруг проводников в пространстве, занимаемом линией электропередачи.

Из теоретических основ электротехники [16] известно, что векторные величины – напряженность электрического поля (E) и магнитного (H) определяют плотность потока мощности в электромагнитном поле (Π)

$$\Pi = E \times H . \quad (2)$$

Основываясь на общей теории электромагнитного поля [16] в работе [17] было получено выражение суммарного потока вектора мощности многопроводной линии электропередачи для самого общего случая, которое имеет следующий вид

$$\begin{aligned} -\Pi_{\Sigma} = & \sum_{i=1}^n \sigma_{inp} E_{inp}^2 \pi r_0^2 l - j \frac{\omega l}{\varepsilon \varepsilon_0 2\pi} \sum_{i=1}^n q_i^2 \ln \frac{R_1}{r_0} + \\ & + j \frac{\omega l \mu \mu_0}{2\pi} \sum_{i=1}^n I_i^2 \ln \frac{R_1}{r_0} = P_{\theta\Sigma} - jQ_{C\Sigma} + jQ_{L\Sigma} \end{aligned} , \quad (3)$$

где E_{inp} – продольная составляющая напряженности электрического поля внутри i -го провода;

σ_{inp} – удельная электрическая проводимость провода;

r_0 – радиус провода;

l – длина линии;

ω – угловая частота, рад/с;

ωl – скорость распространения электромагнитной волны, м/с (l – размерность м/рад);

ε_0 электрическая постоянная;

ε – относительная электрическая проницаемость среды;

μ_0 – магнитная постоянная;

μ – относительная магнитная проницаемость;

q_i – заряд i -го провода;

R_1 – радиус некоторого цилиндра, поверхность которого ограничивает объем пространства вокруг провода, в котором происходит изменение энергии поля;

I_i – ток в i -том проводе;

n – число проводов (фаз) линии;

$P_{\theta\Sigma}$ – суммарные тепловые потери в проводах линии;



$Q_{C\Sigma}$ – суммарная мощность электрического поля линии;
 $Q_{L\Sigma}$ – суммарная мощность магнитного поля линии.

Мощности магнитного и электрического полей имеют обратные знаки, что свидетельствует о их обменном характере.

Для режима натуральной мощности имеет место равенство

$$|-jQ_{C\Sigma}| = |+jQ_{L\Sigma}|. \quad (4)$$

Из выражения (3) при условии (4) было найдено выражение натуральной мощности многопроводной линии

$$P_H = v \cdot U \sum_{i=1}^n q_i \cos(\gamma_i - \alpha_i), \quad (5)$$

где v – скорость распространения электромагнитной волны;

$U=U_i$ – напряжение фазного провода;

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

Приведенные выражения (3, 5) показывают каким образом суммарный поток вектора мощности линии зависит от различных факторов.

Они позволяют выявить наиболее влияющие параметры и выполнять оптимизационные расчеты, осуществлять выбор конфигураций расположения фаз, конструкции и угловых сдвигов векторов напряжений фаз, которые в комплексе обеспечивают максимум функции (P_H), с учетом заданных ограничений.

Приведенные выражения позволяют также определить обобщенные характеристики линий различного типа и провести их сопоставления.

На основании исследований и анализа влияющих факторов установлено, что для обеспечения максимальной величины натуральной мощности линии необходимо максимально увеличить суммарный заряд линии.

При этом линии будут обладать максимальной зарядной мощностью. Это становится возможным, если сблизить фазы линии между собой и создать максимальный угловой сдвиг (θ) между векторами напряжений, приложенных к фазам.

Вместе с тем, при малых нагрузках линии и холостом ходе необходимо обеспечить режим, при котором зарядная мощность линии будет иметь минимальное значение. Это условие можно выполнить, если осуществлять регулирование величины суммарного заряда линии. Для этого необходимо уменьшать (в пределе до 0) угловой сдвиг между векторами напряжений сближенных фаз.

Таким образом, для повышения пропускной способности и улучшения показателей линий необходимо изменить их параметры. Это потребует осуществления ряда новых технических решений, касающихся конструкции, схем соединений, способов и средств управления.

Весь комплекс новых технических решений, сформулированных на основании этих результатов нашел свое воплощение в предложенных УСВЛ, которые отличаются от обычных линий по своему исполнению и принципу работы [5-7]. Исходными для анализа и проведения исследований приняты многопроводные многофазные воздушные линии электропередачи.

При произвольном расположении проводов (и фаз) и приложенных векторах напряжений и протекающих токов электромагнитное поле имеет также произвольные параметры. Картина электромагнитного поля двухпроводной линии показана на рис. 1, а многопроводной – на рис. 2.

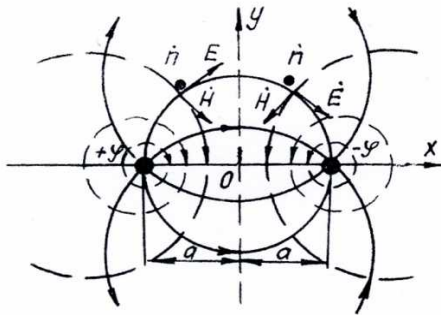


Рис. 1. Конфигурация электромагнитного поля проводов двухпроводной линии электропередачи

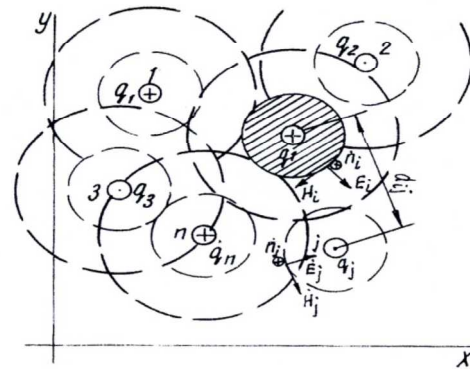


Рис. 2. Конфигурация электромагнитного поля проводов n-проводной линии электропередачи

Задача состоит в том, чтобы в n-проводной (n-фазной) линии проводники расположить так, чтобы при заданных векторных величинах напряжений, приложенных к указанным проводникам, получить максимальную величину суммарного потока вектора мощности, определяемую выражением (3).

Показателем пропускной способности линии может наглядно служить величина натуральной мощности линии, определяемая выражением (5).

Для получения максимальной пропускной способности линии в соответствии с выражением (5) необходимо обеспечить максимальное значение суммы зарядов всех проводников линии.

В принципе, задача является оптимизационной.



Величины зарядов проводников (qi) зависят от значений напряжения (Ui) и эквивалентной емкости (Si), которая, в свою очередь, определяется геометрическим расположением проводников и их сечением.

При поиске и обосновании вариантов конструкции линии, обладающей максимальной пропускной способностью, необходимо учитывать ряд ограничений. К ним, в первую очередь, относятся ограничения:

- по диэлектрической прочности воздушных промежутков провод-провод (фаза-фаза);
- по предельно допустимой величине напряженности электрического поля на поверхности проводов;
- по условиям безопасности персонала при обслуживании;
- соблюдение существующих нормативов по экологии;
- возможности практической реализации и применения освоенных элементов конструкции и систем оборудования;
- по стоимостным показателям и затратам при эксплуатации;
- соответствие существующим нормам и требованиям, установленным правилами устройства и технической эксплуатации электроустановок (ПУЭ) и ПТЭ).

Одним из принципиальных при создании компактных ВЛ является вопрос, насколько можно сближать провода (фазы) линий электропередач между собой.

Согласно действующим нормам [24, 25] минимально допустимые расстояния между фазами ВЛ определяются с учетом максимальных значений рабочих напряжений, а также с учетом величин коммутационных и грозовых перенапряжений.

Конструкции любых, разрабатываемых и создаваемых вариантов ВЛ, в том числе и компактных УСВЛ, должны рассчитываться с одной и той же нормируемой кратностью перенапряжений. Требования для новых ВЛ, как и традиционных остаются одинаковыми.

Рекомендуемые согласно ПУЭ [24, 25] минимально допустимые междуфазовые расстояния, а также полученные в результате расчетов зависимости для ВЛ различных классов напряжения приведены на рис. 3.

Как видно из приведенных данных, минимально допустимые расстояния между фазами ВЛ по максимальным междуфазовым рабочим напряжениям в 3-3,5 раза меньше, чем принимаемые на практике для традиционных конструкций. По коммутационным и грозовым перенапряжениям они практически в 2 раза меньше.

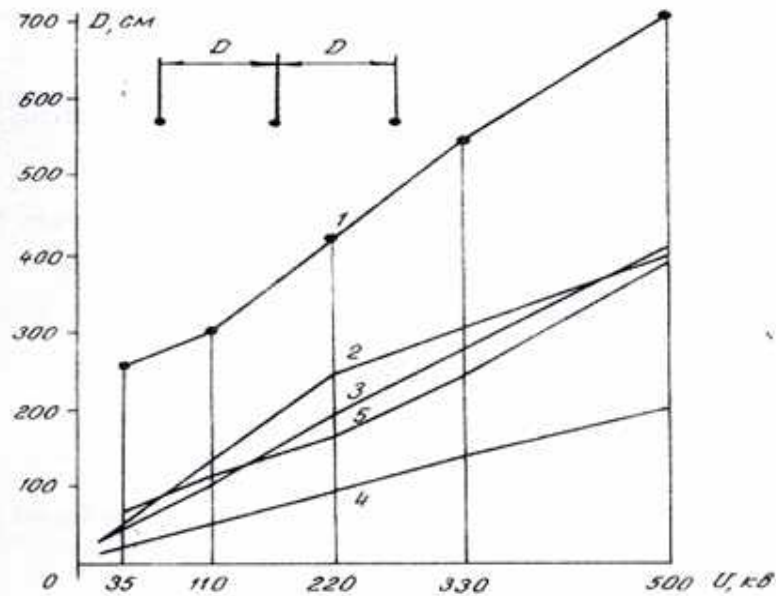


Рис. 3. Минимально допустимые расстояния между фазами ВЛ согласно ПУЭ: 1 – принимаемые для ВЛ обычной конструкции; 2, 3, 5 – по коммутационным и грозовым перенапряжениям; 4 – по максимальным рабочим напряжениям.

Компактные конструкции возможны как для одноцепных трехфазных ВЛ, так и для двухцепных и многоцепных линий.

На рис. 4 показан фрагмент конструкции двух сближенных фаз, которые приняты в качестве основного технического решения для компактных ВЛ.

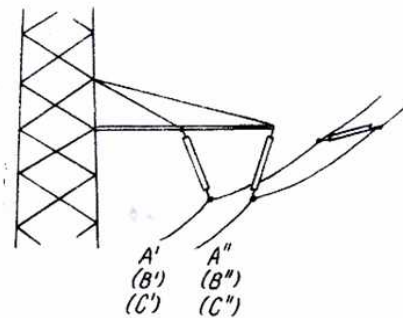


Рис. 4. Фрагмент конструкции двух сближенных фаз компактной ВЛ: А', В' С' - возможные фазы одной цепи; А'', В'', С'' - возможные фазы второй цепи; в пролете – изоляционный элемент (распорка или стяжка).

При выборе минимального значения расстояний между фазами важно учесть возможные отклонения проводов от их первоначального расположения при воздействии неблагоприятных атмосферных факторов, при возникновении качания и пляски проводов.

Для предотвращения этого между сближенными фазами в пролетах предусматривается установка изолирующих элементов (распорки или стягивающих гирлянд изоляторов). Возможно применение специальных подвесок проводов на опорах, например, с помощью V-образных гирлянд изоляторов или крепление их на изолирующих траверсах. Именно такие решения находят свое применение при создании одноцепных трехфазных компактных ВЛ.

Для двухцепных линий электропередачи с учетом указанных выше ограничений и требований, а также доступности практической реализации и удобства эксплуатации наиболее целесообразны конструкции с горизонтальным расположением фаз.

Возможная конфигурация расположения фаз компактной УСВЛ показана на рис. 5, 6. Там же показан способ, каким образом из пространственного произвольного расположения фаз многопроводной линии сформировать компактную двухцепную УСВЛ.

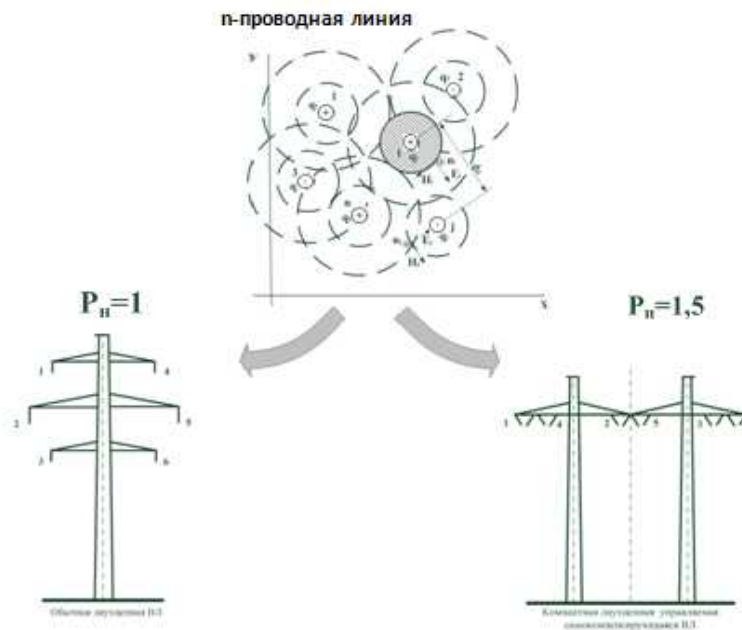


Рис. 5. Исходные варианты опор двухцепных ВЛ: обычной конструкции – слева, УСВЛ – справа

В отличие от двухцепной обычной ВЛ, для которой фазы одной трехфазной цепи располагаются по одну сторону стойки опоры (на рис. 5, 6 – слева) при значительном расстоянии между цепями и фазами самих цепей, в цепи.

Между сближенными фазами отсутствуют заземленные элементы в варианте компактной двухцепной УСВЛ фазы располагаются парами, в которых одна фаза принадлежит первой трехфазной цепи, а вторая – второй цепи.

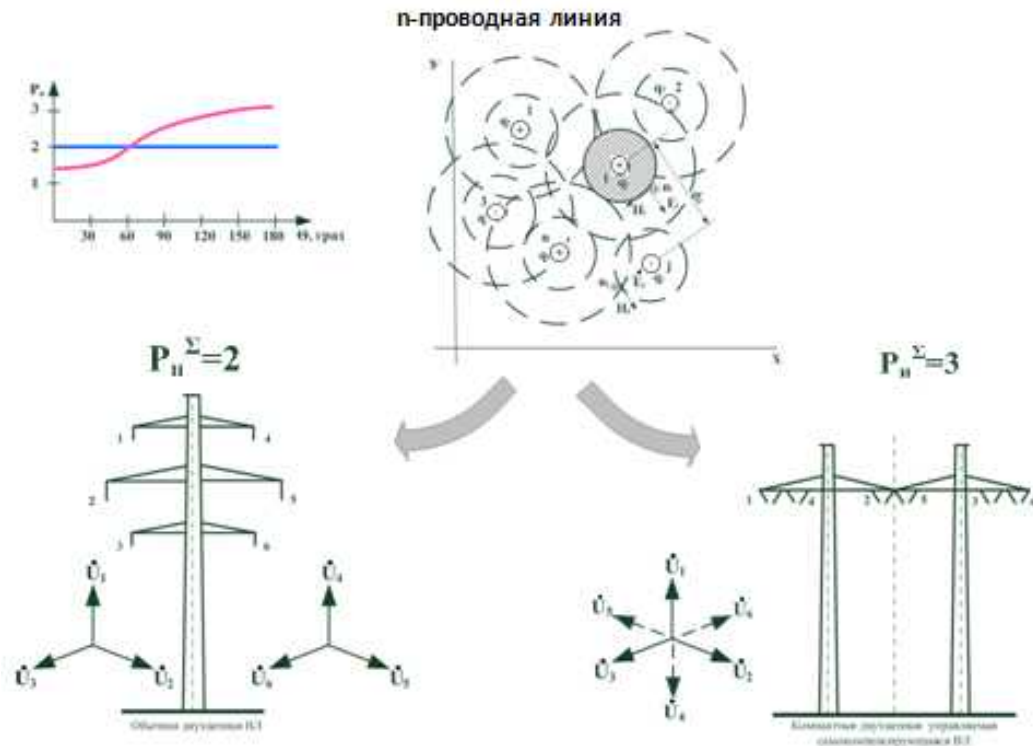


Рис. 6. Расположение фаз на опорах обычной двухцепной ВЛ и компактной двухцепной УСВЛ; график зависимости величины натуральной мощности от углового сдвига между трехфазными системами напряжений цепей (с большим диапазоном изменения – для УСВЛ)

Конструкции опоры таковы, что имеется возможность сблизить фазы между собой на минимально допустимое расстояние. Таким образом, двухцепная компактная УСВЛ будет состоять из трех пар сближенных фаз, используя принципиальное решение (рис. 4).

Варианты схемной реализации компактных двухцепных УСВЛ показаны на рис. 7.

Непременным условием создания компактных двухцепных УСВЛ является установление углового сдвига векторов напряжений одной цепи по отношению к другой (θ). Это обусловлено тем, что от величины угла (θ) зависят эквивалентные параметры УСВЛ. Степень этого влияния зависит от расстояния между сближенными фазами (цепями), а знак – от угла (θ).

Для создания углового сдвига между системами векторов напряжений цепей (соответственно – и токов) предусматривается применение новых схем присоединения к шинам подстанций или установка специальных фазорегулирующих устройств трансформаторного типа.

$$E_m \leq 0,9 E_o. \quad (5)$$

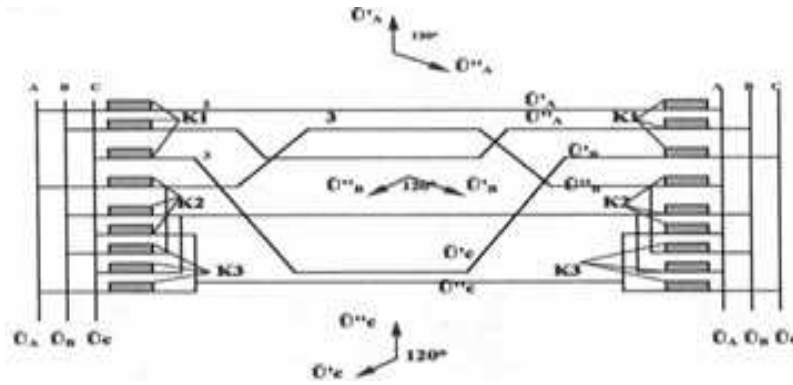


Схема двухцепной электропередачи с дискретным регулирование угла 0-120 град

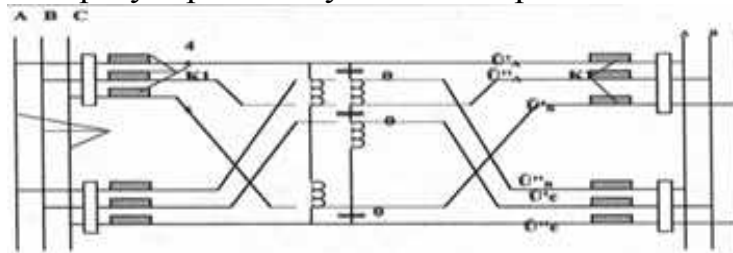


Схема двухцепной электропередачи с возможностью регулирования угла в широком диапазоне с помощью фазорегулирующих устройств и устройств FACST

Рис. 7. Варианты электрических схем компактных двухцепных УСВЛ

Требования к проводам и конструкциям самих фаз УСВЛ остаются такими же, как и для обычных ВЛ. При сопоставлениях принимаются одинаковые плотности тока в проводах и обязательное выполнение условия, при котором максимальная напряженность электрического поля на поверхности проводов (E_m) не должна превышать величину напряженности возникновения короны (E_0).

Выше было приведено выражение (1), определяющее величину пропускной способности ВЛ. Оно применимо и для УСВЛ. Главным параметром, на который осуществляется воздействие в УСВЛ при прочих равных условиях, является волновое сопротивление (Z_c), определяемое в свою очередь выражением

$$Z_c = \sqrt{\frac{r_0 + jx_{03}}{g_0 + jb_{03}}} \quad (6)$$

где r_0 - удельное активное сопротивление проводов (фаз);

x_{03} - удельное эквивалентное индуктивное сопротивление проводов (фаз);

g_0 - удельная активная проводимость проводов (фаз);

b_{03} - удельная эквивалентная емкостная проводимость проводов (фаз).



Указанные параметры зависят от конфигураций расположения фаз, геометрических расстояний и угловых сдвигов между векторами напряжений фаз и протекающих по ним токов.

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 ($\dot{x}_{0\Omega}, \dot{b}_{0\Omega}, \dot{Z}_{c0\Omega}$), и результирующие параметры фаз принимают новые эквивалентные значения

$$\begin{aligned} \dot{x}_{0\Omega} &= x_0 + x_{0\Omega} \cdot e^{j\theta}; \\ \dot{b}_{0\Omega} &= b_0 - b_{0\Omega} \cdot e^{j\theta}; \\ \dot{Z}_c &= Z_{c0} + Z_{c\Omega} \cdot e^{j\theta}. \end{aligned} \quad (7)$$

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

$$\begin{aligned} x_{0\Omega} &= x_0 + x_{0\Omega}; \\ b_{0\Omega} &= b_0 - b_{0\Omega}; \\ Z_c &= Z_{c0} + Z_{c\Omega}. \end{aligned} \quad (8)$$

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

$$\begin{aligned} x_{0\Omega} &= x_0 - x_{0\Omega}; \\ b_{0\Omega} &= b_0 + b_{0\Omega}; \\ Z_c &= Z_{c0} - Z_{c\Omega}. \end{aligned} \quad (9)$$

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

Выполненные расчеты показали, что при изменении угла (θ) в пределах $0\div 180^\circ$ указанные параметры характеризуются почти полтора кратным диапазоном регулирования.

Волновое сопротивление линии (Z_c) определяет ее пропускную способность, а емкостная проводимость (b_0) – зарядную мощность (Q_c). Возможность регулирования пропускной способности и зарядной мощности является важным преимуществом УСВЛ перед ВЛ обычного типа. В дальнейшем обоснование эффективности УСВЛ, в том числе и системной эффективности, принято с учетом этих преимуществ УСВЛ.

УСВЛ относятся к категории гибких электропередач, получивших в последние годы развитие как в теоретическом, так и практи-



ческом плане. Направление создания гибких электропередач переменного тока – Flexible Alternating Current Transmission Systems (сокращенно FACTS) подразумевает создание регулируемых электропередач на базе применения различных сосредоточенных средств компенсации и управления, однако при сохранении линии как нерегулируемого объекта.

УСВЛ, воплощая в себе идеи регулируемых электропередач, являются дальнейшим развитием направления гибких электропередач, так как в дополнение включают идеи и способы регулирования параметров и собственно линий. Благодаря этому достигается новый уровень управления режимами и техническими показателями электропередач переменного тока. УСВЛ могут быть названы и управляемыми самокомпенсирующимися гибкими системами передачи электроэнергии на переменном токе – Controlled Flexible Self – Compensation Alternating Current Transmission Power Systems (сокращенно CFACTS).

Технические характеристики вариантов УСВЛ различных классов напряжения.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований к настоящему времени выполнены расчеты и разработки конкретных вариантов двухцепных УСВЛ различных классов напряжений, от 10 кВ до 1150 кВ.

В процессе проведения исследований и разработок был решен целый ряд технических вопросов, связанных с новизной конструкций опор, междуфазовой изоляции, нетрадиционных конфигураций расположения фаз, схем присоединения к подстанциям и применения фазорегулирующих устройств, средств компенсации, релейной защиты и управления, отличием режимов и многими другими.

К настоящему времени удалось реально построить и проверить на практике работоспособность двухцепных УСВЛ напряжением 10, 35, 110 кВ (рис. 8).

СВЛ-10 кВ. Первой была сооружена в 1973 г. опытно-промышленная СВЛ-10 кВ протяженностью 1,2 км при проектной нагрузке 3,5 МВт.

Расчеты и натурные эксперименты подтвердили, что реактивное сопротивление СВЛ-10 кВ на 22 % меньше по сравнению с обычными ВЛ. СВЛ-10 кВ обеспечила экономию капитальных затрат в размере 16%. В 1975 г. была сооружена вторая СВЛ-10 кВ протяженностью 9,5 км. Показатели этой линии оказались лучшими, чем первой. Снижение индуктивного сопротивления составило 25%, а экономия капитальных затрат – 24%. Следует отметить, что сближение фаз, имеющих различные потенциалы, как средство увеличения пропускной способности и улучшения технико-экономических показателей, применимо и для обычных трехфазных линий электропередачи.

Внедрение их было начато в распределительных сетях «Молд-энерго». Одноцепные ВЛ-10 кВ с уменьшенными междупазными расстояниями обеспечивают снижение индуктивного сопротивления на 20-23%, а также улучшение технико-экономических показателей по сравнению с обычными ВЛ.

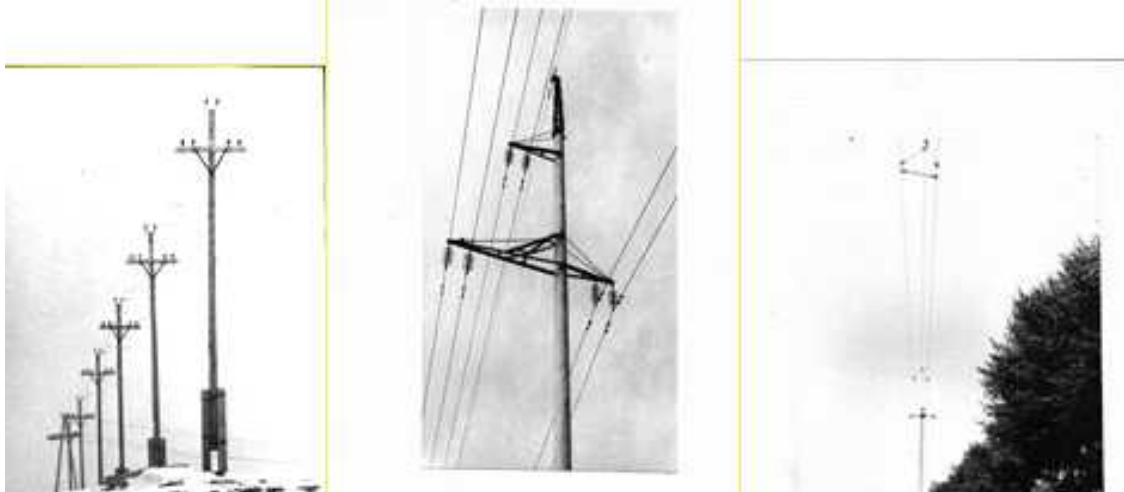


Рис. 8. Первые в мире промышленные двухцепные СВЛ-10,35 кВ и ВЛСФ-10 кВ, построенные в Молдавской энергосистеме

СВЛ-35 кВ. Следующим этапом разработок явилось создание опытно-промышленной СВЛ-35 кВ протяженностью 8,7 км и расчетной нагрузке 12 МВт. В качестве опор для двухцепных СВЛ-10, 35 кВ приняты одностоечные опоры. На данной линии были также проведены натурные испытания и экспериментальным путем определены параметры, которые показали, что реактивное сопротивление СВЛ-35 кВ на 17% меньше, чем у обычной двухцепной ВЛ-35 кВ. Сопоставление проектных технико-экономических показателей показало экономии капитальных вложений на 12, 6%.

УСВЛ-110 кВ. Протяженность разработанной линии составила 76 км, а построенного в 1979 г. первого ее участка – 34 км (рис.2) на одностоечных и второго участка-20 км на двухстоечных двухцепных опорах (рис.3). Особенностью СВЛ-110 кВ является то, что она предназначена для работы в сложно-замкнутой энергосистеме и имеет ряд ответвлений для питания промежуточных потребителей.

При создании СВЛ-110 кВ был решен большой комплекс сложных технических вопросов, связанных с расчетом электрических параметров, расчетом конструкции, выбором изоляции, релейной защиты и автоматики.

Для двухцепной СВЛ-110 кВ разработаны варианты одностоечных и двухстоечных опор на железобетонных типовых стойках. На одностоечных опорах расположение попарно сближенных (стянутых) фаз выполнено по вершинам треугольника, а на двухстоечных – в горизонтальной плоскости.

Расстояния между сближенными фазами приняты равными $d_c=0,3-0,4$ м для СВЛ-10 кВ, $d_c=0,6-0,8$ м – для СВЛ-35 кВ и $d_c=1,1-1,3$ м – для СВЛ-110 кВ. Сближенные фазы зафиксированы друг относительно друга с помощью изоляционных распорок - в СВЛ-10, 35 кВ и с помощью стягивающих гирлянд изоляторов в СВЛ-110 кВ.



Рис. 9. Первая в мире управляемая двухцепная самокомпенсирующаяся высоковольтная линия электропередачи 110 кВ (СВЛ-110 кВ).

Созданию линии предшествовали механические испытания элементов конструкции на полигоне ПО «Союзтехэнерго».

Электрические испытания, проведенные непосредственно на опытно-промышленной СВЛ-110 кВ Бельцы–Новые Беличены, позволили экспериментальным путем определить величину потерь напряжения в нагрузочных режимах; уровни токов короткого замыкания, основные параметры линии при различных режимах работы.

Установлено, что индуктивное сопротивление СВЛ-110 кВ при $\theta=120^\circ$ на 20,3 % ниже, чем у обычной двухцепной ВЛ-110 кВ, емкостная проводимость на 25 % выше. Натуральная мощность СВЛ-110 кВ на 20 % выше, чем у обычной линии.

Увеличение предела передаваемой по СВЛ-110 кВ мощности по сравнению с обычной двухцепной ВЛ-110 кВ, исходя из допустимого уровня потери напряжения, зависит от величины коэффициента мощности нагрузки и составляет: при $\cos \varphi_n=0,95$ – 7,5 %, а при $\cos \varphi_n=0,8$ – 20 %.

СВЛ-110 кВ позволяют также улучшить параметры режима – снизить потери напряжения и уменьшить потери мощности. В случае нетранспонированной СВЛ-110 кВ, работающей в режиме нерегулируемого угла сдвига систем напряжений цепей $\theta=120^\circ$, снижение потерь мощности достигается, в основном, при передаче значительных мощностей, приближающихся к величине натуральной мощности линии и превосходящих ее.

При малых нагрузках снижения потерь мощности на СВЛ-110 кВ при нерегулируемом угле θ не наблюдается. Однако, если на СВЛ-110 кВ применить регулирование угла θ : при малых нагрузках устанавливать $\theta=0^\circ$, а при больших - $\theta=120^\circ$, то во всем диапазоне передаваемой мощности обеспечивается выигрыш в потерях по сравнению с обычными ВЛ.

Снижение потерь мощности в СВЛ зависит от коэффициента мощности нагрузки, чем меньше $\cos \varphi_n$, тем больше экономия. При $\cos \varphi_n = 0,8$ и передаваемой мощности 30 МВт на цепь снижение потерь мощности в СВЛ-110 составляет 3 % по сравнению с обычной ЛЭП. Сопоставление технико-экономических показателей показало, что СВЛ-110 кВ обеспечила по сравнению с обычной двухцепной ВЛ-110 кВ на 10 % экономию капитальных затрат.

На указанных УСВЛ попарно сближены фазы разных цепей при дискретном изменении угла сдвига векторов напряжений цепей $\theta = 0 - 120^\circ$, осуществленном путем особой схемы присоединения к конечным и промежуточным подстанциям, показанной на рис. 7. Для УСВЛ-110 кВ на полигоне ПО «ОРГРЭС» проведены механические испытания двухстоечных специально разработанных опор. Аналогичные работы проведены по моделированию и механическим испытаниям сближенных фаз УСВЛ 220 кВ.

Разработаны варианты конструкции опор компактных управляемых УСВЛ 220 -500 кВ. Выполнено ТЭО ряда УСВЛ – 220 кВ, УСВЛ – 500 кВ (рис. 10).



Рис. 10. Высоковольтный полигон: ГИН-2500 кВ, ИТ-500 кВ, две фазы УСВЛ-500 кВ на опоре ВЛ 750 кВ

Разработаны варианты конструкции опор компактных управляемых УСВЛ 220-500 кВ (рис.11, 12). Выполнено ТЭО ряда УСВЛ 220 кВ, 500 кВ.

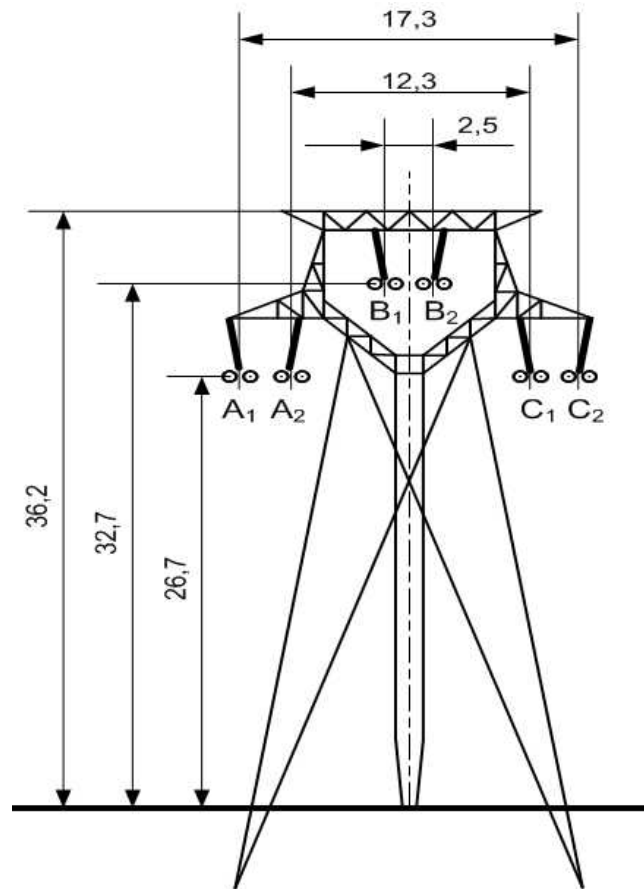


Рис. 11. Вариант конструкции компактной двухцепной УСВЛ-220 кВ

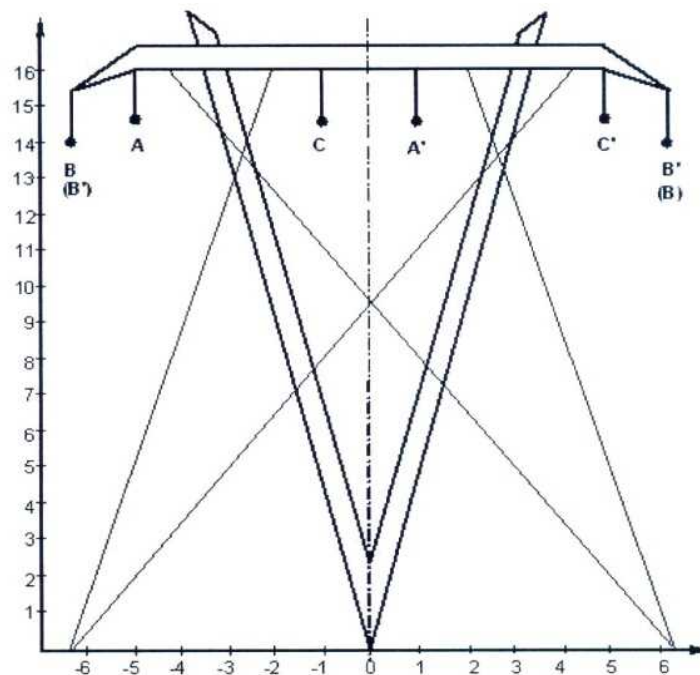


Рис. 12. Вариант оптимизированной опоры двухцепной УСВЛ-330 кВ, провода ЗАС-300/39, $r_p=0,5$ м



Данные исследований основных показателей УСВЛ и сопоставление их с аналогичными характеристиками обычных трехфазных ЛЭП показывает, что УСВЛ:

- превосходят обычные ЛЭП по величине натуральной мощности на 20-40 %;
- обеспечивают экономию на 15-30 % удельных капитальных вложений и приведенных затрат в расчете на единицу передаваемой мощности;
- создают благоприятные возможности для системообразования, регулирования перетоков мощности и снижения суммарных потерь в энергосистеме;
- снижения величины напряженности электрического и магнитного полей вблизи поверхности земли под линиями, благодаря чему оказывают сниженное экологическое влияние;
- УСВЛ позволяют также уменьшить площади земельных угодий, отчуждаемых под строительство.

Выводы

1. Компактные управляемые двухцепные самокомпенсирующиеся высоковольтные линии электропередач (УСВЛ) в сочетании с устройствами FACTS и одноцепные компактные ВЛ обладают рядом достоинств и могут быть успешно использованы, как для транспорта электроэнергии на большие расстояния, так и применены в распределительных электросетях

2. Выполненные исследования и проектные разработки, опыт строительства вариантов УСВЛ и проведенные экспериментальные работы подтверждают возможности реального применения компактных управляемых самокомпенсирующихся ВЛ в сочетании с устройствами FACTS в отдельных, а также в объединенных энергосистемах для решения проблем транспорта и распределения электроэнергии, улучшения параметров режимов энергосистем и получения значительного экономического эффекта.

Список использованной литературы

1. Управляемые (гибкие) системы передачи переменного тока (flexible AC Transmission system, FACTS). Составитель д.т.н. профессор Ю.Г. Шакарян, ОАО «ВНИИЭ», 41 с.

2. *Solovieff I.I.* An Investigation of a special circuit for long transmission of electric power / *I.I. Solovieff*. Канд. дисс., США, 1933, - 156 с.

3. *Ракушев Н.Ф.* Сверхдальняя передача энергии переменным током по разомкнутым линиям / *Н.Ф. Ракушев*. – М.: ГЭИ, 1957, -160 с.



4. *Постолатий В.М.* Исследование управляемых полуразомкнутых электропередач переменного тока / *В.М. Постолатий.* Автореф. канд. дисс. – М., 1968, -28с.

5. А.с. 218294 (СССР). Способ передачи электроэнергии / *В.А. Веников, Г.В. Чалый, В.М. Постолатий.* – Заявл. 6.12.66. № 1116879. Оpubл. в Б.И., 1968, № 17.

6. А.с. 266924 (СССР). Способ передачи электроэнергии / *В.А. Веников, Ю.Н. Астахов, В.М. Постолатий.* – Заявл. 4.11.68. № 1280553. Оpubл. в Б.И., 1970, № 12.

7. А.с. 566288 (СССР). Электропередача переменного тока / *В.М. Постолатий, В.А. Веников, Ю.Н. Астахов, Г.В. Чалый, Л.П. Калинин.* Заявл. 21.03.74. № 2006496. Оpubл. в Б.И., 1977, № 27.

8. Электропередача переменного тока / *Постолатий В.М., Веников В.А., Астахов Ю.Н., Чалый Г.В., Калинин Л.П.* Патенты: США №4001672, 1977; ГДР № 116990, 1976; Франции № 7508749, 1977; Англии № 1488442, 1978; Швеции № 75032268, 1978; Канады № 1038029, 1978; ФРГ № 2511928, 1979; Японии № 1096176, 1982.

9. Астахов Ю.Н. Основные принципы создания и технические характеристики управляемых самокомпенсирующихся линий электропередачи / *Ю.Н. Астахов, В.А. Веников, В.М. Постолатий* и др. - Электричество, 1977, № 12, с. 37-44.

10. *Астахов Ю.Н.* Управляемые линии электропередачи / *Ю.Н. Астахов, В.М. Постолатий, И.Т. Комендант, Г.В. Чалый.* Под ред. В.А. Веникова, Изд-во Штиинца, 1984, 296 с.

11. Управляемые электропередачи. Выпуск № 8 (23), труды Института энергетики АН Молдовы за 2001-2007 г.г. Составители: *Постолатий В.М., Быкова Е.В.* Кишинев, 2007. 234 с.

12. Устройство изменения фазового сдвига / *Бошняга В.А., Калинин Л.П., Постолатий В.М.* Патенты: США № 3975673, 1976; ГДР № 119494, 1976; ГДР № 123846, 1977; США № 4013942, 1977; Англии № 1484522, 1977; Франции № 7522737, 1977; Англии № 1493652, 1978; Швеции № 7508349, 1978; Швеции № 7508350, 1978; ФРГ № 2531578, 1978; ФРГ № 2531644, 1978; Франции № 7522615, 1978; Канады № 1045202, 1978; Канады № 1041172, 1978.

13. *Постолатий В.М.* Современные средства регулирования перетоков мощности и эффективность применения их в энергосистемах / *В.М. Постолатий, Л.П. Калинин, Д.А. Зайцев, Е.В. Быкова* // Сборник докладов международной конференции «Энергетика Молдовы – 2005». с. 2006-219.

14. *Рыжов Ю.П.* Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учебник для ВУЗов / *Ю.П. Рыжов.* – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 488 с.: илл.



15. *Александров Г.Н.* Передача электрической энергии / *Г.Н.Александров.* - СПб.: Изд-во Политехнического университета, - 2007 – 412 с. (Энергетика в политехническом университете).
16. *Поливанов К.М.* Теоретические основы электротехники. Ч.3. Теория электромагнитного поля / *К.М. Поливанов.* – М.: Энергия. 1969. – 352 с.
17. *Постолатий В.М.* Теоретические основы и принципы создания управляемых самокомпенсирующихся линий электропередач / *В.М. Постолатий.* Дис. на соиск. уч. ст. д.т.н., Кишинев, 1987. – 529 с.
18. *Вульф А.А.* Проблема передачи электрической энергии на сверхдальние расстояния по компенсированным линиям / *А.А. Вульф.* – М.: ГЭИ, 1941. – 100 с.
19. *Веников В.А.* Дальние электропередачи / *В.А. Веников.* – М.Л.: ГЭИ, 1960. – 312 с.
20. *Щербаков В.К.* Настроенные электропередачи / *В.К. Щербаков, Э.С. Лукашов, О.В. Ольшевский, А.Т. Путилова.* Новосибирск, - 1963.
21. Комплексные испытания полуволновой электропередачи в сети 500 кВ ЕЭС Европейской части СССР / *Вершков В.А., Нахапетян К.Т., Ольшевский О.В., Совалов С.А., Фотин В.П., Щербаков В.К.* Электричество, 1968, № 8.
22. Технические и экономические характеристики настроенных электропередач. Под ред. *В.К. Щербакова / Воробьев Г.В., Заславская Т.Б., Калюжный А.Х., Лукашов Э.С., Ольшевский О.В., Путилова А.Т., Хакимов Ф.З., Халевин В.К., Щербаков В.К.* Новосибирск. – Наука, 1965. – 68 с.
23. Эффективность применения компактных линий электропередачи переменного тока / *Шакарян Ю.Г., Тимашова Л.В., Карева С.Н., Постолатий В.М., Быкова Е.В., Суслов В.М.* // Сборник статей: Инновационные технические решения в программе НИОКР ПАО «ФСК ЕЭС», под общей редакцией А.Е. Мурова. М.: Издательство АО «НТЦ ФСК ЕЭС», 2016, - С.76-104.
24. Справочник по электрическим сетям 0,4 – 35 кВ и 110 – 1150 кВ./Колл. Авт.-М.: ИД «Энергия», 2009.- Том 10-816 с.
25. Библия энергетика [Текст]: ПУЭ (шестое и седьмое издания, все действующие разделы); МПОТ; ПТЭ. – Новосибирск: Сиб. унив. Из-во, 2011.- 688 с., ил.



КОМПАКТНІ КЕРОВАНІ САМОКОМПЕНСУЮЧІ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ЗМІННОГО СТРУМУ

Постолатій В. М., Бикова О.В.

Анотація - викладено принципів засади створення і наведені результати досліджень і розробок ліній електропередачі нового типу - компактних керованих самокомпенсуючих високовольтних ліній електропередач, і дана оцінка можливим перспективам та ефективності застосування запропонованих варіантів електропередач нового типу в енергосистемах.

COMPACT CONTROLLED SELF COMPENSATING AC VOLTAGE LINES

Postolatiy V., Bykova E.

Summary

The basic principles for the creation and the results of research and development of new transmission lines of a new type - compact controlled self-compensating high-voltage transmission lines are given, and an assessment of possible prospects and efficiency of the proposed new transmission options in power systems is given.