

Compact Controllable Overhead Transmission Lines

Postolaty V. M.

Institute of Power Engineering
Chisinau, Republic of Moldova

Abstract. Compact controllable high-voltage power lines (HVPLs) are a new generation of alternating current power transmission lines, representing the newest achievements in the field of power transmission and control means, new technical solutions for the design, insulation, connection layouts and control systems. The main distinctive features of the compact controllable HVPLs are: extremely reduced phase-to-phase distances adopted relative to the minimal required insulation distances (dielectric strength of the phase-to-phase gaps) at a maximum operating voltage and also under lightning and commutation overvoltage; new phase configurations, where tower's grounded parts (poles, cross-arms, suspension hubs) placed outside of the interphase space; insulating elements (insulating spacers or screeds) between closely adjacent HVPL phases installation if required, fixing the selected distance between phases and dampening conductor's vibration or galloping under severe weather conditions, which ensures high mechanical stability and reliability of the adjacent phases in spans; angular phase shifts establishment between the voltage vectors applied to the compact controllable HVPL adjacent phases; implementation of high-speed phase control devices and adjustable compensation devices (FACTS type). Compared to the conventional high-voltage power lines, compact controllable ones with FACTS devices ensure the following: 1.2-1.6 times increase in throughput; reduction of total costs per transmission capacity unit by 20 – 30%; 1.5-2 times alienated land reduction in case of equal power transmission; reduction of electric field intensity in the HVPL external space, and, hence, mitigation in the environmental effect; ability to control power flows and their directions; and total energy losses reduction in the power system.

Keywords: transmission lines, high voltage, compact, controllable, self-compensating, equivalent parameters.

DOI: 10.5281/zenodo.3240222

Linii electrice compacte dirijate de înaltă tensiune

Postolati V. M.

Institutul de Energetică
Chișinău, Republica Moldova

Rezumat. Liniile electrice compacte dirijate de înaltă tensiune, reprezintă o nouă generație de linii electrice de curent alternativ, care încorporează cele mai recente progrese în domeniul transmiterii dirijate a energiei, noi soluții tehnice pentru proiectarea, alegerea izolației, schemele de conectare și sistemele de control. Scopul lucrării constă în analiza și compararea principalelor caracteristici distinctive ale liniilor electrice compacte dirijate, ca: - distanțe interfațiale extrem de reduse, adoptate în conformitate cu distanțele minime admise privind asigurarea rigidității electrice (rigiditatea electrică a izolației între fazele liniei) la valorile maxime a tensiunii de lucru, precum și luând în considerare supratensiunile de trăsnet și de comutație; - configurații noi ale amplasării fazelor pe stâlpii liniei, a căror elemente de legare la pământ (circuitul de cobărâre, traversele) sunt amplasate în afara spațiului dintre fazele liniei. Acest lucru asigură o stabilitate mecanică ridicată și o fiabilitate ridicată a funcționării fazelor prin limitarea nivelului vibrațiilor și jocului conductoarelor sub influența factorilor exteriori meteorologici; stabilirea valorilor unghiurilor diferenței de fază a vectorilor de tensiune a fazelor apropiate; - implementarea dispozitivelor cu timp mic de reacție pentru reglarea unghiului diferenței de fază și a gradului de compensare a puterii reactive a liniilor compacte dirijate (tip FACTS). Comparativ cu liniile aeriene convenționale, liniile compacte dirijate dotate cu dispozitive FACTS oferă următoarele avantaje: o creștere a capacității de transmisie de 1.2-1.6 ori; reducerea costului total cu 20-30% pe unitate de putere transmisă; scăderea cu 1.3-1.5 ori a suprafeței de teren care urmează să fie înstrăinată la construirea liniei în compararea cu linia tradițională cu aceiași putere de transmisie. Sunt prezentate caracteristicile și avantajele liniilor dirijate 110, 220, 330 și 500 kV comparativ cu liniile electrice convenționale.

Cuvinte-cheie: linii de transmisie, înaltă tensiune, compacte, dirijate, autocompensare, parametri echivalenți.

Компактные управляемые высоковольтные линии электропередачи Постолатий В. М.

Институт Энергетики
Кишинэу, Республика Молдова

Аннотация. Компактные управляемые высоковольтные линии электропередачи - это новое поколение линий электропередачи переменного тока, воплощающих самые новые достижения в области передачи энергии и средств регулирования, новые технические решения по проектированию, выбору изоляции, схем подключения и систем управления. Целью работы является рассмотрение основных отличительных особенностей компактных управляемых линий электропередачи характеризующиеся: предельно уменьшенными межфазными расстояниями, принятые в соответствии с минимально допустимыми изоляционными расстояниями (электрическая прочность межфазных промежутков) при максимальном рабочем напряжении, а также при учете грозовых и коммутационных перенапряжений; новые конфигурации расположения фаз на опорах, в которых заземленные части опоры (стоки, траверсы) размещены за пределами межфазного пространства; изолирующие элементы (изолирующие распорки или изоляционные стяжки), установленные между близко расположенными фазами в пролетах линии, если необходима фиксация выбранного расстояния между фазами и недопущение вибрации и пляски проводов при воздействии неблагоприятных атмосферных факторов; это обеспечивает высокую механическую стабильность и надежность работы сближенных фаз в пролетах; установление угловых фазовых сдвигов между векторами напряжения, приложенными к компактно расположенным смежным фазам линии: внедрение быстродействующих фазорегулирующих устройств и регулируемых средств компенсации (тип FACTS). По сравнению с обычными воздушными линиями компактные управляемые линии с устройствами FACTS обеспечивают следующие преимущества: - увеличение пропускной способности в 1.2-1.6 раза; снижение общих затрат на единицу передаваемой мощности на 20 - 30%; в 1.3-1.5 раза уменьшение площади отчуждаемых под строительство земельных угодий, при равной передаваемой мощности; снижение напряженности электрического поля во внешнем пространстве линии, а следовательно, снижение воздействия на окружающую среду; способность регулировать потоки мощности и их направления - снижение общих потерь энергии в энергосистеме.

Ключевые слова: компонента, стиль, стилистика, вставка, данные, информация.

ВВЕДЕНИЕ

Компактные управляемые высоковольтные линии электропередачи являются линиями электропередачи нового поколения. Основные идеи создания таких линий основаны на достижениях в области, как высоковольтной техники, так и электротехнического оборудования [1-13; 17, 23, 27, 28].

Основная цель проводимых в данной области результатов исследований и разработок состоит в формировании основных концептуальных положений и технических решений по созданию компактных управляемых электропередач нового типа, которые в значительной мере превосходили бы существующие по своим основным показателям, и, в том, чтобы разрешить ряд технических, экономических и экологических проблем в области транспортных и распределительных электросетей, а также формирования на значительных территориях объединенных энергосистем и управления ими.

А. Основные проблемы в области электропередач переменного тока

При постановке задач исследования, прежде всего, возникают вопросы, в чем состоят проблемы и каковы возможные пути их решения.

Анализ характеристик линий электропередач переменного тока высокого и сверхвысокого напряжения традиционной конструкции показывает, что по целому ряду показателей они не в полной мере удовлетворяют требованиям технического, экономического и экологического характера.

В области **технических** требований следует назвать: недостаточную в ряде случаев пропускную способность; значительные потери электроэнергии; низкую надежность при воздействии неблагоприятных атмосферных факторов (погодные условия - гололед, ветер); создание помех для других технических систем (радиопомехи, акустические шумы); недостаточную управляемость и трудности поддержания режимных параметров в диапазоне нормируемых и заданных значений.

К числу **экономических** проблем следует отнести такие недостатки существующих типов линий электропередачи: значительные капитальные вложения, как суммарные, так и

удельные – в расчете на единицу передаваемой мощности; большие затраты на регулирующее и подстанционное оборудование; необходимость перехода на более высокие уровни напряжения при недостаточной пропускной способности линии рассматриваемого класса напряжения, что сопровождается соответственно более высокими затратами; значительные потери электроэнергии в распределительных электросетях.

Экологические проблемы связаны: с отчуждением значительных площадей под строительство линий электропередачи; радиопомехами и акустическими шумами; значительными уровнями напряженности электрического и магнитного поля в пространстве, окружающем линии, в том числе под линиями, вблизи поверхности земли.

Указанные проблемные вопросы в значительной мере можно разрешить при создании линий электропередачи нового типа – двухцепных и многоцепных компактных управляемых самокомпенсирующихся высоковольтных линий электропередач различных классов напряжений. Компактные управляемые самокомпенсирующиеся высоковольтные линии электропередачи (УСВЛ) занимают вполне определенное место среди других типов линий электропередачи переменного тока.

К числу известных и исследуемых в мировой практике можно отнести следующие типы ВЛ переменного тока: компенсированные одноцепные и многоцепные трехфазные ВЛ (с устройствами продольной и поперечной компенсации) [14, 15, 18, 19]; настроенные на полуволну трехфазные одноцепные ВЛ (с добавлением 4-ой резервной фазы) [20-22]; гибкие электропередачи, одноцепные и многоцепные (типа SMART-GRID) [14]; компактные одноцепные или многоцепные линии электропередачи, содержащие компактные трехфазные цепи; линии электропередачи трехфазные с использованием вместо одной фазы «земляной провод», т.е. «две фазы – земля»; разомкнутые линии электропередачи, содержащие фактически две трехфазные цепи [2, 3]; линии электропередачи традиционной конструкции ультравысокого напряжения [15]; линии электропередачи с глубоким расщеплением фаз [15]; кабельные высоковольтные линии

(сверхпроводящие, волноводные); линии электропередачи с антенным отбором мощности; линии электропередачи с высокотемпературными проводами.

Отдельным направлением в области транспорта электроэнергии является применение линий постоянного тока и вставок постоянного тока (ВПТ). Они имеют свою отдельную область применения.

Из всех типов линий электропередач переменного тока только компактные одноцепные и многоцепные линии, а также линии с глубоким расщеплением фаз и компактные управляемые самокомпенсирующиеся линии электропередачи создают новые качества за счет новой конструкции самих линий, причем, практически без дополнительных затрат. Остальные типы линий электропередачи предусматривают получение новых качеств за счет дополнительного оборудования, устанавливаемого в отдельных узлах и на подстанциях, что сопровождается, как правило, удорожанием транспорта электроэнергии. Компактные управляемые самокомпенсирующиеся линии обеспечивают улучшение технико-экономических показателей линий, как за счет новой компактной конструкции, так и реализации в процессе работы идеи управления параметрами электрического и магнитного поля линии. В УСВЛ достигается удешевление транспорта электроэнергии на 30-35%, в расчете на единицу передаваемой энергии, снижение экологического влияния, улучшение управляемости, по сравнению с ВЛ традиционной конструкции.

В настоящей работе показано, каким образом можно достичь улучшения характеристик и показателей линий электропередач переменного тока за счет применения УСВЛ по сравнению с линиями традиционной конструкции и линиями других типов, применяемыми в настоящее время на практике.

Б. Структура работы

Работа состоит из двух частей: - в первой части описаны основные отличия УСВЛ от ВЛ традиционной конструкции, схемы замещения, элементы конструктивного и схемного исполнения, опыт практического исполнения, и второй части – посвященной решению системы уравнений УСВЛ, расчету параметров и описанию полученных результатов.

Постановка задачи состоит в том, чтобы указать подходы улучшения показателей ВЛ при сохранении практически одних и тех же материальных затрат, в виде суммарного сечения проводов линии, при соблюдении всех нормативных требований, а также подтвердить реальную возможность практического создания электропередач нового типа и удобства их эксплуатации. Рассмотрение этой проблемы следует начать из анализа параметров линий электропередач переменного тока.

II. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

При выполнении анализа характеристик линий электропередачи переменного тока (ВЛ) рассмотрению подлежат следующие основные параметры:

- *удельное активное сопротивление проводов* (r_0), зависящее от материала проводов, суммарного сечения, от конструкции и температуры, единицами измерений являются (Ом/км); активное сопротивление является одним из основных факторов, определяющих активные потери электроэнергии в линии. Частично снизить их можно путем поддержания на заданном уровне напряжения или путем перехода на другие материалы и используя сверхпроводимость;

- *удельное индуктивное сопротивление* (x_0), величина которого зависит от геометрических размеров проводов, размеров расщепленных фаз, индуктивности и угловой частоты, числа составляющих в расщепленных фазах, геометрических расстояний между фазами, конфигурации расположения фаз, габаритов линии, угловых сдвигов векторов и величин токов, протекающих по проводам фаз; анализ показывает, что при соответствующем выборе указанных параметров можно существенно повлиять на величину удельного индуктивного сопротивления линии и, соответственно, на пропускную способность и характеристики линии в целом.

- *удельная активная поперечная проводимость* (g_0) *фаз линии*, значение которой определяется следующими факторами: несовершенством изоляции проводов, повышенной величиной напряженности электрического поля и,

соответственно, потерями на корону, негладкостью поверхности проводов, с чем связано возникновение местных повышенных значений напряженности электрического поля и, соответственно, местной короны, превышением короны, превышением напряжения линии, по сравнению с нормируемым, что выражается в повышении напряженности электрического поля на поверхности проводов. Поперечная активная проводимость создает дополнительные активные потери. На величину потерь мощности на корону, и соответственно, потерь энергии из-за коронирования проводов, существенно влияют атмосферные факторы (дождь, снег, изморозь, туман, повышенная влажность воздуха). При конструировании любых типов линий электропередачи необходимо обеспечивать выполнение всех требований к проводам и уровню максимальной напряженности электрического поля (E_m) на поверхности проводов по отношению к величине напряженности (E_H) начала короны, т.е.

$$E_m \leq 0.9E_H \quad (1)$$

Удовлетворить требованию (1) можно путем выбора соответствующего числа составляющих в расщепленных фазах и сечения каждой составляющей, а также конструкции расщепленных фаз.

- *удельная поперечная емкостная проводимость* (ϵ_0) является одним из важных параметров линии, определяющим величину зарядной мощности и пропускной способности линии. Величина (ϵ_0) зависит от аналогичных параметров, что и (X_0). Параметры (x_0) и (ϵ_0) находятся во взаимосвязи. При этом наблюдается следующая закономерность. Если тот или иной фактор приводит к снижению величины (x_0), то он же способствует увеличению (ϵ_0). Влияя на эти параметры можно обеспечить те, или иные значения пропускной способности и показателей Удельные параметры (ϵ_0) и (x_0), а также (r_0) и (g_0) являются основными первичными параметрами линий переменного тока любых типов.

К числу первичных расчетных основополагающих параметров относятся величины зарядов (g) на проводах, значения напряженности электрического (E) и магнитного поля (H) в пространстве, окружающем провода линий. Для моделирования линий электропередачи

используется целый ряд вторичных параметров и характеристик. О некоторых из них будет сказано при дальнейшем изложении материала. Одними из основных параметров ВЛ переменного тока являются **волновое сопротивление (Z_c) и величина натуральной мощности (P_c)**.

При передаче по линии мощности, равной величине натуральной,

$$P = P_c \quad (2)$$

характерным является то, что напряжение в любой точке линии оказывается равным приложенному номинальному напряжению, если не учитывать потери напряжения на активном сопротивлении, величина которых невелика.

Основные потери напряжения происходят от тока нагрузки на индуктивном сопротивлении линии. На элементарном участке линии (равном, например, 1 км) эти потери составляют:

$$\Delta U_L = \dot{I}_N jx_0 \quad (3)$$

где

$$P_m = P_c \frac{\sin \delta}{\sin \alpha_0 l} = \frac{|\dot{U}_1| |\dot{U}_2|}{Z_c \sin \alpha_0 l} \sin \delta \quad (4)$$

где

$|\dot{U}_1|, |\dot{U}_2|$ - модули напряжения в начале и конце линии, соответственно; δ - угловой сдвиг между векторами напряжений $|\dot{U}_1|, |\dot{U}_2|$; $\alpha_0 l$ - электрическая длина линии, электрических градусов; α_0 - коэффициент фазы, град/км; определяется, как мнимая составляющая коэффициента распространения $\gamma_0 = x_0 b_0 = j\alpha_0 + \beta_0$ здесь β_0 - коэффициент затухания; l - длина линии, км; Z_c - волновое сопротивление, Ом.

Величину натуральной мощности можно определить, исходя непосредственно из расчета напряженности электрического (\dot{E}) и магнитного (\dot{H}) поля линии электропередачи, выражая через эти параметры вектор потока мощности (вектор Пойнтинга-Хевисайда [16]), в виде их произведения:

$$\dot{\Pi} = \dot{E} \cdot \dot{H} \quad (5)$$

Для многопроводной (многофазной) линии получено следующее выражение суммарного вектора потока мощности, передаваемой по линии [27]:

$$-\Pi_\Sigma = \sum_{i=1}^n \sigma_{inp} E_{inp}^2 \pi r_0^2 l - j \frac{\omega l}{\epsilon \epsilon_0 2\pi} \sum_{i=1}^n q_i^2 \ln \frac{R_i}{r_0} + j \frac{\omega l \mu \mu_0}{2\pi} \sum_{i=1}^n I_i^2 \ln \frac{R_i}{r_0} = P_{\Sigma} - jQ_{C\Sigma} + jQ_{L\Sigma} \quad (6)$$

Из условия режима натуральной мощности для многопроводной (многофазной) линии при

$$jQ_{C\Sigma} = jQ_{L\Sigma} \quad jQ_{C\Sigma} = jQ_{L\Sigma}$$

получено следующее выражение суммарного вектора потока мощности, передаваемой по линии [27]:

$$P_c = v \sum_{i=1}^n \dot{U}_i q_i \cos(\gamma_i - \alpha_i) \quad (7)$$

где

v - скорость распространения электромагнитной волны, м/сек.;

U_i - напряжение i -той фазы кВ; q_i - заряд i -той фазы.

Из выражения (13) наглядно видно, что, повысить величину натуральной мощности линии при одном и том же напряжении фаз (U_i) можно путем увеличения электрического заряда q_i , что может быть достигнуто за счет оптимальной конструкции расщепленных фаз и выбора компактного расположения фаз.

Второй важной величиной, которую удалось определить из выражения суммарного вектора потока мощности [27], является:

$$\ln \frac{R_i}{r_0} = \frac{\epsilon \epsilon_0 2\pi \dot{U}_i \cos(\gamma_i - \alpha_i)}{q_i}, \quad (8)$$

определяющее эффективность использования площади поперечного сечения линии, т.е. определение некоторого эквивалентного радиуса сечения цилиндра (R_i), сквозь которое осуществляется передача всей мощности по каждой из рассматриваемых фаз линии.

В выражение (8) входят следующие величины: r_0 - эквивалентный радиус расщепленной фазы; q_i - заряд i -ой фазы; U_i - напряжение i -ой фазы; $\epsilon, \epsilon_0, \pi$ - константы. Обозначим правую часть уравнения (8), как:

$$c = \frac{\epsilon \epsilon_0 2\pi \dot{U}_i \cos(\gamma_i - \alpha_i)}{q_i} \quad (9)$$

Тогда $\ln \frac{R_i}{r_0} = c$, откуда находим выражение:

$$R_i = r_0 e^c \quad (10)$$

в котором показатель степени (с) рассчитывается по выражению (9).

Приведенные математические модели позволили выявить наиболее влияющие факторы на величину натуральной мощности и пропускную способность ВЛ.

При прочих равных условиях наиболее влияющими факторами являются: радиус единичного провода (r_0); эквивалентный радиус расщепленных фаз (r_s); число составляющих в расщепленных фазах (n); радиус расщепления фаз (r_p); расстояние между фазами на опорах и в пролетах (D); угловой сдвиг между векторами напряжений ближайших друг к другу фаз (θ) и расстояние между этими фазами (d_c); суммарный заряд, который могут удерживать фазы линии; приложенные напряжения к фазам и протекающие по ним токи; напряженность электрического поля на поверхности проводов; удельное активное сопротивление проводов; удельное индуктивное сопротивление проводов; удельная емкостная поперечная проводимость фаз; удельное взаимное индуктивное сопротивление фаз; взаимная удельная проводимость фаз; удельная зарядная мощность фаз.

i_N - ток нагрузки; x_0 - удельное индуктивное сопротивление линии, (Ом/км).

При наличии поперечной емкостной проводимости линии через нее протекает емкостной ток (i_c). Его величина на элементарном участке линии определяется двумя факторами: величиной удельной емкостной проводимости (b_0) и напряжением линии, т.е.

$$i_c = \dot{U} j b_0 \text{ или } i_c = \dot{U} j \omega C \quad (11)$$

При протекании емкостного тока (i_c) через продольное индуктивное сопротивление линии на нем создается падение напряжения, имеющее обратный знак по отношению к падению напряжения от тока нагрузки. При холостом ходе и малом токе нагрузки емкостное падение напряжения является избыточным и приводящим к увеличению напряжения линии, сверх приложенного. И только при одном значении тока нагрузки, равном (i_N), падения напряжения на индуктивном сопротивлении становятся равными, т.е.

$$\Delta \dot{U}_L = i_N j X_0 = -\Delta \dot{U}_C = -\dot{U} j b_0 \quad (12)$$

Отсюда следует, что:

$$i_N = \frac{\dot{U} j b_0}{j X_0} \quad (13)$$

Отношение

$$\frac{j X_0}{j b_0} = Z_C \quad (14)$$

является волновым сопротивлением линии, при не учете удельного активного сопротивления (r_0) и удельной поперечной активной проводимости (g_0).

Выражение (13) с учетом (14) можно записать в виде:

$$i_N = \frac{\dot{U}}{Z_C} \quad (15)$$

Произведение тока i_N на напряжение \dot{U} будет представлять собой некоторую мощность, которая получила название натуральной мощности линии (P_C), т.е.

$$P_C = \frac{\dot{U} \cdot \dot{U}}{Z_C} \quad (16)$$

Если в качестве напряжения линии рассматривается фазное напряжение (U_ϕ), то мощность (P_C) представляет величину натуральной мощности в расчете на фазу. Согласно теории длинных линий [19] величина натуральной мощности (P_C) с учетом длины линии и распределенности параметров определяет величину максимально возможной передаваемой по линии мощности:

Обязательными при выборе тех или иных новых технических решений является соблюдение действующих нормативных требований ПУЭ и ПТЭ [24, 25].

При создании УСВЛ предполагается, что исходная материальная база принимается, как и для обычных ВЛ: число фаз, число трехфазных цепей и др., суммарное сечение проводов, расположение фаз на одних опорах.

Приведенные математические модели, теоретические исследования и выполненные расчеты позволили сформулировать основные требования к конструкциям компактных одноцепных и многоцепных ВЛ переменного тока, которые превосходят по своим показателям ВЛ традиционной конструкции. Установление зависимости эквивалентных параметров и характеристик компактных многоцепных ВЛ от углового сдвига между системами векторов

напряжений цепей позволило сформулировать новые принципы управления режимами таких линий электропередачи и электроэнергетических систем, их содержащих.

Новыми технологическими особенностями рассматриваемых УСВЛ является использование эффекта регулируемого электромагнитного влияния одной группы фаз (цепей) на параметры другой аналогичной группы фаз (цепей) линии при соответствующем их взаимном расположении. Этот эффект имеет место в линиях и традиционной конструкции. Однако, из-за больших расстояний между цепями (и фазами) он слабо проявляется в таких ВЛ, и, более того, от него старались избавляться, из-за его отрицательного влияния на характеристики линий. Поэтому не случайно, что в обычных двухцепных ВЛ, например, цепи располагаются по разные стороны стойки опоры и разносятся на значительные расстояния. В отличие от таких конструкций в многоцепных компактных УСВЛ цепи располагаются на возможно близком расстоянии друг от друга, все заземленные элементы выносятся за пределы пространства между цепями, чтобы дать возможность максимально сблизить фазы одной цепи с фазами другой цепи, с целью обеспечить при этом величину максимально возможного взаимного электромагнитного влияния цепей. Выбор того или иного фазового сдвига между трехфазными системами векторов одной трехфазной цепи по отношению к другой (θ) в пределах $0 \div 180^\circ$ позволяет регулировать величину и знак электромагнитного влияния цепей.

При этом за счет изменения знака взаимного индуктивного сопротивления и взаимной емкостной проводимости эквивалентные параметры фаз цепей (x_{oe}, b_{oe}) изменяются в пределах от 0.8 до 1.6 относительных единиц по сравнению с исходными значениями. Под исходными значениями указанных параметров понимается их собственные значения в системе фаз только своей трехфазной цепи, при отсутствии других трехфазных цепей и соответственно при отсутствии какого-либо влияния фаз других цепей на фазы первой цепи.

Используя полные выражения параметров (x_{oe}) и (b_{oe}), записанные для

многоцепных (многофазных) ВЛ, удалось сгруппировать их составляющие, зависящие от электромагнитного влияния фаз своих цепей (x_{oe}, b_{oe}) и от взаимного влияния фаз других цепей (x_{om}, b_{om}), т.е. получить выражения эквивалентных параметров (x_{oe}, b_{oe}).

Величина и соотношение этих составляющих таково: при предельно допустимом сближении фаз разных цепей:

$$\Delta X_0 = \frac{x_{0m}}{x_0} \approx 0.3 - 0.35 \text{ о.е.};$$

$$\Delta B_0 = \frac{B_{0m}}{B_0} \approx 0.3 - 0.35 \text{ о.е.}$$

Знак взаимного индуктивного влияния (x_{om}) зависит от углового сдвига векторов токов, протекающих в сближенных фазах разных цепей, а взаимной емкостной проводимости – от соотношения векторов напряжений этих фаз. Для двухцепных ВЛ, например, сближенными выбираются одноименные фазы (индексом 1 – обозначены фазы 1-ой цепи, а индексом 2 – фазы второй цепи: (A_1 и A_2), (B_1 и B_2), (C_1 и C_2). К ним приложены напряжения, соответственно: $\dot{U}_{A1}, \dot{U}_{A2}; \dot{U}_{B1}, \dot{U}_{B2}; \dot{U}_{C1}, \dot{U}_{C2}$; . По данным фазам протекают токи: $\dot{I}_{A1}, \dot{I}_{A2}; \dot{I}_{B1}, \dot{I}_{B2}; \dot{I}_{C1}, \dot{I}_{C2}$. В самом общем случае указанные параметры различаются как по модулю, так и по фазе. В случае симметричных систем векторов напряжений и токов трехфазных цепей можно записать:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{I}_{A1}}{\dot{I}_{A2}} = K_I e^{j\theta}; \frac{\dot{I}_{B1}}{\dot{I}_{B2}} = K_I e^{j(\theta+120^\circ)}; \frac{\dot{I}_{C1}}{\dot{I}_{C2}} = K_I e^{j(\theta+240^\circ)}; \\ \frac{\dot{U}_{A1}}{\dot{U}_{A2}} = K_U e^{j\theta}; \frac{\dot{U}_{B1}}{\dot{U}_{B2}} = K_U e^{j(\theta+120^\circ)}; \frac{\dot{U}_{C1}}{\dot{U}_{C2}} = K_U e^{j(\theta+240^\circ)}; \end{aligned} \quad (17)$$

где - K_I, K_U – отношение модулей токов и напряжений фаз разных цепей, соответственно; θ – угловой сдвиг между трехфазными системами токов одной цепи по отношению к другой цепи. Это же значение углового сдвига принято между системами векторов напряжений цепей.

С учетом данных условий значения эквивалентных величин индуктивного сопротивления и емкостной проводимости примут вид (для фаз A_1 и A_2):

$$X_{0s} = X_0 + X_{0m} K_I e^{j\theta}; B_{0s} = B_0 - B_{0m} K_U e^{j\theta} \quad (18)$$

Если принять условие, что $K_I = K_U$, то в общем случае:

$$X_{0\theta} = X_0 + X_{0m} e^{j\theta}; B_{0\theta} = B_0 - B_{0m} e^{j\theta} \quad (19)$$

При различных значениях угла (θ) выражения (19) определяют:

$$\begin{aligned} X_{0\theta} &= X_0 + X_{0m}; B_{0\theta} = B_0 - B_{0m} \text{ при } \theta = 0^\circ \text{ и} \\ X_{0\theta} &= X_0 - X_{0m}; B_{0\theta} = B_0 + B_{0m} \text{ при } \theta = 180^\circ \end{aligned} \quad (20)$$

При величине угла в пределах $\theta = 0 \div 180^\circ$, указанные параметры принимают промежуточное значение.

Изменение углового сдвига между системами векторов напряжений цепей в пределах $\theta = 0 \div 180^\circ$ позволяет регулировать указанные эквивалентные параметры в диапазоне $0.8 \div 1.6$ и, соответственно, пропускную способность линии, а также величину ее натуральной мощности и удельной зарядной мощности, которая в расчете на одну фазу будет равна: $Q_{0c} = U^2 \omega C_{0e}$, где U – напряжение фазы; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; C_{0e} – удельная эквивалентная емкость фазы.

Величина зарядной мощности играет важную роль для поддержания заданного уровня напряжения вдоль линии при изменении величины передаваемой мощности. Путем изменения углового сдвига между системами векторов напряжений цепей в пределах $\theta = 0 \div 180^\circ$ можно обеспечить постоянство напряжения вдоль линии при изменении величины передаваемой мощности в пределах $0.8-1.6$ от величины натуральной мощности каждой цепи линии. В остальном диапазоне передаваемой мощности (от 0 до $0.8 P_n$) для регулирования уровней напряжения вдоль линии должны быть предусмотрены устройства поперечной индуктивной компенсации (например, регулируемые шунтирующие реакторы – УШР).

В процессе управления параметрами режимов сказывается влияние всех первичных параметров линий, а также протяженность и передаваемая мощность. Основной математической базой, увязывающей параметры линии и параметры режимов в комплексе, при этом являются системы уравнений. Их составление и решение является самостоятельной задачей.

В данной работе ограничимся иллюстрацией структуры составленных исходных систем уравнений и описанием основных подходов к их решению. Подробное описание приведено во второй части, а также в [27].

III. ОСОБЕННОСТИ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ КОМПАКТНЫХ МНОГОЦЕПНЫХ (МНОГОФАЗНЫХ) УСВЛ И ПОДХОДОВ К СОСТАВЛЕНИЮ И ОСНОВНЫХ УРАВНЕНИЙ

Компактные многоцепные УСВЛ являются частным вариантом многоцепных (многофазных, многопроводных) линий электропередачи переменного тока, для которых может быть показана взаимная связь удельных параметров и параметров режимов. Для этого все рассуждения и закономерности справедливы для любого участка линии, в том числе и для элементарного участка, длиной (dx). На рис. 1 показана схема замещения элементарного участка многофазной линии. При разработке данной схемы замещения послужил аналог двухпроводной линии [29]. Для схемы замещения многофазной линии длиной (dx) может быть составлена система уравнений в частных производных.

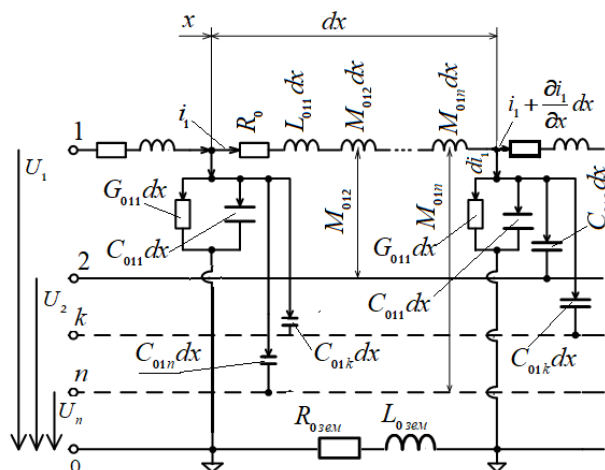


Рис.1. Схема замещения элементарного участка многопроводной линии.¹

По 2-ому закону Кирхгофа для замкнутого контура, образованного каждой фазой и остальными фазами, например, для фазы 1, отслеживая контур и идя по часовой стрелке, можно записать:

$$\begin{aligned} -U_1 + R_0 dx \cdot i_1 + L_{011} dx \frac{\partial i_1}{\partial t} - \\ -M_{012} dx \frac{\partial i_2}{\partial t} - \dots - M_{01n} dx \frac{\partial i_n}{\partial t} + U_1 + \frac{\partial U_1}{\partial x} dx = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

В уравнении (21) учтено, что токи i_2, \dots, i_n имеют противоположный знак по отношению к току i_1 , т.к. сумма всех токов $i_1 + i_2 + \dots + i_n = 0$ и отсюда $i_1 = -i_2 - \dots - i_n$.

¹ Appendix 1

После сокращения в уравнении (21) еличин $(-U_1)$ и (U_1) и деления на dx получим:

$$R_0 i_1 + L_{011} \frac{\partial i_1}{\partial t} - M_{012} \frac{\partial i_2}{\partial t} - \dots - M_{01n} \frac{\partial i_n}{\partial t} + \frac{\partial U_1}{\partial x} = 0. \quad (22)$$

Из выражения (22) находим:

$$-\frac{\partial U_1}{\partial x} = R_0 i_1 + L_{011} \frac{\partial i_1}{\partial t} - M_{012} \frac{\partial i_2}{\partial t} - \dots - M_{01n} \frac{\partial i_n}{\partial t} = 0 \quad (23)$$

По первому закону Кирхгофа запишем уравнение для тока (i_1) , (см. рис. 1):

$$i_1 = i_1 + \frac{\partial i_1}{\partial x} dx + di_1 \quad (24)$$

Выразим ток di_1 фазы (1) через составляющие. Ток di_1 равен сумме токов, протекающих через активную проводимость данной фазы $G_{01} dx$ и емкость $C_{01} dx$, благодаря приложенному фазному напряжению $(U_1 + \frac{\partial U_2}{\partial x} dx)$ тока, протекающего через емкости между фазами 1-2, т.е. $C_{012} dx$ под действием разности напряжений $(U_1 - U_2) + \frac{\partial}{\partial x}(U_1 - U_2) dx$ и через емкость $C_{01n} dx$ между фазами 1-n под приложенной разностью напряжений $(U_1 - U_n) + \frac{\partial}{\partial x}(U_1 - U_n) dx$

С учетом этого запишем выражение тока di_1 :

$$di_1 = di_{iG01} + di_{iC01} + di_{iC012} + \dots + di_{iC01n} \quad (25)$$

или

$$di_1 = \left(U_1 + \frac{\partial U_1}{\partial x} dx \right) G_{01} dx + \frac{\partial}{\partial t} C_{01} dx \left(U_1 + \frac{\partial U_1}{\partial x} dx \right) + \frac{\partial}{\partial t} C_{012} dx \left((U_1 - U_2) + \frac{\partial}{\partial x} (U_1 - U_2) dx \right) + \dots + \frac{\partial}{\partial t} C_{01n} dx \left((U_1 - U_n) + \frac{\partial}{\partial x} (U_1 - U_n) dx \right) \quad (26)$$

Раскроем скобки в выражении (26) и перепишем его после пренебрежения слагаемыми второго порядка малости:

$$di_1 = U_1 G_{01} dx + \frac{\partial}{\partial t} U_1 C_{01} dx + \frac{\partial}{\partial t} (U_1 - U_2) C_{012} dx + \dots + \frac{\partial}{\partial t} (U_1 - U_n) C_{01n} dx \quad (27)$$

Подставим (27) в (24):

$$i_1 = i_1 + \frac{\partial i_1}{\partial x} dx + U_1 G_{01} dx + \frac{\partial U_1}{\partial t} C_{01} dx + \frac{\partial}{\partial t} (U_1 - U_2) C_{012} dx + \dots + \frac{\partial}{\partial t} (U_1 - U_n) C_{01n} dx \quad (28)$$

Сократим выражение (28) на (i_1) и разделим на dx , в результате получим:

$$0 = \frac{\partial i_1}{\partial x} + U_1 G_{01} + \frac{\partial U_1}{\partial t} C_{01} + \frac{\partial}{\partial t} (U_1 - U_2) C_{012} + \dots + \frac{\partial}{\partial t} (U_1 - U_n) C_{01n} \quad (29)$$

Отсюда, из (29):

$$-\frac{\partial i_1}{\partial x} = U_1 G_{01} + \frac{\partial U_1}{\partial t} C_{01} + \frac{\partial U_1}{\partial t} C_{012} - \frac{\partial U_1}{\partial t} C_{012} + \dots + \frac{\partial U_1}{\partial t} C_{01n} - \frac{\partial U_2}{\partial t} C_{01n}. \quad (30)$$

Сгруппируем слагаемые при $\frac{\partial U_1}{\partial t}$:

$$-\frac{\partial i_1}{\partial x} = U_1 G_{01} + (C_{01} + C_{012} + \dots + C_{01n}) \frac{\partial U_1}{\partial t} - C_{012} \frac{\partial U_2}{\partial t} - \dots - C_{01n} \frac{\partial U_n}{\partial t}. \quad (31)$$

Введем обозначение:

$$C_{01} + C_{012} + \dots + C_{01n} = C_{01\Sigma} \quad (32)$$

Выражение (31) с учетом (32) примет вид:

$$-\frac{\partial i_1}{\partial x} = U_1 G_{01} + C_{01\Sigma} \frac{\partial U_1}{\partial t} - C_{012} \frac{\partial U_2}{\partial t} - \dots - C_{01n} \frac{\partial U_n}{\partial t}. \quad (33)$$

Запишем уравнения (24, 33) в общем виде для многофазной ВЛ с распределенными параметрами при отсчете длины (x) от начала линии:

Для фазы 1:

$$\begin{cases} -\frac{\partial U_1}{\partial x} = R_0 i_1 + L_{011} \frac{\partial i_1}{\partial t} - M_{012} \frac{\partial i_2}{\partial t} - \dots - M_{01n} \frac{\partial i_n}{\partial t}; \\ -\frac{\partial i_1}{\partial x} = U_1 G_{01} + C_{01\Sigma} \frac{\partial U_1}{\partial t} - C_{012} \frac{\partial U_2}{\partial t} - \dots - C_{01n} \frac{\partial U_n}{\partial t}. \end{cases} \quad (34)$$

Для фазы 2:

$$\begin{cases} -\frac{\partial U_2}{\partial x} = R_{02}i_2 + L_{022}\frac{\partial i_2}{\partial t} - M_{021}\frac{\partial i_1}{\partial t} - \dots - M_{02n}\frac{\partial i_n}{\partial t}; \\ -\frac{\partial i_2}{\partial x} = U_2G_{02} + C_{02\Sigma}\frac{\partial U_2}{\partial t} - C_{021}\frac{\partial U_1}{\partial t} - \dots - C_{02n}\frac{\partial U_n}{\partial t}. \end{cases} \quad (35)$$

Для фазы n:

$$\begin{cases} -\frac{\partial U_n}{\partial x} = R_{0n}i_n + L_{0nn}\frac{\partial i_n}{\partial t} - M_{0n1}\frac{\partial i_1}{\partial t} - \dots - M_{0n(n-1)}\frac{\partial i_{n-1}}{\partial t}; \\ -\frac{\partial i_n}{\partial x} = U_nG_{0n} + C_{0n\Sigma}\frac{\partial U_n}{\partial t} - C_{0n1}\frac{\partial U_1}{\partial t} - \dots - C_{0n(n-1)}\frac{\partial U_{n-1}}{\partial t}. \end{cases} \quad (36)$$

Уравнения (34-36) являются системой основных дифференциальных уравнений линии электропередачи с распределенными параметрами в частных производных. Линии содержат число фаз, более двух (1, 2, ..., n), при отсчете длины (x) от начала линии.

Если принять условие, что напряжения (U) и ток (i) являются синусоидальными по времени, то можно при дальнейших выкладках воспользоваться символическим методом, перейдя для синусоидальных величин токов и напряжений к системам обычных дифференциальных уравнений линий и последующему их решению [27]. Это приведено во второй части статьи в настоящем издании.

IV. ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К ВЫБОРУ КОНСТРУКЦИИ КОМПАКТНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ САМОКОМПЕНСИРУЮЩИХСЯ ЛИНИЙ ЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Компактные управляемые самокомпенсирующиеся высоковольтные линии электропередачи (УСВЛ) являются многопроводными многоцепными линиями переменного тока. Для описания происходящих в них процессов, проведения расчетов режимов и выбора основных технических решений для них применимы основы теории электропередач переменного тока. Вместе с тем УСВЛ имеют свои особенности и отличия, что потребовало дополнительных разработок новых методик расчета и новых подходов к выбору основных схем, конструкции и аппаратного оснащения.

На основании исследований и анализа влияющих факторов установлено, что для обеспечения максимальной величины натуральной мощности линии, необходимо максимально увеличить суммарный заряд линии. При этом линий будет 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 разных цепей.

Таким образом, для повышения пропускной способности и улучшения показателей линий необходимо изменить их параметры, что, однако, требует 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. Исходными для анализа и проведения исследований приняты многопроводные многофазные воздушные линии электропередачи.

При произвольном расположении проводов (и фаз) и приложенных к ним векторах напряжений и протекающих токов электромагнитное поле имеет также произвольные параметры. Картина электромагнитного поля двухпроводной линии показана на рисинке 2, а многопроводной многопроводной линии - на рис. 3.

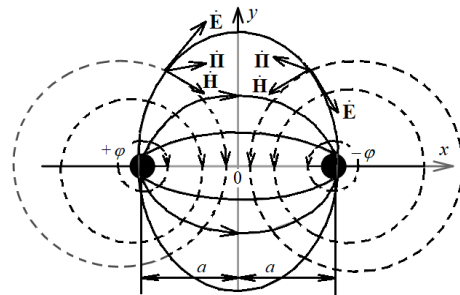


Рис. 2. Конфигурация электромагнитного поля двухпроводной линии.²

² Appendix 1

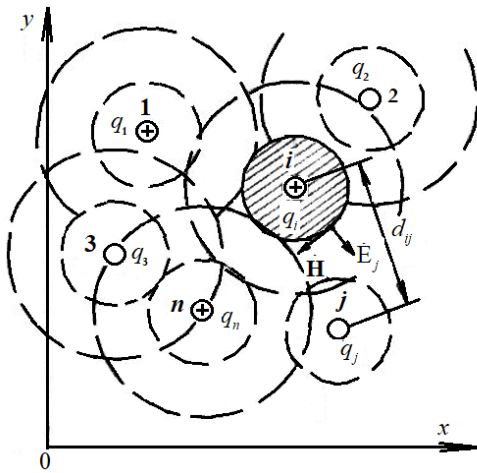


Рис.3. Конфигурация электромагнитного поля n- проводной линии.³

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 (12). Показателем пропускной способности линии может наглядно служить величина натуральной мощности линии, определяемая выражением (13).

Для получения максимальной пропускной способности линии в соответствии с выражением (13) необходимо обеспечить максимальное значение суммы зарядов всех проводников линии. В принципе, задача является оптимизационной.

Величины зарядов проводников (q_i) висят от значений напряжения (U_i) и эквивалентной емкости (C_i), 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, вновь 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 их значений для ВЛ различных классов напряжения приведены на рис. 4. 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. Компактные конструкции возможны как для одноцепных трехфазных ВЛ, так и для двухцепных и многоцепных линий. На рис. 5 показан фрагмент конструкции двух сближенных фаз, принятой в качестве основного технического решения для компактных ВЛ.

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 (распорок 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

³ Appendix 1

решения находят свое применение при создании одноцепных трехфазных компактных ВЛ.

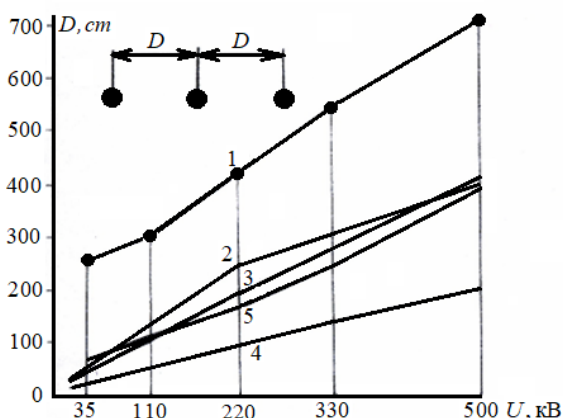


Рис. 4. Минимально допустимые расстояния между фазами ВЛ согласно ПУЭ: 1 – принимаемые для ВЛ обычной конструкции; 2, 3, 5 – по коммутационным и грозовым перенапряжениям; 4 – по максимальным рабочим напряжениям.⁴

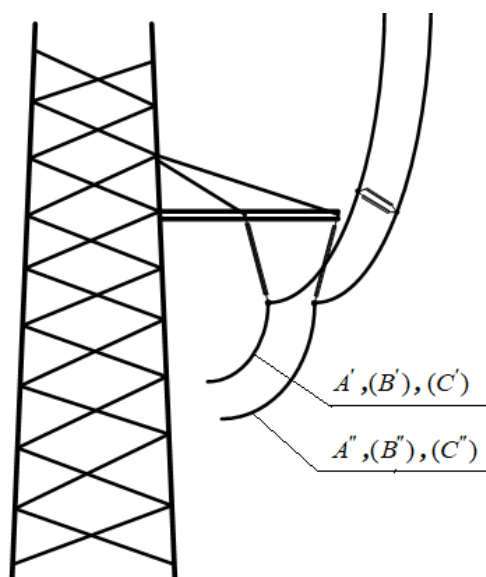


Рис. 5. Фрагмент конструкции двух сближенных фаз компактной ВЛ: A', B', C' - возможные фазы одной цепи; A'', B'', C'' - возможные фазы второй цепи; в пролете – изоляционный элемент (распорка или стяжка).⁵

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 (распорок 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 можно сформировать компактную двухцепную УСВЛ.

В двухцепной обычной ВЛ фазы одной трехфазной цепи располагаются по одну сторону стойки опоры (на рис. 6, 7 слева), а другой цепи по другую сторону стоки опоры, при значительном расстоянии между цепями и фазами самих цепей.

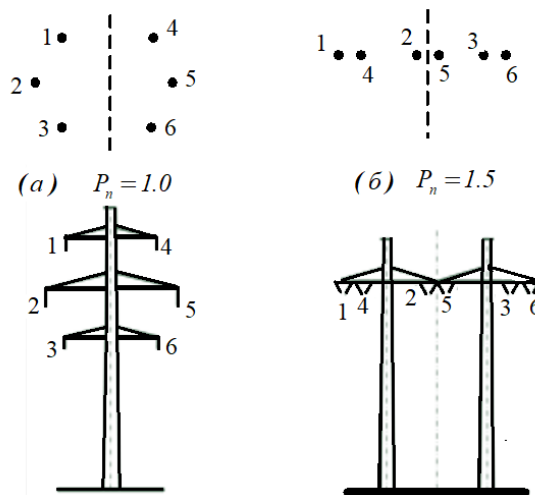


Рис. 6. Исходные варианты опор двухцепных ВЛ и передаваемая мощность.

В варианте компактной двухцепной УСВЛ фазы располагаются парами, в которых одна фаза принадлежит первой трехфазной цепи, а вторая – второй цепи. Конструкции опоры таковы, что дают возможность сблизить их между собой на минимально допустимое расстояние. Между сближенными фазами

отсутствуют заземленные элементы. Таким образом, двухцепная компактная УСВЛ будет состоять из трех пар сближенных фаз, используя принципиальное решение, показанное на рис. 7 (справа).

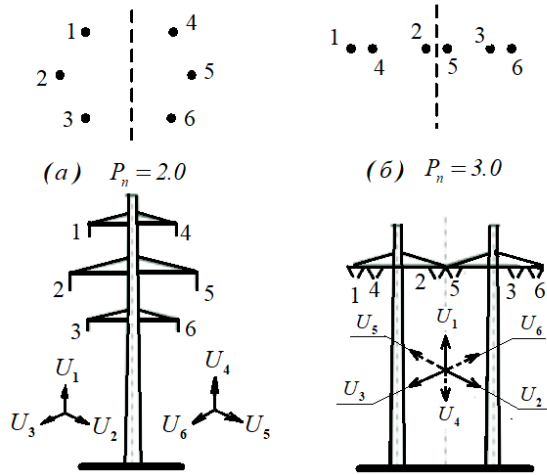


Рис. 7. Расположение фаз на опорах обычной двухцепной ВЛ (а) и компактной двухцепной УСВЛ (б) и натуральная мощность от углового сдвига между трехфазными системами напряжений цепей.⁷

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

Требования к проводам и конструкциям самих фаз УСВЛ остаются такими же, как и для обычных ВЛ. При сопоставлении 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_n).

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

практическом 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 регулируемой электропередачи является дальнейшим развитием направления гибких электропередач, так как в дополнение включает идеи и способы регулирования параметров и собственно линий, благодаря чему 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).

V. 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, отличия режимов и многими другими.

К настоящему времени удалось реально построить и проверить на практике работоспособность одноцепных трехфазных ВЛСФ-10 кВ и двухцепных УСВЛ напряжением 10, 35, 110 кВ, показанных на фотографиях.

А. Самокомпенсирующиеся воздушная линия 10 кВ (СВЛ 10 кВ)

СВЛ-10 кВ. Первой была сооружена в 1973 г. опытно-промышленная СВЛ-10 кВ протяженностью 1.2 км при проектной

⁷ Appendix 1

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-10кВ 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 «Молдэнерго». Одноцепные ВЛ-10 кВ с уменьшенными междоузельными расстояниями обеспечивают снижение индуктивного сопротивления на 20-23%, а также улучшение технико-экономических показателей по сравнению с обычными ВЛ.

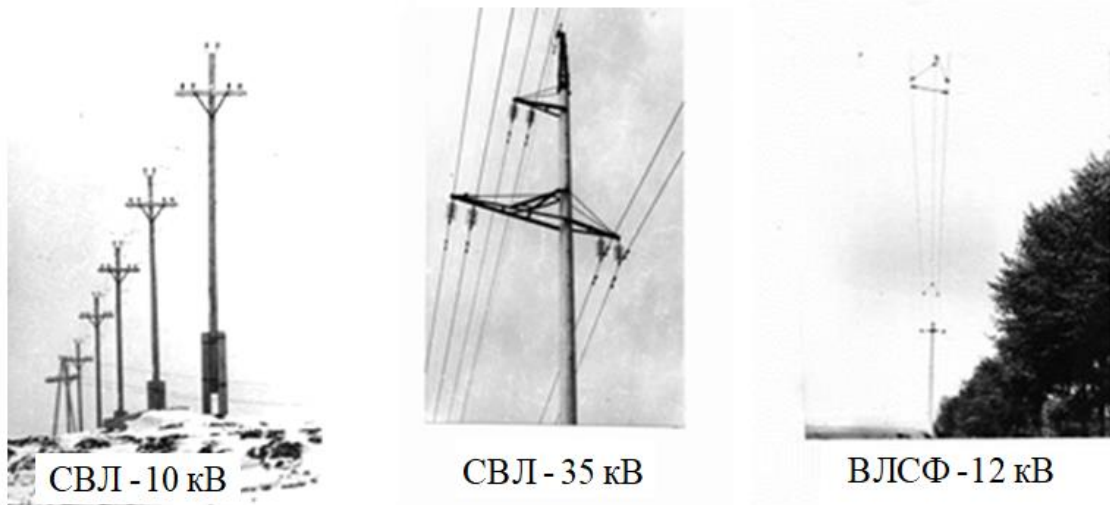


Рис. 8. Первые в мире промышленные двухцепные СВЛ-10,35 кВ и ВЛСФ-10 кВ, построенные в Молдавской энергосистеме.⁸

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 экономию капитальных вложений на 12. 6%., рис.8 (центральное фото).

УСВЛ-110 кВ Протяженность разработанной линии составила 76 км, а построенного в 1979 г. первого ее участка – 34 км (рис. 9 справа) на одностоечных и второго участка - 20 км на двухстоечных двухцепных опорах (рис. 9 слева). 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.

Созданию линии предшествовали механические испытания элементов

⁸ Appendix 1

конструкции на полигоне ПО «Союзтехэнерго», и электрические на Высоковольтной испытательной станции Института энергетики АН Молдовы, рис.10.

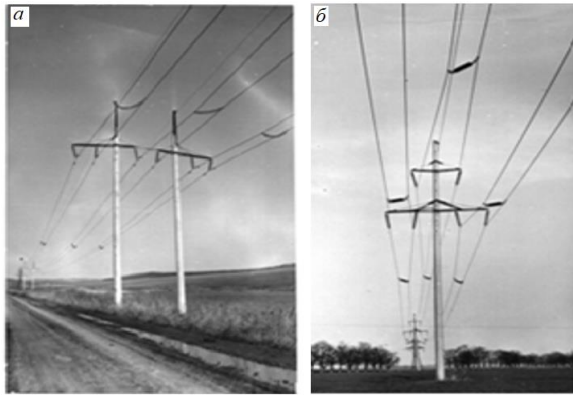


Рис. 9. Первая в мире управляемая двухцепная самокомпенсирующаяся высоковольтная линия электропередачи 110 кВ на двухстоечных (а) и одностоечных (б) опорах.⁹



Рис 10. Высоковольтный полигон: ГИН-2500 кВ, ИТ-500 кВ, две фазы УСВЛ-500 кВ на опоре ВЛ-550 кВ (УСВЛ-500 кВ содержит 2 трехфазные цепи, общее число фаз равно 6, показаны 2).¹⁰

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. 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, 500 кВ. 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 %, и 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.

VI. 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.

3. Компактные управляемые ВЛ в сочетании с устройствами FACTS по сравнению с ВЛ традиционной конструкции позволяют: увеличить пропускную способность в 1.2-1.6 раза; снизить суммарные затраты в расчете на единицу передаваемой мощности на 10–20%; сократить в 1.5-2 раза площади земельных угодий, отчуждаемых под воздушные линии при передаче одинаковой мощности; снизить уровень электромагнитных полей во внешнем пространстве, в таком образом уменьшить воздействие ВЛ на окружающую среду и население; обеспечить управление величиной и направлением потоков мощности в электрических сетях; повысить

эффективность использования устройств регулирования реактивной мощности; снизить суммарные потери электроэнергии в энергосистеме; повысить устойчивость ВЛ при воздействии неблагоприятных атмосферных факторов.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹**Fig. 1.** The equivalent circuit of the elementary section of the multi-wire line.

²**Fig. 2.** The configuration of the electromagnetic field of a two-wire line.

³**Fig. 3.** Configuration of the electromagnetic field of the n-wire line.

⁴**Fig. 4.** The minimum allowable distance between the phases of the overhead lines according to the PUE: 1 - accepted for the overhead lines of conventional design; 2, 3, 5 - on switching and lightning overvoltages; 4 - for maximum operating voltages.

⁵**Fig. 5.** A fragment of the design of two close phases of a compact overhead line: A', B', C' - possible phases of one circuit; A'', B'', C'' - possible phases of the second chain; in the span - an insulating element (spacer or screed).

⁶**Fig. 6.** The original options for supporting double-circuit overhead lines and transmitted power.

⁷**Fig. 7.** The arrangement of phases on the supports of a conventional double-circuit AL (a) and a compact double-circuit USVL (b) and the natural power from the angular shift between three-phase voltage systems of circuits.

⁸**Fig. 8.** The world's first industrial double-circuit SVL-10.35 kV and VLSF-10 kV, manufacturing in the Moldovan power system.

⁹**Fig. 9.** The world's first controlled double-circuit self-compensating high-voltage power line 110 kV on two-post (a) and one-post (b) supports.

¹⁰**Fig. 10.** High-voltage testing ground: GIN-2500 kV, IT-500 kV, two phases of the USVL-500 kV on a VL-550 kV support (USVL-500 kV contains 2 three-phase circuits, the total number of phases is 6, 2 are shown).

Литература (References)

- [1] Upravlyayemyye (gibkiye) sistemy peredachi peremennogo toka (flexible AC Transmission system, FACTS). Sostavitel' d.t.n. prof. YU.G. Shakaryan, OAO «VNIIE», 41 s.
- [2] Solovieff I.I. An Investigation of a special circuit for long transmission of electric power. Cand. Diss., USA, 1933, -156 p.
- [3] Rakushev N.F. Sverkhdal'nyaya peredacha energii peremennym tokom po razomknutyim liniyam [Ultra long range AC power transmission over open lines]. – M.: GEI, 1957, -160 s.
- [4] Postolaty V.M. Issledovaniye upravlyayemykh polurazomknutykh elektroperedach peremennogo toka [Study of controlled semi-open AC power

- transmissions]. Avtoref. kand. diss. – M., 1968, – 28s.
- [5] SU patent 218294 (SSSR). Sposob peredachi elektroenergii [Electric Power Transmission Method]/V.A. Venikov, G.V. Chalyy, V.M. Postolatiy. – Zayavl. 6.12.66. № 1116879. Opubl. v B.I., 1968, № 17.
- [6] SU patent 266924 (SSSR). Sposob peredachi elektroenergii [Electric Power Transmission Method]/V.A. Venikov, YU.N. Astakhov, V.M. Postolatiy. – Zayavl. 4.11.68. № 1280553. Opubl. v B.I., 1970, № 12.
- [7] SU patent 566288 (SSSR). Elektroperedacha peremennogo toka [AC power transmission]/V.M. Postolatiy, V.A. Venikov, YU.N. Astakhov, G.V. Chalyy, L.P. Kalinin. Zayavl. 21.03.74. № 2006496. Opubl. v B.I., 1977, № 27.
- [8] Elektroperedacha peremennogo toka [AC power transmission]/Postolatiy V.M., Venikov V.A., Astakhov YU.N., Chalyy G.V., Kalinin L.P. Patenty: SSHA №4001672, 1977; GDR № 116990, 1976; Frantsii № 7508749, 1977; Anglii № 1488442, 1978; Shvetsii № 75032268, 1978; Kanady № 1038029, 1978; FRG № 2511928, 1979; Yaponii № 1096176, 1982.
- [9] Astakhov YU.N., Venikov V.A., Postolatiy V.M. i dr. osnovnyye printsipy sozdaniya i tekhnicheskkiye kharakteristiki upravlyayemykh samokompensiruyushchikhsya liniy elektroperedachi [Basic principles of creation and technical characteristics of controlled self-compensating power lines], - Elektrichestvo, 1977, № 12, s. 37-44.
- [10] Astakhov Yu.N., Postolatiy V.M., Komendant I.T., Chalyy G.V. Upravlyayemye linii elektroperedachi [Управляемые линии электропередачи]. Pod red. V.A. Venikova, Izd-vo Shtiintsa, 1984, 296 s.
- [11] Upravlyayemye elektroperedachi [Controllable power lines]. Vypusk № 8 (23), trudy Instituta energetiki AN Moldovy za 2001-2007 g. Sostaviteli: Postolatiy V.M., Bykova Ye.V. Kishinev, 2007. 234 s.
- [12] Ustroystvo izmeneniya fazovogo sdviga [Phase Shift Device] / Boshnyaga V.A., Kalinin L.P., Postolatiy V.M. Patenty: SSHA № 3975673, 1976; GDR № 119494, 1976; GDR № 123846, 1977; SSHA № 4013942, 1977; Anglii № 1484522, 1977; Frantsii № 7522737, 1977; Anglii 1493652, 1978; Shvetsii № 7508349, 1978; Shvetsii № 7508350, 1978; FRG № 2531578, 1978; FRG № 2531644, 1978; Frantsii № 7522615, 1978; Kanady № 1045202, 1978; Kanady № 1041172, 1978.
- [13] Postolatiy V. M., Kalinin L. P., Zaytsev D. A., Bykova E. V. Sovremennyye sredstva regulirovaniya peretokov moshchnosti i effektivnost' primeneniya ikh v energosistemakh [Modern means of regulating power flows and their efficiency in power systems]. Sbornik dokladov mezhdunarodnoy konferentsii «Energetika Moldovy – 2005». s. 2006-219.
- [14] Ryzhov Yu. P. Dal'niye elektroperedachi sverkhvysokogo napryazheniya [Long-distance power transmission of extra-high voltage]: uchebnik dlya VUZov/Yu. P. Ryzhov. – M.: Izdatel'skiy dom MEI, 2007. – 488 s.: ill.
- [15] Aleksandrov Gh. N. Peredacha elektricheskoy energii [Transmission of electrical energy.]. SPb.: Izd-vo Politekhnikeskogo universiteta, 2007. 412 s. (Energetika v politekhnikeskom universitete).
- [16] Polivanov K.M. Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki [Theoretical foundations of electrical engineering]. Ch.3. Teoriya elektromagnitnogo polya. – M.: Energiya. 1969. – 352 s.
- [17] Postolatiy V.M. Teoreticheskiye osnovy i printsipy sozdaniya upravlyayemykh samokompensiruyushchikhsya liniy elektroperedach [Theoretical foundations and principles of creating controlled self-compensating power lines.]. Dis. na soisk. uch. st. d.t.n., Kishinev, 1987. 529 s.
- [18] Vul'f A.A. Problema peredachi elektricheskoy energii na sverkhdal'niye rasstoyaniya po kompensirovannym liniyam [The problem of transferring electric energy to extra steel distances along compensated lines]. – M.: GEI, 1941. – 100 s.
- [19] Venikov V.A. Dal'niye elektroperedachi [Long distance power transmission]. – M.L.: GEI, 1960. – 312 s.
- [20] Shcherbakov V.K., Lukashov E.S., Olshevskiy O.V., Putilova A.T. Nastroyeniye elektroperedachi [The mood of power transmission]. Novosibirsk, 1963.
- [21] Vershkov V. A., Nakhapetyan K. T., Ol'shevskiy O. V., Sovalov S. A., Fotin V. P., Shcherbakov V. K. Kompleksnyye ispytaniya poluvolnovoy elektroperedachi v seti 500 kV EES Yevropeyskoy chasti SSSR [Complex tests of half-wave power transmission in a 500 kV network of the UES of the European part of the USSR]. Elektrichestvo, 1968, № 8.
- [22] Vorob'yev G.V., Zaslavskaya T.B., Alyuzhnyy A.Kh., Lukashov E.S., Ol'shevskiy O.V., Putilova A.T., Khakimov F.Z., Khalevin V.K., Shcherbakov V.K. Tekhnicheskkiye i ekonomicheskkiye kharakteristiki nastroyennykh elektroperedach [Technical and economic characteristics of tuned power lines]. Pod red. V.K. Shcherbakova. Novosibirsk. – Nauka, 1965. 68 s.
- [23] Shakaryan Yu. G., Timashova L. V., Kareva S.N., V. M. Postolatiy V. M., Bykova E. V., Suslov V. M. Effektivnost' primeneniya kompaktnykh liniy elektroperedachi peremennogo toka [Efficiency of using compact AC power lines]. Sbornik statey:

- Innovatsionnyye tekhnicheskiye resheniya v programme NIOKR PAO «FSK YEES», pod obshchey redaktsiyey A.Ye. Murova. M.:Izdatel'stvo AO «NTTS FSK YEES», 2016, s.76-104.
- [24] Spravochnik po elektricheskim setyam 0,4 – 35 kV i 110 – 1150 kV [Handbook of electrical networks 0.4 - 35 kV and 110 - 1150 kV]./Koll. Avt.-M.: ID «Energiya», 2009.- Tom 10-816 s.
- [25] Bibliya energetika [Energy library][Tekst]: PUE (shestoye i sed'moye izdaniya, vse deystvuyushchiye razdely); MPOT; PTE. – Novosibirsk: Sib. univ. Iz-vo, 2011.- 688 s., ill.
- [26] Feasibility study for the interconnection of the power systems of the Republic of Moldova and Romania [Feasibility study of the interconnection of energy systems of the Republic of Moldova and Romania]. Part 1. Component A. Tasc 3: Feasibility study LEA 400 kV Vulcanesti - Chisinau. ISPE, ivl, Moldelectrica, Energy Project, December 2017.
- [27] Postolatiy V.M. Kompaktnyye upravlyayemyye samokompensiruyushchiesya vysokovol'tnyye linii elektroperedachi peremennogo toka [Compact, controlled, self-compensating high-voltage AC power lines], Kishinev, 2017, 731 s.
- [28] Issledovaniye ratsional'nykh konstruksiy opor i fundamentov dlya upravlyayemykh samokompensiruyushchikhsya VL 220-1150 kV [Rational Design Research supports and foundation for controlling self-compensating overhead lines of 220-1150 kV]. Tom 2. Dvukhtsepnyye USVL 330/330 kV. Nauchno-tekhnicheskiy Otchet. VGPI i NII «ENERGOSET'PROYEKT», Severo-Zapadnoye otdeleniye. g. Leningrad 1979 g.
- [29] Bessonov L.A. Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki: Elektricheskiye tsepi [Theoretical Foundations of Electrical Engineering: Electrical Circuits.]. Uchebnik dlya studentov elektrotekhnicheskikh, energeticheskikh i priborostroitel'nykh spetsial'nostey, VUZov. – 7-oye izd. pererab. i dop. – M.: Vysshaya shkola, 1978. – 528 s., il.

Сведения об авторе.



Постолатий В.М., д.т.н., академик АН Молдовы, Институт энергетики АН Молдовы. Область научных интересов: энергетические системы, управляемые линии электропередач переменного тока повышенной пропускной способности, проблемы передачи энергии, режимы энергетических систем, переходные электромеханические процессы, электрические станции, теплоэнергетика, экономика энергетика, вопросы управления энергетическим комплексом
E-mail: vpostolati@rambler.ru