

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
Б С С Р

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

АЛЕКСЕНКО Георгий Ефимович

К ИССЛЕДОВАНИЮ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ В КОМПЕНСИРОВАННЫХ  
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧАХ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ОТВЕТВЛЕНИЯМИ

Специальность 05.14.06 -  
Электрические системы и управление ими

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

М и н с к 1973

Работа выполнена на кафедре электрические системы и сети  
Белорусского политехнического института.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
Г.Е.ПОСПЕЛОВ.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Д.П.ЛЕДЯНИН,  
кандидат технических наук, старший  
научный сотрудник Е.П.ГОНЧАРИК.

Ведущее предприятие – Всесоюзный ГПИ и НИИ "Энергосеть-  
проект" (Волгоградское ОКП).

Автореферат разослан " 23 " февраля 1973 г.

Защита состоится " 6 " апреля 1973 г.  
в 9 час. 30 мин. на заседании Совета по присуждению ученых сте-  
пеней по энергетическим специальностям при Белорусском ордена  
Трудового Красного Знамени политехническом институте, Ленинский  
пр., 65, корпус 2, ауд. 317.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БПИ.

Просим Вас принять участие в обсуждении диссертации или  
прислать отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный  
печатью учреждения, по адресу: 220027, г. Минск, Ленинский  
проспект, 65, Белорусский политехнический институт, Ученому  
секретарю Совета.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА  
к.т.н., доцент

(Л.Л.ЧЕРВИНСКИЙ)

Поставленная XXIV съездом ВЭС задача дальнейшего повышения уровня электрификации, увеличения выработки электроэнергии и ее эффективного использования будет решаться путем научной организации труда, объединением энергосистем и широким внедрением средств автоматического управления системами.

Характерной особенностью научно-технической революции является интенсивное развитие электроэнергетики нашей страны, которое требует совершенствования прежних и разработку новых методов анализа электрических систем, решения эксплуатационных, проектных и научно-исследовательских задач на ЭВМ.

Исследование режимов электрических систем и сетей возможно провести аналитическими, графо-аналитическими и графическими методами. В последние годы в анализе широко применяются матричная алгебра, теория графов и теория вероятностей.

Объектом нашего исследования была электропередача, индуктивное сопротивление и емкостная проводимость которой компенсировались в той или иной степени соответственно емкостным сопротивлением и индуктивной проводимостью.

Цель исследования состояла в развитии методики анализа установившихся режимов компенсированных электропередач с промежуточными ответвлениями.

В качестве главной ставилась задача функционального определения взаимосвязи электрических величин в начальной, промежуточной и конечной точках линии и ее параметров.

Вывод и последующее преобразование уравнений взаимосвязи выполнены на основе алгебры матриц. При этом напряжение, ток, мощность, параметры линии и ее разветвленных участков представлялись комплексными числами.

Полученная автором группа уравнений практически была использована для решения следующих задач:

- поддержание заданных уровней узловых напряжений путем изменения мощности в промежуточной точке при двух схемах замещения нагрузки - последовательной и параллельной;
- определение падений напряжений на сосредоточенном емкостном сопротивлении компенсирующей установки и на участках линии;
- определение токов в промежуточных ответвлениях.

Путем преобразования уравнений, т.е. посредством перехода к новым структурным формам, в них введены независимые переменные:

сопротивление нагрузки на конце линии, проводимость промежуточных ответвлений, емкостное сопротивление и индуктивная проводимость компенсирующих устройств.

Анализ схем электропередачи и их расчет выполнены при следующих условиях: при неизменной частоте генератора; при постоянстве параметров участков линии в схемах замещения; при наличии в линии компенсирующих устройств, задаваемых сосредоточенными сопротивлениями или проводимостями; при поочередном изменении параметров нагрузки по концам линии и промежуточных ответвлений; при конечном числе узлов в линии; при одном фиксированном узлом напряжении.

Выведенные автором уравнения могут быть применены во всех практических задачах, когда за расчетную модель цепей автоматики, телемеханики, электросвязи и линии электропередач принимается четырехполюсная схема, при электрическом моделировании биосистем.

Диссертация состоит из введения с кратким изложением цели и направленности исследования, четырех глав с описанием достигнутых результатов, приложения и перечня использованной литературы. Теоретические положения работы проведены экспериментально на физической модели электропередачи, рассчитанной и построенной автором. Более подробная характеристика рассмотренных вопросов дана ниже.

В настоящее время утвердилось мнение о том, что наиболее полное количественное описание состояния физической системы может быть достигнуто матричными или топологическими методами.

Современные электрические системы – это сложные многоузловые и многоконтурные цепи с вращающимися машинами и статическими преобразователями.

На основании правил матричной алгебры для электрической системы с известными параметрами можно составить первое уравнение состояния, связывающее задающие токи в узлах и узловые напряжения

$$M_i Y_B \cdot M_i^t \dot{\varphi} = M_i Y_B E_B, \quad (I)$$

и второе уравнение состояний, взаимосвязывающее токи и электродвижущие силы в контурах

$$M_u Z_\theta - M_u^t J_k = M_u \dot{E}_\theta \quad , \quad (2)$$

где  $M_i (M_i^t)$ ,  $M_u (M_u^t)$  - матрицы соединений по узлам и контурам и соответственно им транспонированные;

$Y_\theta, Z_\theta$  - диагональные матрицы проводимостей и сопротивлений ветвей;

$\varphi, J_k, \dot{E}_\theta$  - матрицы-столбцы соответственно узловых потенциалов, контурных токов и действующих в ветвях электродвижущих сил.

На данных двух уравнениях основывается современный анализ электрических систем. Выбор типа уравнений, способов их решения определяется набором параметров, искомым и исходным величин.

В работах В.А.Веникова, Н.А.Мельникова, Г.Е.Поспелова, Х.Ф.Фазылова, Н.Н.Щедрина, В.К.Щербакова и других изложены методы расчета электрических сетей и систем, дана сравнительная их оценка, показаны условия сходимости итерационных процессов.

Из всего многообразия возможных задач анализа линии электропередачи автором рассматривались следующие:

а) определение узловых напряжений при известном одном и заданных мощностях потребителей и источников, кроме одного;  
 б) регулирование напряжения перераспределением потоков мощностей;

в) определение фаз узловых напряжений, когда потребители представлялись известными статическими характеристиками, т.е. зависимостями мощностей от модулей напряжения.

Уравнения (1), (2) содержат соответственно неизвестные узловые напряжения и контурные токи. Они могут быть преобразованы к другим формам, если за искомые будут приняты узловые токи и контурные э.д.с.

Эта взаиморазрешаемость относительно величин, входящих в соответствующие уравнение, приводит к четырем видам представления параметров сети: матрице узловых проводимостей  $Y$ , матрице узловых сопротивлений  $Z_y$ , матрице контурных сопротивлений  $Z$  и матрице контурных проводимостей  $Y_k$ .



Известно, что минимальное число сторон замкнутой фигуры, образуемой отрезками прямых, равно трем. Из этого возможно сделать единственное предположение о том, что если уравнение связи электрических величин в трех точках линии электропередачи формулируется, т.е. логически выводится, то три члена в его структуре необходимы и достаточны в отражении существа этой взаимосвязи. Все нами принятые условные обозначения величин и параметров указаны на рис. 2.

В первой главе изложены выводы нескольких уравнений состояния линии электропередачи в установившемся режиме, показана их взаимопреобразуемость в зависимости от исходных и искомых величин и указаны условия построения по уравнениям векторно-круговых диаграмм.

По структуре уравнений, независимым переменным, системе отсчета промежуточных точек их можно систематизировать в следующие группы: линейные, дробно-линейные, нелинейные, основные и производные; уравнения эквивалентных источников напряжения и тока; уравнения состояния промежуточных точек по данным электрическим величинам и нагрузкам начала или конца линии.

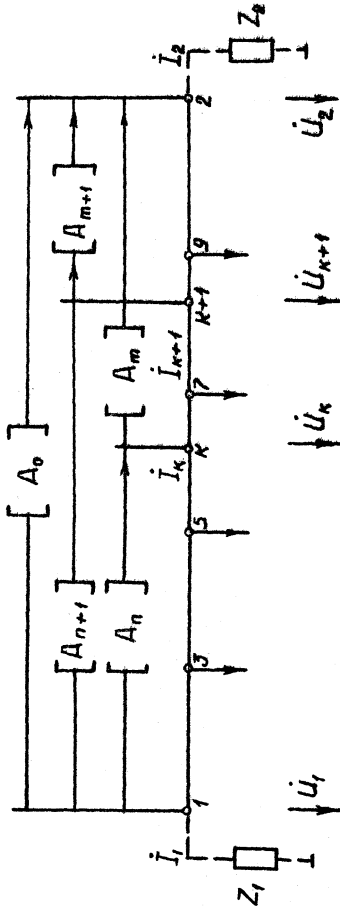
Уравнения эквивалентных источников напряжения и тока:

$$\dot{U}_K = \frac{B_m \dot{U}_1 + B_n \dot{U}_2}{B_0} = \frac{A_m \dot{I}_1 - A_n \dot{I}_2}{C_0}; \quad (4a, 0)$$

$$\dot{I}_K = \frac{C_m \dot{I}_1 + C_n \dot{I}_2}{C_0} = \frac{A_m \dot{U}_1 - A_n \dot{U}_2}{B_0}. \quad (5a, 0)$$

Как закономерно образование уравнений по величинам  $\dot{U}_1, \dot{I}_1, \dot{U}_2, \dot{I}_2$ , вводимым для описания состояния четырехполюсника, так закономерны формы (4) и (5). Они отражают электромагнитное состояние точек формирования сигнала, его развития и приема. В общей задаче установления взаимосвязи электрических величин в трех точках линии электропередачи уравнения (4) и (5) - основные, а их доказательство - главный результат.

Напряжение  $\dot{U}_K$  и ток  $\dot{I}_K$  определены через соответствующие одноразмерные величины  $(\dot{U}_1, \dot{U}_2), (\dot{I}_1, \dot{I}_2)$ , а в преобразованных формах - через составляющие от воздействий генераторов, характеризуемых величинами, связанными с искомым законом Ома.



$$\begin{aligned}
 \dot{I}_k &= A_k e^{j\alpha_k}; & \dot{B}_k &= B_k e^{j\beta_k}; & \dot{C}_k &= C_k e^{j\delta_k}; & \dot{D}_k &= D_k e^{j\theta_k}. \\
 \dot{I}_{k+1} &= A_{k+1} e^{j\alpha_{k+1}}; & \dot{B}_{k+1} &= B_{k+1} e^{j\beta_{k+1}}; & \dot{C}_{k+1} &= C_{k+1} e^{j\delta_{k+1}}; & \dot{D}_{k+1} &= D_{k+1} e^{j\theta_{k+1}}. \\
 \dot{U}_1 &= U_1 e^{j\psi_1}; & \dot{U}_k &= U_k e^{j\psi_k}; & \dot{U}_{k+1} &= U_{k+1} e^{j\psi_{k+1}}; & \dot{U}_2 &= U_2 e^{j\psi_2}. \\
 \dot{I}_1 &= I_1 e^{j\varphi_1}; & \dot{I}_k &= I_k e^{j\varphi_k}; & \dot{I}_{k+1} &= I_{k+1} e^{j\varphi_{k+1}}; & \dot{I}_2 &= I_2 e^{j\varphi_2}.
 \end{aligned}$$

Рис. 2. Условные обозначения электрических величин и коэффициентов схемы замещения.

При определенных условиях равенства (4) и (5) представляют функции вида  $\dot{F} = \dot{F}_1(\text{const}) + \dot{F}_2(\text{var})$ , по которым можно построить векторно-круговую диаграмму, указав последними область изменения  $\dot{U}_\kappa$  или  $\dot{I}_\kappa$  (рис. 3).

Формулы (4) и (5) применимы и к анализу участка линии, ограниченного точками  $\kappa-1$ ,  $\kappa+2$ , и на котором выделена промежуточная точка  $\kappa$ . В этом варианте (4) и (5) будут записаны через величины  $\dot{U}_{\kappa+1}(\dot{I}_{\kappa-1})$ ,  $\dot{U}_{\kappa+1}(\dot{I}_{\kappa+1})$ .

Каждое из исходных равенств (4) и (5) или записанных для рассматриваемого участка разрешимо относительно третьей величины из наборов  $(\dot{U}_{\kappa-1}, \dot{U}_\kappa, \dot{U}_{\kappa+1})$  или  $(\dot{I}_{\kappa-1}, \dot{I}_\kappa, \dot{I}_{\kappa+1})$ .

Уравнения (4) и (5) можно сгруппировать по другому принципу. Путем выделения общих величин придем к следующей матричной записи:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_\kappa \\ \dot{I}_\kappa \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{B_m}{B_0} & \frac{B_n}{B_0} \\ \frac{A_m}{B_0} & \frac{A_n}{B_0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A_m}{C_0} & \frac{A_n}{C_0} \\ \frac{C_m}{C_0} & \frac{C_n}{C_0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}, \quad (6a, \delta)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_\kappa \\ \dot{I}_\kappa \end{bmatrix} = [K_u] \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} = [K_i] \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}. \quad (7a, \delta)$$

Возможна и обратная задача - определение набора  $(\dot{U}_1, \dot{U}_2)$ ,  $(\dot{I}_1, \dot{I}_2)$  по данным сигналам в промежуточной точке:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} = [K_u]^{-1} \begin{bmatrix} \dot{U}_\kappa \\ \dot{I}_\kappa \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = [K_i]^{-1} \begin{bmatrix} \dot{U}_\kappa \\ \dot{I}_\kappa \end{bmatrix}. \quad (8a, \delta)$$

На основе уравнений (4) и (5) образованием разностей  $\Delta \dot{U} = \dot{U}_\kappa - \dot{U}_{\kappa+1}$ ,  $\Delta \dot{I} = \dot{I}_\kappa - \dot{I}_{\kappa+1}$  значений напряжений и токов в двух точках можно найти выражение падений напряжения на участках

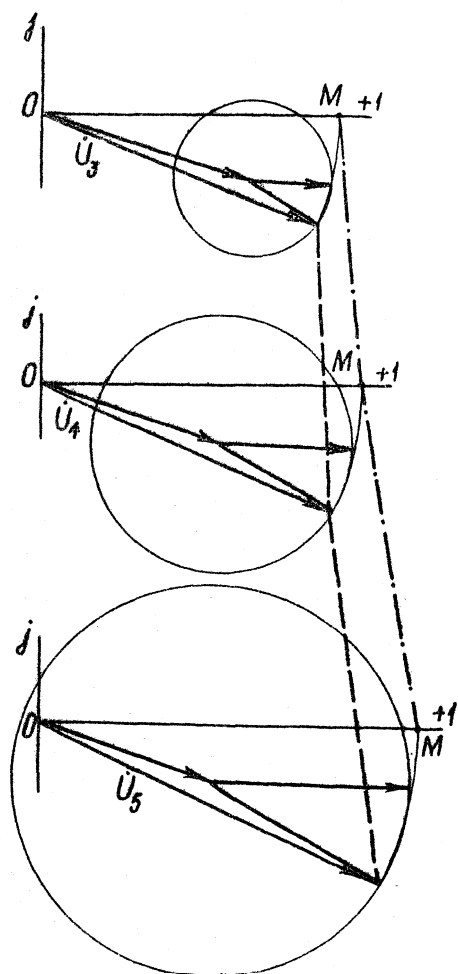


Рис. 3. Годограф вектора напряжения в промежуточных точках линии.

линии и тока - в промежуточных ответвлениях. Так, падение напряжения на сопротивлении -  $jX_c$  компенсирующей установки, размещенной между участками линии, заданными  $[A_1]$ ,  $[A_2]$ ,

$$\Delta \dot{U} = -jX_c \frac{A_2 \dot{U}_1 - A_1 \dot{U}_2}{A_1 B_2 + B_1 A_2 - jX_c A_1 A_2} . \quad (9)$$

Разности  $\Delta \dot{U}$ ,  $\Delta \dot{I}$  составят вторую группу из четырех уравнений, по которым можно вести расчет аналитическим и графическим методом - построением векторно-круговой диаграммы.

Из формул (4) и (5) возможно вывести еще группу уравнений, позволяющих рассчитать величины сосредоточенных продольного сопротивления  $Z$  ( $\dot{U}_1$ ,  $\dot{U}_k$ ,  $\dot{U}_2$ ) и поперечной проводимости  $\dot{U}_1$ ,  $\dot{U}_k$ ,  $\dot{U}_2$  участка линии, при которых напряжения  $\dot{U}_1$ ,  $\dot{U}_k$ ,  $\dot{U}_2$  принимают избранные или допустимые по Правилам технической эксплуатации значения.

Зависимости напряжения и тока в промежуточной точке от нагрузки по концам линии электропередачи:

$$\dot{U}_k = \frac{A_m Z_2 + B_m}{A_o Z_2 + B_o} \dot{U}_1 = \frac{B_n + Z_1 D_n}{B_o + Z_1 D_o} \dot{U}_2 , \quad (IOa, б)$$

$$\dot{I}_k = \frac{C_m Z_2 + D_m}{A_o Z_2 + B_o} \dot{U}_1 = \frac{A_n + Z_1 C_n}{B_o + Z_1 D_o} \dot{U}_2 . \quad (IIa, б)$$

Если переменными величинами в равенствах (IO) и (II) являются только модули  $Z_1$ ,  $Z_2$ , то все значения  $\dot{U}_k$ ,  $\dot{I}_k$  можно найти построением векторно-круговой диаграммы.

Из представления

$$[A_n][A_m] = [A_o] \quad (12)$$

следует условие взаимозаменяемости постоянных участков линии через ее обобщенные:

$$[A_n] = [A_o][A_m]^{-1}, \quad [A_m] = [A_n]^{-1}[A_o] . \quad (I3a, б)$$

На основании (I3а,б) можно преобразовать исходные (I0) и (II) к видам:

$$\dot{U}_k = \left( A_n - B_n \frac{C_0 Z_2 + D_0}{A_0 Z_2 + B_0} \right) \dot{U}_1 = \left( A_m - B_m \frac{A_0 + Z_1 C_0}{B_0 + Z_1 D_0} \right) \dot{U}_2 ; \quad (I4а,б)$$

$$\dot{I}_k = \left( A_n \frac{C_0 Z_2 + D_0}{A_0 Z_2 + B_0} - C_n \right) \dot{U}_1 = \left( A_m \frac{A_0 + Z_1 C_0}{B_0 + Z_1 D_0} - C_m \right) \dot{U}_2 . \quad (I5а,б)$$

Представление электрических величин комплексными числами содержит два возможных направления в анализе цепей: расчет модулей по заданному набору фаз и определение фаз по известным модулям.

Ток в начале линии можно выразить следующим образом:

$$\dot{I}_1(\dot{U}_1, \dot{U}_k) = \frac{D_k \dot{U}_1 - \dot{U}_k}{B_k} = \dot{I}_1(\dot{U}_1, \dot{U}_{k+1}) = \frac{D_{k+1} \dot{U}_1 - \dot{U}_{k+1}}{B_{k+1}} \quad (I6а,б)$$

Из данного условия непрерывности тока можно определить модули  $U_k$ ,  $U_{k+1}$ , приняв  $\dot{U}_1 = U_1$ .

После выделения в равенстве (I6) действительных и мнимых частей и группировки членов с искомыми  $U_k$ ,  $U_{k+1}$  получим

$$U_k = \frac{B_k D_{k+1} \sin(\delta_{k+1} - \psi_{k+1}) - B_{k+1} D_k \sin(\beta_{k+1} - \beta_k + \delta_k - \psi_{k+1})}{B_{k+1} \sin(\beta_k - \beta_{k+1} + \psi_{k+1} - \psi_k)} U_1 ; \quad (I7)$$

$$U_{k+1} = \frac{B_k D_{k+1} \sin(\beta_k - \beta_{k+1} + \delta_{k+1} - \psi_k) - B_{k+1} D_k \sin(\delta_k - \psi_k)}{B_k \sin(\beta_k - \beta_{k+1} + \psi_{k+1} - \psi_k)} U_1 \quad (I8)$$

Приняв  $U_1 = \text{const}$  и наложив ограничения  $\varphi = (0 \div 2\pi)$ , можно по формулам (I7) и (I8) выполнить расчет модулей напряжений в промежуточных точках линии.

Исходя из условия  $\dot{I}_2(U_2, U_k) = \dot{I}_2(\dot{U}_2, \dot{U}_{k+1})$ , можно при  $U_2 = U_2$  получить два уравнения, аналогичных равенствам (I7) и (I8), при отсчете координаты от условного конца линии.

Последней рассматриваемой точкой по равенству (18) будет конец линии, а определяемой величиной -  $U_2$ .

При  $U_1 = U_{ном} = const$  в формулах (17) и (18) остаются только два варьируемых числа:  $\varphi_k$  и  $\varphi_{k+1} = \varphi_2$ . Расчет будет найдено сочетание фаз  $\varphi_k$  и  $\varphi_2$ , при которых

$|U_k| = |U_2| = U_{ном}$ . Данные расчета необходимы для определения запаса статической устойчивости  $\frac{1}{\sin \delta_{12}} - 1$  ( $\dot{U}_1 = U_1$ ).

Согласно выражению (4) при данном направлении передачи и значении энергии равенство  $|U_1| = |U_k| = |U_2|$  выполнимо только один раз.

Наиболее быстро перебор вариантов  $\varphi_k, \varphi_{k+1}$  осуществим на ЭВМ.

Решение для схемы с источником тока  $\dot{I}_1$  может быть найдено из условия

$$\dot{U}_1 = \frac{A_k \dot{I}_1 - \dot{I}_k}{C_k} = \frac{A_{k+1} \dot{I}_1 - \dot{I}_{k+1}}{C_{k+1}} \quad (19)$$

Положив  $\dot{I}_1 = I_1$ , после выделения действительных и мнимых частей получим:

$$I_k = \left( \frac{A_{k+1} C_k \sin(\alpha_{k+1} - \varphi_{k+1}) - A_k C_{k+1} \sin(\gamma_{k+1} - \gamma_k + \alpha_k - \varphi_{k+1})}{C_{k+1} \sin(\gamma_k - \gamma_{k+1} + \varphi_{k+1} - \varphi_k)} \right) I_1 \quad (20)$$

$$I_{k+1} = \left( \frac{A_{k+1} C_k \sin(\gamma_k - \gamma_{k+1} + \alpha_{k+1} - \varphi_k) - A_k C_{k+1} \sin(\alpha_k - \varphi_k)}{C_k \sin(\gamma_k - \gamma_{k+1} + \varphi_{k+1} - \varphi_k)} \right) I_1 \quad (21)$$

Из равенства  $\dot{U}_2(I_2, \dot{I}_k) = \dot{U}_2(I_2, \dot{I}_{k+1})$  можно вывести выражение для модулей  $I_k, I_{k+1}$  при отсчете координат рассматриваемых точек от конца линии.

Данные расчета по равенствам (17) и (18) необходимы и для определения потока мощности в промежуточной точке:

$$\dot{S}_k = U_k^2 \cdot Y_{BX}(k) = \frac{A_m \dot{U}_1 - A_n \dot{U}_2}{B_m \dot{U}_1 + B_n \dot{U}_2} U_k^2 \quad (22a)$$

Если известны результаты по (20) и (21), мощность  $\dot{S}_k$  целесообразно вычислять по соотношению

$$\dot{S}_k = Z_{\delta k}(\kappa) I_k^2 = \frac{A_m \dot{I}_1 - D_n \dot{I}_2}{C_m \dot{I}_1 + C_n \dot{I}_2} \dot{I}_k^2 \quad (226)$$

Произвольный выбор фаз  $\psi_k, \psi_{k+1}$  напряжений, вводимых в равенства (17) и (18), ограниченно возможен.

Любая первоначальная комбинация модуля и двух фаз предопределяет вариант распределения напряжения и тока вдоль линии.

Если принято сочетание  $(U_1, \psi_k, \psi_2)$  и затем по формулам (17) и (18) вычислены  $U_k, U_2$ , то комплексные напряжения в других промежуточных точках линии электропередачи далее необходимо определять по формуле (4) через напряжения  $U_1, U_2$  или  $U_k, U_2$  и соответствующие постоянные линии или участка.

Если избрать сочетание  $(U_1, \psi_k, \psi_{k+1})$ , то после определения по (17, 18)  $U_k, U_{k+1}$  расчет напряжений  $U_{k+2}, U_{k+3}$  и т.д., включая  $U_2$ , следует вести по формуле (4), выдерживая цпки "от двух предыдущих точек к третьей последующей".

Произведения  $\dot{S} = \dot{U} \dot{I}$ , образуемые по приведенным здесь уравнениям для напряжения  $\dot{U}_k$  и тока  $\dot{I}_k$ , составят группу уравнений, дополняющую аппарат исследования линии электропередачи. Так, при исходных формулах (4а, 5б) для мощности в промежуточной точке линии получим

$$\dot{S}_k = \frac{(B_m \dot{U}_1 + B_n \dot{U}_2)(\hat{A}_m \hat{U}_1 - \hat{A}_n \hat{U}_2)}{|B_o|^2} \quad (23)$$

Потери мощности  $\Delta \dot{S}$  на участке линии равны разности мощностей в начале и конце участка.

Согласно (23) эти потери можно представить следующей суммой:

$$\Delta \dot{S} = \Delta \dot{S}(U_1^2) + \Delta \dot{S}(\dot{U}_1, \dot{U}_2) + \Delta \dot{S}(\hat{U}_1, \hat{U}_2) + \Delta \dot{S}(U_2^2) \quad (24)$$

В скобках выделены варьируемые величины и независимые переменные, по которым сгруппированы составляющие суммы.

В данном выражении потерь величины  $U_1, U_2$  - показатели режима реальной линии, свободно избираемые в проектных исследованиях.

Неограниченность выбора  $U_1, U_2$  в расчетах объясняется тем, что в данных определениях мощности  $\dot{S}_\kappa$  и потери мощности  $\Delta \dot{S}$  - величины переменные, одномерные. Поскольку выбор значений  $U_1, U_2$  предопределяет соотношение модулей  $|U_2|/|U_1|$  (перепад напряжений), то эти же уравнения, отражающие зависимость  $\dot{S}_\kappa, \Delta \dot{S}$  от  $U_1, U_2$ , могут быть прочтены как зависимости мощности  $\dot{S}_\kappa$  и потерь  $\Delta \dot{S}$  от перепада напряжений.

Формула расчета потерь мощности на сосредоточенном сопротивлении  $Z$ , включенном между участками линии, заданными  $[A_1], [A_2]$ , имеет вид:

$$\Delta \dot{S}(Z) = \frac{D_2^2 U_1^2 - \hat{A}_1 \hat{D}_2 U_1 U_2 - \hat{A}_1 \hat{D}_2 U_1 U_2 + A_1^2 U_2^2}{B^2 + \hat{B} \hat{Z} \hat{A}_1 \hat{D}_2 + \hat{B} \hat{Z} \hat{A}_1 \hat{D}_2 + Z^2 A_1^2 D_2^2} Z, \quad (25)$$

где  $\hat{B} = B_0$  при  $Z = 0$ .

Эта формула включает и решение для  $\Delta \dot{S}_{\kappa y} = \Delta \dot{S}(Z)$  при  $Z = -jXc$ .

При избранных значениях  $U_1, U_2$  и вычисленных мощностях в начале  $\dot{S}_1$  и конце  $\dot{S}_2$  расчет мощности  $\dot{S}_\kappa$  в промежуточной точке возможно выполнить по произведению

$$\dot{S}_\kappa = U_\kappa \hat{I}_\kappa = \frac{(B_m U_1 + B_n U_2)(\hat{C}_m \hat{I}_1 + \hat{C}_n \hat{I}_2)}{B_0 \hat{C}_0}. \quad (26)$$

В этом случае потери мощности на участке будут иметь следующие слагаемые:

$$\Delta \dot{S} = \Delta \dot{S}(\dot{S}_1) + \Delta \dot{S}\left(\frac{U_2}{U_1} \dot{S}_1\right) + \Delta \dot{S}\left(\frac{U_1}{U_2} \dot{S}_2\right) + \Delta \dot{S}(\dot{S}_2). \quad (27)$$

Как в исходном соотношении (26), так и образованном (27) содержатся величины  $U_1, U_2, S_1, S_2$  различных размерностей, что не допускает одновременного произвольного выбора этих четырех величин.

Коэффициенты пропорциональности, содержащиеся во всех предлагаемых автором уравнениях, целесообразно вычислять по топологическим правилам. Эти коэффициенты соответствуют элементам матриц схем замещения линии в целом или ее участков. При данных

условиях наиболее эффективным средством будет правило, позволяющее определить требуемые коэффициенты цепной схемы без последовательного перемножения матриц.

Во второй главе даны решения некоторых задач, связанных с компенсацией параметров линии, наличием в линии отборов, заданных статическими характеристиками, и изложены разработанные автором два метода графо-аналитического исследования распределения напряжения в линии.

Рассмотрены следующие вопросы:

- анализ зависимости обобщенных коэффициентов линии от параметров компенсирующего устройства при его фиксированном местоположении;

- определение величины емкостного сопротивления  $\chi_c$ , исключающей самовозбуждение связанного с линией синхронного генератора;

- необходимость и достаточность задания статической характеристики при расчете напряжений в линии рабочей точкой - входной проводимостью ответвления;

- выяснение условий построения круговой диаграммы мощности промежуточного ответвления;

- возможность отражения круговой диаграммой зависимостей полных мощностей в начале и конце линии от емкостного сопротивления или индуктивной проводимости компенсирующих устройств.

Включение в линию сосредоточенных емкостного сопротивления  $-j\chi_c$  или индуктивной проводимости  $-j\beta_L$  приводит к изменению ее первоначальных параметров. Это влияет на технико-экономические показатели линии. Оценка этого влияния может быть произведена в том случае, если прежде всего известны данные:

$$(A_o, B_o, C_o, D_o) = f_1(\chi_c) \quad \text{и} \quad (A_o, B_o, C_o, D_o) = f_2(\beta_L).$$

Особый интерес представляет задача определения экстремальных значений этих зависимых коэффициентов. Графики для  $A_o, B_o, C_o, D_o$ , построенные при переменных абсолютных значениях  $\chi_c, \beta_L$  и различных местоположениях компенсирующих установок на линии, можно найти в соответствующей литературе\*/.

\*/ Г.Е.Поспелов. Элементы технико-экономических расчетов систем электропередач. "Высшая школа", 1967.

Нак. показаны два возможных варианта определения минимальных значений  $B_{0\min}$ ,  $C_{0\min}$  при фиксированных местоположениях компенсирующих устройств и изменяющихся параметрах  $X_c$  и  $\beta_c$ : графическое и аналитическое.

Так, при исходном определении

$$B_0 = A_1 B_2 + B_2 D_2 - j X_c A_1 D_2 = B - j X_c A_1 D_2 \quad (28)$$

значение  $X_{c0}$ , удовлетворяющее условию  $|B_0| = |B_0|_{\min}$ ,

$$X_{c0} = j \frac{A_1 D_2 \hat{B} - A_1 \hat{D}_2 B}{2 |A_1 D_2|^2} \quad (29)$$

Увеличение  $X_c$  не безгранично. При некотором значении входного сопротивления  $Z_{\beta x} = Z_{\beta x} - j X_{\beta x}$  возможно самовозбуждение связанного с линией синхронного генератора. Зависимость  $Z_{\beta x}(-j X_c)$  представляет собой дробно-линейную функцию. По ней можно построить векторно-круговую диаграмму. Введение критерия существования самовозбуждения означает наложение ограничений в изменениях  $X_c$ . Например, зона синхронного самовозбуждения определяется соотношениями между параметрами генератора  $X_q$ ,  $X_d$  и внешней цепи  $Z_{\beta x}$ ,  $X_{\beta x}$ :

$$X_q < X_{\beta x} < X_d; \quad Z_{\beta x} = 0,5(X_d - X_q) \quad (30)$$

Эти граничные значения  $Z_{\beta x}$ ,  $X_{\beta x}$  и выделяется на диаграмме  $Z_{\beta x}(-j X_c)$  (рис. 4).

При переменном емкостном сопротивлении компенсирующей установки зависимости  $\dot{S}_1(-j X_c)$ ,  $\dot{S}_2(-j X_c)$  мощностей отправного и приемного концов линии электропередачи есть также дробно-линейные функции.

Исследование зависимостей  $Z_{\beta x}(-j X_c)$ ,  $\dot{S}_1(-j X_c)$ ,  $\dot{S}_2(-j X_c)$  методом векторно-круговых диаграмм наиболее приемлемо в проектных разработках.

Далее изложен метод графического определения напряжений в точках компенсированной линии без потерь с промежуточными отборами мощности, заданными статическими характеристиками.

Геометрические построения, на которых основан метод, полностью применимы и к анализу линии с потерями.

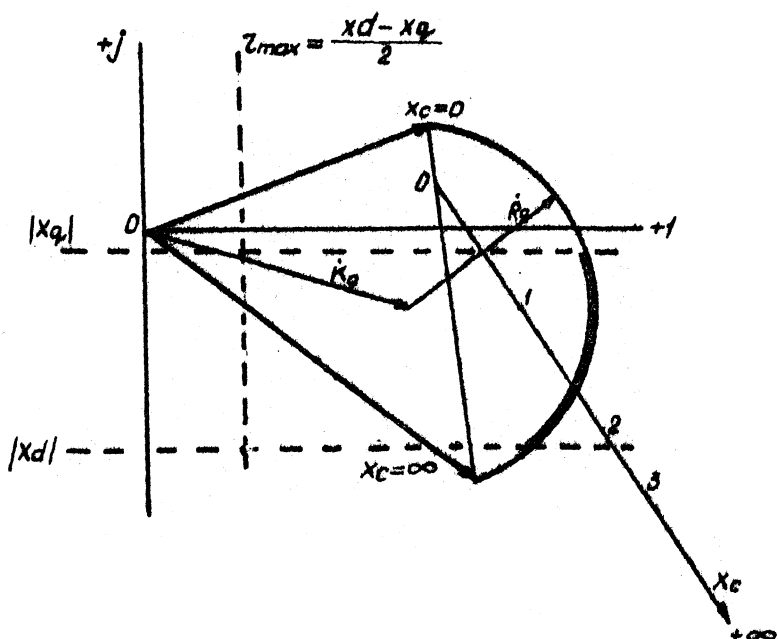


Рис. 4. Круговая диаграмма входного сопротивления линии с ограничением по самовозбуждению генератора.

Статическим характеристикам автор придавал содержание информации о режиме промежуточного пункта.

Аналитический расчет может быть выполнен по формуле, выводимой из равенства (4).

Коэффициент  $B_0$  четырехполюсника, замещающего участок линии с промежуточным пунктом, зависит от входной проводимости пункта (потребителя или генератора):

$$B_0 = A, B_2 + B, D_2 + YB, B_2 = B + \frac{\dot{S}_0}{U_K^2} B_n B_m. \quad (31)$$

В частном случае, при  $Y=0$  или при  $\dot{S}_0=0$ ,  $B_0 = B$ . Подстановка равенства (31) в формулу (4) приводит к результату

$$\dot{S}_0 = \frac{(B_m \dot{U}_{k-1} + B_n \dot{U}_{k+1}) \dot{U}_k - B U_k^2}{B_n B_m} \quad (32)$$

После задания характеристики пункта  $P_0 = P_0(U)$ ,  $Q_0 = Q_0(U)$  в уравнении (32) останутся только две варьируемые величины  $\dot{U}_{k-1}$ ,  $\dot{U}_{k+2}$ .

Расчет по этому уравнению ведется от условного начала линии к ее концу или наоборот. При этом выдерживается правило: напряжение в последующей точке определяется по напряжениям в двух предыдущих точках.

Поясним подробнее (см. таблицу). Обозначим промежуточные точки между началом и концом линии электропередачи последовательность чисел: 3, 4, 5, 6, 7 ... (рис. 2). Пусть нечетные 3, 5, 7 ... обозначают узлы. Задав  $\dot{U}_1 = U_{ном} e^{j\psi_1}$  и набор  $(U_3, P_3, Q_3)$  по характеристике пункта 3, найдем по формуле (32) напряжение в последующей точке  $\dot{U}_4$ . Точка 4 не узловая ( $S_4 = 0$ ). Обращаемся к равенству (4а). Определим по данным  $\dot{U}_3, \dot{U}_4$  напряжение  $\dot{U}_5$ . Для расчета  $\dot{U}_6$  вводим в уравнение (32) напряжения  $\dot{U}_4, \dot{U}_5, U_5^2$  и соответствующие модуль  $U_5$  мощности  $P_5, Q_5$ . И далее в таком же порядке.

Формула (32) выражает условие поддержания напряжения в трех точках линии электропередачи путем изменения мощности  $\dot{S}_0$ , потребляемой или развиваемой промежуточным пунктом.

Для линии с одним пунктом порядок расчета состоит в следующем: избираются желаемые модули  $U_1, U_k, U_2$ , принимается  $\psi_1 = 0$  и при переменных  $\psi_k, \psi_2$  определяются соответствующие значения  $\dot{S}_0$ .

Если в линии несколько пунктов, то в расчете по формуле (32) необходимо соблюдение цикла "от двух точек к третьей". Ниже это разъяснено на примере линии с четырьмя узлами, обозначенными цифрами 3, 5, 7, 9 (рис. 2).

Таблица

Показатели режима (исходные величины)	$\dot{U}_1, \dot{U}_3, \dot{U}_5$	$\dot{U}_3, \dot{U}_5, \dot{U}_7$	$\dot{U}_5, \dot{U}_7, \dot{U}_9$	$\dot{U}_7, \dot{U}_9, \dot{U}_2$
Условие реализации (искомые величины)	$\dot{S}_3$	$\dot{S}_5$	$\dot{S}_7$	$\dot{S}_9$

Практически эта методика может применяться и в задаче с эксплуатируемой линией и особенно удобна в проектных разработках.

Далее показана еще одна возможность расчета напряжения в точках линии электропередачи - путем решения треугольников векторов. При исследовании распределения напряжения этим путем заданными принимаются модули. При этом треугольник векторов должен удовлетворять построению по формуле (4). Это достигается соблюдением цикла "от двух точек к третьей", т.е. два вычисленных напряжения вводятся в определение третьего.

Приводятся примеры расчета напряжения в линии без потерь, не имеющей отбора, и в линии с потерями - с отборами и без них.

Третья глава содержит блок-схемы, описание программ расчета на ЭВМ "Минск-22" и инструкции оператору.

В работе приводятся две программы:

1. Расчет модулей напряжений и токов по аргументам их комплексных представлений.

2. Расчет напряжения и тока в промежуточных точках линии при переменных нагрузках на ее концах.

Первая программа составлена по уравнениям (17) и (18) из группы (17), (18), (20), (21), вторая - по равенству (10) из группы (10), (11).

Программа расчета по формуле (32) докладывалась на конференциях / 7, II/.

В программах выдержаны следующие принципы ведения расчета: поочередное изменение варьируемых величин; введение в память ЭВМ результатов, удовлетворяющих наложенным ограничениям; использование подпрограмм из Библиотеки стандартных программ.

В настоящее время эффективность алгоритма принято оценивать по двум показателям: по суммарной затрате машинного времени и рациональности использования оперативной памяти ЭВМ.

По первому алгоритму расход машинного времени при расчете модулей напряжений в двух точках при известных фазах напряжений в этих точках и модуле напряжения в принятом начале линии составляет порядка 2 мин., или 1 мин. на одно искомое.

Программа занимает в оперативной памяти ячейки 40-2120 и может быть выполнена на ЭВМ "Минск-22" и "Минск-32" в режиме "совместимости".

В работе приведена формула определения машинного времени по

второй программе, даны разъяснения по составляющим элементам формулы.

В четвертой главе дан расчет элементов статической модели линии электропередачи. За исходные данные приняты параметры прямой последовательности реальной электропередачи Волжская ГЭС имени В.И.Ленина - Москва. Рабочая частота модели  $f = 495$  гц. Модель представляла собой цепь по схеме из двадцати каскадно соединенных симметричных четырехполюсников. Блочное исполнение модели позволило замечать линии длиной от 100 до 2000 км.

Проверка на модели подтвердила характер распределения вдоль линии напряжения, тока, мощности, выявленный путем расчета по предлагаемым автором уравнениям.

В приложении показано условие определения центра и радиуса окружности, представляемой дробно-линейной функцией, к которой может быть приведено большинство из этих уравнений.

Результаты исследований могут быть кратко сформулированы следующим образом:

1. Получена основная группа уравнений (4, 5) взаимосвязи напряжения (тока) в промежуточной точке и напряжений (токов) в начале и конце линии. В едином процессе производства, передачи и потребления электроэнергии электромагнитное состояние этих трех точек линии взаимозависимо. Эта связь отражена уравнениями эквивалентных источников напряжения и тока. Уравнения просты по структуре. В них искомые величины выражены через другие, совпадающие с ними по размерности. Слагаемые напряжений и токов в промежуточных точках выступают как независимые аргументы, свободные в выборе при анализе и при построении векторно-круговых диаграмм.

Несложность вычисления и возможность применять эти уравнения к любым линиям дает основание считать, что данные типы уравнений в качестве расчетных имеют значительное преимущество перед употребляемыми в настоящее время.

2. Показана возможность исследования распределения напряжения на основе векторных диаграмм, изображающих напряжения в начальной, промежуточной и конечной точках линии.

Характер распределения напряжения вдоль линии может быть описан обобщенным геометрическим местом - кривой (годографом вектора), соединяющей соответствующие точки нескольких векторно-

круговых диаграмм (рис. 3). Наглядность и возможность сосредоточить информацию в едином построении делает этот прием особенно ценным при поиске варианта равномерного распределения напряжения.

3. Преобразованием основных уравнений установлены соотношения, выражающие токи в промежуточных ответвлениях и падение напряжения на продольных элементах линии. Падение и потерю напряжения на участке линии можно определить по годографу вектора напряжения в промежуточных точках. Падение напряжения, кроме этого, можно вычислить по преобразованному уравнению эквивалентного источника напряжения.

4. Требуемый вариант распределения может быть реализован последовательным или совместным регулированием параметров устройств, присоединенных к промежуточной точке. Области изменения этих переменных параметров можно определить по преобразованному уравнению взаимосвязи напряжений в трех точках.

5. Доказано, что из представления электрических величин комплексными числами, в силу свойств последних, возможны два расчетных варианта: определение модулей комплексных напряжений и токов в точках линии по данному набору аргументов этих величин и определение фаз напряжений и токов по известному распределению их модулей.

6. Разработан графический метод определения напряжений в промежуточных точках линии электропередачи с отборами, заданными статическими характеристиками.

7. По уравнению эквивалентных источников напряжения и тока получены выражения потока мощности в промежуточной точке. Потери мощности на участках линии определены по режимным показателям начала и конца линии. Установлено, что изменение мощности промежуточного ответвления можно описать векторно-круговой диаграммой. Сформулированы рекомендации по расчету напряжений в точках линии при заданных мощностях промежуточных ответвлений, удовлетворяющих заданному распределению напряжений.

8. Анализ влияния значений емкостного сопротивления и индуктивной проводимости компенсирующих установок на характер распределения напряжения при фиксированных напряжениях по концам линии можно также выполнить аналитически по уравнению эквивалентного источника напряжения или графически путем построения векторно-круговой диаграммы. Доказана возможность графического определения обобщенных коэффициентов линии при переменных параметрах устройств продольной и поперечной компенсации. Предложена методика графичес-

кого и аналитического расчетов величины емкостного сопротивления продольной компенсации, при котором для данной линии коэффициент  $\beta_0$  имеет минимальное значение. Данная методика применима при анализе влияния на обобщенный коэффициент  $C_0$  индуктивной проводимости поперечной компенсации. Показано, что величину емкостного сопротивления компенсирующего устройства, исключающую самовозбуждение связанного с линией синхронного генератора, можно выбрать по круговой диаграмме входного сопротивления линии. Установлено, что зависимость полных мощностей в начале и конце линии от емкостного сопротивления  $-jX_C$  и индуктивной проводимости  $-jB_L$  может быть представлена дробно-линейной функцией и по ней построена круговая диаграмма.

9. Выведены зависимости напряжения и тока в промежуточной точке от нагрузки на конце линии.

10. Выполнены преобразования уравнений с учетом возможных исходных и искомых величин. Для каждой из групп уравнений сформулированы условия построения векторно-круговой диаграммы - средства геометрического отображения функциональной связи величин и автономно-возможного аппарата исследования.

11. По основным уравнениям и соотношениям были составлены алгоритмы и программы расчета на ЭВМ "Минск-22". Расчет по уравнениям эквивалентных источников напряжения или тока обладает возможностью учесть при помощи соответствующих коэффициентов между исследуемыми и независимыми величинами изменения параметров линии, отдельного ее участка, ответвления или компенсирующего устройства.

12. О применении уравнений (4), (5), (10), (11), (15) к цепям автоматики, телемеханики и электросвязи указано в работах автора /5, 6, 8, 9/.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих статьях:

1. Стационарные режимы компенсированных электропередач с промежуточным отбором мощности. Труды ТЭИ СО АН СССР, № 1, 1962 (соавтор О.Б.Толпыго).

2. Графическое определение напряжения вдоль компенсированной линии без потерь с промежуточным отбором мощности, при отборах, заданных статическими характеристиками. "Известия вузов - Энергетика", № 5, 1962.

3. О некоторых стационарных режимах компенсированных электропередач с промежуточным отбором мощности. "Известия вузов -

Энергетика", № 10, 1962 (соавтор О.Б.Толпыго).

4. Расчет напряжений в промежуточных точках линии электропередачи путем решения треугольников векторов. Материалы XXVI научно-технической конференции БПИ, Минск, 1972.

5. Уравнение напряжения и тока в промежуточной точке линии электропередачи. "Известия вузов - Энергетика", № 5, 1970.

6. К исследованию распределения тока, напряжения и мощности в компенсированной линии электропередачи. "Известия вузов - Энергетика", № 11, 1970.

7. Программа расчета напряжений в промежуточных точках линии на ЭВМ "Минск-22". Материалы III республиканской научно-технической конференции по применению вычислительной техники в энергетике БССР. Минск, 1970 (соавтор В.И.Цегельский).

8. Уравнения напряжения, тока и мощности в промежуточной точке канала информации при четырехполюсной схеме замещения. Сб. "Новые разработки элементов радиотехнических устройств". Вып. I, Минск, "Высшая школа", 1972.

9. Применение теоремы об активном двухполюснике к промежуточной точке канала информации и вывод группы расчетных уравнений для напряжения и тока. Сб. "Новые разработки элементов радиотехнических устройств". Вып. I, Минск, "Высшая школа", 1972.

10. К исследованию распределения напряжения вдоль линии с включенным в промежуточной точке реактором. Тезисы докладов научно-технической конференции "Повышение качественных показателей радио-и электронной аппаратуры на полупроводниковых приборах и интегральных схемах". Минск, 1972 (соавтор З.Е.Алтунина).

11. Некоторые алгоритмы и программы расчета установившихся режимов электропередач. Тезисы докладов республиканского научно-технического совещания "Автоматизация управления Белорусской энергосистемой", Минск, 1972.

12. Расчет тока в промежуточной точке канала информации. Сб. "Новые элементы систем автоматики, телемеханики и вычислительной техники". Вып. 2, Минск, "Высшая школа", 1972.

Содержание работ докладывалось автором на Всесоюзном совещании по вопросам передачи электроэнергии на расстояния (2000-3000 км) по настроенным электропередачам (г.Новосибирск, 1961); на II и IV республиканских НТК членов НТО РЭ и С имени А.С.Попова - в 1968, 1972 гг. и на НТК, на материалы которых сделана ссылка в перечне опубликованных автором работ.