

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
Институт электродинамики

На правах рукописи

Солдатов Валерий Александрович

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ УПРАВЛЯЕМЫХ  
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ С ПОВЫШЕННОЙ ЕСТЕСТВЕННОЙ И  
ИСКУССТВЕННОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ НА  
ОСНОВЕ ФАЗОВОГО УПРАВЛЕНИЯ

Специальность: 05.14.02 - Электрические станции  
(электрическая часть), сети, электроэнергетические  
системы и управление ими

Автореферат  
диссертации на соискание ученой  
степени доктора технических наук

Киев - 1993

Работа выполнена в Институте энергетики Академии наук Молдовы.

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор,  
член-корреспондент Российской Академии наук

Александров Г.Н.

Доктор технических наук, профессор

Астахов Ю.Н.

Доктор технических наук, профессор

Зорин В.В.

Ведущее предприятие:

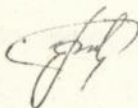
Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт "Энергосетьпроект" (г. Москва)

Защита состоится "8" июня 1993 г. в 14<sup>00</sup> час. мин. на заседании специализированного совета Д 016.30.04 при Институте электродинамики Академии наук Украины (252680, Киев - 57, проспект Победы, 56; тел. 446-91-15).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института электродинамики АН Украины.

Автореферат разослан "14" апреля 1993 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
д.т.н.



Т.М. Федоренко

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00803092 (M)

ЛННБ ім. В. Стефаніка  
АН України

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для оптимального развития электрических сетей наряду с повышением пропускной способности (п.с.) и уменьшением экологического влияния (э.в.) увеличивается требование и к способности управления потоками мощности по электропередачам. До последнего времени основным направлением увеличения п.с. ЛЭП было освоение новых классов СВН и УВН. Этот путь связан с известными техническими, экономическими и экологическими трудностями.

Повышение п.с. и управляемости, а также снижение э.в. ЛЭП уже освоенных классов напряжения при снижении капитальных затрат, издержек от потерь энергии и приведенных затрат по электропередаче является актуальной задачей.

Работы в данном направлении ведутся как в СНГ, так и за рубежом. В определенной мере решить поставленные задачи позволяют рассматриваемые в работе управляемые линии электропередачи с повышенной пропускной способностью на основе фазового управления, а именно: управляемые самокомпенсирующиеся высоковольтные линии (УСВЛ) и ЛЭП с управляемой продольной компенсацией на основе конденсаторной батареи и фазорегулирующего трансформатора (УПК ФРТ). Эти два вида ЛЭП объединяет то, что управление параметрами и режимами в них осуществляется на основе фазового управления. В случае УСВЛ можно говорить об "естественной" увеличенной пропускной способности, которая достигается улучшенным использованием проводникового материала. В случае ЛЭП с УПК ФРТ можно говорить об "искусственной" увеличенной пропускной способности, которая достигается компенсированием сосредоточенных параметров ЛЭП с возможностью генерирования необходимой реактивной мощности конденсаторной батареей.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом научных исследований, проводимых лабораторией управляемых электропередач Отдела энергетической кибернетики АН МССР (ныне Институт энергетике АН РМ), начиная с 1976 года.

Основой данных исследований являются: постановления Государственного комитета СССР по науке и технике, принятые по вопросам исследований и разработок управляемых линий электропередачи повышенной пропускной способности: № 72 от 17.03.1976, № 232 от 5.06.1978, № 24 от 12.09.1978, № 248 от 17.06.1980; целевая комплексная программа ОЦ 003 (подпрограмма 0.01.12.11, раздел 01.02), принятая на 1981-1985 гг. ГК НТ СССР и Госпланом СССР (постановление № 515/271 от 29.12.1981); план научных исследований АН СССР по

естественным и общественным наукам на 1981-1985 гг. (физико-технические и математические науки, I.9 физико-технические проблемы энергетики, раздел I.9.2.2); координационный план секции физико-технических и математических наук АН СССР в области научно-исследовательских работ по комплексной проблеме "Электрофизика и электроэнергетика" (шифр I.9.2, тема I.9.2.2, задание I.9.2.2.2, тема I.9.3.6, задание I.9.3.6.I.3.I.2) на 1986-1990 гг. (постановление № II000-494-I2I6 от 5.I2.1985); проблемно-тематический план многостороннего научного сотрудничества академий наук социалистических стран на 1983-1985 гг. и на 1986-1990 гг. в области физико-технических проблем энергетики (тема III, задание III-I.4); общесоюзная научно-техническая программа ОI, Энергетика на 1986-1990 гг. 0.0I.06, задание 05 (постановление ГК НТ СССР № 555 от 3.I0.1985 г.); постановления Президиума АН РМ по планам научно-исследовательских работ на 1976-1992 гг.

Объектом исследований являются управляемые линии электропередачи повышенной пропускной способности и их эффективность.

Целью работы являются:

- углубление и обобщение теории управляемых линий электропередачи с повышенной естественной и искусственной пропускной способностью на основе фазового управления;
- получение точных и упрощенных аналитических выражений, описывающих связь между натуральной мощностью, электрическими полями и конструкцией линий повышенной пропускной способности, а также позволяющих рассчитывать параметры схем замещения и нормальные режимы таких линий произвольной конструкции;
- разработка критериев и методики оптимизации взаимного расположения проводников линий электропередачи повышенной пропускной способности и произвольной конструкции;
- получение и исследование параметров оптимальных конструкций СВЛ-10, 35, 110 кВ и УСВЛ-220, 330, 500, 750, 1150 кВ;
- оптимизация нормального режима и исследование особых режимов УСВЛ при модульном и фазовом управлении;
- определение областей использования УСВЛ различного класса напряжения;
- разработка и исследования на основе фазового управления нового способа управляемой продольной компенсации (УПК ФРТ) для повышения пропускной способности и управляемости ЛЭП, а также оптимизация режима таких линий и выявление областей их применения.

- разработка методик синтеза схем и расчета параметров схем замещения, а также симметричных и несимметричных режимов работы фазорегулирующих трансформаторов;

- разработка методики оценки эффективности управляемых ветвей на основе оптимизации режима электрических сетей, содержащих такие ветви.

Методы исследования, применяемые в работе, основаны на теории электрического поля и электрических цепей, теории нелинейного математического программирования, использовании матричной алгебры и теории эквивалентирования. В работе применялась современная вычислительная техника.

Научная новизна и положения выносимые на защиту.

1. Осуществлено решение научной проблемы, имеющей важное народнохозяйственное значение, и заключающейся в разработке и углублении теории, методик расчета и исследования свойств и эффективности управляемых линий электропередачи с повышенной "естественной" и "искусственной" пропускной способностью на основе фазового управления.

2. Разработка критериев и методики оптимизации взаимного расположения проводников линий электропередачи повышенной пропускной способности и произвольной конструкции на основе полученных в работе соотношений между натуральной мощностью, электрическими полями и конструкцией линии, а также аналитических выражений для градиентов натуральных мощностей проводников.

3. Обобщение методики расчета погонных, волновых и обобщенных параметров, а также параметров схем замещения линий произвольной конструкции с эквивалентированием уравнений по числу: проводников, фаз, цепей, одного эквивалентного провода с иллюстрацией выкладок и расчетов на примере УСВЛ.

4. Получение и исследование параметров оптимальных конструкций УСВЛ класса 10, 35, 110, 220, 330, 500, 750, 1150 кВ на основе предложенных критериев и методик.

5. Оптимизация нормального режима и исследование особых режимов УСВЛ при модульном и фазовом управлении на основе полученных аналитических выражений.

6. Определение областей использования УСВЛ различного класса напряжения в сравнении с несколькими традиционными цепями ЛЭП того же класса напряжения и одноцепными ЛЭП более высокого класса напряжения, позволивших предложить альтернативный вариант развития электрических сетей ЕЭС на далекую перспективу (двухсотузловая схема).

7. Разработка и исследование нового способа управляемой продольной компенсации на основе конденсаторной батареи и фазорегулирующего трансформатора, включенных параллельно, и исследование свойств, параметров и режимов ЛЭП с таким устройством, а также получение областей применения таких ЛЭП.

8. Разработка методик синтеза схем и расчета параметров схем замещения, а также симметричных и несимметричных режимов работы фазорегулирующих трансформаторов произвольной конструкции с несколькими входами и выходами на основе примеров расчета трех предложенных в работе схем и наиболее перспективных схем фазорегуляторов с предложением использовать фазорегуляторы в режиме поперечного реактора для расширения области их применения.

9. Разработка методики оценки эффективности управляемых ветвей в электрических сетях, позволяющей определять места включения и оптимальные параметры на основе полученных выражений для производных от потерь активной мощности по величине фазового сдвига и величине продольного сопротивления ветви, проиллюстрированной на примере оптимизации режима электрической сети Южной части ЕЭС.

Практическая ценность. Разработанные критерии и методики расчета и оптимизации параметров и режимов управляемых ЛЭП повышенной пропускной способности реализованы в программах для ЭВМ, позволяющих выявить экономически выгодные конструкции ЛЭП и способы управления их режимами, которые могут использоваться при исследовании, проектировании и создании таких ЛЭП.

С использованием рекомендаций и разработок, приведенных в диссертации, спроектированы и созданы на практике СВЛ-10, 35, 110 кВ, выполнен рабочий проект СВЛ-220 кВ, сделаны проектные проработки вариантов УСВЛ-330, 500, 750, 1150 кВ. На базе УСВЛ-330, 500, 750, 1150 кВ разработан альтернативный вариант электрических сетей ЕЭС (двухсотузловая схема) на далекую перспективу. Показано, что варианты сети с УСВЛ обеспечивают значительное улучшение технико-экономических показателей и достижение существенного народнохозяйственного эффекта.

Рекомендации и разработки, приведенные в диссертации, использовались также при создании опытно-промышленных образцов ФРТ-35 и 110 кВ.

Выполненные разработки позволяют расширить область применения электропередач переменного тока путем снижения капитальных затрат, издержек от потерь энергии и суммарных приведенных затрат по электропередаче и в ряде случаев отказаться от перехода на более высокую степень напряжения.

Достоверность разработанных методик и программ подтверждается данными натуральных экспериментов на опытно-промышленных СВЛ-10, 35, 110 кВ, опытно-промышленного образца ФРТ-110 кВ, а также строгими преобразованиями на основе теорий, описанных в методах исследования.

Реализация работы. Основные положения диссертационной работы в виде методик, программ, рекомендаций и результатов расчетов переданы для внедрения: в ВГПИ и НИИ "Энергосетьпроект", Запорожский институт трансформаторостроения (ЗИТ), Центральное диспетчерское управление (ЦДУ СССР), Молдэнерго, Ленинградское отделение ВГПИ и НИИ "Гидропроект", ЛЭО "Дальние электропередачи". Материалы в виде основных теоретических разработок и методик расчета нашли применение в учебном процессе Кишиневского политехнического института и Московского энергетического института. Некоторые научные материалы переданы в соответствии с планами многостороннего сотрудничества академий наук социалистических стран.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: совместном заседании Всесоюзного научно-технического семинара "Проблемы оптимизации передачи энергии переменным током" и Республиканского семинара "Передовой опыт в энергосистемах и возможности его использования в Молдавии" - Кишинев, 1984, 1987 гг.; конференции молодых ученых АН МССР - 1984, 1986, 1988 гг.; заседаниях кафедр электрических систем и электрических аппаратов Ленинградского политехнического института - 1985, 1987 гг.; заседаниях кафедры электрических систем Московского энергетического института - 1985, 1992 гг., заседаниях кафедры Кишиневского политехнического института - 1987, 1992 гг.; Всесоюзном совещании ОЭС и ЭЭС СССР - 1989 г.; в г. Вроцлаве (Польша) - 1988 г.; Международной конференции по электрическим сетям (Гумьня) - 1992 г.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы изложено в 45 публикациях и 15 отчетах о НИР Отдела энергетической кибернетики АН МССР и Института энергетики АН РМ.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, восьми глав, выводов по каждой главе, заключения, списка литературы 165 наименований, 9-ти приложений и акт о внедрении, 104 таблиц, 186 рисунков. Основной машинописный текст, не включая приложений и рисунков составляет 300 страниц. Общий объём работы с приложениями 690 страниц.

Основное содержание диссертации:

**Введение.** Проводится анализ работ по исследованию управляемых линий электропередачи повышенной пропускной способности. Формулируются цели и задачи диссертационной работы, изложена её структура и краткая информация по главам, формулируются основные положения, выносимые на защиту. Показывается, что несмотря на выполненные ранее исследования в МЭИ, ЛПИ, ОЭК АН МССР, актуальной задачей является создание и обобщение методик, а также оптимизация параметров и режимов управляемых электропередач повышенной пропускной способности. Предлагаемые в диссертации методики расчета и оптимизации относятся к управляемым линиям электропередачи повышенной пропускной способности на основе фазового управления. Бвиду этого исследуются и оптимизируются как элементы конструкции самих линий и их режимы, так и фазорегулирующие трансформаторы, а также режимы электрических сетей, содержащих управляемые ветви.

**Первая глава.** На основе преобразования матричных телеграфных уравнений многопроводной линии получены различные соотношения между натуральной мощностью  $P_N$ , погонными потерями в режиме натуральной мощности  $\Delta P_N$  и параметрами проводников. Так, для линии с  $n$  одинаковыми проводниками при заданном модуле напряжения  $U$  получено:

$$\begin{cases} P_N = v_0 U^2 \sum_i \sum_j \beta_{ij} \cos(\varphi_i - \varphi_j); \\ \Delta P_N = v_0^2 UR \sum_i \sum_j \sum_k \beta_{ik} \beta_{kj} \cos(\varphi_i - \varphi_j); \\ P_N = v_0 U \sum_i q_i \cos(\varphi_i - \gamma_i); \\ \Delta P_N = v_0^2 UR \sum_i \sum_j \beta_{ij} q_i q_j \cos(\varphi_i - \gamma_j); \end{cases} \quad (1) \quad (2)$$

$$\begin{cases} P_N = v_0 \sum_i \sum_j \alpha_{ij} q_i q_j \cos(\gamma_i - \gamma_j); \\ \Delta P_N = v_0^2 R \sum_i q_i^2 \end{cases} \quad (3)$$

В (1)-(3) обозначено:  $v_0$  - скорость света;  $R$ ,  $\alpha_{ij}$ ,  $\beta_{ij}$  - активное сопротивление, потенциальные коэффициенты и коэффициенты электростатической индукции проводников;  $U$ ,  $\varphi_i$  - модуль и фаза напряжения  $i$ -го проводника;  $q_i$ ,  $\gamma_i$  - модуль и фаза заряда  $i$ -го проводника. Полученные выражения (1)-(3) хорошо обобщают различные возможные способы увеличения  $P_N$ . При заданном модуле  $U$ , увеличить  $P_N$  можно изменением как конструктивных параметров, так и режимных параметров линии:

1. Изменить геометрию взаимного расположения проводников, т.е. их координаты  $x_i$ ,  $y_i$  ( $\alpha_{ij}$ ,  $\beta_{ij}$ ,  $q_i = f(x_i, y_i)$ ). Из (3) видно, что  $P_N$  увеличивается при увеличении  $q_i$ . Этот способ нашел отражение в работах ЛПИ им. М.И.Калинина при создании одноцепных компактных линий повышенной  $P_N$ .

2. Изменить фазы напряжения проводников  $\varphi_i$ . Из (1) видно, что  $P_N$  изменяется при изменении разности ( $\varphi_i - \varphi_j$ ). Причем  $P_N$  максималь-

но, когда  $(\varphi_i - \varphi_j) = 180^\circ$ , т.к.  $\beta_{ii} > 0$ , а  $\beta_{ij} < 0$ . Однако обеспечить сдвиг фаз  $180^\circ$  между всеми проводниками невозможно. Возможно обеспечить  $180^\circ$  сдвиг лишь между двумя проводниками или двумя группами проводников. Этот способ нашел отражение в работах по созданию двухцепных УСВЛ, где вводится регулируемый фазовый сдвиг  $\theta$  между системами напряжений двух цепей.

3. Синтезировать первый и второй способы. Из (1)-(3) видно, что  $P_N$ ,  $\Delta P_N$ , нелинейным образом зависят от координат проводников  $x_i, y_i$  и существует бесчисленное множество сочетаний  $x_i, y_i, \varphi_i$ , обеспечивающих одинаковую  $P_N$ . Из этого множества надо выбрать наиболее целесообразные.

В работе найдены соотношения между параметрами РИМ линии для трех частных случаев: 1) - потери оптимальны ( $\Delta P_N \rightarrow \min$ ); 2) равны модули зарядов проводников ( $q_i = q_j$ ); 3) - равны натуральные мощности проводников ( $P_{Ni} = P_{Nj}$ ).

Показано, что при любом расположении проводников в линии, происходит перераспределение мощностей, протекающих по ним, что ведет к увеличению эквивалентного активного сопротивления  $R_3 = R[(\sum q_i^2) / (\sum q_i \cos(\varphi_i - \varphi_j))] / n$ , т.е.  $R_3 > \frac{R}{n}$ . Получены уравнения, связывающие геометрию расположения проводников с необходимой  $P_N$  как в общем, так и в трех частных случаях. Из этих уравнений (количество уравнений меньше  $2n$ ) показано, что существует множество расположений проводников, удовлетворяющих получению заданной одинаковой  $P_N$ . Эти уравнения могут быть решены итерационными методами относительно координат проводников ( $x_i, y_i, i=1 \div n$ ), однако они не учитывают ограничений на взаимное расположение проводников, накладываемые условиями электрической прочности, механики и допустимыми электрическими полями по короне и экологии. В связи с этим в работе представлен материал по расчету электрического поля как в точках пространства, окружающего проводники, так и на их поверхности с учетом несинфазности напряжений на них. Как показано ранее в других работах, в любой точке "М" плоскости поперечного сечения линии результирующий вектор напряженности электрического поля  $\vec{E}_M$ , равный сумме горизонтальной  $\vec{E}_{Mx} = E_x \cdot \sin(\omega t + \varphi_x)$  и вертикальной  $\vec{E}_{My} = E_y \sin(\omega t + \varphi_y)$  составляющих, вращается и описывает своим концом эллипс во времени, рис. 1. Для экстремальных  $E_{M, \max}, E_{M, \min}$  и действующего  $E_{M, g}$  значений напряженности в работе получены выражения:

$$E_{M, \max, \min} = \sqrt{E_x^2 \sin^2(\omega t_{\max, \min} + \varphi_x) + E_y^2 \sin^2(\omega t_{\max, \min} + \varphi_y)};$$

$$E_{M, g} = \sqrt{(E_x^2 + E_y^2) / 2}; \quad \omega t_{\max, \min} = \arctg((A \pm \sqrt{A^2 + B^2}) / B);$$

$$A = E_x^2 \cos 2\varphi_x + E_y^2 \cos 2\varphi_y; \quad B = E_x^2 \sin 2\varphi_x + E_y^2 \sin 2\varphi_y.$$

На поверхности круглого проводника результирующий вектор напряженности  $\vec{e}_i$ , является суперпозицией трех полей: поля от собственного заряда  $\vec{e}_{ci}$  и удвоенных горизонтальной  $\vec{e}_{xi}$  и вертикальной  $\vec{e}_{yi}$  составляющих вращающегося внешнего поля  $\vec{e}_{wi} = \vec{e}_{xi} + \vec{e}_{yi}$ , создаваемого всеми другими проводниками в точке расположения  $i$ -го проводника:

$$\vec{e}_i = \vec{e}_i(\xi, t) = (e_{ci} + 2e_{xi} \cos \xi + 2e_{yi} \cdot \sin \xi) \cdot \vec{\xi}_0 \quad (4)$$

Условиями короны ограничивается мгновенное максимальное значение напряженности на поверхности проводника, поэтому решив систему уравнений  $\frac{\partial e_i}{\partial \omega t} = 0; \frac{\partial e_i}{\partial \xi} = 0$  в работе получено уравнение четвертой степени, позволяющее определить времена  $\omega t_{1,2,3,4}$  и точки поверхности  $\xi_{1,2,3,4}$  проводника, в которых  $e_i$  экстремально:

$$t_0^4 \left(\frac{\xi}{2}\right) (a_i - c_i) + t_0^2 \left(\frac{\xi}{2}\right) (-2b_i - 2) + t_0^2 \left(\frac{\xi}{2}\right) (-6a_i) + t_0 \left(\frac{\xi}{2}\right) (2b_i - 2d_i) + (c_i + a_i) = 0;$$

$$b_i = 4(E_{yi}^2 - E_{xi}^2); \quad a_i = 4E_{xi}E_{yi} \cos(\varphi_{xi} - \varphi_{yi}); \quad c_i = 2E_{ci}E_{yi} \cos(\varphi_{yi} - \varphi_i);$$

$$d_i = 2E_{ci}E_{xi} \cos(\varphi_{xi} - \varphi_i); \quad \omega t_{1,2,3,4} = f(E_{ci}, \varphi_i, E_{xi}, \varphi_{xi}, E_{yi}, \varphi_{yi}, \xi_{1,2,3,4}).$$

После подстановки  $\xi_{1,2,3,4}$  и  $\omega t_{1,2,3,4}$  в (4) определяются значения  $e_{i,1,2,3,4}$  из которых выбирается максимальное  $E_{i,max}$ ;  $\omega t_{i,max}$ . Картина искажения распределение  $e_i$  по поверхности  $i$ -го проводника при  $\omega t_{max}$  показана на рис. 2. С учетом этого искажения коэффициент использования поверхности проводов линии  $K_{uc}$  может быть вычислен как:

$$K_{uc} = \frac{P_H}{P_0} = (1/n E_{дон}) \sum_i (E_{i,max} - 2e_{wi}) \cos(\varphi_i - \varphi_i).$$

Вторая глава. В работе представлены различные конструкции линий, подтверждающие существование множества возможных расположений, обеспечивающих одинаковую  $P_H$ , т.е. одинаковый  $K_{uc}$ . Однако они различаются по площади занимаемого пространства, уровням электрического поля под линией, полосой отчуждаемых земель и пр.

Таким образом,  $K_{uc}$  не характеризует качество полученной конструкции линии полностью, а отражает лишь значение её  $P_H$ . Поэтому в работе предложены два дополнительных критерия ( $K_p, K_k$ ) сравнения конструкций линий. Предложено сравнивать любую конструкцию линии с теоретически возможной линией с тем же числом проводников, у которой  $K_{uc,0} = K_p,0 = K_k,0 = 1, K_{z,0} = 100\%$ :

1.  $P_H$  равна теоретически возможному максимальному значению при:  $(e_i = E_{дон})$ :  $P_0 = \sqrt{2} U_0 \pi \epsilon_0 r_0 U E_{дон} \cdot n$

2. Площадь порталной опоры  $S_0 = L_0 \cdot H_0$  минимально возможная, в окне которое обеспечивается плотность передачи мощности в воздухе

$\rho P_0 = 12,22 \text{ МВт/м}^2$ , обусловленная электрической прочностью воздуха при  $E_{\text{доп}} = 0,678 \text{ кВ/см}$ :  $\rho P_0 = (E_{\text{доп}}^2 / Z_{\text{доп}}) = \frac{P_0}{S_0} = 12,22$ .

3. Потери мощности минимальные при передаче  $P_H: \Delta P = \frac{P_0}{K} (P_H/U)^2$ . Таким образом, если какая-либо конструкция линии обладает параметрами:  $\rho_H, \Delta P_H, S$  ( $S = L \cdot H$  - площадь опоры), то об эффективности её конструкции можно судить по трём коэффициентам:

$K_{uc} = \frac{\rho_H}{\rho_0}$  - коэффициент использования поверхности проводов, характеризующий степень неравномерности электрического поля на поверхности проводников (введен в работах ЛПИ);

$K_p = \frac{\rho_H/S}{12,22}$  - коэффициент использования пространства, характеризующий степень неравномерности электрического поля в пространстве, окружающем проводники;

$K_r = \frac{\Delta P}{\Delta P_H} = \frac{(\sum q_i \cos(\varphi_i - \chi_i))^2}{\sum q_i^2}$  - коэффициент использования сечения проводников, характеризующий степень неравномерности распределения модулей токов по проводникам. Произведение этих коэффициентов в процентах названо коэффициентом эффективности конструкции линии:

$K_z = (K_{uc}, K_p, K_r) \cdot 100 \%$ . В работе найдено аналитическое выражение для качественного анализа затрат на передачу 1 МВт мощности по линии:  $3/\rho_H = f(K_{uc}, K_p, K_r)$  и показано, что наибольшую чувствительность (при реальных значениях  $K_{uc}, K_p, K_r$ ) затраты имеют к коэффициенту  $K_p$ . Для разработки методики и программы оптимизации взаимного расположения проводников многопроводной линии в работе использован градиентный метод на основе полученных аналитических выражений для частных производных и градиентов по координатам  $x_i, y_i$  от натуральной мощности и потерь проводников:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_H}{\partial x_i} &= v_0 q_i E_{xi}; & \frac{\partial \Delta P_H}{\partial x_k} &= v^2 R \sum_i q_i \sum_j \beta_{ij} E_{xkj}; \\ \frac{\partial P_H}{\partial y_i} &= v_0 q_i E_{yi}; & \frac{\partial \Delta P_H}{\partial y_i} &= v_0^2 R \sum_i q_i \sum_j \beta_{ij} E_{yij}; \\ \text{grad}_{x,y} (P_{Hi}) &= v_0 q_i \vec{E}_{\text{вн}i} & \text{grad}_{x,y} (\Delta P_{Hi}) &= 2v_0^2 R \sum_j \beta_{ij} \vec{E}_{\text{вн}j}. \end{aligned}$$

Здесь  $E_{\text{вн}i}, E_{xi}, E_{yi}$  - напряженность внешнего поля и его горизонтальная и вертикальная составляющие в точке расположения  $i$ -го проводника (при  $\omega t_{\text{max}}$ ). Таким образом, проводники перемещаются в направлении внешнего поля.

В работе показано, что при движении проводников по их градиентам от натуральных мощностей увеличиваются не только  $P_{Hi}$ , но и КПД проводников. Следовательно, перемещение проводников вдоль своих  $\text{grad}_{x,y} (P_{Hi})$  является удобным итерационным способом для увеличения  $K_{uc}$  и  $K_r$  линии. Существование множества вариантов расположения дает возможность использования исходного расположения проводников с минимально возможными расстояниями между ними, что обес-

печивает получение решения ближайшего к исходному. Это обуславливает получение наибольшего  $K_p$  линии, а также получение решения с желаемым приблизительным расположением фаз, которое может диктоваться: видом опоры, удобством эксплуатации и пр. Разработанные методика и программа расчета учитывают следующие пять ограничений:  $E_{i, \max} \leq E_{\text{дон}}$  - по короне на поверхности проводников;  $E_{3, \max} \leq E_3$  - по максимально допустимому экологическому значению напряженности электрического поля под линией;  $a_{ij} \geq a_0$  - по расстоянию между проводниками одной фазы;  $A_{ij} \geq A_0$  - по расстоянию между проводниками разных фаз;  $y_i \geq h_r$  - по габариту в центре пролёта линии. Данные ограничения учтены в виде квадратичных штрафных функций -  $f_{\psi, p} = I+5$ . Составная целевая функция имеет вид:

$$F_i = \left( \frac{P_0}{n} - P_{Ni} \right)^2 + \sum_{p=1}^5 f_{\psi, p} \cdot K_{\psi, p}$$

где  $P_0$  - необходимая или максимально возможная натуральная мощность линии. При выполнении ограничений на каждом шаге итерации проводники движутся вдоль своих  $\text{grad}_{x, y} (P_{Ni})$  с шагом, задаваемым в исходных данных и регулируемым в процессе итераций ( $n$  - номер итерации):

$$x_i^{n+1} = x_i^n + \frac{P_{0i} - P_{Ni}^n}{V_0 \varphi_i^n \cdot E_{\theta Ni}^n} \cdot \frac{E_{xi}^n}{E_{\theta Ni}^n}; \quad y_i^{n+1} = y_i^n + \frac{P_{0i} - P_{Ni}^n}{V_0 \varphi_i^n \cdot E_{\theta Ni}^n} \cdot \frac{E_{yi}^n}{E_{\theta Ni}^n}$$

Перемещение всех проводников линии в работе названо полной оптимизацией. Однако при этом получаемые конструкции фаз могут оказаться не традиционными с разными расстояниями между проводниками. Поэтому в работе разработана и реализована в программе методика осуществления частичных видов оптимизаций: - оптимизация взаимного расположения фаз заданной конструкции (круглых, плоских и т.д.); - оптимизация радиусов расщепления каждой круглой фазы линии (положение центров фаз не изменяется); - совместная оптимизация радиусов расщепления и центров фаз (фазы подобны исходным, положение фаз изменяется). По указанной методике и программе, в качестве примера, проведена полная и три частичные оптимизации расположения проводников АС-300/39 в УСВЛ-500/500 кВ при  $\theta = 180^\circ$  для различного числа проводников в фазе  $n_\varphi = 3, 4, 5, 6$ , рис. 3-6: УСВЛ-1 - перемещение круглых фаз, рис. 3; УСВЛ-2 - перемещение плоских фаз, рис. 4; УСВЛ-3 - поиск радиусов расщепления, рис. 5; УСВЛ-4 - полная оптимизация, рис. 6. Для полученных конструкций УСВЛ-4 на рис. 7 представлены зависимости изменений  $K_{ис}$ ,  $K_p$ ,  $K_r$ ,  $K_3$  от общего числа проводников в линии ( $n = 6 \cdot n_\varphi$ ), там же, пунктирными линиями, представлены аналогичные показатели для традиционных ИС-цепей ЛЭП-500 кВ

(Гр. ЛЭП) ( $n = 9-11С$ ) и для шестифазных "линий Вертольда" (ЛБ) класса 500 кВ с расположением круглых фаз по кругу, между которыми обеспечивается равный фиксированный сдвиг  $60^\circ$  ( $n = 6-n_f$ ), а точками показаны показатели для одноцепных компактных линий с эллиптическими фазами (э.ф.) (по данным ЛПИ). Из этих рисунков видно, что для УСВЛ-4 при увеличении  $n$ :  $K_{ис,4}$  имеет минимум при  $n = 24$ ;  $K_{р,4}$  - возрастает;  $K_{р,4}$  - резко возрастает и достигает при  $n = 36$  значения  $K_{р,4} = 0,4$ , т.е. плотность передачи мощности в УСВЛ при полной оптимизации ( $n = 36$ ) в четыре раза выше, чем в традиционных цепях;  $K_{э,4}$  возрастает с 6 % до 36 %. Гр.ЛЭП имеет показатели:  $K_{ис,тр} = 0,808$ ;  $K_{р,тр} = 0,988$ ;  $K_{р,тр} = 0,099$ ;  $K_{э,тр} = 7,9$  %. Для ЛБ:  $K_{ис,ЛБ}$  - низок, а  $K_{р,ЛБ}$ ,  $K_{э,ЛБ}$  - довольно высоки. Исследование аналогичных зависимостей для УСВЛ-1, УСВЛ-2, УСВЛ-3 показало, что  $K_{э,1}$  возрастает с 4,4 процента до 17,3 %;  $K_{э,2}$  возрастает с 7,5 % до 13,7 %;  $K_{э,3}$  возрастает с 7 % до 17 %. На рис. 8 представлены зависимости изменения  $\rho_n$  для полученных УСВЛ (для  $n_f = 6$ , рис. 3-6) при регулировании угла  $\theta$  вниз от  $180^\circ$  до  $0^\circ$ . Видно, что все рассмотренные четыре вида оптимизации УСВЛ увеличивают диапазон изменения  $\rho_n$  ( $\rho_n^{180} - \rho_n^0$ ) по сравнению с ранее рассматриваемыми УСВЛ (штриховая линия), что увеличивает эффект управления режимом УСВЛ. Исследована экономическая эффективность полученных конструкций УСВЛ-500 кВ в части затрат на опоры и отчуждаемую землю. Показано, что применение отдельно стоящих традиционных параллельных цепей для увеличения  $\rho_n$  приводит к увеличению указанных затрат на передачу 1 МВт мощности по сравнению с теоретической линией, тогда как размещение такого же числа проводников на одной опоре в УСВЛ приводит к снижению этого показателя, рис. 9. Относительное уменьшение затрат на опоры и отчуждаемую землю (на передачу 1 МВт мощности) в УСВЛ по сравнению с соответствующими затратами в 2-х, 3-х и 4-х традиционных цепях составляет: 9 %, 37 % и 66 % для УСВЛ-1; 16 %, 40 % для УСВЛ-2; 23 %, 43 % и 65 % для УСВЛ-3; 15 %, 43 % и 78 % для УСВЛ-4.

Таким образом, увеличение единичной мощности линий приводит к снижению удельных затрат аналогично тому, как это происходит в аппаратуростроении (трансформаторы, генераторы и при.). Исследованы параметры электрического поля в окружающем пространстве для полученных УСВЛ, гр.ЛЭП и ЛБ. Построены зоны экологического влияния линий, представляющие собой области, охваченные линиями равной напряженности электрического поля  $E_p = 5$  кВ/м и  $E_p = 10$  кВ/м в поперечном сечении линии  $S_{п.с.}$  и в сечении вдоль пролета на уровне 2-х метров от земли.  $S_{прол.}$  Эти зоны, в качестве примера, представлены

только при  $E_p = 10$  кВ/см: для УСВЛ-4 при  $n_p = 6$  - на рис. 10; для ЛБ при  $n_p = 6$  - на рис. 11; для тр.ЛЭП - на рис. 12. Отношение площадей  $S_{п.с.}$  и  $S_{прод.}$  для тр.ЛЭП и УСВЛ представлено на рис.13. Видно что площади  $S_{п.с.}$  и  $S_{прод.}$  для УСВЛ меньше, чем для тр.ЛЭП соответственно в (1,2-4,8) раза и в (50-19) раз. Изменение напряженности электрического поля ( $E_g$ ) под линиями показано на рис. 14. Видно, что максимальная напряженность электрического поля под УСВЛ-4 при  $n_p = 6$  на уровне 1,8 м от земли меньше, чем под тр.ЛЭП на 40 %. На рис. 15 представлены графики изменения эллипсности поля (отношение  $e_{max}/e_{min}$  рис. 1) под УСВЛ и под тр.ЛЭП на уровне 1,8 м от земли ( $h = 1,8$ ). Видно, что этот показатель сильно зависит от расположения фаз и координаты расчетной точки "М" ( $x_M, y_M$ ).

Третья глава. Посвящена преобразованиям уравнений, описывающих параметры и режимы многоцепных линий электропередачи. Используются матричные телеграфные уравнения и их решение по числу  $\kappa$ , рассматриваемых проводников (все проводники, все эквивалентные фазы, все эквивалентные цепи, один эквивалентный провод):

$$-\frac{d}{dz} \begin{pmatrix} [U_{zi}] \\ [I_{zi}] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [0] & [z_{ij}] \\ [y_{ij}] & [0] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [U_{zi}] \\ [I_{zi}] \end{pmatrix} \quad i, j = 1 \div \kappa \quad (5)$$

где  $[U_z], [I_z]$  - столбцовые матрицы напряжений и токов проводников в точке  $z$  линий;  $[z_{ij}], [y_{ij}]$  - квадратные матрицы погонных продольных сопротивлений и поперечных проводимостей линии. Решение этих уравнений имеет вид уравнений 4  $\kappa$  - полюсника:

$$\begin{pmatrix} [U_N] \\ [I_N] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [A] & [B] \\ [C] & [D] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [U_K] \\ [I_K] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [ch\Gamma_z] & [sh\Gamma_z][W] \\ [W]^{-1} [sh\Gamma_z] & [ch\Gamma_z] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [U_K] \\ [I_K] \end{pmatrix} \quad (6)$$

где  $[U_N], [I_N], [U_K], [I_K]$  - столбцовые матрицы напряжений и токов в начале и конце линии;  $[A], [B], [C], [D]$  - квадратные матрицы обобщенных параметров линии;  $[\Gamma], [\Gamma_z]$  - квадратные матрицы коэффициентов распространения волн напряжений и токов;  $[W]$  - квадратная матрица волновых сопротивлений. Причем:

$$[\Gamma]^2 = [z_{ij}] [y_{ij}]; \quad [W]^2 = [z_{ij}] [y_{ij}]^{-1}. \quad (7)$$

Чтобы найти матрицы  $[A], [B], [C], [D]$  надо решить уравнения (7), это можно сделать как прямыми методами (например, с использованием модальных координат), так и итерационными методами. В качестве примера в работе приводится вывод матриц  $[A], [B], [C], [D]$  для двух эквивалентных цепей УСВЛ с использованием модальных координат, диагонализующих матрицы  $[\Gamma]$  и  $[W]$ .

Путем понижения размерности уравнений (5), записанных для  $n$  проводников линии, расположенных произвольно, к размерности по чис-

лу эквивалентных фаз линии  $NF$  получены эквивалентные погонные параметры фаз произвольной конструкции:

$$[Z_{mL}] = [N_t][Z_{ij}]^{-1}[N]^{-1}; \quad [Y_{mL}] = [N_t][Y_{ij}][N]; \quad (8)$$

$$i, j = 1 \div n, \quad m, L = 1 \div NF$$

Также получены эквивалентные погонные параметры фаз с учётом произвольного числа  $NTI$  вида транспозиции:

$$[Z_{mL}^T] = \frac{1}{NT} [\Pi][z' \dots z'] [\Pi_t]; \quad [Y_{mL}^T] = \frac{1}{N} [\Pi][Y' \dots Y'] [\Pi_t] \quad (9)$$

Правила заполнения матрицы  $N, N_t, \Pi, \Pi_t$  даны в работе;  $z'$  и  $Y'$  - матрицы на первом участке транспозиции.

На основе параметров (8) или (9) построены уравнения (5) и (6) и преобразованы в „ $Y^*$ ” форму, после чего найдены параметры по-фазной схеме замещения в виде полного многоугольника для многофазной линии длины  $L$ :

$$[Y_{mL}^{aX}] = f([ch r \cdot L], [sh r \cdot L], [W]) \quad (10)$$

Далее проведены преобразования параметров и уравнений в фазных координатах для многофазных многоцепных линий типа УСВЛ со сдвигом напряжений между цепями в координаты трех симметричных составляющих. Описаны условия, при которых это преобразование диагонализует матрицы параметров УСВЛ в трех симметричных составляющих. После выделения первой последовательности из этих преобразований получены уравнения эквивалентного 4-НС-полюсника типа (6) для НС-цепной линии. При работе всех НС-цепей параллельно на общие шины через преобразователи по концам, путем эквивалентирования, получены уравнения эквивалентного четырехполюсника одной эквивалентной цепи электропередачи. Далее проведены преобразования уравнений для двухцепных УСВЛ. Исследовано различие погонных параметров цепей УСВЛ при трех и шести циклах транспозиции (ЦТ). Наибольшее отличие эквивалентных параметров цепей УСВЛ наблюдается при горизонтальном расположении фаз и заключается в том, что при трех ЦТ появляются реактивные составляющие взаимных индуктивностей  $L_{bp}$  и ёмкостей  $C_{bp}$  цепей УСВЛ. Это обуславливает появление дополнительного к углу сдвига токов цепей ( $\beta$ ) естественного угла сдвига фаз между токами цепей УСВЛ -  $\alpha = \arctg (L_{bp} / L_{sa})$  (II). При этом графики натуральных мощностей  $\rho_H^{(a)}$  и  $\rho_H^{(c)}$  в зависимости от угла  $\theta$  сдвигаются на угол  $\alpha$ , а диапазон изменения  $\rho_H^{(c)}$  больше, чем  $\rho_H^{(a)}$ , рис. 16. Проведено исследование отличия параметров режима УСВЛ при 3-х и 6-ти ЦТ. Построены векторные диаграммы напряжений, токов и мощностей цепей при различных углах  $\varphi_x$  нагрузки  $S_x$  в конце УСВЛ и углах  $\theta$ . При этом условие  $\beta = \theta$  выполняется для 3-х цик-

лов при  $\theta = -\alpha$ ,  $180^\circ - \alpha$ , а для 6-ти циклов при  $\theta = 0^\circ$ ,  $180^\circ$ . Расчеты режимов при 3-х и 6-ти ЦТ подтверждают, что диапазон изменения реактивной мощности при 3-х циклах  $Q^{(3)}$  больше, чем при 6-ти  $Q^{(6)}$ . При этом потери активной мощности ( $\Delta P^{(3)} = \Delta P^{(6)}$ ) практически одинаковы, рис. 17. Далее из (6) получены уравнения "А" и "У" в форме 8-ми полюсника УСВЛ (двух эквивалентных цепей первой последовательности). На основе их преобразования выделены поправочные коэффициенты  $K_F, K_{XU}, K_{i2}, K_{D0}, K_{\beta\beta}$  для определения сосредоточенных параметров 8-ми полюсной схемы замещения участка УСВЛ длиной  $l$ , без гиперболических функций, рис. 18. Оценена погрешность при расчёта в сравнении с точными формулами, содержащими гиперболические функции. Эта погрешность составляет (1-5) % при  $l = (300-700)$  км. Далее получены уравнения эквивалентного 4-х полюсника УСВЛ (одна эквивалентная цепь), путем эквивалентирования 8-ми полюсника для общего случая при неравенстве комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов-фазорегуляторов по концам цепей ( $K_1 = R_1 \cdot e^{j\theta_1}$ ,  $K_2 = R_2 \cdot e^{j\theta_2}$ ,  $K_3 = R_3 \cdot e^{j\theta_3}$ ,  $K_4 = R_4 \cdot e^{j\theta_4}$ ), рис. 19 а, б. Эквивалентные обобщенные постоянные этого 4-х полюсника имеет вид:

$$A_2 = A_0 / \beta_0 \left[ \beta_c \left( \frac{\hat{K}_3}{K_2} + \frac{\hat{K}_4}{K_4} \right) - \beta_\beta \left( \frac{\hat{K}_2}{K_2} + \frac{\hat{K}_4}{K_4} \right) \right] + A_\beta / \beta_0 \left[ \beta_c \left( \frac{\hat{K}_3}{K_3} + \frac{\hat{K}_4}{K_4} \right) - \beta_\beta \left( \frac{\hat{K}_2}{K_2} + \frac{\hat{K}_4}{K_4} \right) \right]$$

$$B_2 = \hat{K}_2 \hat{K}_4 (\beta_c^2 - \beta_\beta^2) / \beta_0; \quad \beta_0 = \beta_c (K_1 \hat{K}_4 + \hat{K}_3 K_2) - \beta_\beta (K_1 \hat{K}_2 + K_3 \hat{K}_4); \quad (12)$$

$$C_2 = C_c \left( \frac{\hat{K}_1}{K_2} + \frac{\hat{K}_3}{K_4} \right) - C_\beta \left( \frac{\hat{K}_1}{K_4} + \frac{\hat{K}_3}{K_2} \right) + \frac{1}{\beta_0} \left[ A_c \left( \frac{K_1}{K_4} - \frac{K_3}{K_2} \right) + A_\beta \left( \frac{K_1}{K_2} - \frac{K_3}{K_4} \right) \right] \left[ A_c (\hat{K}_1 \hat{K}_2 - \hat{K}_3 \hat{K}_4) + A_\beta (\hat{K}_2 \hat{K}_3 - \hat{K}_1 \hat{K}_4) \right]$$

$$D_2 = \hat{K}_1 \hat{K}_4 D_c + \hat{K}_1 \hat{K}_2 D_\beta + \frac{1}{\beta_0} \left[ D_c (\hat{K}_1 \hat{K}_2 - \hat{K}_3 \hat{K}_4) + D_\beta (\hat{K}_2 \hat{K}_3 - \hat{K}_1 \hat{K}_4) \right] \left[ \beta_c K_1 \hat{K}_4 - \beta_\beta K_3 \hat{K}_2 \right].$$

Выведены условия обратимости и симметричности этого 4-х полюсника:

$$K_1 = \frac{1}{K_2} = K_1; \quad K_3 = \frac{1}{K_4} = K_2; \quad \theta_1 = -\theta_2 = \theta_3; \quad \theta_3 = -\theta_4 = \theta_1 \quad (13)$$

Уравнения (12) позволяют исследовать режимы УСВЛ как при согласованном фазовом управлении (СФУ) ( $\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 = 0$ ), так и при рассогласованном фазовом управлении (РФУ) ( $\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \neq 0$ ). Далее получены уравнения эквивалентного четырехполюсника УСВЛ при СФУ на основе эквивалентных погонных параметров ( $Z_2, Y_2$ ) УСВЛ, зависящих от угла  $\theta$ , аналогичные обычной линии:

$$Z_2 = R_2 + jX_2 = \frac{1}{2} \frac{Z_c^2 - Z_\beta^2}{Z_c - Z_\beta \cos \theta}; \quad Y_2 = g_2 + j\beta_2 = 2(Y_c' - Y_\beta \cos \theta). \quad (14)$$

Приведены их исследования и упрощения для анализа при изменении угла  $\theta$ . На основе расчета потерь на корону в УСВЛ как суммы потерь по каждой фазе при различных углах  $\theta$ , показано, что  $g_2$  имеет минимум в районе угла  $\theta = 60^\circ$ , рис. 20. Это объясняется более равномерным распределением зарядов и напряженностей электрического поля по фазам УСВЛ при  $\theta = 60^\circ$  и нелинейной зависимостью потерь на корону от напряженности на поверхности проводов.

Четвертая глава. Для снижения потерь мощности и энергии в электропередачах с переменным графиком нагрузки необходимо иметь средства управления режимом, делающие электропередачи (ЭП) управляемыми. Эти средства могут быть различны: статические компенсирующие устройства, синхронные компенсаторы, трансформаторы и т.д. В УСВЛ добавляется возможность управлять режимом еще и фазорегуляторами. Для сравнения фазового управления (ФУ) в УСВЛ с другими средствами управления важно установить критерии сравнения. Как показано в работе, такими критериями могут быть: равенство эквивалентных погонных параметров линий или равенство обобщенных параметров эквивалентных четырехполюсников ЭП. Тогда пропускные способности и потери сравниваемых ЭП будут равны и воздействие их на режим энергосистемы будет одинаково, т.е. не надо учитывать системный эффект. Кроме того, уравнения эквивалентных 4-х полюсников (с учётом средств управления) удобны для проведения аналитической и численной оптимизации режимов ЭП с учётом ограничений на параметры режима. В работе рассмотрена возможность применения трёх режимов ЭП: режима минимальных потерь (РМП); режима согласованной нагрузки (РСН); режима при постоянстве модулей напряжения по концам ЭП (РПН). С учетом ограничений на параметры режима линии выявлена целесообразность применения того или иного режима на разных областях передаваемых мощностей  $P_k$ . С учетом ограничений на модуль напряжений вдоль ЭП, РМП можно осуществить только в ограниченном диапазоне  $P_k$ , для которого получено:

$$P_{дон, min} = \frac{(0,95 \cdot U_{ном})^2}{K_u} \leq P_k \leq \frac{(1,05 \cdot U_{ном})^2}{K_u \cdot K_{ср}^2} = P_{дон, max} \quad (15)$$

В (15)  $K_u, K_Q, K_{ср} = f(A_3, B_3, C_3, D_3)$  и связывают  $U_{ср, опт} = K_{ср} \cdot P_k, U_{к, опт} = K_u \cdot P_k, Q_{к, опт} = K_Q \cdot P_k$ . Причем КПД ЭП в РМП  $\eta_{max}$  максимален если выполняется условие:

$$Re(A_3 \hat{D}_3 + B_3 \hat{C}_3) \rightarrow \min \quad (16)$$

Взяв производные от (16) по  $K_1, K_2, (\theta_1 - \theta_2)$  с учетом (12) и (13) при  $K_1 = K_2 = 1; K_3 = e^{j\theta}, K_4 = e^{-j\theta}$ , дали два реальных решения для сдвига фаз между напряжениями цепей УСВЛ:  $\theta = 0^\circ$  и  $\theta = 160^\circ$  причем  $\eta_{max}^0 > \eta_{max}^{160}$ . Для исследования составляющих общих потерь ( $\Delta P$ ): потерь на корону в  $g_3 \rightarrow (\Delta P_g)$  и потерь на нагрузку в  $R_3 \rightarrow (\Delta P_R)$ , в работе получены выражения для  $K_u, K_Q, K_{ср}$ , а также для среднеквадратичных тока  $I_{ср}^2$  и напряжения  $U_{ср}^2$  в зависимости от параметров УСВЛ ( $R_3, X_3, g_3, \beta_3, \theta, P_k, A_k, U_k$ ). В этом случае потери равны:  $\Delta P = \Delta P_R + \Delta P_g; \Delta P_R = P_3 \cdot I_{ср}^2 \cdot \Delta P_g = g_3 \cdot U_{ср}^2 \cdot L$ . Показано, что отношение  $(\Delta P_g / \Delta P_R)$  в зависимости от  $L, \theta, P_k$  меняется в широких диапазонах: для РМП (0,9+0,3); для РПН (1,5+0,01). Для исследования эффективности ФУ в сравнении с управлением при помощи управляемых компенсирующих устройств (УК) рас-

смотрены линии с равной натуральной мощностью  $P_N = 3,6$  ГВт, представленные на рис. 21 а, б, в; а) двухцепная УСВЛ (6х6хАС-300); б) одноцепная ЛЭП с эллиптическими фазами (3х12хАС-300); в) четыре тр.ЛЭП (4х3х3хАС-300). Эквивалентные погонные параметры указанных ЛЭП полностью совпадают с УСВЛ при  $\theta = 180^\circ$ . Следовательно, все параметры режима для УСВЛ при  $\theta = 180^\circ$ , рис. 21, а будут совпадать с параметрами для ЛЭП, рис. 21, б, в. Параметры РМП для длин линии  $L = (200+1000)$  км представлены на рис. 22 а, б, в. Видно, что  $K_U$  и  $K_\alpha$  увеличивается, а  $\eta_{max}$  уменьшается при изменении  $\theta$  от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ . Это объясняется увеличением стока реактивной мощности  $Q_K$  и увеличением  $\Delta P_f$  в УСВЛ при переходе от  $\theta = 0^\circ$  до  $\theta = 180^\circ$ . На рис. 23 приведены допустимые диапазоны  $P_K$  с учетом (15), на которых можно осуществить РМП при различных углах  $\theta$  и длинах линии  $L$ . При изменении  $\theta$  от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  допустимый диапазон увеличивается и перемещается в область больших значений  $P_K$ . Таким образом, регулирование угла  $\theta$  позволяет расширить суммарный допустимый диапазон с  $0,2 \cdot P_N$  при  $\theta = 180^\circ = const$  до  $0,4 P_N$  при  $\theta = 0^\circ + 180^\circ = var$ . Разница  $\Delta \eta = \eta_{max} - \eta_U$  тем больше, чем длиннее линия и меньше  $P_K$ . Таким образом, при  $P_K > P_{don, max}$  необходимо вести другой режим, отличный от РМП. На рис. 24, в качестве примера, приведен вид графиков изменения  $\eta_U$  для РПН при различных  $\theta$ . (В работе исследованы аналогичные графики для  $L = 200 + 1000$  км. Видно, что графики  $\eta_U$  при  $\theta = var$  пересекаются в одной точке, соответствующей  $P_K = P_0$ , для которой найдено аналитическое выражение:  $P_0 = f(R_2, \chi_2, \rho_2, \beta_2, L)$ . Таким образом, для увеличения  $\eta_U$  в УСВЛ при  $P_K < P_0$  выгодно перейти сразу от  $\theta = 180^\circ$  к  $\theta = 0^\circ$ , если нет никаких ограничений. Однако с учетом ограничения на напряжение в середине линии - соответствующего мощности  $P_N^0$  и ограничения по запасу статистической устойчивости - соответствующего мощности  $P_{np}^0$ , передаваемая мощность  $P_K$ , где осуществляется РПН при  $\theta = var$  должна быть  $P_N^0 \leq P_K \leq P_{np}^0$ . Таким образом, осуществить переход от  $\theta = 180^\circ$  сразу к  $\theta = 0^\circ$  при  $P_K = P_0$  с учетом ограничений не всегда возможно. В работе показано, что между значениями  $P_U^0, P_{np}^0, P_0$  и натуральными мощностями УСВЛ  $P_N^0$  при  $\theta = var$  могут существовать различные соотношения (больше, меньше). Рассмотрение всех возможных сочетаний привело к выводу, что РСН ( $P_K = P_N^0$ ) удовлетворяет всем ограничениям и может быть рекомендован как способ плавного перехода от  $\theta = 180^\circ$  к  $\theta = 0^\circ$  в диапазоне  $P_N^0 \leq P_K \leq P_N^{180}$ , для увеличения  $\eta_U$  УСВЛ. КПД УСВЛ в РСН  $\eta_{const}$  и в РМП  $\eta_{max}$  представлены на рис. 24 пунктирными линиями в своих допустимых диапазонах. Результирующий КПД УСВЛ при применении РМП, РСН и РПН показан на рис. 25, а, где при:  $P_K > P_N^{180}$  - режим РПН при  $\theta = 180^\circ = const$ ;  $P_N^0 \leq P_K \leq P_N^{180}$  - режим РСН при  $\theta = var$ ;  $P_{don} \leq P_K \leq P_N^0$  -

РПН при  $\theta=0^\circ = const$ ;  $P_k \leq P_{дон}$  - РМП при  $\theta=var$ ,  $U_k=var$ . Для сравнения с рис. 25,б представлен результирующий КПД для ЛЭП (рис.21,б, в) с УКУ. Причем УКУ авсдтились при  $P_k \leq P_H^{180}$ . Для полного совпадения  $\eta_{лэп}$  и  $\eta_{усвл}$  при  $\theta=var$  необходимо уравнять эквивалентные погонные параметры ЛЭП при помощи распределенных УКУ. Так, при переходе при  $P_k \leq P_H^{180}$  в УСВЛ от  $\theta=180^\circ$  к  $\theta=0^\circ$  для совпадения параметров и КПД  $\eta_{лэп}$  и  $\eta_{усвл}$  при  $\theta=0^\circ$  надо ввести в ЛЭП распределенные продольные  $X_p$  и поперечные  $b_p$  реакторы и источники активной мощности  $g_{act}$ , рис. 26,а:  $X_p=2X_g$ ,  $b_p=-2b_g$ ,  $g_{act}=-2g_g$ , где  $X_g, b_g, g_g$  - взаимные погонные параметры цепей УСВЛ. Однако практически распределить УКУ вдоль линии не представляется возможным. Практически возможен случай, когда УКУ сосредоточены по концам линии  $Z_1, Y_1$ , рис. 26,б, или в центре линии  $Z_2, Y_2$ , рис. 26,в. Приравнивая  $(A_3, B_3, C_3, D_3)$  УСВЛ при  $\theta=var$  к  $(A, B, C, D)$  ЛЭП с УКУ найдены необходимые параметры сосредоточенных УКУ:  $Z_1=R_1+jX_1$ ,  $Y_1=g_1+jb_1$ ,  $Z_2=R_2+jX_2$ ,  $Y_2=g_2+jb_2$ . Расчеты  $Z_1, Y_1, Z_2, Y_2$  для рассматриваемых линий (рис. 21) показывают, что при переходе в УСВЛ от  $\theta=180^\circ$  к  $\theta=0^\circ$ , для соблюдения эквивалентности режима в ЛЭП с УКУ:  $R_1, g_1, R_2, g_2$  - получаются отрицательными, а  $X_1, b_1, X_2, b_2$  - реакторы. Если же источники активной мощности не включать ( $R_1=g_1=R_2=g_2=0$ ), то возможно добиться лишь частичного равенства:  $Re(A_3)=Re(A)$ ;  $Re(D_3)=Re(D)$ ,  $Im(B_3)=Im(B)$ ,  $Im(C_3)=Im(C)$  (17)

На рис. 25,б показаны графики изменения результирующего КПД ЛЭП с УКУ, когда обеспечиваются три режима при:  $P_k > P_H^{180}$  - режим РПН,  $\eta_{лэп}$  совпадает с  $\eta_{усвл}$  при  $\theta=180^\circ=const$ ;  $P_{дон, max} \leq P_k \leq P_H^{180}$  - режим при соблюдении равенств (17);  $P_k \leq P_{дон, max}$  - режим РМП. Разница между  $\eta_{усвл}$  и  $\eta_{лэп}$  достигает (1-5) % при длинах линии  $L=200+1000$  км. Причиной этому является разное распределение токов  $I_z$  и напряжений  $U_z$  вдоль УСВЛ и ЛЭП с УКУ при выполнении (17), показанное на рис. 27. Видно, что в местах установки  $X_1, X_2$  происходит бросок  $U_z$ , а в местах установки  $b_1, b_2$  - бросок  $I_z$ . Экономическая эффективность СВУ показана на рис. 28, где представлен годовой экономический эффект от снижения потерь энергии в рассматриваемых линиях: 1) - в УСВЛ при  $\theta=var$  по сравнению с УСВЛ при  $\theta=180^\circ=const$ ; 2) - в ЛЭП с УКУ по сравнению с ЛЭП без УКУ; 3) - в УСВЛ при  $\theta=var$  по сравнению с ЛЭП с УКУ. Видно, что СВУ тем эффективнее, чем длиннее линия. Далее исследована возможность применения РВУ в особых режимах УСВЛ: режим холостого хода (РХХ); режим согласованной нагрузки (РСН), режим плавки гололеда (РПГ). Из четырех уравнений (12) следует, что при заданных желаемых  $A_3, B_3, C_3, D_3$  можно найти неизвестные  $K_1, K_2, K_3, K_4$ , что обеспечивает большую свободу для синтеза желаемых свойств 4-х полюсника УСВЛ при РВУ. Ввиду нелинейности (12) прием для

однозначности, что фазорегуляторы установлены только во второй цепи УСВЛ:  $K_1 = K_2 = 1$ ,  $K_3 = e^{j\theta_3}$ ,  $K_4 = e^{j\theta_4}$  (18)

На рис. 29 показано изменение реактивной мощности  $Q_K$  и потерь  $\Delta P$  УСВЛ при РЧУ, где обозначено рассогласование углов через  $\theta_3, \theta_4 = 0/30; 0/60; 0/75$ . Видно, что с точки зрения потерь РЧУ нецелисообразен. Однако при РЧУ УСВЛ может не только генерировать ( $Q_K > 0$ ), но и потреблять ( $Q_K < 0$ ) реактивную мощность при нагрузках  $0 \leq P_K \leq P_N^{100}$ , т.е. вплоть до холостого хода. Точки пересечения  $Q_K = f(P_K)$  с осью  $P_K$  дают режим РСН. Таким образом, если при СЧУ режим РСН можно добиться только на диапазоне  $P_N^0 \leq P_K \leq P_N^{100}$ , то при РЧУ диапазон расширяется в область малых нагрузок  $0 \leq P_K \leq P_N^0$ . Суммарный диапазон РСН при СЧУ и РЧУ составляет:  $0 \leq P_K \leq P_N^{100}$ . Следовательно, РЧУ может быть примерно как способ компенсации реактивной мощности в узлах энергосистемы, примыкающих к УСВЛ, если это необходимо с точки зрения системного эффекта, а не потерь в УСВЛ. Возможность РЧУ в РХХ УСВЛ заключается в том, что на х.х. напряжения по концам УСВЛ связаны лишь  $A_3$ ;

$$U_N = |U_N| \cdot e^{j\varphi_N}, \quad U_K = |U_K| \cdot e^{j\varphi_K}, \quad U_H = A_3 \cdot U_K. \quad (19)$$

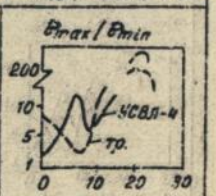
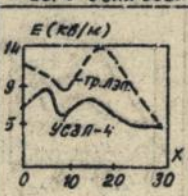
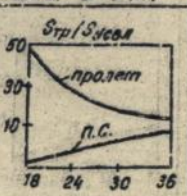
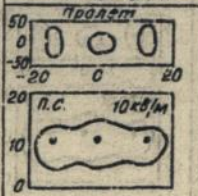
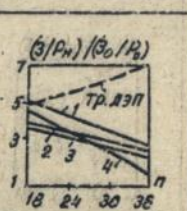
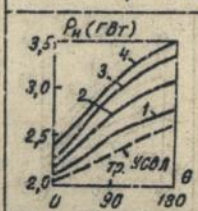
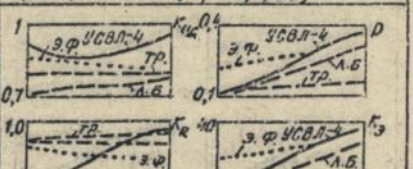
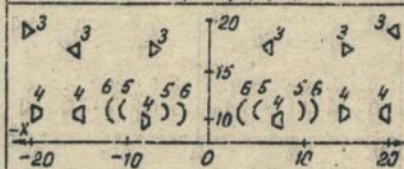
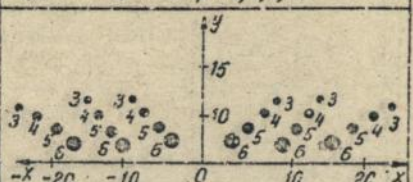
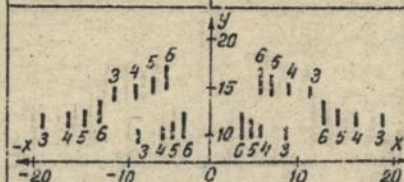
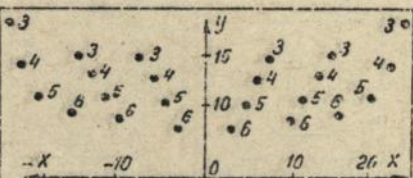
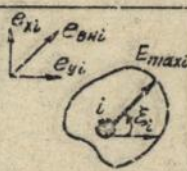
С учетом (18), (12) и (19) предложен способ включения на приёмную систему ( $U_C = |U_C| \cdot e^{j\varphi_C}$ ) двух цепей УСВЛ одновременно без применения реакторов и без протекания переходного процесса, рис. 30. Проводим измерения  $|U_N|$ ,  $\varphi_N$ ,  $|U_C|$ ,  $\varphi_C$  и изменяем  $\theta_3$  и  $\theta_4$  по формулам:

$$\theta_4 = 2 \arctg(F); \quad \theta_3 = -(2\delta + \theta_4); \quad \delta = \varphi_N - \varphi_C;$$

$$F = -D + \sqrt{D^2 - (B+C)(B-C)(B+C)}; \quad C = \frac{U_N}{U_C} \cos \delta - \cos \alpha_2;$$

$$D = \frac{U_N}{U_C} \sin \delta; \quad B = (Z_3^0 + Z_3^{100}) \cdot C / (Z_3^0 - Z_3^{100})$$

или добиваемся показаний вольтметров  $V_1 = V_2, V_3 = 0$  после чего производим включение УСВЛ выключателем В без переходного процесса, т.к. напряжения приёмной системы и конца УСВЛ совпадают  $U_K = U_C$ . Однако обойтись совсем без реакторов х.х. невозможно, т.к. на х.х. может оказаться только одна цепь УСВЛ. При применении РЧУ и выборе реакторов х.х. по РХХ одной цепи - их мощность ( $Q_{P1}$ ) снижается на 60 % по сравнению с полной мощностью реакторов в РХХ двух цепей УСВЛ при  $\theta = 180^\circ$  ( $Q_P^{180}$ ). При применении только СЧУ и выборе реакторов х.х. по РХХ двух цепей УСВЛ при  $\theta = 0^\circ$  их мощность ( $Q_P^0$ ) снижается на 40 % по сравнению с ( $Q_P^{180}$ ). Далее показана возможность применения РЧУ для плавки гололёда на проводах УСВЛ. Сущность заключается в том, чтобы при достаточной нагрузке  $P_K + jQ_K$  перераспределить токи по цепям УСВЛ  $I_1, I_2$  достигнув плавки  $I_{пл}$  сначала в одной цепи, а затем в другой цепи УСВЛ. Перераспределение  $I_1$  и  $I_2$  при РПГ показано на рис. 31.



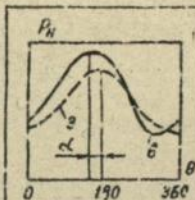


Рис. 16.  $P_n = f(\theta)$

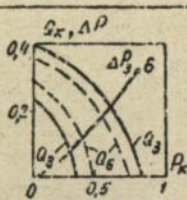


Рис. 17.  $Q_k, \Delta P = f(P_k)$

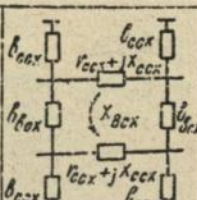


Рис. 18. Схема замещения УСВЛ

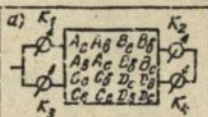


Рис. 19. 3-ми и 4-х полюсники УСВЛ

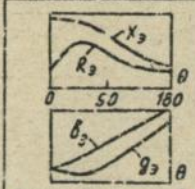


Рис. 20.  $R_3, \gamma_3, \gamma_0, \beta_3 = f(\theta)$

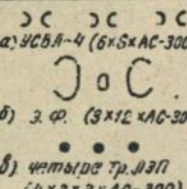


Рис. 21. ЛЭП- $P_n = 3,6187$

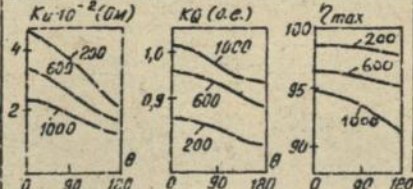


Рис. 22.  $K_u, K_a, z_{max} = f(\theta)$

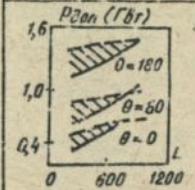


Рис. 23.  $P_{всп} = f(L)$

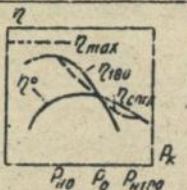


Рис. 24.  $\eta = f(P_k)$

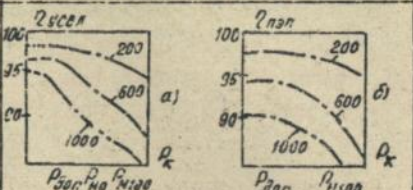


Рис. 25. Фазовое управление и УСВ

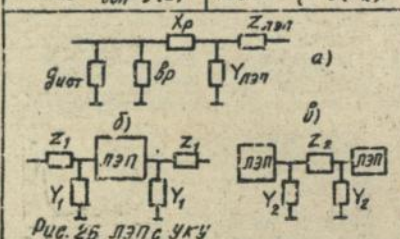


Рис. 26. ЛЭПС УКУ



Рис. 27. Распределение  $I_x, U_z$

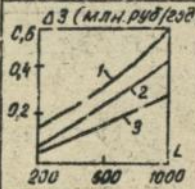


Рис. 28. Снижение затрат ( $\Delta Z$ )



Рис. 29.  $Q_k, \Delta P = f(P_k)$

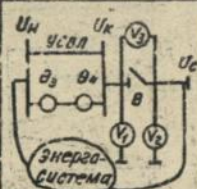


Рис. 30. Способ включения УСВЛ

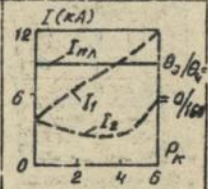
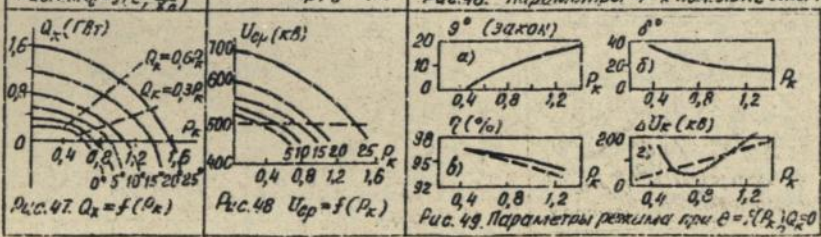
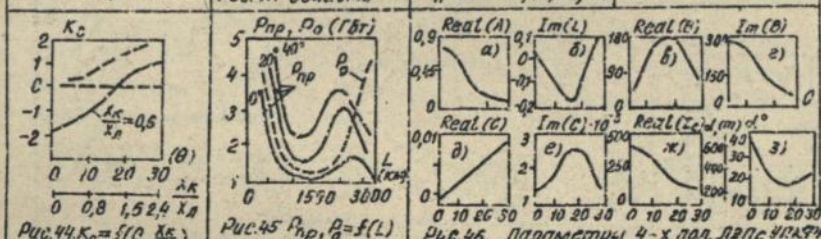
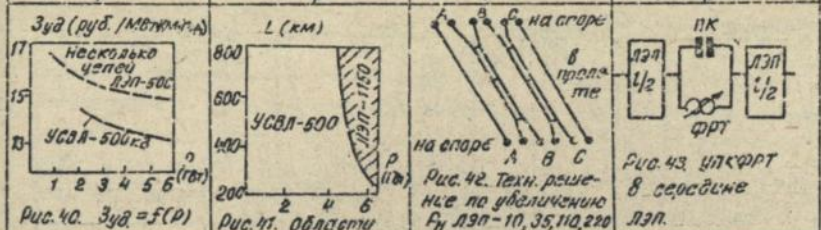
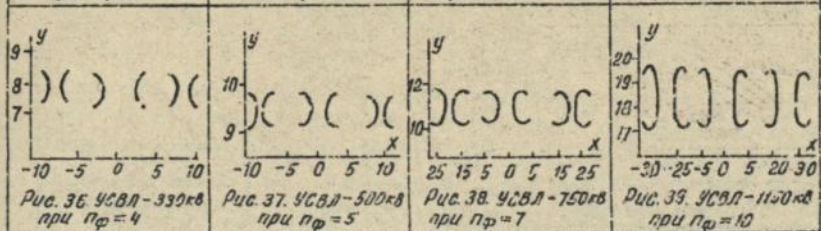
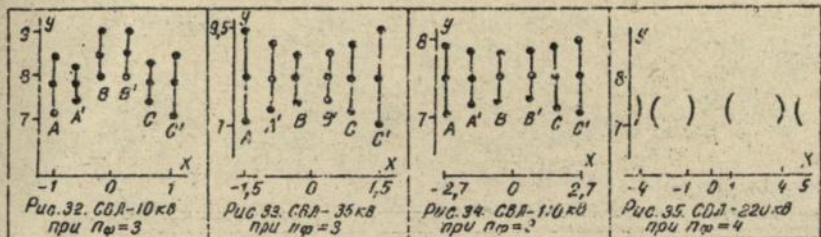


Рис. 31. Режим плавки гололеда



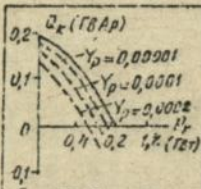


Рис. 50.  $Q_r = f(P_k)$  или  $Y_p = U \sigma$

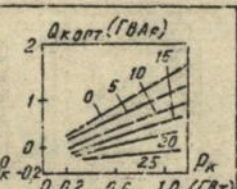
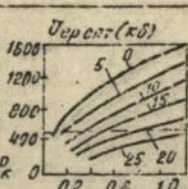
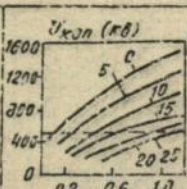


Рис. 51. Параметры РМП  $U_{клпт}$ ,  $U_{перст}$ ,  $Q_{клпт} = f(P_k)$  для ЛЭП с ЭЛК ФРТ при  $\theta = 5, 10, 15, 20, 25$

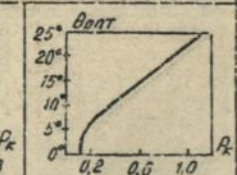
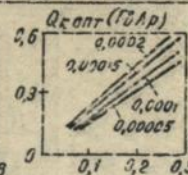
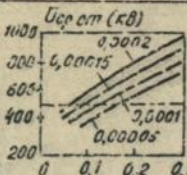
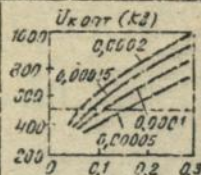


Рис. 52. Параметры РМП  $U_{клпт}$ ,  $U_{перст}$ ,  $Q_{клпт} = f(P_k)$  для ЛЭП с ПК и реакторами при  $Y_p = 0,00005 \div 0,0002$

Рис. 53. Закон  $\theta_{элт} = f(P_k)$  для РМП

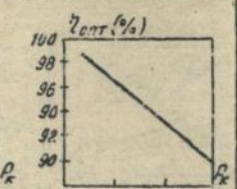
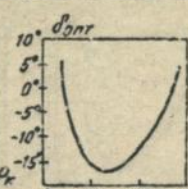
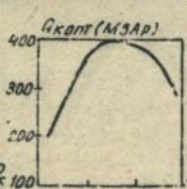
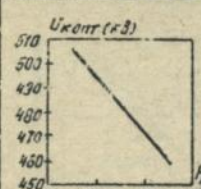


Рис. 54. Параметры РМП при регулировании вольта по рис. 53

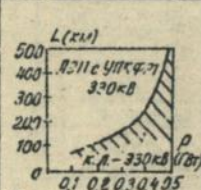


Рис. 55. Область применения

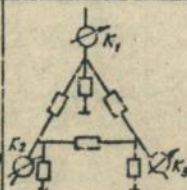


Рис. 56. Схема за-мещения ФРТ

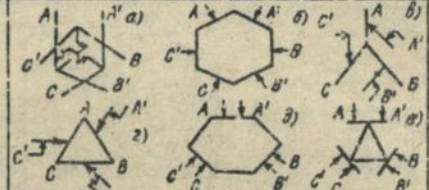


Рис. 57. Схемы ФРТ

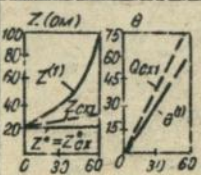


Рис. 58. Параметры схемы замещения ФП

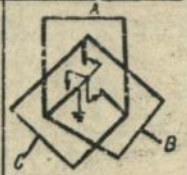


Рис. 59. Схема ФРТ-реактора

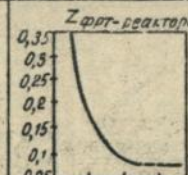


Рис. 60.  $Z_{ФРТ-реакт} = f(\theta)$



Рис. 61. Управляемая ветвь.

Глава пятая. Посвящена получению и исследованию эффективности оптимальных конструкций СВЛ-10, 35, 110 кВ и УСВЛ-220, 330, 500, 750 и 1150 кВ. Оптимальные конструкции УСВЛ были получены на основе методики, описанной в главах I и 2, а параметры этих линий рассчитаны по методике, описанной в главе 3.

Рассмотрены конструкции СВЛ-10, 35, 110 кВ с расцепленными (на число проводников  $n_{\phi}$ ) фазами при естественном угле сдвига  $\theta = 120^\circ$ . Вид этих конструкций показан на рис. 32, 33, 34 соответственно. Применённая методика оптимизации позволила более равномерно загрузить проводники СВЛ-10, 35, 110 кВ со сближенными фазами и получить конструкции с повышенными показателями то  $\rho_r$ ,  $K_f$  и экологии по сравнению с сравниваемыми одноцепными линиями со стандартными расстояниями между фазами при том же общем числе проводников ( $n$ ) ( $n = 3 \cdot n_{\phi}$  - для одноцепной ЛЭП и  $n = 6 \cdot n_{\phi}$  - для двухцепных СВЛ). При этом достигнуто увеличение  $\rho_r$  на (50-150)%; по плотности передачи мощности на (80-200)%; по снижению напряженности под линией на (30-50)%. Кроме конструктивных параметров, оценена режимная эффективность полученных конструкций СВЛ-10, 35, 110 кВ, заключающаяся в расчете потерь напряжения ( $U\%$ ) и мощности ( $\Delta P\%$ ) при различных передаваемых мощностях и длин линий и сравнении этих показателей с аналогичными для одноцепных ЛЭП со стандартными расстояниями между фазами. Показано, что по  $U\%$  и  $\Delta P\%$  достигается следующий выигрыш (1-14)% и (1-24)%.

Таким образом, для линий класса 10, 35, 110 кВ при числе проводников ( $n > 6$ ), позволяющем соорудить двухцепное СВЛ, достигаются более лучшие показатели, чем для традиционных одноцепных ЛЭП с тем же числом проводников. Далее получены и исследованы параметры оптимальных конструкций УСВЛ-220, 330, 500, 750 и 1150 кВ при различном числе проводников в фазе ( $n_{\phi}$ ), которые обладают высокими значениями  $K_{ис}$ ,  $K_r$ ,  $K_e$ . Примеры этих конструкций представлены на рис. 35, 36, 37, 38, 39, соответственно, при числе проводников  $n_{\phi} = 4, 5, 7, 10$ . Для УСВЛ-220 кВ рассмотрено 9 вариантов с круглыми и плоскими фазами, расположенными по горизонтали, вертикали и треугольнику для  $n_{\phi} = 2, 3, 4$ . Для УСВЛ-500 кВ рассмотрено 4 варианта с круглыми и плоскими фазами при различных видах оптимизации (см. рис. 3, 4, 5, 6) для  $n_{\phi} = 3, 4, 5, 6$ . Таким образом, УСВЛ-500 кВ можно рассматривать как альтернативный вариант ЛЭП-750 кВ и ЛЭП-1150 кВ. Для УСВЛ 750 кВ рассмотрено 4 варианта с круглыми и оптимальными фазами, расположенными горизонтально для  $n_{\phi} = 6, 7, 8$ . Таким образом, УСВЛ-750 кВ можно рассматривать как альтернативу к ЛЭП-1150 кВ и передач постоянного тока  $\pm 750$  кВ.

Для УСВЛ-1150 кВ рассмотрено 4 варианта с круглыми и оптимальными фазами, расположенными горизонтально для  $\rho_{\phi} = 9, 10, 11$ . Далее на основе расчета приведенных затрат ( $Z_{\Sigma}$ ) по электропередаче, учитывающих: стоимость линии  $K_{вл}$ ; стоимость трансформаторов  $K_{тр}$ ; реакторов  $K_{reak}$  и ячеек  $K_{ору}$ , стоимость постоянной части подстанций  $K_{пост}$ ; стоимость подстанций  $K_{п/ст}$ ; суммарные капитальные вложения  $K_{\Sigma}$ ; издержки от потерь на нагрузку  $I_N$ ; издержки от потерь на корону  $I_K$ ; были определены области применения УСВЛ различного класса напряжения вместо нескольких традиционных цепей ЛЭП того же класса напряжения и вместо оттоцепных ЛЭП более высокого класса напряжения. В качестве примера на рис. 40 представлены зависимости удельных приведенных затрат ( $Z_{уд}$ ) от передаваемой мощности  $P_K$  для УСВЛ-500 кВ и нескольких традиционных цепей ЛЭП-500 кВ той же натуральной мощности. Такие зависимости получены для УСВЛ всех классов напряжения 110-1150 кВ. Анализ таких зависимостей пока- зывает, что для УСВЛ  $Z_{уд}$  меньше на (5+15) %, чем для нескольких цепей традиционных ЛЭП того же класса напряжения и натуральной мощности. При сравнении по приведенным затратам: УСВЛ-220 и 330 кВ с ЛЭП-500 кВ; УСВЛ-330 и 500 кВ с ЛЭП-750 кВ; УСВЛ-500 и 750 кВ с ЛЭП-1150 кВ были построены области применения в координатах длин и передаваемых мощностей. В качестве примера такие области приведены на рис. 41 для УСВЛ-500 кВ и ЛЭП-1150 кВ. Полученные области применения УСВЛ-220, 330, 500, 750, 1150 кВ позволили пред- ложить их использование при формировании альтернативного вари- анта развития ЕЭС на дальнейшую перспективу (2010-2020 гг.). Базо- вая двухсотузловая схема на основе традиционных ЛЭП-500, 750, 1150 кВ была представлена совместно Энергосетьпроект, СЭИ СО АН СССР и НИИПТ. Альтернативный вариант схемы для двух уровней потребления (а - 2700 и б - 3800 млрд. кВт. час) с применением УСВЛ был разра- ботан с участием автора. При сравнении предложенного альтернатив- ного варианта с УСВЛ с базовым вариантом с традиционными ЛЭП по заменяемой части было получено снижение:  $K_{вл}$  на 20 %,  $K_{тр}$  на 25 %,  $K_{reak}$  на 35 %,  $K_{пост}$  на 20 %,  $K_{ору}$  на 25 %,  $K_{\Sigma}$  на 25 %,  $I_K$  на 30 %,  $Z_{\Sigma}$  на 20 %. Далее предлагается техническое решение по увеличению натуральной мощности одноцепных ЛЭП-10, 35, 110, 220 кВ с расщеп- ленными фазами на  $\rho_{\phi} = 2, 3$  проводника с горизонтальным и треугольным расположением фаз. Суть заключается в том, что в пролете металличе- ские внутрифазные распорки снимаются и проводники разных фаз стя- гиваются изолированными стяжками. Пример такого решения при  $\rho_{\phi} = 2$  показан на рис. 42. Предлагаемое решение позволяет увеличить  $P_N$  по

сравнению с традиционным вариантом для ЛЭП-220 кВ на: 38,4 % при  $n_\varphi=2$  и горизонтальном расположении фаз; 47,6 % при  $n_\varphi=2$  и треугольном расположении фаз; 64,6 % при  $n_\varphi=3$  и треугольном расположении фаз.

Шестая глава посвящена исследованию свойств, параметров и режимов ЛЭП с новым устройством и способом управляемой продольной компенсации на основе конденсаторной батареи и фазорегулирующего трансформатора (УПК ФРТ), включенных параллельно между собой и установленных в середине ЛЭП, рис. 43. Для УПК ФРТ получены обобщенные параметры четырехполюсника:

$$A_F = (Z_\varphi \hat{K}_\varphi + \frac{1}{\hat{K}_\varphi} Z_K) / \Delta; \quad B_F = (Z_K \cdot Z_\varphi \cdot \hat{K}_\varphi) / \Delta; \quad C_F = (\hat{K}_\varphi - 1 + \frac{1}{\hat{K}_\varphi} - \frac{\hat{K}_\varphi}{\hat{K}_\varphi}) / \Delta$$

$$D_F = (Z_\varphi + Z_K) \cdot \hat{K}_\varphi / \Delta; \quad \Delta = Z_\varphi \cdot \hat{K}_\varphi + Z_K, \quad (20)$$

где  $Z_K$  - сопротивление конденсатора;  $Z_\varphi, K_\varphi$  - сопротивление и коэффициент трансформации фазорегулятора. Также получены эквивалентные обобщенные параметры ЛЭП с УПК ФРТ:  $A_{\partial F}, B_{\partial F}, C_{\partial F}, D_{\partial F} =$

$= f(A_F, B_F, C_F, D_F, A_\lambda, B_\lambda, C_\lambda, D_\lambda)$ . Для линии без потерь при  $Z_K = -jX_K, Z_\varphi = jX_\varphi, K_\varphi = e^{i\theta}$  получены  $A_{\partial F}, B_{\partial F}, C_{\partial F}, D_{\partial F}$  в виде:

$$A_{\partial F} = D_{\partial F} = jA_0(F' + jF''), \quad B_{\partial F} = B_0(F' - jF''), \quad C_{\partial F} = C_0(F' - jF'') \quad (21)$$

где  $F' = (X_\varphi \sin 2\theta - X_K \sin \theta) / T, F'' = (X_\varphi - X_K \cos \theta) / T$

$$T = X_\varphi^2 + X_K^2 - 2X_\varphi X_K \cos \theta; \quad A_0, B_0, C_0 = f(Z_\varphi, \alpha_\varphi, L, \theta, X_\varphi, X_K) \quad (22)$$

Из (21, 22) видно, что реальная часть  $Re(B_{\partial F})$  и  $Re(C_{\partial F})$  становятся равными нулю при  $F' = 0$ , т.е. когда выполняется условие  $\theta = \arccos(\frac{X_K}{2X_\varphi})$ . Из (21 и 22) видно, что мнимая часть  $Im(B_{\partial F})$  и  $Im(C_{\partial F})$  становятся равными нулю при  $F'' = 0$ , т.е. когда выполняется условие  $\theta = \arccos(\frac{X_\varphi}{X_K})$ . Сопротивление ЛЭП с УПК ФРТ начинает компенсироваться не при  $\theta = 0^\circ$ , а при  $\theta \geq \arccos(\frac{X_\varphi}{X_K})$ , при этом  $X_K$  должно быть больше  $X_\varphi$ . Это происходит из-за влияния индуктивного сопротивления фазорегулятора  $X_\varphi$ . Для эквивалентного четырехполюсника ЛЭП с УПК ФРТ получено характеристическое сопротивление  $Z_C$  и коэффициент передачи по напряжению ( $\gamma_u$ ) и по току ( $\gamma_i$ ). Ввиду того, что ЛЭП в основном работает при напряжениях по концам, близким  $U$  номинальное, рассмотрен режим ЛЭП с УПК ФРТ при заданных напряжениях в начале  $U_N$  и конце  $U_K$ . Как известно, для поддержания  $U_N$  и  $U_K$  при передаваемой активной мощности  $P_K$  необходима реактивная мощность в конце  $Q_K$ , равная:

$$Q_K = Im(\hat{B}_{\partial F} A_{\partial F}) \frac{U_K^2}{|B_{\partial F}|^2} + \sqrt{\left(\frac{U_N U_K}{|B_{\partial F}|}\right)^2 - \left(P_K + Re(\hat{B}_{\partial F} A_{\partial F}) \frac{U_K^2}{|B_{\partial F}|^2}\right)^2} \quad (23)$$

Из (23) видно, что при изменении в широком диапазоне  $A_{\partial F}, B_{\partial F}, C_{\partial F}, D_{\partial F}$  при регулировании угла  $\theta$  можно получить разные  $Q_K$  при заданных  $U_N, U_K, P_K$ . Если задается условием, что  $Q_K = P_K \cdot ig \varphi$  (24)

т.е. электропередача будет работать с заданным углом нагрузки  $\varphi$ , то из (23) и (24) получим уравнение для  $P_k$ :

$$P_k = (-E + \sqrt{E^2 + 4FP}) / 2F; \quad (25)$$

$$E = 2RE(\hat{\beta}_{2F} A_{2F}) \frac{U_k^2}{|B_{2F}|^2} - 2I_g \varphi \cdot \text{Im}(\hat{\beta}_{2F} A_{2F}) \frac{U_k^2}{|B_{2F}|^2};$$

$$P = |A_{2F}|^2 \frac{U_k^2}{|B_{2F}|^2} - \left( \frac{U_H U_K}{|B_{2F}|} \right)^2; \quad F = I_g^2 \varphi + 1. \quad (26)$$

Из (23) - (25) видно, что для ЛЭП с УПК ФРТ можно обеспечить режим с заданными  $U_H, U_K, Q_K$ , т.е. электропередача будет потреблять ( $Q_K < 0$ ) или выдавать ( $Q_K > 0$ ), или работать в режиме согласованной нагрузки ( $Q_K = 0$ ) при данной мощности  $P_k$ . Из (23) можно найти предельную мощность  $P_{пр}$ , которую можно передать при заданных  $U_H$  и  $U_K$ :

$$P_{пр} = \frac{U_H U_K}{|B_{2F}|} - RE(\hat{\beta}_{2F} A_{2F}) \frac{U_k^2}{|B_{2F}|^2} = P_0 - P_2. \quad (27)$$

Видно, что  $P_{пр}$  меньше, чем значение  $P_0 = \frac{U_H U_K}{|B_{2F}|}$ , которому в ряде публикаций присваивалось значение предельной мощности. Из (25) и (26) когда  $P_k = 0$  получено условие:  $|A_{2F}| = \frac{U_H}{U_K}$  или: при  $U_H = U_K \rightarrow |A_{2F}| = 1$  (28).

Таким образом, если установить угол  $\theta$  УПК ФРТ, обеспечивающий условие равенства единице модулю обобщенного параметра  $|A_{2F}|$ , то можно обеспечить режим с  $P_k = 0$  при  $Q_K > 0, Q_K < 0, Q_K = 0$ . При  $P_k = 0$  и  $Q_K = 0$  линия как бы запирается, т.е. обеспечивается режим эквивалентного холостого хода при этом  $U_H$  и  $U_K$  будут заданными. Далее показано, что коэффициент компенсации  $K_C$  для ЛЭП без регулирующих ПК - постоянная величина, а для ЛЭП с УПК ФРТ - переменная, зависящая от угла  $\theta$ . Зависимость  $K_C$  от  $X_k$  и угла  $\theta$  представлена на рис. 44. Для ЛЭП с УПК ФРТ при отрицательных значениях  $K_C$  - эквивалентное сопротивление ЛЭП увеличено, а при положительных значениях  $K_C$  - оно уменьшено по сравнению с обычной ЛЭП. Таким образом, при  $X_k > X_{ф}$  возможно добиться емкостной компенсации, а при (отключении части батареи)  $X_k < X_{ф}$  возможно добиться индуктивной компенсации параметров ЛЭП регулируя угол  $\theta$ . Далее построены и исследованы зависимости А, В, С, Д и параметров режимов для ЛЭП с УПК ФРТ. На рис. 45 представлены графики изменения  $P_{пр}$  и  $P_0$  для ЛЭП с УПК ФРТ при  $\theta = 0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$  и для обычной ЛЭП (штриховые линии) класса 500 кВ. Видно, что  $P_{пр}$  увеличивается с ростом угла  $\theta$  и смещается в сторону меньших длин. Это говорит об уменьшении волновой длины ЛЭП. Изменение реальных и мнимых частей А, В, С, Д, а также  $Z_C, \gamma$  даны на рис. 46, а, б, в, г, д, с, ж, з для  $L = 400$  км,  $X_{ф} = 50$  Ом,  $\frac{X_k}{X_{ф}} = 0,6$ . Из рис. 46, з видно, что изменение угла  $\theta$  от  $0^\circ$  до  $35^\circ$  соответствует изменению электрической длины линии от 630 до 50 км (при естественной длине  $L = 400$  км). На рис. 47 представлены графики измене -

ния (круговые диаграммы)  $Q_K = f(\rho_K)$  при  $\chi_K = 0,6 \cdot \chi_N$ ,  $\theta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ . Видно, что можно обеспечить передачу  $\rho_K$  при любом угле нагрузки  $\gamma (Q_K = \rho_K \cdot \text{tg } \gamma)$ . Штриховыми линиями нанесены результирующие диаграммы  $Q_K = (0; 0,3; 0,6) \cdot \rho_K$ , представляющие собой прямые линии. Кроме того, можно увеличить пропускную способность  $\rho_K$  при  $Q_K > 0$  до 1400 МВт, т.е. до  $1,4 \cdot \rho_N$ . На рис. 48 представлено изменение максимального модуля напряжения  $U_{ср}$  вдоль ЛЭП в зависимости от  $\rho_K$  при различных углах  $\theta$ . Видно, что при каждом  $\rho_K$  можно подобрать, обеспечивающее равенство  $U_{ср} = U_{ном}$ . На рис. 49,а представлен необходимый закон изменения угла  $\theta$  в зависимости от  $\rho_K$  при обеспечении режима согласованной нагрузки ( $Q_K = 0$ ). При этом угол  $\theta$  от  $\rho_K$  уменьшается и становится существенно меньше, чем для обычной ЛЭП, рис. 49,б. КПД также выше, чем для об.ЛЭП, рис. 49,в. На рис. 49,г показано изменение падения напряжения  $\Delta U_K$  на обкладках конденсатора для ЛЭП с УПК ФРТ и ЛЭП с ПК. Видно, что ЛЭП с УПК ФРТ генерирование реактивной мощности конденсатором происходит по другому закону. Далее исследованы параметры и режим "запирания" ЛЭП: при  $\chi_K = 0,2 \cdot \chi_N = -22,4$  (Ом),  $\chi_{ф} = 50$  (Ом). т.е.  $\chi_K < \chi_{ф}$ . Построены зависимости А, В, С, Д от угла  $\theta$ . Показано, что модуль |А| становится равным 1 при  $\theta = 12,2^\circ$ , что соответствует условию (28). При этом можно обеспечить режим эквивалентного холостого хода  $\rho_K = 0, Q_K = 0$ . Далее исследован режим минимальных потерь ЛЭП с УПК ФРТ, аналогично как это было сделано для УСВЛ в главе 4 при изменении  $U_{к, опт}$  и  $Q_{к, опт}$  по известным законам. Для сравнения был исследован также режим минимальных потерь для ЛЭП с ПК и управляемыми реакторами с проводимостью  $Y_p$  по концам ПК. Исследованы изменения обобщенных параметров А, В, С, Д, а также  $Z_c$  и  $\gamma$  от величины  $Y_p$ . На рис. 50 видно, что  $Q_K$  для ЛЭП с ПК и реакторами уменьшается с ростом  $Y_p$ . Причем естественная пропускная способность ЛЭП с ПК и реакторами (при  $Q_K \geq 0$ ) составляет диапазон  $\rho_K = (0 + 0,6) \rho_N$ , а для ЛЭП с УПК ФРТ - диапазон  $\rho_K = (0, 1 + 1,4) \rho_N$ , что больше в 2,5 раза. На рис. 51 и 52 представлены параметры режима минимума потерь для ЛЭП с УПК ФРТ и ЛЭП с ПК и реакторами, соответственно. Сравнивая эти режимы видно, что с учетом ограничений по  $U_{ср}$  в ЛЭП с ПК и реакторами можно обеспечить РМП в диапазоне  $\rho_K = (0 + 0,13) \cdot \rho_N$ , а для ЛЭП с УПК ФРТ на всем диапазоне  $(0, 1 + 1,4) \rho_N$ , что больше в 10 раз. На рис. 53 представлен закон изменения  $\theta_{опт} = f(\rho_K)$ , а на рис. 54 представлены графики изменения  $U_{к, опт}$ ,  $Q_{к, опт}$ ,  $\delta_{опт}$  и  $\gamma_{опт}$  для РМП при изменении  $\theta_{опт}$  по закону рис. 53. Таким образом, проведенные исследования свойств параметров и режимов ЛЭП с УПК ФРТ показывают несомненное преимущество такого способа компенсации. Далее были определены области примене-

ния ЛЭП с УПК ФРТ в сравнении с компактными линиями (КЛ) с управляемыми реакторами. Принято, что пропускная способность повышается на 40 % и в том и в другом случае. При этом в расчете приведенных затрат для ЛЭП с УПК ФРТ добавляется стоимость ФРТ ( $K_{фрт}$ ) и стоимость батареи конденсаторов ( $K_{кан}$ ), принятых втрое дороже трансформаторов, а стоимость реакторов равна нулю, (т.к. реакторы заменяет сопротивление фазорегуляторов при  $X_k < X_{ф}$ ). Для компактных линий учтено удорожание втрое стоимости управляемых реакторов по сравнению с неуправляемыми реакторами, выбранных на всю зарядную мощность линии и учтено угорожание линии за счет добавления проводников для увеличения натуральной мощности на 40 %. Вид областей применения сравниваемых ЛЭП приведен на рис. 55 для класса напряжения 330 кВ. Анализ таких зависимостей для 220, 330, 500, 750 кВ показал, что чем выше класс напряжения, тем области применения ЛЭП с УПК ФРТ увеличиваются.

Седьмая глава. Ввиду того, что рассмотренные виды управляемых электропередач УСВЛ и ЛЭП с УПК ФРТ основаны на фазовом управлении, в этой главе представлена обобщенная методика расчета, синтеза параметров конструкции, схем замещения и режимов ФРТ. Рассмотрены и эквивалентированы узловые уравнения для схем ФРТ в фазных и трех симметричных координатах. Причем в фазных координатах матрицы параметров, связывающие токи и напряжения узлов и ветвей ФРТ состоят из блоков  $\Pi_{ij}$ , а в трех симметричных координатах - из блоков  $\Pi_{sij}$ , вида:

$$\Pi_{ij} = \begin{bmatrix} \Pi_1 & \Pi_2 & \Pi_3 \\ \Pi_3 & \Pi_1 & \Pi_2 \\ \Pi_2 & \Pi_3 & \Pi_1 \end{bmatrix}; \quad \Pi_{sij} = \begin{bmatrix} \Pi^{(\alpha)} & & \\ & \Pi^{(\beta)} & \\ & & \Pi^{(\gamma)} \end{bmatrix} \quad (29)$$

При этом матрицы параметров 1-й, 2-й, 0-й последовательности будут иметь вид

$$\Pi_s^{(i, z, \theta)} = \begin{bmatrix} \Pi_{11}^{(i, z, \theta)} & \Pi_{12}^{(i, z, \theta)} \\ \Pi_{21}^{(i, z, \theta)} & \Pi_{22}^{(i, z, \theta)} \end{bmatrix}. \quad (30)$$

Причем в (30)  $\Pi_{12}^{(\alpha)} \neq \Pi_{21}^{(\alpha)}$  и  $\Pi_{12}^{(\beta)} \neq \Pi_{21}^{(\beta)}$ , т.е. нельзя построить схему замещения ФРТ 1-й, 2-й последовательности, состоящих только их проводимостей. Можно построить схему замещения с проводимостями и идеальными трансформаторами с комплексным коэффициентом трансформации  $K = R \cdot e^{j\theta}$ . Такая схема для ФРТ с одним входом и двумя выходами, представлена на рис. 56. Для таких схем замещения найдены расчетные выражения для их параметров при двух случаях  $U_{вх} / U_{вых} = K$  и  $U_{вх} / U_{вых} = 1/K$ . Полученные выражения имеют вид:

$$Y_p^{(i, z, \theta)} = [\hat{K}^{(i, z, \theta)}] Y_s^{(i, z, \theta)} [K^{(i, z, \theta)}],$$

где  $-Y_j^{i,2,0}$  и  $K_j^{i,2,0}$  - матрицы искомым проводимостей и коэффициентов трансформации;  $Y_j^{i,2,0}$  матрица известных проводимостей I, 2, 0-й последовательности. Из этих выражений при  $K_j = 1+j0$  и  $K_j = R_j e^{j\theta_j}$  найдено условие существования схемы замещения:

$$Y_{sjj}^{(i,2,0)} \cdot K_j^{(i,2,0)} = Y_{sjj}^{(i,2,0)} \cdot \hat{K}_j^{(i,2,0)} \quad (31)$$

Из (31) относительно неизвестных  $\theta_j$  получено:

$$\theta_j^{(i,2,0)} = (y_{ji}^{(i,2,0)} - y_{ij}^{(i,2,0)})/2 = \theta_{сх,j},$$

где  $-y_{ji}$  и  $y_{ij}$  - аргументы комплексных проводимостей выходов относительно входа  $Y_{sjj}$  и  $Y_{stj}$ . Относительно неизвестных  $Y_{sij}$  получено:

$$Y_{sij}^{(i,2,0)} = -\hat{K}_i^{(i,2,0)} \cdot Y_{sij}^{(i,2,0)} \cdot K_j^{(i,2,0)} \quad \text{при } i \neq j$$

$$Y_{sii}^{(i,2,0)} = \hat{K}_i^{(i,2,0)} \sum_{j=1}^{n0} (Y_{sij}^{(i,2,0)} \cdot K_j^{(i,2,0)}) \quad \text{при } i=j$$

Для сопротивлений  $Z_{sij} = 1/Y_{sij}$ . По представленной методике рассчитаны параметры схем замещения 6-ти схем ФРТ, представленных на рис. 57. Вид изменения параметров для схемы рис. 57, а показан на рис. 58, из которого видно, что нельзя вводить в схему замещения сопротивления  $Z^{(1)}, Z^{(2)}, Z^{(0)}$  и угол  $\theta^{(i)}$ . Необходимо вводить найденные  $Z_{сх1} = Z_{сх2}, Z_{сх0}$  и угол  $\theta_{сх1}$ . Причем разница между ними существенная при больших углах  $\theta$ . Далее на основе преобразований узловых уравнений предложена методика синтеза (изобретения) схем ФРТ и получено уравнение ФРТ вида: (I - вход, j - выходы):

$$-[Y_{ij}][Y_{jj}]^{-1}([\hat{Y}_{ji}] - [\hat{Y}_{jj}][\hat{Y}_{jj}]^{-1}[\hat{Y}_{ji}]) = -[\hat{Y}_{ij}][\hat{Y}_{jj}]^{-1}[\hat{Y}_{ji}] \quad (32)$$

Для ФРТ с одним входом и выходом уравнений (32) имеет вид:  $\frac{Y_{21}}{Y_{12}} = e^{j2\theta}$   
 Показано, что искомая матрица инцидентии M изобретаемого ФРТ может состоять из 27 блоков вида (29), где  $\Pi_{ij}=0$ ; I; -I, а  $\Pi_{sij}$  представляют собой комбинации на I, a, a<sup>2</sup>. Методика синтеза заключается в следующем: 1) определяются размеры предполагаемой M (число узлов NY и число ветвей NB); 2) определяется число необходимых блоков  $\Pi_{ij}$ :  $N\Pi = \frac{NY}{3} \cdot \frac{NB}{3}$ ; 3) из 27 блоков выбираются произвольно  $\frac{NB}{3}$  число блоков  $\Pi_{ij}$ , которыми заполняется первый ряд M, далее заполняются второй и последующие ряды. Последний ряд заполняется из условия, чтобы сумма элементов каждого столбца M равнялась нулю; 4) по полученной M строится схема ФРТ; 5) полученная схема проверяется по уравнению (32). Если оно выполняется, то схема устройства является схемой ФРТ. По предложенной методике получены схемы рис. 57, в, г. Далее показано, что условие существования схемы замещения ФРТ (31) связано с законом управления обмотками ФРТ для кругового вращения фазы и продемонстрировано на примере получение такого закона. Далее предложены и исследованы параметры двух новых авто -

трансформаторных схем ФРТ (рис. 57, в, г) с соединением обмоток в звезду и треугольник. Найдены параметры, токи и напряжения узлов и ветвей этих схем, а также расчетные мощности. Показано, что эти схемы имеют хорошие энергетические показатели. Далее предлагается использовать ФРТ в режиме поперечного реактора, когда вход и выход замыкаются между собой. На примере схемы рис. 57, а исследованы параметры и режимы ФРТ-реактора, схема которого представлена на рис. 59. Показано, что сопротивление ФРТ-реактора изменяется в 9 раз при изменении  $\theta = 0^\circ + 60^\circ$ , откуда следует, что применение ФРТ в режиме поперечного реактора может стать эффективным средством, которое расширяет область применения ФРТ. Далее предложена методика расчета несимметричных режимов ФРТ в фазных координатах на основе узловых уравнений с учетом источника питания и нагрузки. Представленная методика проиллюстрирована на примере расчета схемы ФРТ. Построены векторные диаграммы токов и напряжений при различных видах повреждений.

**Восьмая глава.** Ввиду того, что рассмотренные управляемые линии УСВЛ и ЛЭП с УПК ФРТ, а также сами ФРТ, представляют собой управляемые ветви электрической сети, в данной главе предлагается методика и исследуется эффективность регулирования угла  $\theta_{ij}$  или продольного сопротивления ветвей  $X_{ij}$  с точки зрения минимума потерь во всей электрической сети. Схема управляемой ветви представлена на рис. 61. Получены узловые уравнения электрической сети при разбиении матрицы инцидентности  $M$  на матрицу начала  $M_+$  и матрицу конца  $M_-$  и с учетом матриц комплексных коэффициентов трансформации  $K_\Phi$  ФРТ:

$$Y_3 = (M_+ \hat{K}_\Phi - M_-) Y_0 (K_\Phi M_+^T - M_-^T)$$

Разделяя проводимости  $Y_3$  на действительную  $g_3$  и мнимую  $b_3$  части с учетом  $K_{\Phi ij} = e^{j\theta_{ij}}$ ,  $Y_{3ij} = g_{3ij} + j b_{3ij}$ , получено, что  $Y_{3ij} \neq Y_{3ji}$  при этом получено выражение для потерь активной мощности электрической сети, содержащей управляемые ветви:

$$\Delta P = \sum_i \sum_j U_i U_j [g_{3ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{3ij} \sin(\delta_i - \delta_j)]$$

где  $U_i, \delta_i$  - модули и фазы напряжений узлов сети. Для построения эффективного итерационного метода поиска минимума  $\Delta P$  получены производные от  $\Delta P$  по углам  $\theta_{ij}$  и продольным сопротивлениям  $X_{ij}$  управляемых ветвей:

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial \theta_{ij}} = 2 U_i U_j g_{3ij} \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j); \quad (33)$$

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial X_{ij}} = 4 U_i U_j \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \left( \frac{r_{ij} X_{ij}}{(r_{ij}^2 + X_{ij}^2)^2} \right) \quad (34)$$

Задача поставлена следующим образом: найти минимум  $\Delta P$  при ограничениях на модули напряжения  $U_i$  узлов и токи  $I_{Si}$  ветвей. Алгоритм поиска мест установки и параметров регулируемых средств построен

следующим образом: 1) вычисляются производные (33, 34) от  $\Delta P$  по  $\theta_{ij}$  и  $\chi_{ij}$  всех ветвей сети при данном режиме; 2) вычисленные производные ранжируются по убыванию своих значений; 3) выбирается ветвь с максимальной производной и в неё вставляется регулируемое средство (ФРТ, УСВЛ, ЛЭП с УПК ФРТ, продольный реактор); 4) на основе итерационного градиентного метода определяется значение  $\theta_{ij}$  или  $\chi_{ij}$  для получения минимума  $\Delta P$ . Если в процессе итераций вступают в силу ограничения, то параметр  $\theta_{ij}$  или  $\chi_{ij}$  фиксируется; 5) проверяется рентабельность включения управляемого средства по условию  $\Delta P^k - \Delta P^o \leq \Delta P_{рент}$ , (35), где  $-\Delta P^o$  и  $\Delta P^k$  - исходные потери и потери на конечной итерации;  $\Delta P_{рент}$  - рентабельная величина снижения потерь управляемым средством достаточная для его окупаемости. Если условие (35) выполняется, то управляемое средство остаётся в найденной ветви схемы, если нет, то средство исключается; 6) повторяются пункты 1-5 для следующих по порядку ветвей с наибольшими производными. Повторение происходит до тех пор, пока не достигается снижение  $\Delta P$  более, чем на 10 %, или не исчерпан весь список ветвей; 7) в результате работы алгоритма определяются места установки и параметры управляемых средств, а также достигнутое снижение потерь  $\Delta P_{opt}$ . На основе представленного алгоритма создана программа для ЭВМ, по которой были рассчитаны оптимальные режимы для Южной части ЕЭС. В результате выбрано четыре ветви, где применение регулируемого угла  $\theta_{ij}$  или сопротивления  $\chi_{ij}$  позволило снизить потери соответственно на 39,3 или 40,7 МВт, что дало экономический эффект более 2х миллионов рублей в год.

В приложениях приведен вывод формул для расчета электрических полей ЛЭП; основные соотношения параметров оптимизации двухпроводной линии; параметры и стоимостные показатели УСВЛ; расчет параметров УСВЛ; вывод обобщенных параметров 4-х полюсника УСВЛ; материалы по опытно-промышленным СВЛ-10,35,110 кВ; материалы по опытно-промышленному образцу ФРТ-110 кВ; приложены акты внедрения и использования результатов диссертации.

**Заключение.** В диссертационной работе получили развитие теория, разработка методик расчета и исследование параметров и режимов управляемых линий электропередачи с повышенной естественной и искусственной пропускной способностью на основе фазового управления.

Основные выводы, полученные на основе этих разработок, можно сформулировать следующим образом.

1. Разработаны критерии и методика оптимизации взаимного расположения проводников ЛЭП повышенной пропускной способности и про-

извольной конструкции на основе полученных в работе соотношений между натуральной мощностью, координатами проводников, электрическими полями, а также аналитический, выражений для градиентов натуральных мощностей проводников.

2. Обобщена методика расчета погонных, волновых и обобщенных параметров, а также параметров схем замещения линий произвольной конструкции, по которой рассчитаны УСВЛ 10-1150 кв.

3. Получены оптимальные конструкции УСВЛ всех классов напряжений при различном числе проводников и исследованы их параметры на основе предложенных критериев и методик. Показано, что эти конструкции позволяют повысить плотность передачи мощности в (1,5-4) раза при снижении приведенных затрат на (5-15) % и снижении зон экологического влияния в (4-50) раз.

4. Произведена оптимизация нормального режима УСВЛ при модульном и фазовом управлении и проведено сравнение фазового управления с управлением при помощи компенсирующих устройств. Показано, что фазовое управление тем эффективнее, чем длиннее линия и позволяет повысить КПД на (1-5) %.

5. Определены области использования УСВЛ различного класса напряжения в сравнении с несколькими традиционными цепями ЛЭП того же класса напряжения и одноцепными ЛЭП более высокого класса напряжения, позволившие предложить альтернативный вариант развития электрических сетей ЭЭС на далекую перспективу (двухсотузловая схема) при снижении приведенных затрат на 20 %.

6. Предложен и исследован новый способ управляемой продольной компенсации УПК ФРТ. Показано, что возможно добиться как емкостной, так и индуктивной компенсации, что позволяет осуществить режимы минимума потерь и согласованной нагрузки на всем диапазоне мощностей (0,1-1,4)  $P_N$  с учетом ограничений и регулировать пропускную способность и волновую длину ЛЭП. Определены области применения ЛЭП с УПК ФРТ.

7. Разработаны и обобщены методики: расчета параметров схем замещения, синтеза схем, расчета несимметричных режимов работы фазорегулирующих трансформаторов произвольной конструкции с несколькими входами и выходами с иллюстрацией на примере расчета 3-х предложенных в работе схем и наиболее перспективных схем ФРТ. Предложено использование ФРТ в режиме поперечного реактора.

8. Разработана методика оценки эффективности управляемых ветвей в электрических сетях, позволяющая определить места включения, и параметры оптимального режима на основе полученных выражений для производных от потерь активной мощности по величине фазового сдви-

га и величине продольного сопротивления ветви, проиллюстрированная на примере оптимизации режима электрической сети Южной части ЭЭС, что дало экономический эффект более 2 млн. руб. в ценах 1990 г. Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях.

1. Постолатий В.М., Новгородцев В.М., Солдатов В.А., Комендант И.Т. Параметры и характеристики УСВЛ-220+1150 кВ. - В кн.: Управляемые ЛЭП. - Кишинев: Штиинца, 1983, с.3-20.

2. Постолатий В.М., Комендант И.Т., Солдатов В.А. Поправочные коэффициенты для определения параметров схем замещения участка УСВЛ. - Известия АН МССР. - Кишинев: Штиинца, 1983, № I, с.71-73.

3. Постолатий В.М., Солдатов В.А. Расчет напряженности электрического поля в пространстве, окружающем ЛЭП. - Там же, 1984, № 2, с.73-76.

4. Солдатов В.А., Раца В.С. Расчет напряженности электрического поля под ЛЭП и на поверхности составляющих фаз. - В кн.: Алгоритмы и программы (Инф. бюл. Гос. ФАП СССР) № I (58), 1984, с.109.

5. Солдатов В.А., Раца В.С. Выбор расположения фаз и состав - ляющих в фазах ЛЭП. - Там же № 3, 1984, с. 69.

6. Солдатов В.А., Раца В.С. Расчет погонных параметров и параметров схем замещения многофазных ЛЭП. - Там же, с. 70.

7. Солдатов В.А. Выбор взаимного расположения проводников ЛЭП. - Тез. докл. на конф. молодых ученых АН МССР. - Кишинев: Штиинца, 1984, - с. 251.

8. Солдатов В.А., Комендант И.Т., Постолатий В.М. Параметры УСВЛ при неполной транспозиции фаз. - В кн.: Электропередачи с регулируемыми параметрами. - Кишинев: Штиинца, 1984, с.3-12.

9. Солдатов В.А., Комендант И.Т., Постолатий В.М. Режимы УСВЛ при неполной транспозиции фаз. - Там же, с. 12-16.

10. Калинин Л.П., Бошняга В.А., Солдатов В.А. Способ включения двухцепной ЛЭП. - А.с. СССР, № 1089307, 1984.

11. Постолатий В.М., Фейгис Ш.Л., Солдатов В.А. и др. Результаты опытно-промышленных испытаний СВЛ-110 кВ. - В кн.: Двухцепные электропередачи повышенной пропускной способности. - Кишинев: Штиинца, 1985, с. 3-14.

12. Постолатий В.М., Солдатов В.А., Царик И.А. Исследование потерь мощности в УСВЛ. - Там же, с.37-50.

13. Постолатий В.М., Солдатов В.А., Царик И.А. Эквивалентные параметры УСВЛ и исследование КПД УСВЛ-500/500 кВ и ВЛ-500 кВ равной пропускной способности. - В кн.: Управляемые электропередачи. - Кишинев: Штиинца, 1986, с. 3-20.

14. Солдатов В.А. Уравнения эквивалентного четырехполюсника УСВЛ и оптимизация на их основе КПД электропередачи с учетом ограничений по напряжению. - Там же, с. 20-42.

15. Постолатий В.М., Солдатов В.А., Курносое А.И. Опора линии электропередачи. - А.с. СССР № 1283338, 1986.

16. Солдатов В.А. Основные соотношения между параметрами режима натуральной мощности и геометрией расположения проводников многопроводных линий электропередачи. - В кн.: Оптимизация конструкций, регулирование режимов. - Кишинев: Штиинца, 1987, с.24-50.

17. Постолатий В.М., Солдатов В.А. Оптимизация взаимного расположения проводников УСВЛ. - Там же, с.3-23.

18. Солдатов В.А., Царик И.А. Оптимизация взаимного расположения фаз УСВЛ-330 кВ. - В сб.: Управление режимами электропередач. - Кишинев: Штиинца, 1988, с.3-15.

19. Солдатов В.А. Применение различных режимов для уменьшения потерь мощности и энергии в УСВЛ в условиях технических ограничений. - В сб.: Управляемые электропередачи, вып. I. - Кишинев: Штиинца, 1989, с. 3-20.

20. Солдатов В.А., Калинин Л.П., Зайцев Д.А. Методика построения схем замещения и закон управления трансформаторным фазорегулирующим устройством кругового вращения фазы. - Там же, с.42-61.

21. Солдатов В.А., Дубков А.А. Применение фазового управления для снижения потерь мощности в энергосистемах. - Известия АН МССР № 2. - Кишинев: Штиинца, 1989, с.48-51.

22. Солдатов В.А. Расчет напряженности электрического поля на поверхности проводников линии электропередачи. Изв. АН МССР № 1. - Кишинев: Штиинца, 1990, с.38-42.

23. Солдатов В.А., Дубков А.А. Использование принципов фазового управления при разработке вариантов развития электрических сетей. - В сб.: Тезисы докладов II Международного симпозиума в г. Вроцлаве (Польша), 1988, с.66-67.

24. Солдатов В.А., Дубков А.А. Оптимизация потерь мощности в электрических сетях с использованием фазорегуляторов. - В сб.: Тезисы докладов Всесоюзного совещания ОЭС и ЕЭС СССР. - Кишинев: Штиинца, 1989, с. 14-15.

25. Солдатов В.А., Зайцев Д.А. Моделирование, расчет и синтез параметров и режимов фазорегуляторов. - Там же, с.15-16.

26. Ханаев В.А., Лачков Г.Г. и др., Солдатов В.А. Системная эффективность электропередач повышенной натуральной мощности в ЕЭС в отдаленной перспективе. - В сб.: Управляемые электропередачи, вып. 2. - Кишинев - Штиинца, 1989, с.3-13.

27. Постолатий В.М., Солдатов В.А., Царик И.А. Расчет зон экологического влияния УСВЛ. - Там же, с. 58-64.
28. Постолатий В.М., Солдатов В.А., Царик И.А., Мелешко М.И. Технико-экономические показатели УСВЛ класса IIO+II50 кВ. - В сб.: Управляемые электропередачи, вып. 3. - Кишинев: Штиинца, 1990, с.3-15.
29. Солдатов В.А., Мелешко М.И. Параметры и режимы УСВЛ с поперечной компенсацией: - Там же, с.35-41.
30. Солдатов В.А., Зайцев Д.А. Уравнение фазорегулирующего трансформатора и синтез его схемы. - Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт, том. 36, - Москва, 1990, с.46-50.
31. Солдатов В.А., Постолатий В.М. Расчет и оптимизация параметров и режимов управляемых многопроводных линий. - Монография. - Кишинев: Штиинца, 1990, 239 с.
32. Солдатов В.А., Зайцев Д.А. Фазорегулирующий трансформатор с соединением обмоток в треугольник. - Изв. АН СССР № I. - Кишинев: Штиинца, 1991, с. 54-60.
33. Солдатов В.А., Киреева Л.А. Исследование эффективности применения двухцепных ЛЭП-10,35, IIO кВ с расщепленными фазами. - В сб.: Управляемые электропередачи, вып. 5. - Кишинев: Штиинца, 1991, с.3-9.
34. Солдатов В.А., Калинин Л.П., Дубков А.А., Зайцев Д.А. Фазорегулирующий автотрансформатор с соединением обмоток в звезду. - Там же, с.30-36.
35. Солдатов В.А., Дубков А.А. Применение продольных реакторов для снижения потерь мощности в электрических сетях. - Изв. АН РМ № 3. - Кишинев: Штиинца, 1991, с.33-37.
36. Солдатов В.А., Киреева Л.В. Параметры ЛЭП-35 кВ с расщепленными фазами. - В сб.: Управляемые электропередачи, вып. 4. - Кишинев: Штиинца, 1991, с. 17-28.
37. Солдатов В.А., Киреева Л.В. Параметры ЛЭП-IIO кВ с расщепленными фазами. - Там же, с.3-16.
38. Солдатов В.А., Киреева Л.В. Расчет параметров многопроводных линий произвольной конструкции на примере УСВЛ. - Изв. АН РМ № 5. - Кишинев: Штиинца, 1992, с.
39. Солдатов В.А., Киреева Л.В. Оптимизация конструкции фаз УСВЛ-330 кВ. - В сб.: Управляемые электропередачи, вып. 7. - Кишинев: Штиинца, 199 , с.14.
40. Постолатий В.М., Солдатов В.А., Киреева Л.В. Области применения УСВЛ вместо одноцепных ЛЭП более высокого класса напряжения.

41. Солдатов В.А., Зайцев Д.А. Расчет несимметричных режимов фазорегулирующих трансформаторов. - Известия АН МССР № 3. - Кишинев: Штиинца, 1988, с.37-43.

42. Солдатов В.А. Особенности расчета параметров схем замещения фазорегулирующих трансформаторов. В сб.: Управляемые электропередачи, вып. 7, - Кишинев: Штиинца, 1992, с.

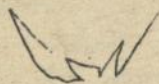
43. Солдатов В.А., Калинин Л.П., Пестушко А.В. Параметры фазорегулирующего трансформатора в режиме реактора. - Там же, с.

44. Калинин Л.П., Солдатов В.А. Фазорегулирующий трансформатор в соединении с конденсаторной батареей. - В кн.: Национальная энергетическая конференция. - Констанца (Румыния), 1992, с.45.

45. Чеботарь Ф.И., Солдатов В.А. Пути повышения пропускной способности линий электропередач с расщепленными фазами. - Энергетическое строительство. - Москва, 1991, № 11, с.33-36.

Личный вклад автора. В работах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежит: расчет и анализ параметров УСВЛ [1,2], разработка методик и алгоритмов расчета электрических полей и параметров УСВЛ [3,4,5,6,38], исследование свойств и параметров УСВЛ [8,9], исследование способа включения УСВЛ [10], участие в испытаниях и исследовании их результатов [11], разработка критериев и исследование параметров и режимов УСВЛ [13], разработка методики и исследование новых конструкций УСВЛ [17,31], разработка критериев и методик оптимизации параметров и режимов [31], получение и исследование эффективности новых конструкций УСВЛ [18,31,33,36,37,39], разработка методик расчета и синтеза, а также исследование параметров и режимов ФРТ [20,25,30,32,34,41,43], исследование свойств нового способа управляемой продольной компенсации [44], разработка методики оценки эффективности управляемых ветвей в электрических сетях [21,23,24,35].

Соискатель



Подписано к печати 29.03.1993 г. Формат 60x84/16  
Бумага офсетная Усл.-печ. лист 2,0. Уч.-изд. лист 2,0.  
Тираж 110. Заказ 375. Бесплатно

Полиграф. уч.-к Института электродинамики АН Украины,  
Ж2057, Киев-57, проспект Победы, 56.

465218

AB 27.135