

Южно-Уральский государственный университет
Кафедра "Электрические станции, сети и системы"

Булатов Б.Г., Комисарова Е.Д.

Электрические системы и сети:
Учебное пособие по лабораторным работам

Введение

Технические возможности современных ЭВМ, широко используемых в учебном процессе для проведения различных расчетов, позволяют эффективно применять их в лабораторном практикуме.

Компьютерная графика, высокое быстродействие, удобная система ввода данных, наглядное представление результатов позволили создать цикл из 5 лабораторных работ по дисциплине «Электрические системы и сети».

Все лабораторные работы выполняются на ПЭВМ под управлением операционных систем Windows 3.1, Windows 95 или Windows 98.

Программное обеспечение разработано в среде проектирования LabVIEW, основанной на графическом языке программирования G.

Все программы LabVIEW, называемые виртуальными устройствами (ВУ), осуществляют взаимодействие пользователя-исследователя с реальным объектом или математической моделью объекта через фронтальную панель.

В первом случае связь с объектом осуществляется через специальные платы сопряжения, имеющие порты аналогового и цифрового ввода и вывода.

Использование математических моделей изучаемых объектов при современном быстродействии ПЭВМ создает иллюзию непосредственного взаимодействия с исследуемой системой, что дает возможность в большинстве случаев проводить эксперименты, которые в условиях действующих установок или физических моделей были бы невозможны. Все это позволяет расширить программу экспериментов и способствует улучшению усвоения учебного материала.

В зависимости от загруженного программного обеспечения ПЭВМ, на которой проводятся лабораторные работы, возможны два способа оформления программных файлов.

Если на ПЭВМ установлен пакет LabVIEW, то программы оформляются в виде библиотек с расширением .LLB, например ELS2.llb. После входа в библиотеку в диалоговом окне появляется список всех модулей библиотеки.

С помощью мышки надо активизировать головной модуль, обычно имеющий имя библиотеки и расширение .vi, например ELS2.vi. После этого происходит автоматическая загрузка LabVIEW и соответствующей программы.

Если на ПЭВМ пакет LabVIEW не установлен, то программа оформляется в виде исполняемого модуля с расширением .exe, например ELS2.exe. Вызов этой программы осуществляется средствами Windows.

После загрузки программного файла в центре экрана дисплея появляется фронтальная панель ВУ. Сверху панели размещаются обычные для Windows строки. В первой указывается имя выполняемой программы.

Вторая строка включает меню File, Edit, Operate, Windows, Help. При работе с готовой программой можно обойтись без обращения к пунктам этого меню.

Еще ниже располагается панель инструментов (рис.В.1), используемая для запуска программы.

Рис В.1 Панель инструментов

Предварительно на цифровых задатчиках с помощью мыши выставляются параметры системы, заранее подсчитанные в соответствии заданным вариантом, и параметры режима. При этом курсор мыши в виде «руки» подводится к кнопкам «прибавить» или «убавить» цифрового задатчика, расположенным в левой части его. Нажатие левой кнопки мыши приводит к соответствующим изменениям уставки на единицу.

В качестве задатчика могут использоваться ползунковые устройства, управляемые аналогично перемещением движка.

Изменить уставку можно подводом «руки» к полю индикатора задатчика с последующим нажатием левой кнопки мыши и вводом величины параметра с клавиатуры

С помощью кнопок 1 и 2 панели осуществляется запуск программы.

Нажатие кнопки 1 приводит к выполнению программы только один раз. Полученные результаты выводятся на индикаторы, которые предусмотрены разработчиком программы и размещены на фронтальной панели.

Нажатие кнопки 2 приводит к циклически повторяющемуся запуску программы. При этом каждый раз опрашиваются все кнопки управления и цифровые задатчики фронтальной панели, осуществляется решение и отображение результатов. В этом случае любое изменение исходных параметров пользователем тут же приводит к адекватному изменению

параметров режима системы. Панель инструментов меняет свой вид (рис В.1, б), появляется кнопка Stop, нажатие на которую приводит к останову решения.

Выход из программы осуществляется путём нажатия кнопки



в первой строке, или через меню **File»Close**.

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА СЛОЖНОЙ ЗАМКНУТОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ.

Цель работы: расчёт режима электрической сети сложной конфигурации, проверка и анализ мероприятий по обеспечению надёжности электрической сети, допустимости работы оборудования сети, качества электрической энергии. Расчёт экономического распределения потоков мощности в сети и выбор мероприятий, обеспечивающих его.

Теоретическая часть

Для электрических сетей расчёты установившихся режимов составляют большую часть исследований, проводимых как на стадии проектирования электрических сетей, так и при эксплуатации.

Под установившимся режимом электрической сети, состоящей из линий передач, подстанций, электростанций, понимается симметричный режим симметричной системы трёхфазного переменного тока, определяющий состояние системы на некотором интервале времени. Это состояние характеризуется значениями частоты, токов, напряжений, мощностей и других физических величин, называемых параметрами режима и определяющих процесс преобразования, передачи и распределения электроэнергии.

Электрическая система вводится в расчёт **схемой замещения, которая составляется на одну фазу** с нейтралью (имеется узел с нулевым напряжением) и содержит источники ЭДС и тока, активные сопротивления, индуктивности и ёмкости. В схемах замещения выделяют:

– **активные элементы** (генераторы электростанций и нагрузки подстанций), которые представляются в виде источников тока – «задающие токи»;

– **пассивные элементы** (линии электропередачи, трансформаторы, компенсирующие устройства), которые образуют в схемах замещения продольные ветви – активные и индуктивные сопротивления и поперечные ветви – активные, индуктивные и ёмкостные проводимости.

Связь пассивных элементов определяется конфигурацией сети, значения их называются параметрами системы.

Расчёт установившегося режима электрической системы заключается в определении напряжений, токов, активных и реактивных мощностей во всех её элементах. Исходными данными для расчёта являются: схема замещения, значения параметров пассивных элементов, а также значения активных элементов в реальных условиях работы источников и потребителей электроэнергии в системе. Один из источников принимается за **балансирующий узел** и одна из подстанций – за **базисный**. Чаще всего балансирующий и базисный узлы совпадают.

Состояние электрической системы описывается уравнениями, составленными на основе первого и второго законов Кирхгофа и закона Ома. Неизвестными в этих уравнениях являются токи в ветвях сети. Так как в сложных электрических сетях число ветвей превосходит число узлов и контуров, то порядок полученной системы уравнений достаточно высок и решение её – трудоёмкая задача.

Для анализа цепей, как известно, могут использоваться **метод узловых напряжений** и **метод контурных токов**. Первый из них сводит задачу к определению узловых напряжений, число которых равно числу узлов схемы без одного базисного, второй – приводит к решению уравнений, определяющих контурные токи, т.е. токи в ветвях, принадлежащих только какому-либо одному независимому контуру. Обычно число независимых контуров гораздо меньше числа узлов, и соответственно снижается число уравнений в системе для расчёта параметров режима.

Однако, применение метода контурных уравнений не получило широкого распространения главным образом из-за сложности и неоднозначности выбора независимых контуров в схеме. В настоящее время для расчёта режима электрической сети в основном применяются программы, составленные с использованием узловых уравнений.

Система узловых нелинейных алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами имеет вид:

$$\underline{YU} = \frac{\underline{S}^*}{\sqrt{3}\underline{U}^*} - \underline{Y}_0 \underline{U}_0, \quad (1.1)$$

где \underline{Y} – матрица узловых проводимостей; \underline{U} – вектор неизвестных узловых напряжений; $\underline{Y}_{\bar{o}}$ – вектор проводимостей узлов по отношению к балансирующему; $\underline{U}_{\bar{o}}$ – напряжение балансирующего узла; \underline{S} – вектор мощностей в узлах схемы.

Решая систему уравнений (1.1) любыми известными итерационными методами, определяют напряжения в узлах схемы. Полученные напряжения используются для расчёта токов и потоков мощности в ветвях.

При этом сначала рассчитываются токи в продольной части линии (в сопротивлении \underline{Z}_{kj}):

$$\underline{I}_{kj} = \frac{\underline{U}_k - \underline{U}_j}{\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_{kj}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (\underline{U}_k - \underline{U}_j) \cdot \underline{Y}_{kj}, \quad (1.2)$$

где $\underline{U}_k, \underline{U}_j$ – напряжения узлов k и j ; \underline{Z}_{kj} – сопротивление ветви kj ; $\underline{Y}_{kj} = -\underline{Z}_{kj}^{-1}$ – взаимная проводимость ветви kj .

Учитывая ёмкостные проводимости линии kj , ток \underline{I}_k , текущий от узла k в линию kj , равен

$$\underline{I}_k = -\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (\underline{U}_k - \underline{U}_j) \cdot \underline{Y}_{kj} + j \frac{\underline{U}_k}{\sqrt{3}} \cdot \frac{b_{lkj}}{2}, \quad (1.3)$$

где $\frac{b_{lkj}}{2}$, – половина ёмкостной проводимости линии kj .

Ток, текущий из линии kj к узлу j , равен:

$$\underline{I}_j = -\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (\underline{U}_k - \underline{U}_j) \cdot \underline{Y}_{kj} - j \frac{\underline{U}_k}{\sqrt{3}} \cdot \frac{b_{lkj}}{2}. \quad (1.4)$$

Соответственно мощности для узлов k и j можно получить:

$$\underline{S}_k = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_k \underline{I}_k^* \text{ и } \underline{S}_j = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_j \underline{I}_j^*, \quad (1.5)$$

а потери мощности в ветви kj :

$$\Delta \underline{S}_{kj} = \underline{S}_k - \underline{S}_j. \quad (1.6)$$

Сумма потоков мощности для всех линий, связанных с балансирующим узлом, позволяет определить мощность, поступающую из балансирующего узла.

Во всех уравнениях (1.2–1.6) можно выделить действительные и мнимые составляющие соответствующих величин: токов, мощностей, потерь мощности.

В общем случае систему алгебраических уравнений (1.1) можно записать в виде:

$$\mathbf{AX} = \mathbf{B} \quad (1.7)$$

и использовать для её решения любые итерационные методы. Например, метод Гаусса – Зейделя:

в матрице \mathbf{A} , соответствующей узловым проводимостям, наибольшие элементы располагаются на главной диагонали, что обеспечивает необходимые условия сходимости итерационного процесса, основное соотношение которого:

$$x_i^{(k+1)} = \frac{1}{a_{ii}} \left(b_i - \sum_{j \langle i} a_{ij} x_j^{(k+1)} - \sum_{j \rangle i} a_{ij} x_j^k \right),$$

где k – номер итерации.

Если хотя бы одна составляющая $x_i^{(k+1)}$ вектора неизвестных отличается от значения $x_i^{(k)}$ на предыдущей итерации на величину, большую заданной точности eps , то итерационный процесс продолжается.

Метод достаточно прост в программной реализации и имеет неплохую сходимость. Ускорение итерационного процесса может быть достигнуто путём введения специальных ускоряющих коэффициентов q , с помощью которых реализуемые значения неизвестных определяются по выражению:

$$\tilde{x}_i^{(k+1)} = x_i^k + q(x_i^{(k+1)} - x_i^k).$$

Величина q выбирается в зависимости от хода итерационного процесса: при медленной аperiodической сходимости принимают $q > 1$, при колебательном характере процесса выбирается $q < 1$.

Метод широко используется в промышленных программах анализа режимов сложных энергосистем.

Предложенный алгоритм расчёта режима электросети **реализован в программе «NetCAD»**, которая используется в лабораторной работе для проведения исследований.

Параметры режима позволяют оценить условия, в которых будут работать потребители и оборудование электрической сети. Такие оценки дают возможность предусмотреть меры для обеспечения требуемого качества электроэнергии, а также мероприятия по допустимости рассмотренного режима сети для её оборудования, кроме того, регулируя параметры режима, найти оптимальные условия для передачи электроэнергии к потребителям.

Одним из важнейших показателей качества электроэнергии является **напряжение на подстанциях системы**. Верхние допустимые значения напряжений нормируются по условиям работы изоляции в энергоустановках, нижние – определяются прежде всего условиями устойчивой параллельной работы генераторов электростанций и узлов нагрузок. И те и другие значения зависят также от допустимых отклонений напряжения у потребителей и диапазона изменения коэффициента трансформации трансформаторов, установленных в сети. Регулируя напряжение, необходимо изменять величину реактивной мощности, вырабатываемую генераторами станций, и устанавливать устройства поперечной компенсации непосредственно на шинах потребителей.

Допустимость работы линий передач в нормальных режимах оценивается по рабочей плотности тока, по соответствию реальных сечений линий экономически целесообразным, по допустимым отклонениям напряжения у потребителей; в послеаварийных режимах – по нагреву.

Оптимальными можно считать условия передачи электроэнергии, когда потери мощности в элементах электрической сети минимальны. Эффективным способом снижения потерь мощности в замкнутых сетях можно считать **обеспечение экономичного распределения потоков мощности**. Последнее определяется только активными сопротивлениями ветвей сети. Режим, отвечающий экономическому распределению, можно получить, если провести мероприятия, поддерживающие вынужденное распределение потоков мощности в системе: введение уравнительной ЭДС, подключение устройств продольной компенсации к отдельным линиям передачи, размыкание сети в точках раздела мощности, соответствующих экономическому распределению.

Объект исследования

Исследование проводится для энергосистемы, схема которой представлена на рис. 1.1, а варианты необходимых данных приведены в табл. 1.1 и табл. 1.2. номинальное напряжение сети 110 кВ. Базисный и балансирующий узлы совпадают с узловой (системной) подстанцией «С».

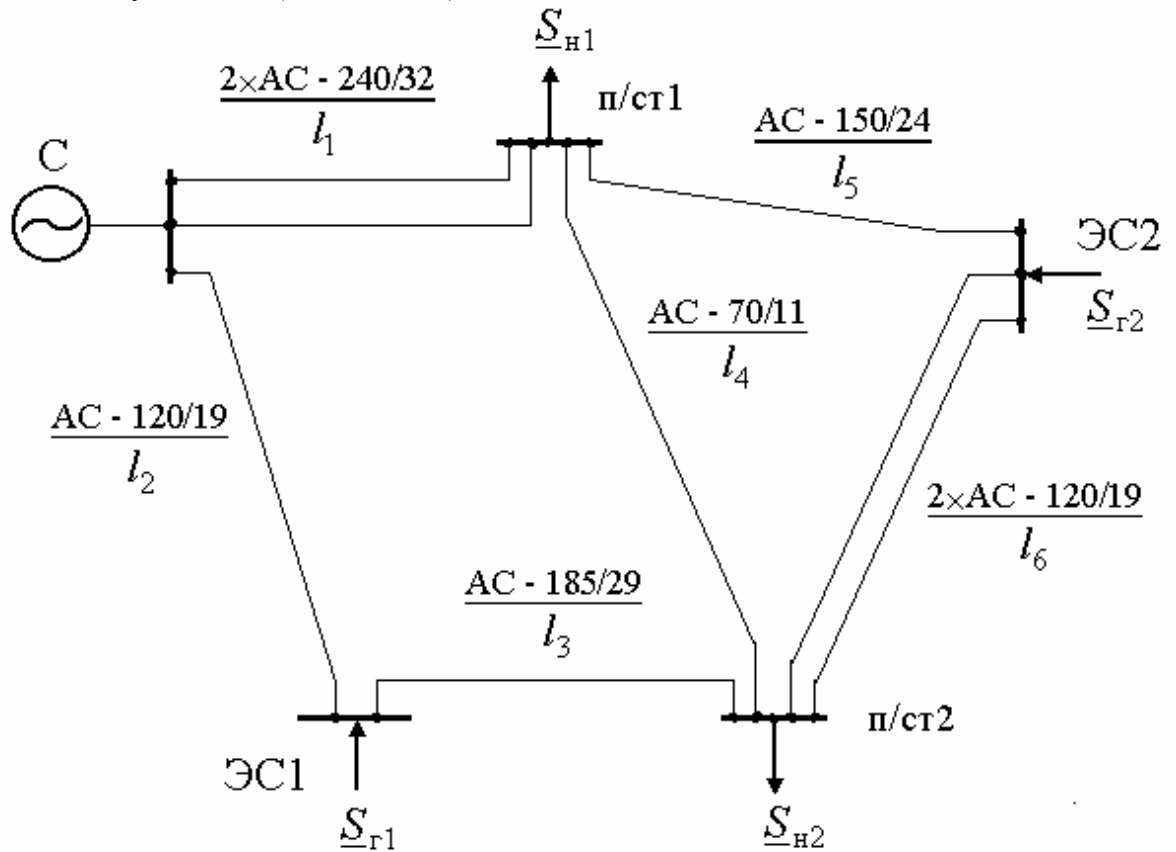


Рис. 1.1 Электрическая схема сети

Таблица 1.1

№ варианта	l_1 , км	l_2 , км	l_3 , км	l_4 , км	l_5 , км	l_6 , км
1	40	35	55	40	30	60
2	50	62	45	55	40	35
3	30	40	55	60	45	55
4	50	30	65	30	50	25
5	25	50	35	70	40	60
6	35	45	50	45	35	40
7	45	25	30	55	60	45
8	55	20	40	65	45	50

Таблица 1.2

№ варианта	U_0 , кВ	$\underline{S}_{Г1}$, МВА	$\underline{S}_{Г2}$, МВА	$\underline{S}_{Н1}$, МВА	$\underline{S}_{Н2}$, МВА
1	120	$-60 - j25$	$-80 - j40$	$200 + j80$	$130 + j50$
2	115	$-90 - j40$	$-100 - j55$	$150 + j60$	$100 + j30$
3	118	$-110 - j50$	$-105 - j45$	$180 + j70$	$120 + j60$
4	113	$-120 - j40$	$-130 - j45$	$100 + j30$	$80 + j40$
5	116	$-100 - j45$	$-85 - j30$	$140 + j45$	$140 + j50$
6	121	$-70 - j30$	$-60 - j25$	$190 + j70$	$120 + j55$
7	119	$-80 - j50$	$-70 - j35$	$170 + j75$	$90 + j35$
8	120	$-65 - j20$	$-75 - j30$	$185 + j85$	$105 + j55$

Расчётная часть

1. Составить схему замещения сети, определить параметры ветвей и узловые мощности. Ёмкостные проводимости линий можно учесть непосредственно в ветвях схемы замещения или зарядной мощностью, подключив её к соответствующим узлам схемы.

2. Рассчитать режим для линии l_2 при отключении линии l_3 . Построить векторную диаграмму. При необходимости провести мероприятия, обеспечивающие техническую допустимость указанного режима.

3. Используя метод преобразования сети, рассчитать экономическое распределение потоков мощности, определить точку потокораздела. Потери мощности на участках сети не учитывать и напряжение во всех узлах считать номинальным.

4. Подготовить карты режима для «естественного» и экономического распределения потоков мощности.

5. Подготовить табл. 1.3 для анализа послеаварийных режимов работы сети.

Программное обеспечение

Для анализа режимов применяются различные программные продукты. В данной работе рекомендуется использовать программу NetCAD, позволяющую рассчитывать режимы сетей с одной ступенью напряжения.

Программа имеет развитый графический интерфейс, высокую наглядность с возможностью представления результатов на схеме сети и удобную систему ввода и корректировки исходной информации (рис. 1.2).

Главное меню программы включает следующие пункты: ФАЙЛ, РЕДАКТИРОВАНИЕ, РАСЧЁТ. При активизации их с помощью мыши появляются ниспадающие меню второго уровня.

Пункт ФАЙЛ содержит типовые для современных программных пакетов функции: СОЗДАТЬ, ОТКРЫТЬ, СОХРАНИТЬ, СОХРАНИТЬ КАК, ПЕЧАТАТЬ И ВЫЙТИ.

Пункт РЕДАКТИРОВАНИЕ включает : ДОБАВИТЬ, УДАЛИТЬ, ПЕРЕМЕСТИТЬ.

Таблица 1.3

№ лин	1	2	...	n	
$\frac{s}{\text{№ откл. лин}}$	$P_1 + jQ_1$, МВА	$P_2 + jQ_2$, МВА			$\Delta U_{\text{нб}}, \%$
Норм. режим					
1					
2					
⋮					
$j_p, \text{А/мм}^2$					
$I_{\text{нб, нав}}, \text{А}$					
$n_c \cdot F_c$					
$I_{\text{дон}}^c, \text{А}$					
$n_0 \cdot F_0$					

ПРИМЕЧАНИЯ:

1. j_p – рабочая плотность тока; $n_c \cdot F_c$ и $I_{\text{дон}}^c$ – количество цепей и марка провода, допустимый по нагреву ток для существующих линий рассматриваемого района; $n_0 \cdot F_0$ – те же величины, полученные в результате расчёта.

2. Одновременное отключение двух цепей двухцепной линии не рассматривается, для таких линий наибольший ток имеет место при отключении

одной цепи; для остальных линий наибольший ток определяется по наибольшему потоку мощности на данной линии в рассмотренных послеаварийных ситуациях.

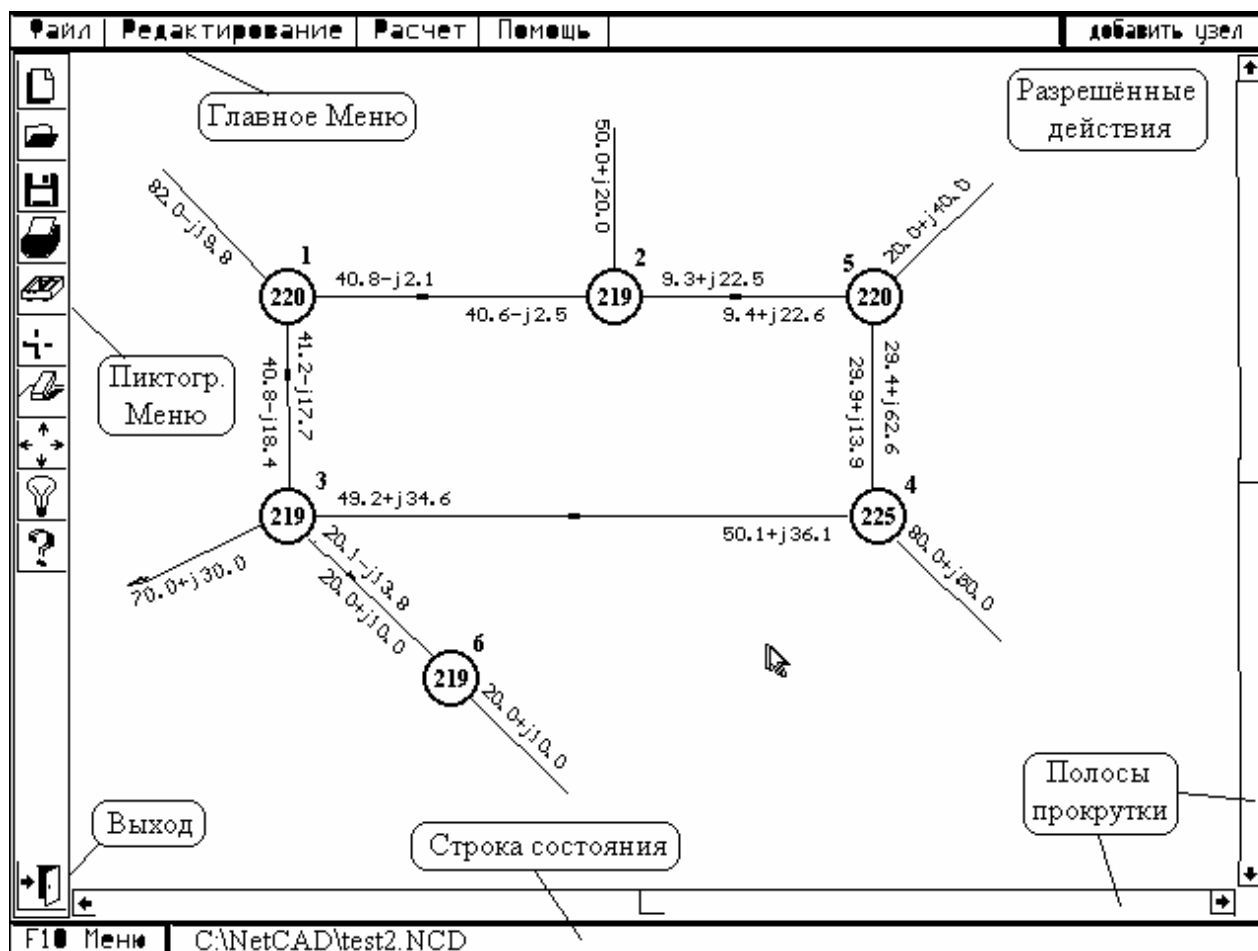


Рис. 1.2 Фронтальная панель

Эти функции позволяют предельно просто и наглядно организовать первичный ввод конфигурации сети. Ввод схемы начинается с выбора места на экране для балансирующего узла. Место узла на экране определяется положением индикатора мыши и фиксируется нажатием её левой кнопки. Затем аналогично размещаются и остальные узлы расчётной схемы.

Положение ветви на экране определяется подводом мыши к начальному узлу, а затем, не отпуская кнопки, к конечному узлу ветви.

После ввода схемы для повышения наглядности граф сети на экране можно деформировать путём перемещения узлов.

Ввод параметров узлов и ветвей осуществляется подводом мыши к соответствующему элементу и нажатием правой кнопки её. При этом открывается диалоговое окно, через которое и производится ввод

запрашиваемых параметров. Для балансирующего узла вводится напряжение, для остальных – узловые мощности. Для ветвей вводят $R_{л}$, $X_{л}$ и проводимость $b_{л}$.

Пункт меню РАСЧЁТ позволяет в режиме НАСТРОЙКА ввести допустимый небаланс в узлах (по умолчанию принят 0,1 МВА) и установить предельное число итераций (по умолчанию 1000), при достижении которого вычислительный процесс прекращается.

Режимы работы могут выбираться и с помощью пиктографического меню, расположенного вертикально в левой части экрана.

Порядок выполнения работы

1. Активизировать программу NetCAD.exe.
2. Ввести исходные данные сети и провести расчёт режима. Составить карту режима, т.е. нанести на расчётную схему полученные параметры режима.
3. Проверить выполнение баланса мощности в некоторых узлах.
4. Проверить выполнение соотношений для звена передачи на примере линии l_2 .
5. Проверить техническую допустимость работы сети.
 - 5.1. Для нормального режима работы сравнить рабочие плотности тока с экономическими, проверить соответствие сечений экономически целесообразным (выбираются по методу экономических интервалов), определить наибольшую потерю напряжения и отклонения напряжения на подстанциях, сравнить их с допустимыми. Оценить потери мощности и $\text{tg}\varphi$ на системной подстанции.
 - 5.2. Проверить сечения проводов ВЛ по нагреву, для чего рассмотреть все возможные послеаварийные ситуации в сети, для каждой линии выбрать наиболее тяжёлый режим, определить ток и сравнить его с допустимым. Проверить отклонения напряжения в рассмотренных режимах. Результаты эксперимента удобно представить в виде табл. 1.3.
6. Получить экономическое распределение потоков мощности по сети. Составить карту режима, сравнить полученные параметры режима с расчётными.
 - 6.1. Подключая в отдельные линии установки продольной компенсации, привести сеть к однородной, провести расчёт режима, сравнить параметры режима с ранее полученными.
 - 6.2. Вернуться к исходной схеме, изменив параметры ветвей, провести размыкание сети в точках потокораздела экономических потоков мощности. Оценить снижение потерь мощности в сети.

7. Методом утяжеления режима проверить возможность роста нагрузки на п/ст 2. При этом техническая допустимость работы сети должна быть обеспечена.

Содержание отчёта

1. Включить в отчёт аккуратно оформленную расчётную часть.
2. Представить полученные в результате эксперимента карты режима и сделать по ним необходимые выводы, оценив потери мощности, напряжения в узлах, тангенс мощности в балансирующем узле.
3. Сравнить параметры звена передачи для линии 2, полученные экспериментально и аналитически.
4. Анализируя данные табл. 1.3, сделать выводы о технической допустимости работы сети в послеаварийных ситуациях.
5. Привести карту режима для предельно допустимой нагрузки в узле. Определить ограничения для роста её.

Контрольные вопросы

1. Какие параметры определяют режим электрической системы?
2. Как составляется матрица узловых проводимостей?
3. Какие методы решения системы линейных алгебраических уравнений Вам известны?
4. Изобразите блок – схему алгоритма расчёта режима электрической сети.
5. Как по найденным узловым напряжениям определить токи ветвей и мощности на основе арифметики действительных чисел?
6. Как определить потери мощности по ветвям и по сети в целом?
7. Как влияет нагрузка узлов на уровни напряжений в сети?
8. Как определяется потеря напряжения в ЛЭП?
9. Перечислить методы снижения потерь мощности в сети.
10. Получить формулы для расчёта экономического распределения мощности в простейшей замкнутой сети.
11. Перечислить мероприятия, обеспечивающие экономическое потокораспределение в сети.
12. Объяснить выбор сечений проводов методом экономических интервалов.
13. В каких условиях и для чего проводится проверка сечений проводов по нагреву?
14. Как оценить экономические и технические характеристики линий электропередач?
15. Как оценить качество электроэнергии, поставляемой потребителям? Какие условия определяют допустимые уровни напряжения в сети

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА СЕТИ С АВТОТРАНСФОРМАТОРАМИ

Цель работы: расчет и оптимизация параметров режима сложноразветвленной электрической сети нескольких номинальных напряжений путем регулирования ответвлений на автотрансформаторах связи.

Теоретическая часть

Районные энергосистемы имеют сложную конфигурацию и содержат несколько источников питания, десятки трансформаторных подстанций и сотни линий передач различного назначения и разных номинальных напряжений.

Электрические сети энергосистем условно можно разделить на основные – системообразующие и распределительные. Системообразующие сети выполняются, как правило, линиями 110, 220, а иногда и 500 кВ. Для связи сетей разных номинальных напряжений используются автотрансформаторы, оснащенные устройствами изменения коэффициентов трансформации под нагрузкой, что позволяет диспетчеру с их помощью регулировать режимы работы сети.

Расчет режимов сети любого размера и конфигурации осуществляется на ЭВМ с использованием универсальных программ, реализующих различные методы определения параметров режима в зависимости от способа задания исходных данных и цели расчета.

Для расчета и оптимизации режима в сети с несколькими номинальными напряжениями необходимо составлять **расчетные схемы без приведения к одной ступени напряжения**, включая в них идеальные трансформаторы с регулируемыми коэффициентами трансформации. При расчете режима сети эти изменения можно достаточно просто учесть в матрице узловых проводимостей. Рассмотрим это на примере продольной ветви с проводимостью \underline{Y}_{kj} и идеальным трансформатором с комплексным коэффициентом трансформации $\underline{k}_{tkj} = \underline{U}'_k / \underline{U}_k$ (рис.2.1).

Токи в ветви могут быть определены:

$$\underline{I}'_k = \frac{\underline{U}'_k - \underline{U}_j}{\sqrt{3}} \underline{Y}_{kj} \text{ и } \underline{I}_j = -\frac{\underline{U}_j - \underline{U}'_k}{\sqrt{3}} \underline{Y}_{kj}. \quad (2.1)$$

Заменим в приведенных уравнениях \underline{U}_k' на \underline{U}_k и \underline{I}_k' на \underline{I}_k , используя для идеального трансформатора равенство мощностей:

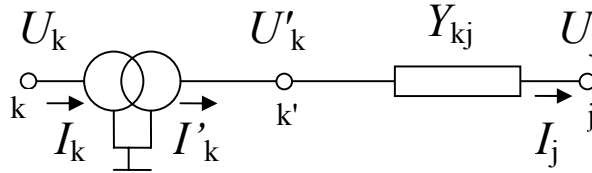


Рис. 2.1 Схема продольной ветви

$$\underline{S}_k = \underline{S}_k' \text{ или } \sqrt{3} \cdot \underline{U}_k \underline{I}_k^* = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_k' \underline{I}_k'^*.$$

$$\text{Отсюда } \underline{I}_k'^* = \frac{\underline{U}_k \underline{I}_k^*}{\underline{U}_k'} \text{ или } \underline{I}_k' = \frac{\underline{I}_k}{\underline{k}_{\tau kj}^*}.$$

С учетом этих соотношений выражения (2.1) для токов по концам ветви с трансформатором будут иметь вид

$$\begin{aligned} \underline{I}_k &= \frac{\underline{Y}_{kj} k_{\tau kj}^2 \underline{U}_k - \underline{Y}_{kj} k_{\tau kj}^* \underline{U}_j}{\sqrt{3}}, \\ \underline{I}_j &= -\frac{\underline{Y}_{kj} \underline{U}_j - \underline{Y}_{kj} k_{\tau kj} \underline{U}_k}{\sqrt{3}}. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Переписывая уравнения (2.2) в матричной форме и учитывая, что направление тока, выходящего из узла, принято за положительное, а входящего в узел – за отрицательное, получим:

$$\begin{bmatrix} \underline{Y}_{kj} \cdot k_{\tau kj}^2 & -\underline{Y}_{kj} \cdot k_{\tau kj}^* \\ -\underline{Y}_{kj} \cdot k_{\tau kj} & \underline{Y}_{kj} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_k \\ \underline{U}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{I}_k \\ -\underline{I}_j \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Таким образом, трансформаторные связи можно учесть изменением соответствующих элементов матрицы узловых проводимостей. Если коэффициенты трансформации комплексные, то результирующая матрица \underline{Y}_y будет несимметрична. Формируемое при этом узловое уравнение может решаться различными методами, в том числе и методом Гаусса-Зейделя, который уже был рассмотрен в предыдущей работе.

Для улучшения сходимости итерационного процесса в программах для ЭВМ могут использоваться и более сложные методы, например, градиентный метод, метод Ньютона или их сочетание. В градиентном методе наиболее

эффективны несколько первых итераций, в дальнейшем решение происходит медленно. Для ускорения сходимости, начиная с некоторой итерации, переходят на метод Ньютона.

Оптимизация параметров режима сети заключается в снижении потерь мощности при соблюдении допустимых уровней напряжения.

Потери активной мощности в энергосистемах составляют, как правило, 3 – 5% от передаваемой мощности. Допустимые уровни напряжения ограничиваются условиями работы изоляции (превышение 10 – 5% от $U_{\text{ном}}$) и условиями устойчивости узлов нагрузки (понижение 10 – 15% от $U_{\text{ном}}$).

Потери активной мощности можно разделить на **нагрузочные потери и потери в поперечных элементах схемы замещения**. Нагрузочные потери от протекания тока нагрузки по линиям и трансформаторам сети приближенно определяются по известной формуле:

$$\Delta p = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} r, \quad (2.4)$$

где P и Q – активная и реактивная нагрузки элемента сети; r – активное сопротивление элемента сети; U – среднее напряжение.

Нагрузочные потери могут быть существенно снижены за счет повышения уровней напряжения в сетях, за счет компенсации реактивных нагрузок потребителей, а также путем принудительного перераспределения потоков мощности в сложнзамкнутой сети. Последнее мероприятие особенно актуально для сетей с автотрансформаторами, позволяющими регулировать коэффициенты трансформации, обеспечивая тем самым введение управляемых ЭДС в контуры схемы и появление уравнительных потоков, меняющих потокораспределение в сети.

Следует отметить, что в замкнутых сетях с несколькими номинальными напряжениями **естественное распределение мощности**, полученное при уравновешенных коэффициентах трансформации, может оказаться неблагоприятным, если полное комплексное сопротивление сети высокого напряжения окажется больше, чем такое же сопротивление в параллельной сети более низкого напряжения. Последняя оказывается относительно более загруженной, чем сеть высшего напряжения, что приводит к неоправданному росту общих потерь активной мощности. Минимальные потери в таких сетях имеют место при экономическом распределении потоков мощности, которое определяется только активными сопротивлениями элементов сети и может быть найдено расчетом потоков в R-схеме.

Принудительно приблизить естественное распределение потоков к **экономическому** можно в замкнутой сети одной ступени напряжения с помощью установок продольной емкостной компенсации (УПК) и линейных

регуляторов, а в сети с автотрансформаторами путем продольно-поперечного регулирования на них. В первом случае сеть при включении УПК на отдельных линиях приводится к однородной, а в однородных сетях естественное и экономическое распределение мощностей совпадают. Во втором случае регулирование позволяет изменять не только модуль, но и фазу вторичного напряжения по отношению к первичному. Вводя небольшой фазовый сдвиг ($\delta = 2 - 4^\circ$) между напряжениями обмоток высшего и среднего напряжения, можно увеличить активную мощность линий высшего напряжения и снизить нагрузочные потери.

Потери в поперечных элементах схемы замещения, включающие потери на корону в линиях и потери холостого хода в трансформаторах, пропорциональны квадрату напряжения на элементе и при изменении режима также меняются, хотя и в меньшей мере. При решении задачи оптимизации режима необходимо обеспечить минимум суммарных потерь активной мощности.

Для снижения потерь в сети необходимо иметь достаточные технические средства для управления режимом напряжения на подстанциях и перетоками мощности в линиях передач и автотрансформаторах. В качестве таких установок могут быть использованы: статические тиристорные компенсаторы (СТК); синхронные компенсаторы (СК); шунтирующие реакторы; установки продольной емкостной компенсации (УПК); линейные регуляторы (вольтодобавочные трансформаторы), и, в первую очередь, устройства регулирования коэффициента трансформации на автотрансформаторах и трансформаторах. Последние выполняются в виде ПБВ (переключение ответвлений без возбуждения) и РПН (переключение ответвлений под нагрузкой). На понижающих подстанциях и в узлах связи сети двух напряжений предпочтение отдается устройствам с РПН, имеющим достаточно широкий диапазон регулирования.

В каждой энергосистеме должны быть правильно **выбраны места размещения устройств** регулирования и их регулировочные диапазоны. Электрические сети различных номинальных напряжений в режимном отношении тесно взаимосвязаны. Управляя регулирующим устройством на одной из подстанций, можно изменить режимные параметры не только близлежащих узлов и примыкающих к ним линий, но и всей энергосистемы в целом, т.е. наблюдать системный эффект регулирования. Наличие системного эффекта требует координации режима напряжений на границах между районными энергообъединениями, т.е. на линиях связи между соседними системами, а также в питающих центрах распределительных сетей. В указанных контрольных точках производят замеры напряжений, позволяющие судить о режиме напряжений для электрической сети в целом.

Объект исследования

Объектом исследования является часть электрической сети районной энергосистемы, имеющая ЛЭП 500, 220 и 110 кВ. Узловая подстанция 500 кВ, принятая за балансирующий узел, обеспечивает связь с основными станциями системы. Вторым источником электроэнергии служат шины 220 кВ ТЭЦ. Электрическая схема сети представлена на рис.2.2.

Рис. 2.2 Электрическая схема сети

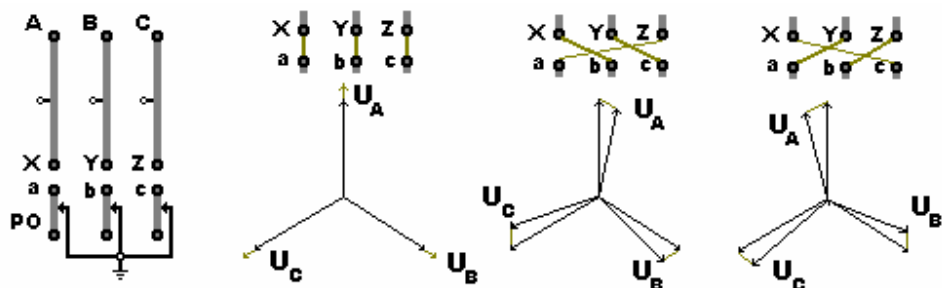


Рис. 2.3. Схемы включения РО

Предполагается, что на автотрансформаторах возможны следующие схемы регулирования коэффициентов трансформации:

- РПН устанавливается на выводах обмотки среднего напряжения;
- регулировочная обмотка с РПН включена в нейтраль по одной из 3-х схем (рис. 2.3).

На рис. 2.4 показана векторная диаграмма напряжений фазы А для «косого» регулирования при включении регулировочной обмотки по схеме XYZ – вса. Напряжение E обмотки РО, зависящее от положения РПН и включенного контактора, складывается с напряжением основных обмоток, что позволяет менять комплексный коэффициент трансформации.

$$\underline{U}_{BH} = \underline{U}_{BO} + \underline{E}_{PO}, \quad \underline{U}_{CH} = \underline{U}_{CO} + \underline{E}_{PO}$$

Исходные данные для расчета режима сети приведены в табл. 1– 3.

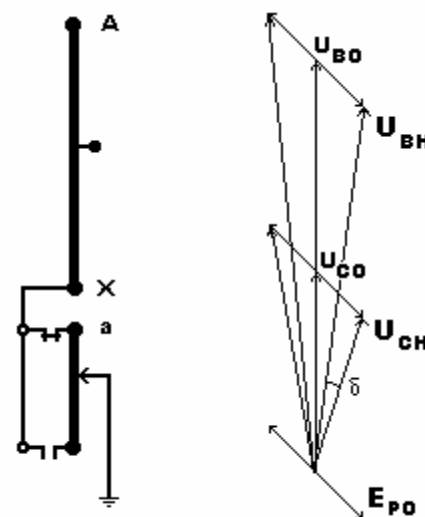


Рис. 2.4 Векторная диаграмма фазы А

Таблица 2.1

№ вар.	АТ1		АТ 2		АТ 3	
	марка	n	марка	n	марка	n
1	АТДЦТН- 500000/500/220	1	АТДЦТН- 125000/220/110	2	АТДЦТН- 250000/220/110	1
2	АОДЦТН- 3Х167000/500/220	1	АТДЦТН- 200000/220/110	1	АТДЦТН- 63000/220/110	2
3	АТДЦТН- 500000/500/220	1	АТДЦТН- 125000/220/110	1	АТДЦТН- 63000/220/110	2
4	АОДЦТН- 3Х167000/500/220	1	АТДЦТН- 250000/220/110	1	АТДЦТН- 200000/220/110	1
5	АТДЦТН- 500000/500/220	1	АТДЦТН- 250000/220/110	1	АТДЦТН- 125000/220/110	2
6	АОДЦТН- 3Х167000/500/220	1	АТДЦТН- 63000/220/110	2	АТДЦТН- 125000/220/110	1
7	АТДЦТН- 500000/500/220	1	АТДЦТН- 200000/220/110	1	АТДЦТН- 200000/220/110	1
8	АОДЦТН- 3Х167000/500/220	1	АТДЦТН- 250000/220/110	1	АТДЦТН- 250000/220/110	1

1. Оценить возможности оптимизации режима сети для схемы, представленной на рис. 2.2.

2. Составить схему замещения электрической сети : линии передач учесть П-образной схемой с параметрами $r_{л}, x_{л}, b_{л}$; автотрансформаторы Г-образной схемой с параметрами $\Delta P_x, \Delta Q_x, r_{ТЭ} = r_{ВЭ} + r_{СЭ}, x_{ТЭ} = x_{ВЭ} + x_{СЭ}$ и идеальными трансформаторами с $k_{ТВ-С}$. Расчет параметров линий передач и автотрансформаторов представить в виде таблиц; на схеме замещения указать: числовые значения всех элементов; составляющие (активную и реактивную) нагрузок в узлах, номинальные коэффициенты трансформации (для нулевых отпайк) идеальных трансформаторов.

3. Для автотрансформаторов записать значения номинальных напряжений на нулевых отпайках и пределы регулирования напряжения.

4. Составить направленный граф сети, пронумеровав узлы и ветви (базисный узел считается 0, остальные узлы и ветви можно нумеровать в любом порядке).

5. Подготовить карту режима для записи экспериментальных данных.

6. Рассчитать естественное распределение потоков мощности на участке 5-8-7-6, приняв $U_5 = U_6 = 110$ кВ.

7. Рассчитать экономическое распределение потоков мощности на том же участке.

8. Определить дополнительную ЭДС, введение которой в рассматриваемую сеть позволит перейти от естественного потокораспределения к экономическому.

Программное обеспечение

Программа REGY2.exe предназначена для расчета и анализа режима сети с несколькими ступенями напряжений с учетом комплексных коэффициентов трансформации. Имеет хорошую сходимость, что обеспечивается применением градиентного метода минимизации среднеквадратического небаланса узловых токов на первых итерациях, число N_g которых определяется пользователем, с переходом на метод Ньютона первого порядка на последующих итерациях.

Для сокращения времени расчета обращение матрицы Якоби осуществляется через dN итераций. Критерием окончания является норма вектора небаланса узловых токов $|I_{нб}| < eps$.

Ход итерационного процесса иллюстрируется графиком изменения $|I_{нб}|$. Вид экрана после входа в программу показан на рис. 2.5.

Главное меню включает следующие режимы: СЕТЬ, РЕЖИМ, ОПТИМИЗАЦИЯ, ВЫВОД, КОРРЕКТИРОВКА, ВЫХОД.

В режиме СЕТЬ осуществляется ввод информации по новой сети или вывод данных по ранее введенной сети. Любая сеть идентифицируется номером записи

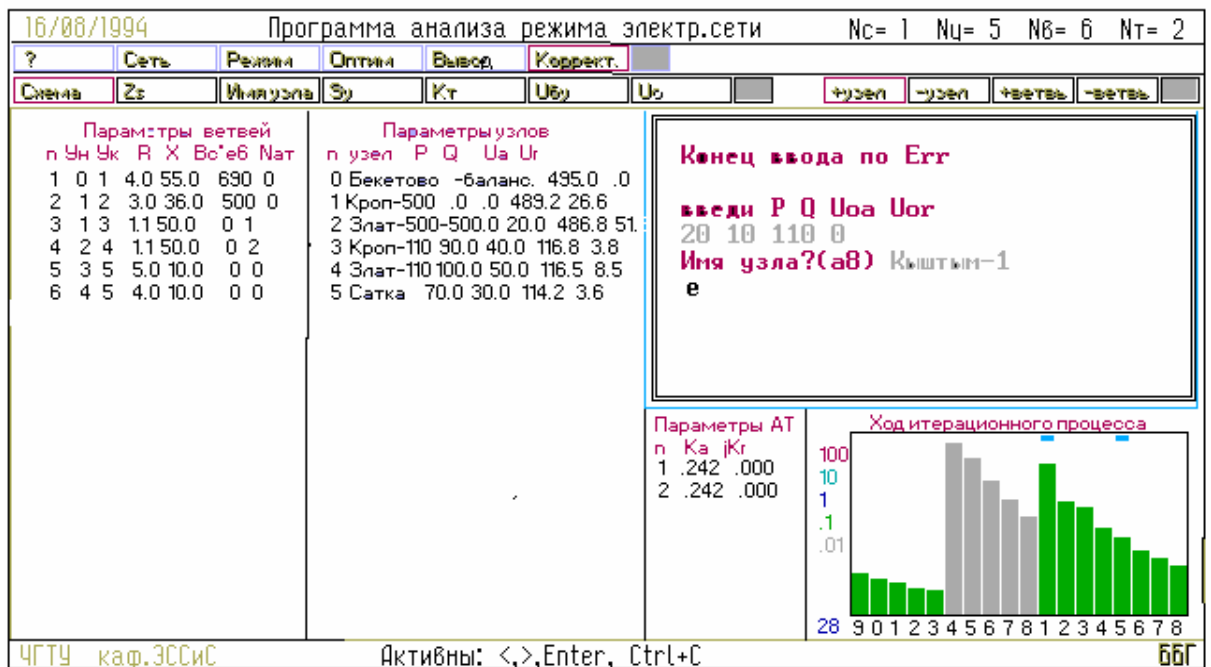


Рис. 2.5. Программа анализа режимов электросети

в файле прямого доступа с именем NETC. Пользователь должен знать свой номер и код, вводимый в формате $a4$ без пробела. Ввод исходной информации осуществляется в режиме диалога. Сначала вводится количество независимых узлов, ветвей и трансформаторов. Балансирующий узел имеет нулевой номер. Данные по ветвям включают узлы начала и конца ветви, сопротивления r , x и проводимость b , также номер автотрансформатора или 0 для ЛЭП. Проводимость вводится целым числом без множителя 10^6 . Данные по узлам включают: наименование узла, узловую мощность P , Q и начальное приближение составляющих узлового напряжения U_a , U_r . Данные по трансформатору включают только составляющие k_a , k_r комплексного коэффициента трансформации, определяемого отношением $\underline{k} = \frac{U_H}{U_B}$.

Пункт РЕЖИМ вызывает обращение к программе расчета.

В режиме ВЫВОД осуществляется вывод результатов расчета режима на экран дисплея или на печать.

В режиме ОПТИМИЗАЦИЯ может быть найдено экономическое потокораспределение, соответствующее однородной сети. По результатам

расчета могут быть определены точки размыкания контуров сети с целью снижения потерь, вызванных неоднородностью сети и уравнительным потоком.

В этом режиме можно также исследовать возможности регулирования коэффициента трансформации на одном из автотрансформаторов. При этом может учитываться регулирование под нагрузкой (РПН) по обычной схеме на стороне среднего напряжения или РПН с включением регулировочной обмотки РО в нейтраль АТ по схеме продольного или косоугольного регулирования.

В результате расчета можно построить зависимости потерь мощности и других параметров режима от номера отпайки.

В режиме КОРРЕКТИРОВКА возможны изменения параметров системы или режима. Выбор вида корректировки осуществляется по меню, которое содержит следующие пункты:

СХЕМА, Z_S , имя узла, S_y , K_b , U_{oy} , U_o . В пункте СХЕМА осуществляется добавление или удаление узлов или ветвей сети. Остальные пункты позволяют изменить обозначенные в меню параметры путем ввода их новых значений. Признаком окончания группы ввода изменений является нажатие в ответ на запрос данных любой буквенной клавиши, например, Е.

На рис. 2.5 показан общий вид экрана дисплея после расчета режима и корректировки путем добавления узла.

Предельный объём сети: число независимых узлов не более 35, ветвей - 40, трансформаторов - 8.

Порядок выполнения работы.

1. Активизировать программу REGY2.exe. Изучить инструкцию по работе с программой.

2. В режиме «Сеть» ввести исходные данные для исследуемой электрической сети. Номер очередной вводимой сети определяется совместно с преподавателем. Код выбирается произвольно.

При вводе данных осуществляется проверка корректности их. Для ветвей должно выполняться условие $r < x$. Емкостная проводимость линий должна вводиться целым числом в микросименсах. При вводе возможны следующие сообщения: $E1$, когда в трансформаторной ветви указан номер трансформатора, превышающий число введенных трансформаторов; $E2$, когда по концам ветви разные номинальные напряжения, а трансформатор не введен.

По завершении ввода всей информации по сети следует убедиться в достоверности введенных исходных данных. Для исправления ошибок необходимо использовать режим «Корректировка», который позволяет изменять любые параметры ветви (для линии и трансформатора) « Z_S »; мощности и напряжения в узлах « S_y », напряжение в базисном узле « U_{by} », конфигурацию сети «Сеть» и т.д.

3. Провести расчет режима и найти естественное распределение потоков мощности при номинальных коэффициентах трансформации – «Режим». На графике изменения модуля небаланса проследить ход итерационного процесса. Изменение масштаба шкалы по мере уменьшения небаланса определяется цветом: красный соответствует шкале 100 ед.; бирюзовый – шкале 10 ед.; синий – шкале 1 ед.; зеленый шкале 0,1 ед.; серый – шкале 0,01 ед.

Просмотреть расчетные параметры режима на экране. Если напряжения в узлах, потери мощности и $\text{tg}\varphi$ в балансирующем узле лежат в области рекомендуемых значений, необходимо распечатать результаты расчета и нанести на карту режима.

4. Исследовать влияние на режим сети регулирования коэффициента трансформации АТ1. С этой целью активизировать пункт меню «Оптимизация» и на запрос (1–5) ввести 2 или 4. От этого выбора зависят условия расчета режима сети (параметры N_g , N_0). Затем ввести номер регулируемого АТ, схему регулирования (РПН на стороне среднего напряжения или РО в нейтрали). После этого запрашиваются номинальные напряжения обмоток АТ. Для РПН далее вводят число ступеней регулирования, например, для ± 6 вводится число 6, и величина ступени в процентах. Для РО вводится ее номинальное напряжение, число ступеней и схема подключения с возможностью круговой перестановки фаз.

Затем предлагается возможность расставить не более 6 приборов для контроля параметров режима сети. В процессе расчета для каждой отпайки в окне выводятся результаты расчета. После заполнения окна и записи результатов для продолжения расчета следует нажать Enter.

По этим результатам можно проследить изменение режима и выбрать оптимальную отпайку и k_{T1} по критерию минимума потерь в сети с учетом или без учета ограничений по контролируемым параметрам режима. В режиме «Корректировка» установить найденный оптимальный k_{T1} , просчитать режим и нанести на карту.

5. С помощью последовательной обмотки РО на АТ2 выбрать схему включения, обеспечивающую рассчитанное значение уравнивающей ЭДС. Порядок исследования повторяет действия по пункту 4.

6. Рассчитать режим при выбранных оптимальных отпайках и сравнить его с режимом, определяющим естественное потокораспределение. Оценить эффективность различных способов регулирования на АТ.

Содержание отчета

1. Сформулировать цель работы, начертить электрическую схему, соответствующую варианту.
2. Рассчитать параметры схемы замещения.
3. Составить направленный граф сети, пронумеровав ветви и идеальные автотрансформаторы. Рекомендуется записать для каждой ветви r_i , x_i , и для элементов линии – b_i , для трансформаторных ветвей – k_T ; в узлах составляющие мощности нагрузок и напряжения.
4. Представить карту режима сети, обозначив на ней естественное и экономическое распределение мощностей, записать значение суммарных потерь мощности.
5. Представить графики изменения потерь мощности в зависимости от номера отпайки трансформатора.
6. Зафиксировать напряжения в выбранных предварительно контрольных точках сети в зависимости от номера отпайки для регулирования на автотрансформаторах.
7. Сформулировать условия, определяющие оптимальный режим работы электрической сети, соответствующей рассматриваемому варианту.

Контрольные вопросы.

1. Назначение системообразующих и распределительных сетей, их конфигурация.
2. Составить узловое уравнение для простейшей замкнутой сети.
3. Составить граф для любой замкнутой сети и матрицу узловых проводимостей.
4. Составить П-образную схему замещения линии и показать, как рассчитать токи и мощности при известном напряжении конце линии.
5. Как учесть идеальные трансформаторы при формировании матрицы узловых проводимостей?
6. Какие математические методы используются для решения узловых уравнений?
7. В чем заключается оптимизация режима сети?
8. Методы снижения потерь мощности в сети.
9. Для замкнутого контура рассчитать естественное распределение потоков мощности.
10. Для того же контура рассчитать экономическое распределение потоков мощности.
11. Мероприятия, обеспечивающие экономическое распределение потоков мощности в сети.
12. В каких сетях естественное и экономическое распределение потоков мощности совпадает?

13. Как влияет изменение коэффициента трансформации на распределение потоков мощности по линиям?

14. Чем ограничены допустимые уровни напряжения в сети с $U_{\text{ном}} \geq 110$ кВ?

15. Как влияет напряжение на нагрузочные потери, потери на корону и потери холостого хода трансформаторов?

Лабораторная работа № 3

КРУГОВЫЕ ДИАГРАММЫ МОЩНОСТИ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Цель работы: исследование режимов работы ЛЭП сверхвысокого напряжения и влияния на них поперечной и продольной компенсации параметров ЛЭП.

Теоретическая часть

Линии электропередачи с напряжением 330 кВ и выше относятся к **линиям сверхвысокого напряжения (СВН)**. Для таких линий характерна большая протяжённость (более 500 км) и значительная передаваемая мощность (более 500 МВА на одну цепь).

Главной особенностью передач СВН является необходимость **учёта распределённого характера параметров и волновых свойств линии**.

Однако для анализа работы таких линий могут использоваться и схемы замещения с сосредоточенными параметрами. Одной из них является П – образная схема (рис. 3.1), в которой сопротивление и проводимость определяются по формулам:

$$\underline{Z} = \underline{z}_c \operatorname{sh} \underline{\gamma} L, \quad \underline{Y} = \frac{2}{\underline{z}_c} \operatorname{th} \frac{\underline{\gamma} L}{2}. \quad (3.1)$$

Здесь:

$$\underline{z}_c = \sqrt{\frac{\underline{z}_0}{\underline{y}_0}} \quad \text{и} \quad \underline{\gamma} = \sqrt{\underline{z}_0 \underline{y}_0};$$

$$\underline{z}_0 = r_0 + jx_0 \quad \text{и} \quad \underline{y}_0 = g_0 + jb_0,$$

где r_0, x_0 – соответственно погонные активное и реактивное сопротивления линии; g_0, b_0 – погонные активная и ёмкостная проводимости линии; \underline{z}_c – волновое сопротивление линии; $\underline{\gamma}$ – коэффициент распространения электромагнитной волны; L – длина линии.

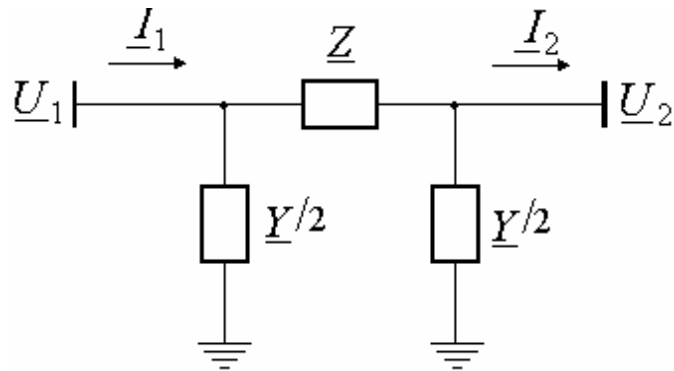


Рис. 3.1 П – образная схема замещения линии передачи

Для практических расчётов используются формулы, устанавливающие связь между параметрами линии и её схемы замещения:

$$\underline{Z} = \underline{z}_0 L \underline{k}_z, \underline{Y} = \underline{y}_0 L \underline{k}_y, \quad (3.2)$$

где

$$\underline{k}_z = \frac{\underline{z}_c \operatorname{sh} \gamma L}{\underline{z}_0 L} \quad \text{и} \quad \underline{k}_y = \frac{2 \operatorname{th} \frac{\gamma L}{2}}{\sqrt{\underline{z}_0 \underline{y}_0} L} \quad (3.3)$$

комплексные коэффициенты, учитывающие распределённость параметров по длине линии.

Для воздушных линий $L < 300$ км и кабельных $L < 50$ км коэффициенты \underline{k}_z и \underline{k}_y близки к единице, поэтому:

$$\underline{Z} = (r_0 + jx_0)L \quad \text{и} \quad \underline{Y} = (g_0 + jb_0)L.$$

При длинах линий от 300 до 1000 км поправочные коэффициенты могут вычисляться по приближённым формулам, полученным в результате преобразования выражений (3.3).

$$k_r = 1 - \frac{L^2}{3} x_0 b_0;$$

$$k_x = 1 - \frac{L^2}{6} \left(x_0 b_0 - r_0^2 \frac{b_0}{x_0} \right);$$

$$k_b = 0,5 \frac{3 + k_r}{1 + k_r}.$$

Считая, что сечение проводов ВЛ и погодные условия исключают возникновение короны на линии, принимают $g_0 = 0$. Для определения параметров схемы замещения (рис. 3.1) используются следующие выражения:

$$r = r_0 Lk_r, \quad x = x_0 Lk_x, \quad b = b_0 Lk_b. \quad (3.4)$$

Второй удобной формой расчётной модели является четырёхполюсник, содержащий один элемент (рис. 3.2), параметрами которого являются комплексные константы \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} , связанные с параметрами реальной линии соотношениями:

$$\underline{A} = \underline{D} = 1 + \frac{\underline{ZY}}{2},$$

$$\underline{B} = \underline{z} \quad \text{и} \quad \underline{C} = \underline{y} \left(1 + \frac{\underline{zy}}{4} \right), \quad (3.5)$$

где:

$$\underline{Z} = \frac{r_0 Lk_r}{n} + j \frac{x_0 Lk_x}{n} \quad \text{и} \quad \underline{Y} = j \frac{b_0 Lk_b}{n}.$$

Здесь: n – число параллельно проложенных линий.

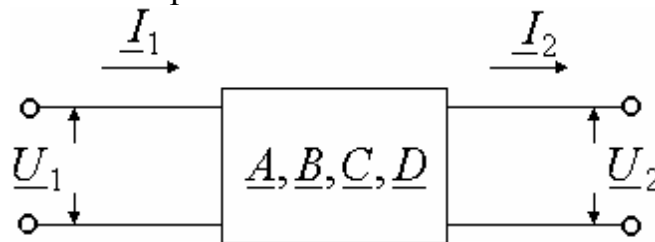


Рис. 3.2 Схема замещения линии передачи – четырёхполюсник

Примером линии сверхвысокого напряжения является **межсистемная связь**, соединяющая между собой две (мощные) подстанции системного значения. Такая связь может иметь две и более цепей и сооружается с номинальным напряжением 330 кВ и выше. Потоки активной мощности в ней могут быть как однонаправленными, так и реверсивными. Поскольку мощность, передаваемая по линии системной связи, в большинстве случаев меньше суммарной установленной мощности генераторов в каждой из систем, общепринятым является их представление шинами неизменного напряжения \underline{U}_1 , \underline{U}_2 . Для увеличения пропускной способности передачи может оказаться необходимым подключение установки продольной ёмкостной компенсации (УПК), а для ограничения напряжений – шунтирующих реакторов Р.

Таким образом, межсистемная связь в общем случае включает в себя не только линию электропередачи, но и дополнительные устройства, обеспечивающие её нормальное функционирование в различных режимах (рис. 3.3 и рис. 3.4).

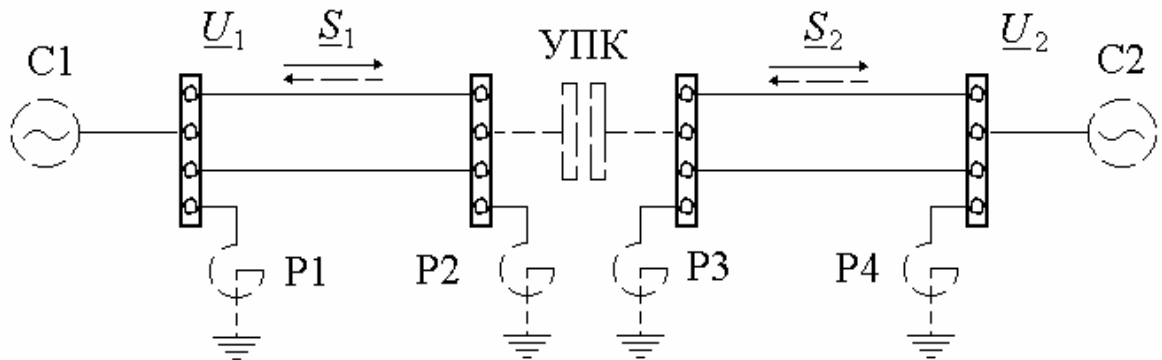


Рис. 3.3 Пример межсистемной связи с установкой продольной ёмкостной компенсации (УПК) и шунтирующими реакторами (P1 – P4)

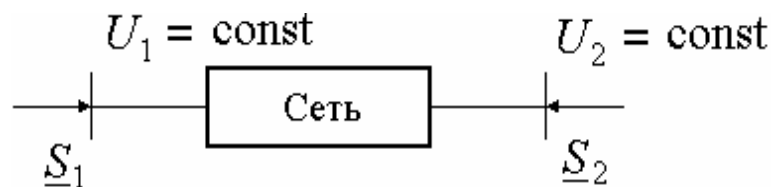


Рис. 3.4 Обобщённое представление электрической сети с двумя источниками питания

Одним из инструментов для анализа режимных свойств таких сетей являются **круговые диаграммы мощности**.

Круговые диаграммы удобно использовать, когда необходимо получить представление об изменении **модулей и аргументов комплексных полных мощностей \underline{S}_1 и \underline{S}_2** при изменении угла сдвига векторов напряжений на **шинах источников при неизменности их модулей** для передач, не имеющих промежуточных отборов. При этом в качестве расчётной модели выбирают четырёхполюсник.

Если связь между системами осуществляется линией, не содержащей дополнительных устройств, то параметры четырёхполюсника определяются по формулам (3.5). При наличии УПК и P (рис. 3.3) необходимо представить электропередачу в виде трёх последовательно включённых четырёхполюсников и рассчитать параметры эквивалентного четырёхполюсника.

Проиллюстрируем построение круговых диаграмм на примере передачи, представленной эквивалентным четырёхполюсником (рис. 3.2). Для него справедливы общие уравнения пассивного четырёхполюсника:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= A\underline{U}_2 + \sqrt{3}B\underline{I}_2; \\ \underline{I}_1 &= C\frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3}} + D\underline{I}_2. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Здесь: вектор напряжения \underline{U}_1 опережает \underline{U}_2 на угол δ ; положительное направление мощностей \underline{S}_1 и \underline{S}_2 выбрано одинаковым.

Определив из (3.6) токи, получим для расчёта потоков мощности \underline{S}_1 и \underline{S}_2 при заданных напряжениях \underline{U}_1 и \underline{U}_2 следующие формулы:

$$\begin{aligned}\underline{S}_1 &= U_1^2 \frac{\underline{D}^*}{\underline{B}^*} - \frac{\underline{U}_1 \underline{U}_2^*}{\underline{B}^*}; \\ \underline{S}_2 &= -U_2^2 \frac{\underline{A}^*}{\underline{B}^*} + \frac{\underline{U}_1 \underline{U}_2}{\underline{B}^*}.\end{aligned}\quad (3.7)$$

Совместим вектор напряжения \underline{U}_2 с действительной осью $\underline{U}_2 = \underline{U}_2^* = U_2$, запишем в показательной форме вектор $\underline{U}_1 = U_1 e^{j\delta}$ и комплексные константы четырёхполюсника: $\underline{A} = A e^{j\psi_A}$, $\underline{B} = B e^{j\psi_B}$ и $\underline{D} = D e^{j\psi_D}$, тогда выражение (3.7) можно переписать в виде:

$$\begin{aligned}\underline{S}_1 &= U_1^2 \frac{D}{B} e^{j(\psi_B - \psi_D)} - \frac{U_1 U_2}{B} e^{j(\psi_B + \delta)}, \\ \underline{S}_2 &= -U_2^2 \frac{A}{B} e^{j(\psi_B - \psi_A)} + \frac{U_2 U_1}{B} e^{j(\psi_B - \delta)} \quad \text{или} \\ \underline{S}_1 &= \underline{\gamma}_1 - \rho e^{j(\psi_B + \delta)}, \quad \underline{S}_2 = -\underline{\gamma}_2 + \rho e^{j(\psi_B - \delta)}.\end{aligned}\quad (3.8)$$

По уравнениям (3.8) для фиксированного значения угла δ построены векторные диаграммы мощностей \underline{S}_1 и \underline{S}_2 (рис. 3.5).

При неизменных модулях напряжений по концам линии формулы (3.8) содержат одну переменную величину – угол δ . Этим формулам при изменении угла δ отвечают графики, представляющие для каждой мощности \underline{S}_1 и \underline{S}_2 окружность радиуса ρ . Они то и называются **круговыми диаграммами мощности**.

При изменении угла δ концы векторов мощности \underline{S}_1 и \underline{S}_2 скользят по дуге соответствующей окружности, что позволяет для каждого угла δ определить мощности \underline{S}_1 и \underline{S}_2 , а также составляющие этих мощностей P_1, P_2 и Q_1, Q_2 .

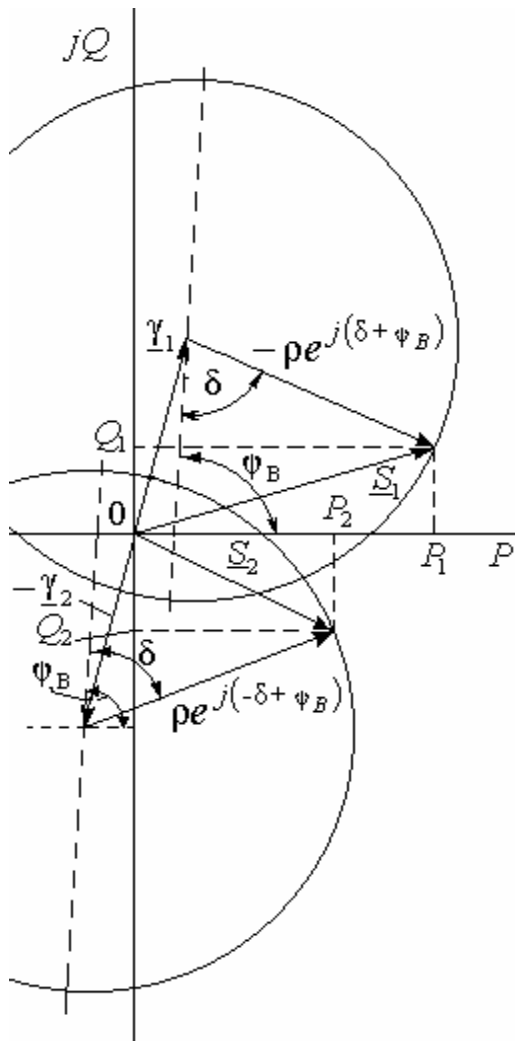


Рис 3.5 Круговая диаграмма линии передачи

Проанализируем соотношения между параметрами режима для системообразующей связи, выполненной линией электропередачи без дополнительных устройств.

Уравнения (3.8), по которым строятся круговые диаграммы, связывают 7 параметров режима: $P_1, Q_1, P_2, Q_2, U_1, U_2$ и δ . Для получения однозначного решения три из них должны быть предварительно заданы. Как отмечалось выше, это U_1, U_2 и P_1 (или P_2), остальные находятся из круговых диаграмм.

Для реальных передач величины напряжений U_1 и U_2 разнятся незначительно, так как верхний предел ограничивается допустимым рабочим напряжением, а нижний – условиями регулирования напряжения. Если учесть, что для электропередач СВН $r \ll x$, т.е. угол ψ_B близок к 90° , то разница напряжений по величине не оказывает влияния на направление потока активной

Однако на практике обычно задаётся не угол, а какая либо **из активных мощностей** P_1 (или P_2), что отвечает заданию диспетчерских графиков перетоков активной мощности в соответствии с условиями её баланса в связанных электропередачей системах. По значению мощности P_1 (или P_2) определяется угол δ между векторами напряжений и остальные параметры режима системообразующей передачи: P_2 (или P_1), $Q_1, Q_2, S_1, S_2, \Delta P, \Delta Q$.

По диаграмме можно легко определить максимальные значения передаваемых по линии мощностей.

Параметры режима передачи формально зависят от положения векторов $\underline{\gamma}_1$ и $\underline{\gamma}_2$ и величины радиуса ρ , которые являются функциями модулей напряжений U_1 и U_2 и постоянных эквивалентного четырёхполюсника $\underline{A}, \underline{B}, \underline{C}, \underline{D}$. Последние определяются параметрами участков электропередачи и дополнительных устройств (шунтирующих реакторов, УПК), которые входят в рассматриваемую схему.

мощности. Например, изменение напряжения \underline{U}_1 приводит к изменению положения координаты центра круговой диаграммы для мощности \underline{S}_1 и к синхронному изменению радиуса обеих диаграмм. При изменении \underline{U}_2 картина обратная.

Таким образом при фиксированном угле δ между векторами напряжений \underline{U}_1 и \underline{U}_2 активная мощность может передаваться **при любом соотношении между модулями напряжений по концам линии**: при $U_1 = U_2$, при $U_1 > U_2$ и при $U_1 < U_2$. **Передача активной мощности всецело определяется величиной угла δ ($r \ll x$) и происходит в направлении от узла с опережающим вектором напряжения к узлу с отстающим вектором напряжения.**

Разность между P_1 и P_2 представляет собой суммарные активные потери мощности в линии:

$$\Delta P_{\Sigma} = P_1 - P_2.$$

Суммарные потери включают потери на корону и на нагрев проводов. При $\delta = 0$ и $U_1 = U_2$ потери минимальны и включают в основном потери на корону, т.е. в линию поступают одинаковые активные мощности от обоих источников питания, каждая из которых идёт на покрытие половины потерь на корону и частично на нагрев за счёт ёмкостных токов. Чем больше передаваемая по линии мощность, тем большую долю в ΔP_{Σ} составляют потери на нагрев проводов. При достижении предельной передаваемой по линии активной мощности потери её будут наибольшими по сравнению с остальными режимами. Экономия потерь мощности в реальной линии передачи при больших потерях на корону ($r \neq 0$ и $g \neq 0$) может быть достигнута за счёт снижения напряжения по концам линии (рис. 3.5). Однако это приводит к уменьшению радиусов окружностей для мощностей \underline{S}_1 и \underline{S}_2 и соответственно к уменьшению передаваемой мощности.

Предельная передаваемая по линии мощность является одним из основных показателей, характеризующих передачу СВН. Как видно из рис. 3.5, предельная мощность $P_{\text{пр}}$, примерно, равна радиусу круговых диаграмм ρ . Величина её в большей мере определяется длиной линии. Действительно, постоянная четырёхполюсника $\underline{B} = \underline{k}_z \underline{z}_0 L$ и чем больше длина линии, тем больше \underline{B} и меньше передаваемая по линии мощность (3.7).

Поэтому для электропередач большой протяжённости возникает задача **увеличения пропускной способности**. Увеличение $P_{\text{пр}}$ может быть достигнуто, в частности, путём компенсации индуктивного сопротивления линии посредством последовательного включения батареи конденсаторов. Установку продольной ёмкостной компенсации размещают обычно в середине ЛЭП. При степени компенсации $k = \frac{x_c}{x_L} = 0,5$ $P_{\text{пр}}$ увеличивается примерно

вдвое (3.8).

Для электропередач СВН большое значение имеют **перетоки реактивной мощности**.

При фиксированных напряжениях U_1 и U_2 величины реактивных мощностей однозначно определяются передаваемой активной мощностью В общем случае баланс реактивной мощности в электропередаче СВН зависит от соотношения генерации и потерь реактивной мощности, вызываемых наличием в схеме замещения ёмкостной проводимости и индуктивного сопротивления.

Суммарные потери реактивной мощности в передаче ΔQ_{Σ} находятся по круговой диаграмме (рис. 3.5) и равны:

$$\Delta Q_{\Sigma} = \Delta Q_x - Q_c,$$

где ΔQ_x – потери в продольной ветви схемы замещения, Q_c – зарядная мощность линии.

Потери ΔQ_x могут быть определены при известных потерях ΔP_r по формуле:

$$\Delta Q_x = \Delta P_r \frac{x}{r}.$$

При передаче по линии мощности, равной натуральной, и $U_1 = U_2$ (рис. 3.5) $Q_1 = Q_2 = 0$ реактивная мощность равна нулю, т.е. потери реактивной мощности компенсируются зарядной мощностью линии. При передаче активной мощности больше натуральной потоки реактивной мощности направлены от источника к центру линии, зарядной мощности недостаточно для покрытия потерь. При передаче активной мощности меньше натуральной потоки реактивной мощности направлены из линии к источникам питания, т.е. в линии существует избыток реактивной мощности $Q_c > \Delta Q_x$. Величины реактивной мощности Q_1 и Q_2 можно регулировать, меняя U_1 или U_2 , при этом изменяется и направление потоков Q_1 и Q_2 .

Зарядные мощности 1 км линии передачи при номинальных напряжениях 500 – 1150 кВ достигают, соответственно 1 или 5 МВАр. Проблемы компенсации реактивной мощности при передаче малых активных мощностей, а особенно в режиме холостого хода являются актуальными для линий большой длины. **Одним из способов уменьшения зарядной мощности линии является установка шунтирующих реакторов.**

Немаловажным фактором для передач СВН является распределение напряжения по её длине в различных режимах работы. При фиксированных напряжениях U_1 и U_2 напряжения в промежуточных точках определяются величиной передаваемой активной мощности, влияющей на соотношение между генерацией и потерями реактивной мощности в сети. При передаче натуральной мощности и $U_1 = U_2$ напряжение по длине линии ($r \ll x$ и $g \neq 0$) не меняется. При передаче мощности больше натуральной напряжение в средней точке линии уменьшается. При снижении передаваемой мощности напряжение в средней точке линии возрастает и достигает максимума, если потоки активной мощности в линии отсутствуют.

Наибольшую опасность представляет режим холостого хода линии. Напряжение на разомкнутом конце резко возрастает с увеличением длины линии. При длинах около 500 км напряжение $U_{2(хх)}$ превышает напряжение U_1 на 15%, а при $L = 1000$ км почти в 2 раза. Снижения напряжения можно достичь, подбирая **места установки и мощности шунтирующих реакторов.**

Рассмотренные теоретические положения следует проверить экспериментально в процессе выполнения лабораторной работы.

Объект исследования

В работе исследуется электропередача, имеющая две цепи, выполненные расщеплённым проводом (рис. 3.3). Марка провода, длина линии и номинальное напряжение передачи для каждой бригады задаются в табл. 3.1.

Расстояние между проводами в фазе $a = 40$ см.

Линия делится на два участка. С целью повышения пропускной способности передачи (передаваемой по линии мощности) в середине её включаются последовательно конденсаторные батареи, рассчитанные на наибольшее рабочее напряжение и наибольший ток линии. Такой комплект конденсаторных батарей называется установкой продольной компенсации и предназначается для уменьшения индуктивного сопротивления линии. Для снижения перетоков реактивной мощности на передающем конце передачи и на посту УПК возможно включение шунтирующих реакторов, компенсирующих полностью или частично ёмкостную проводимость ВЛ.

Таблица
3.1

№ бригады	$U_{\text{ном}}$, кВ	Марка провода	Длина линии L , км	Расстоян. между фазами D , м	Кол – во параллельных линий	Расположение проводов на опоре
1	500	АС–3×500/64	1000	10,5	2	Горизонт.
2	500	АС–3×400/93	800	12	2	Горизонт.
3	500	АС–3×500/27	600	11	2	Горизонт.
4	500	АС–4×240/56	900	10,5	2	Горизонт.
5	500	АС–4×300/48	700	10	2	Горизонт.
6	500	АС–4×400/93	1200	12	2	Горизонт.
7	500	АС–3×500/64	1500	12	2	Горизонт.
8	500	АС–3×400/93	1000	11	2	Горизонт.

Расчётная часть работы

1. Сформулировать цель работы. Нарисовать схему передачи, указав назначение всех устройств в схеме. Рассмотреть возможные режимы передачи и дать им краткую характеристику.

1.1. Рассчитать погонные параметры передачи:

$$r_0 = r_0^{(1)} / k, \quad x_0 = 0,144 \lg(2D_{\text{ср.г}} / d_{\text{эк}} + 0,0157 / k),$$

$$d_{\text{эк}} = 2^k \sqrt[3]{0,5 d a^{k-1}}, \quad D_{\text{ср.г}} = \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{31}},$$

$$b_0 = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg\left(\frac{2D_{\text{ср.г}}}{d_{\text{эк}}}\right)}, \quad g_0 = \frac{\Delta P_{k0}}{U_{\text{ном}}^2}.$$

Здесь: $r_0^{(1)}$ – активное сопротивление одного провода в фазе [3], Ом/км ; k – количество проводов в фазе; $D_{\text{ср.г}}$ – среднее геометрическое расстояние между фазами; D_{12}, D_{23}, D_{31} – расстояния между проводами фаз; $d_{\text{эк}}$ – эквивалентный диаметр расщеплённого провода; d – диаметр одного провода в фазе [3]; ΔP_{k0} – потери на корону на 1 км длины линии [3], кВт/км; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение.

1.2. Определить волновое сопротивление линии \underline{z}_c и натуральную мощность – $P_{\text{НАТ}}$.

$$\underline{z}_c = \sqrt{\frac{\underline{z}_0}{\underline{y}_0}}, \text{ где } \underline{z}_0 = r_0 + jx_0, \underline{y}_0 = g_0 + jb_0 = jb_0.$$

$$P_{\text{НАТ}} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{z_c}.$$

2. Составить П – образную схему замещения передачи (дополнительных устройств УПК и шунтирующих реакторов в передаче нет). Сосредоточенные параметры схемы замещения рассчитываются по формулам (3.4).

3. Составить схему четырёхполюсника и определить его постоянные по формулам (3.5).

4. Построить круговую диаграмму для передачи. Определив по формулам (3.8) положение центров окружностей $\underline{\gamma}_1$ и $\underline{\gamma}_2$ и их радиус ρ .

Круговую диаграмму строить на миллиметровой бумаге (формат А4). Рекомендуемый масштаб 50...100 МВт/мм.

По круговой диаграмме рассчитать значения мощности в начале и конце передачи для угла δ $0^0, 60^0, 120^0, 180^0, 240^0, 300^0, 360^0$ и заполнить соответствующие графы табл. 3.2.

Таблица
1.2

δ	$P_1, \text{ МВт}$		$Q_1, \text{ МВАр}$		$P_2, \text{ МВт}$		$Q_2, \text{ МВАр}$	
	Опыт	Расчёт	Опыт	Расчёт	Опыт	Расчёт	Опыт	Расчёт

2. Представить передачу в виде двух последовательно включенных звеньев, подключить УПК и шунтирующие реакторы (рис. 3.6) и определить её параметры:

$$r_{\text{л}} = \frac{r_0 \frac{L}{2} k_r}{n}, \quad x_{\text{л}} = \frac{r_0 \frac{L}{2} k_x}{n} \quad \text{и} \quad b_{\text{л}} = b_0 \frac{L}{2} k_b n.$$

Принимая 50% – ю степень компенсации индуктивного сопротивления передачи, сопротивление конденсаторов в УПК составит:

$$x_{\text{УПК}} = 0,5x_{\text{л}}.$$

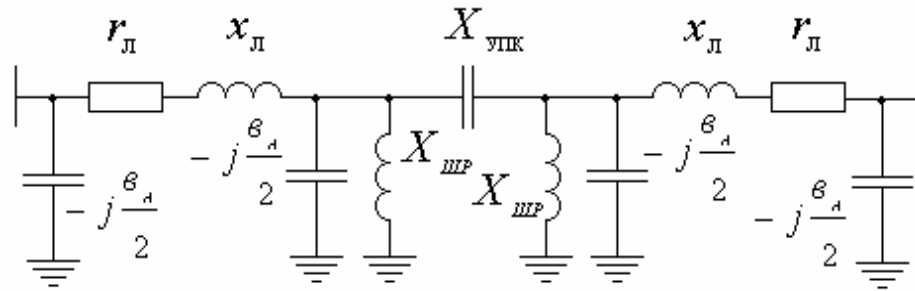


Рис. 3.6. Схема замещения передачи

Сопротивление шунтирующего реактора подобрать следующим образом: шунтирующий реактор должен скомпенсировать примерно 1/4 зарядной мощности линии, а $Q_{\text{ном шр}}$ – номинальная мощность одной группы

реакторов равна 3×60 МВАр. Тогда $\sum_1^k Q_{\text{ном шр}} \approx \frac{1}{4} Q_c$.

Здесь: k – количество групп реакторов, установленных на подстанции,

$$x_{\text{шр}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{\sum Q_{\text{ном шр}}}.$$

Программное обеспечение

Работа выполняется по программе, записанной в файл под именем ELS5.exe или в библиотеку под именем ELS5.lib.

После активизации файла на экран выводится фронтальная панель виртуального устройства (рис. 3.7).

В левой верхней части располагается расчётная схема исследуемой передачи с изображением первичного двигателя ТЭС, виртуальными выключателями, позволяющими коммутировать шунтирующие реакторы и УПК. Здесь же размещены индикаторы основных параметров режима.

В правой части размещаются цифровые задатчики ввода параметров системы. Для ЛЭП задаются удельные сопротивления r_0, x_0 , проводимость b_0 и длины участков L_1 и L_2 в км. Для компенсирующих устройств необходимо ввести сопротивление УПК в Ом и одинаковую для всех номинальную мощность группы реакторов в МВАр.

Справа в нижней части экрана размещаются задатчики регуляторов скорости и возбуждения, с помощью которых можно менять активную и реактивную мощность отправного конца передачи. В центре этой части расположены задатчики удельных потерь на корону на участках ЛЭП, задатчик напряжения U_2 а также переключатель перехода в режим круговых диаграмм. Индикаторы

рядом с диаграммой показывают положения центров окружностей и радиус ρ . В самой нижней полосе размещены индикаторы постоянных четырёхполосников, которые располагаются в массивах из восьми действительных чисел.

Порядок выполнения работы

1. Активизировать программу. Установить на фронтальной панели параметры системы $r_0, x_0, b_0, L_1, L_2, X_{\text{УПК}}, Q_{\text{ном шр}}$ Зашунтировать УПК.

2. Исследовать режим передачи без компенсирующих устройств при $U_1 = U_2 = 500$ кВ в диапазоне передаваемой мощности от 0,5 до 1,1 $P_{\text{нат}}$. С этой целью запустить программу в режиме циклического решения, установить $U_2 = 500$ кВ, меняя установку АРС установить желаемую активную мощность и с помощью АРВ реактивную мощность. Записать постоянные четырёхполосников. Снять круговую диаграмму. Определить предельную передаваемую мощность. Для каждой исследуемой мощности записать параметры режима.

3. Исследовать режим передачи с вводом УПК. Для этого отключить шунтирующий батарею выключатель. Записать постоянные четырёхполосников. Снять круговую диаграмму, определить предел мощности передачи.

Записать основные параметры режима при тех же передаваемых мощностях, что и в п. 2.

4. Ввести на УПК шунтирующие реакторы и повторить исследование по п. 2.. Оценить влияние реакторов на режим в зависимости от передаваемой мощности.

5. Исследовать режим холостого хода передачи при сохранении связи с системой и $U_2 = 500$ кВ. Имитация отключения на отправном конце осуществляется путём подбора таких уставок АРС и АРВ, при которых нагрузка S_1 будет близка к нулю.

Оценить влияние реакторов на распределение напряжения по передаче.

6. Исследовать режим включения передачи на параллельную работу с системой выключателями на приёмном конце.

Такой режим обеспечивается подбором уставок АРВ и АРС таким образом, чтобы при $U_2 = 500$ кВ поток мощности S_2 стал равным нулю.

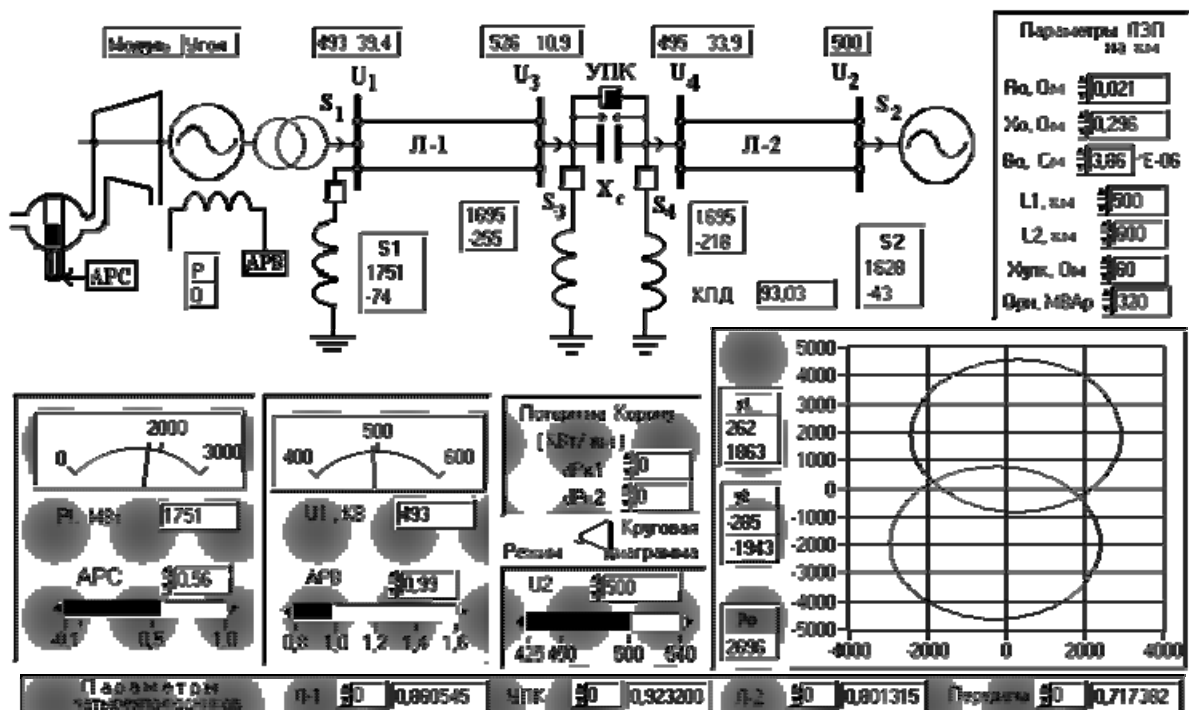


Рис. 3.7 Фронтальная панель виртуального устройства

Контрольные вопросы

1. Назвать схемы замещения, которые используются при анализе электропередач СВН. Указать достоинства и недостатки названных схем и области их применения.
2. Как рассчитать параметры четырёхполюсника через параметры П – образной схемы замещения?
3. Каким образом учитывается при расчёте распределённый характер параметров линии по длине?
4. Физический смысл параметров П – образной схемы замещения и постоянных четырёхполюсника.
5. Как составить схему замещения идеальной линии передачи. Определить постоянные четырёхполюсника для этой линии.
6. Построить круговую диаграмму для электропередачи.
7. Построить круговую диаграмму для идеальной линии.
8. Каким образом используются круговые диаграммы для расчёта параметров режима в реальной передаче?
9. Как найти по круговой диаграмме потери активной и реактивной мощности?
10. Показать на круговой диаграмме параметры режима, соответствующие передаче по линии натуральной мощности.

11. То же при передаче по линии мощности больше натуральной.
12. То же при передаче по линии мощности меньше натуральной.
13. Как определить по круговой диаграмме предельную передаваемую по линии мощность?
14. Каким образом можно увеличить передаваемую по линии активную мощность?
15. Как влияют шунтирующие реакторы на величину передаваемой по линии активной мощности?
16. Как изменяется напряжение на разомкнутом конце линии в режиме холостого хода?

Лабораторная работа № 4

МЕХАНИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ МОНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОВОДОВ

Цель работы: исследование влияния климатических условий работы на механическую прочность монометаллических проводов воздушных линий электропередач; выбор расчётных условий для механического расчёта и монтаж проводов в заданном пролёте.

Теоретическая часть

Механическая прочность воздушных линий (ВЛ)—это способность проводов, грозозащитных тросов и опор выдерживать механические нагрузки от собственного веса, ветра, гололёдных образований, температуры. При этом механические напряжения проводов и тросов, а также их стрелы провеса не должны превышать допустимых значений в любых точках по длине пролёта при различных климатических условиях в районе сооружения линии.

Номинальное напряжение ВЛ и сечение проводов выбираются на основании электрических расчётов. В соответствии с принятыми величинами подбираются унифицированные опоры различных назначений, механическая прочность которых обеспечивается, если все весовые, ветровые и габаритные пролёты по трассе линии не превысят нормируемых для каждой опоры значений. Таким образом при конструировании ВЛ основное внимание уделяется расчётам по условиям механической прочности проводов и грозозащитных тросов.

Повреждения конструкции ВЛ возможны в результате внутренних и атмосферных перенапряжений, гололёдных образований на проводах, действия ветра, изменения температуры, вибрации и «пляски» проводов, загрязнения воздуха.

Влияние указанных факторов на механическую прочность проводов и тросов учитывается **расчётными климатическими условиями**. Карты районирования

территории по данным метеонаблюдений и характеристики климатических условий приводятся в [1]. Расчёты конструктивной части элементов ВЛ выполняются при неблагоприятных сочетаниях климатических условий, исходя из их повторяемости 1 раз в 15 лет для ВЛ 500 кВ, 1 раз в 10 лет для ВЛ 6–330 кВ и 1 раз в 5 лет для ВЛ 3 кВ и ниже.

Расчёты проводов и тросов проводят для нормальных режимов работы, когда все провода и тросы целы, и аварийных, возникающих при обрывах проводов и тросов.

В нормальных режимах рекомендуется учитывать следующие нормативные сочетания климатических условий:

- высшая температура воздуха $\theta_{\text{нб}}$, ветра и гололёда нет;
- низшая температура воздуха $\theta_{\text{нм}}$, ветра и гололёда нет;
- среднегодовая температура воздуха $\theta_{\text{ст}}$, ветра и гололёда нет;
- провода и тросы покрыты гололёдом, толщина стенок гололёда $\epsilon_{\text{Г}}$, температура гололёдообразования $\theta_{\text{Г}} = -5^{\circ}\text{C}$;
- наибольший скоростной напор ветра $q_{\text{внб}}$, гололёда нет, температура воздуха $\theta_{\text{г}}$ (может быть принята -5°C);
- провода и тросы покрыты гололёдом $\epsilon_{\text{Г}}$, $\theta_{\text{Г}} = -5^{\circ}\text{C}$, скоростной напор $0,25 q_{\text{внб}}$.

В полном объёме нормативные сочетания климатических условий для нормальных и аварийных режимов приведены в [2].

Провода и опоры ВЛ находятся под воздействием механических сил, которые изменяются в очень широких пределах и имеют вероятностный характер. Например, нагрузка от гололёда на провод в пролёте может изменяться от нуля до нескольких тонн, температура воздуха от $+40$ до -40°C , ветер может отсутствовать и иметь ураганную силу. В результате в проводах возникают температурные и упругие механические напряжения.

Все указанные климатические факторы при расчётах ВЛ на механическую прочность учитываются с помощью удельных механических нагрузок на провода. Аналогичный расчёт проводится для грозозащитных тросов.

Под удельной механической нагрузкой понимают распределённую вдоль провода в пролёте механическую нагрузку, отнесённую к единице длины и сечения. При определении удельные нагрузки удобно выражать в Ньютонах, отнесённых к проводу длиной 1 м и сечением 1 мм^2 , или в Па/м, когда длина провода берётся 1 м, сечение 1 м^2 .

С учётом климатических условий рассчитывают 7 удельных нагрузок (рис. 4.1).

Удельная нагрузка от веса провода зависит от материала провода (рис. 4.1,а):

$$\gamma_1 = 9,81 \frac{M_n}{F_p} = \frac{G_n}{F_p},$$

где $9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение силы тяжести; M_n – масса провода [3], F_p – расчётное сечение провода (отличается от номинального) [3].

Удельная нагрузка от веса гололёда определяется при условии, что стенка гололёда ϵ_r (рис. 4.1, б) вокруг провода диаметром d имеет одинаковую толщину и плотность льда $g_0 = 900 \text{ кг/м}^3$:

$$\gamma_2 = \frac{9,81 g_0 \pi \epsilon_r (d + \epsilon_r)}{F_p}.$$

Удельная нагрузка от собственного веса провода и гололёда (рис. 4.1, в):

$$\gamma_3 = \gamma_1 + \gamma_2.$$

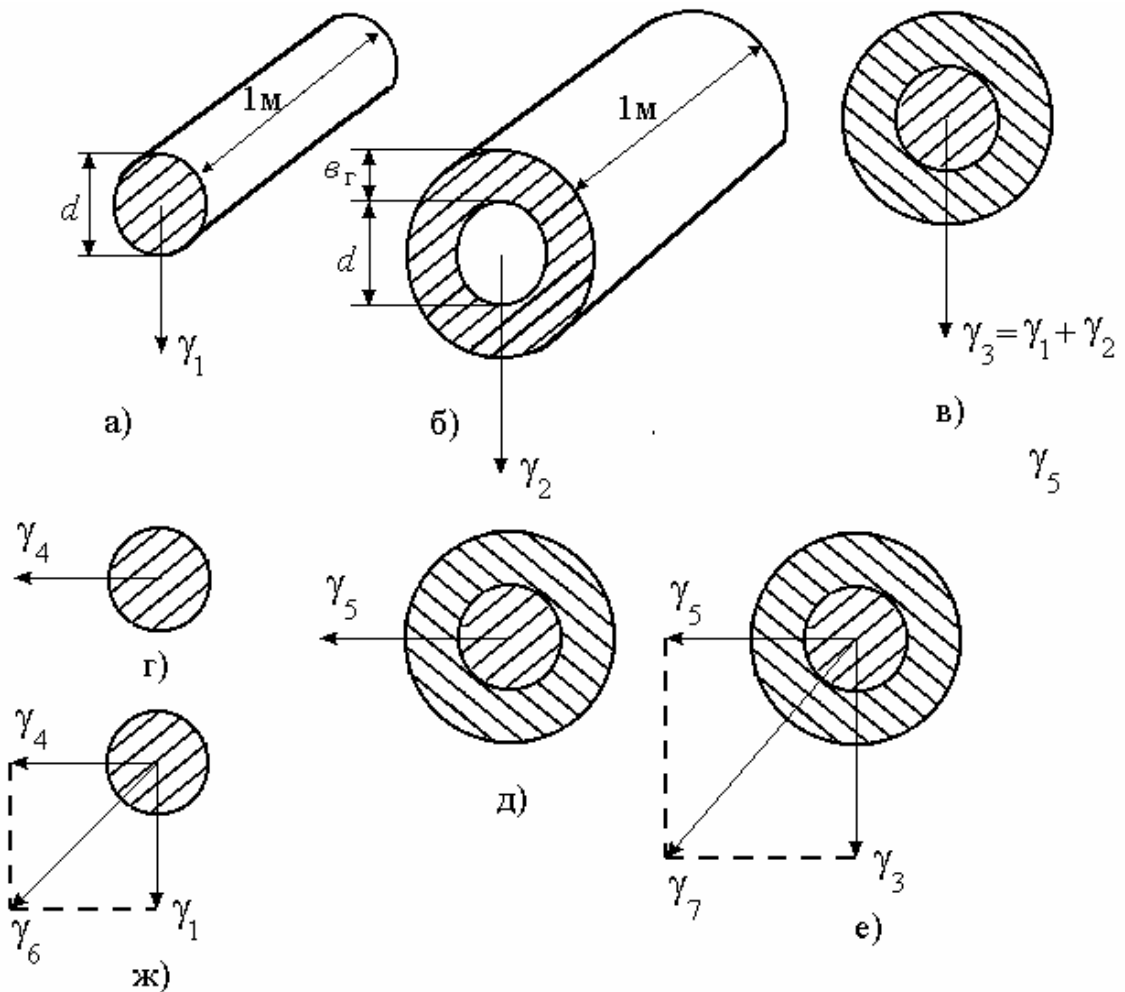


Рис.4.1 Удельные нагрузки: а– от веса провода; б– от веса гололёда; в –от веса провода и гололёда; г – от давления ветра на провода; д– от давления ветра на провода с гололёдом, ж– от веса провода и давления ветра; е– от веса провода, гололёда и давления ветра.

Удельная нагрузка от давления ветра на провод без гололёда (рис. 4.1, г) направлена горизонтально и перпендикулярно к трассе линии:

$$\gamma_4 = \frac{k_l \alpha C_x q_v d}{F_p},$$

где k_l – коэффициент, учитывающий влияние длины пролёта; α – коэффициент неравномерности скоростного напора по пролёту; C_x – аэродинамический коэффициент лобового сопротивления провода, q_v – скоростной напор.

Удельная нагрузка от давления ветра на провод с гололёдом (рис. 4.1, д):

$$\gamma_5 = \frac{k_l \alpha C_x q_v (d + 2e_r)}{F_p}$$

Комбинированные нагрузки: удельная нагрузка от веса провода и давления ветра (рис. 4.1, ж):

$$\gamma_6 = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_4^2},$$

удельная нагрузка от веса провода, гололёда и ветра (рис. 4.1, е):

$$\gamma_7 = \sqrt{\gamma_3^2 + \gamma_5^2}.$$

В зависимости от сочетания климатических условий наибольшей может быть любая из нагрузок γ_6 или γ_7 .

Зная удельную нагрузку γ_i , определяют силу тяжения провода в пролёте:

$$T_i = \gamma_i F_p L \quad \text{или} \quad T_i = \gamma_i F_p l,$$

т.к. длина провода L (рис. 4.2), отличается от длины пролёта l не более, чем на 0,1–0,3%.

Провод в пролёте можно рассматривать как **идеальную гибкую нить или цепную линию**. И в том и в другом случае тяжение T_0 и напряжение σ_0 в нижней точке провисания провода меньше, чем в точке закрепления

$$\sigma_A = \sigma_0 + \gamma_i f, \quad T_A = T_0 + \gamma_i f F_p.$$

При пролётах менее 700 м разницей между σ_0 и σ_A пренебрегают.

Используя уравнения цепной линии, получают формулы, определяющие стрелу провисания f и длину провода L в пролёте:

$$f = \frac{\gamma_i l^2}{8\sigma_0} + \frac{\gamma_i^3 l^4}{384\sigma_0^3} + \dots,$$

$$L = l + \frac{\gamma_i^2 l^3}{24\sigma_0^2} + \frac{\gamma_i^4 l^5}{1920\sigma_0^4} + \dots.$$

При пролётах l длиной до 500–700 м можно пользоваться упрощёнными выражениями:

$$f = \frac{\gamma_i l^2}{8\sigma_0} \quad \text{и} \quad L = l + \frac{\gamma_i^2 l^3}{24\sigma_0^2},$$

что соответствует допущению о равномерном распределении нагрузки по длине пролёта, а не по длине провода.

Согласно [1] расчёт опор и фундаментов проводится по методу **предельных состояний** (используются предельные напряжения $\sigma_{\text{п}}$), тогда как расчёт всех остальных конструктивных элементов ВЛ: проводов, тросов, изоляторов, арматуры – по методу **допускаемых напряжений** $[\sigma]$, т.е. задают определённый запас прочности:

$$k_3 = \frac{\sigma_{\text{п}}}{[\sigma]},$$

где $\sigma_{\text{п}}$ – пределы прочности на растяжение для проволоки, из которой изготовлен провод или трос; $[\sigma]$ – допустимые напряжения для заданной марки провода, троса. $\sigma_{\text{п}}$ и $[\sigma]$ в зависимости от сочетания расчётных климатических условий берутся из [1,2].

Для проведения механического расчёта необходимо знать **физико-механические характеристики** материала провода и троса. Это α – коэффициент температурного расширения провода, β – коэффициент упругого удлинения провода и E – модуль упругости, величина обратная β . Значения указанных коэффициентов берутся из [1,2].

Механический расчёт проводов и тросов проводится аналогично и заключается, в первую очередь, в определении наибольших напряжений в материале проводов для всех возможных режимов работы ВЛ. Полученные напряжения не должны превышать допустимых значений. Допустимые напряжения гарантируют нормальную работу передачи в сложных климатических условиях: при низкой температуре воздуха $[\sigma]_{\theta_{\text{нм}}}$; при наибольшей нагрузке $[\sigma]_{\gamma_{\text{нб}}}$; при среднегодовой температуре $[\sigma]_{\theta_{\text{сг}}}$. Последнее обеспечивает запас по усталости материала провода, которая наступает при знакопеременных нагрузках (вибрация провода), и исключает изломы проволок. Далее рассчитываются наибольшие стрелы провеса и длины проводов. Проверяются габаритные расстояния, строятся монтажные кривые или таблицы и т.д.

При изменении климатических условий меняются θ, γ , а следовательно, и механическое напряжение σ . Для определения σ используют **уравнение состояния провода** (4.1), которое связывает γ, θ и σ для двух разных климатических условий. Если известно напряжение σ_m при температуре θ_m и нагрузке γ_m , то напряжения σ_n при изменившихся условиях θ_n и γ_n можно определить из уравнения состояния:

$$\sigma_n - \frac{E\gamma_n^2 l^2}{24\sigma_n^2} + \alpha E\theta_n = \sigma_m - \frac{E\gamma_m^2 l^2}{24\sigma_m^2} + \sigma E\theta_m. \quad (4.1)$$

Напряжения σ_m и σ_n относятся к низшей точке провисания провода.

Напряжения в материале провода определяются длиной пролёта. Для монометаллического провода из алюминия наибольшие напряжения при малых пролётах зависят в основном от температуры и достигают максимума при минимальной температуре $\theta_{\text{нм}}$. При больших пролётах опасны нагрузки: максимальное напряжение имеет место при наибольшей нагрузке. Если приравнять эти максимальные напряжения допустимым значениям, то граничный пролёт, при котором в проводе допустимое напряжение достигается дважды, при низкой температуре и при наибольшей нагрузке, называется **критическим пролётом** $l_{\text{кр}}$. Величина его определяется из уравнения

состояния (4.1), в котором индексу n соответствует условие $[\sigma]_{\theta_{\text{нм}}}, \gamma_1, \theta_{\text{нм}}$, а индексу m — $[\sigma]_{\gamma_{\text{нб}}}, \gamma_{\text{нб}}, \theta_{\gamma_{\text{нб}}}$.

Поскольку $[\sigma]_{\theta_{\text{нм}}} = [\sigma]_{\gamma_{\text{нб}}} = [\sigma]$,

$$l_{\text{кр}} = [\sigma] \sqrt{\frac{24(\theta_{\gamma_{\text{нб}}} - \theta_{\text{нм}})\alpha}{\gamma_{\text{нб}}^2 - \gamma_1^2}}.$$

Полученный критический пролёт обычно называют вторым $l_{2\text{кр}}$ и его вполне достаточно для выбора расчётных климатических условий для монометаллического провода из алюминия.

Если длина пролёта $l < l_{2\text{кр}}$, то расчётные климатические условия, определяющие правую часть уравнения (4.1): $[\sigma]_{\theta_{\text{нм}}}, \gamma_1, \theta_{\text{нм}}$.

Если длина пролёта $l > l_{2\text{кр}}$, то расчётные условия $[\sigma]_{\gamma_{\text{нб}}}, \gamma_{\text{нб}}, \theta_{\text{нб}}$.

Выбрав расчётные условия, можно определить напряжение в проводе σ_i при любых погодных условиях $(\theta_i \text{ и } \gamma_i)$ по уравнению состояния (4.1), а затем стрелу провеса, длину провода, тяжение.

Безопасная работа ВЛ будет обеспечена, если расстояние между землёй и нижней точкой провисания провода не превысит допустимого габарита. Для соблюдения этого условия необходимо знать **наибольшую стрелу провисания провода**.

Наибольшая стрела провеса провода $f_{\text{нб}}$ может иметь место при нагрузке его гололёдом γ_3 или при наибольшей температуре воздуха $\theta_{\text{нб}}$.

Выбрать для линии передачи условия, определяющие $f_{\text{нб}}$, можно с помощью критической температуры $\theta_{\text{кр}}$. При критической температуре стрела провеса такая же, как при гололёде, т. е. при максимальной вертикальной нагрузке (γ_3).

$$\theta_{\text{кр}} = \theta_{\text{г}} + \frac{\sigma_3}{\alpha \cdot E} \left(1 - \frac{\gamma_1}{\gamma_3} \right).$$

Если $\theta_{\text{кр}} > \theta_{\text{нб}}$, то наибольшая стрела провеса возникает при гололёде т.е. при $\sigma_3, \theta_{\text{г}}, \gamma_3$.

Если $\theta_{\text{кр}} < \theta_{\text{нб}}$, то наибольшая стрела провеса имеет место при максимальной температуре, т.е. при $\sigma_1, \theta_{\text{нб}}, \gamma_1$.

При критической температуре напряжения и нагрузки связаны следующим соотношением: $\sigma_3 \gamma_1 = \sigma_1 \gamma_3$.

Зная метеоусловия, при которых будет $f_{\text{нб}}$ определяют из (4.1) σ_f и находят величину стрелы провеса, затем для выбранной унифицированной опоры проверяют габарит. Если габаритное расстояние не обеспечивается, то необходимо подобрать другую опору или изменить пролёт.

Следующим этапом расчёта является составление **монтажных кривых** или таблиц. Обычно монтаж проводов (тросов) проводится в безветренную погоду или при слабом ветре, поэтому можно считать, что при монтаже переменной величиной будет только температура воздуха.

Натяжка проводов производится либо путём непосредственного визирования стрел провеса в пролёте, либо путём замера тяжения.

И в том и в другом случае необходимо, используя уравнение состояния провода (4.1) и выбранные расчётные климатические условия, определить для нескольких значений температур ($\theta_{\text{м}}$) величину $\sigma_{\text{м}}$, затем $T_{\text{м}}$ и $f_{\text{м}}$ и построить графики $T_{\text{м}} = \varphi(\theta_{\text{м}})$ и $f_{\text{м}} = \varphi(\theta_{\text{м}})$.

Объект исследования

В работе исследуются механические характеристики проводов воздушной одноцепной линии $U_{\text{ном}} = 110$ кВ. Провода закрепляются по вершинам

треугольника на железобетонной опоре. Марка провода, сечение, длина пролёта и климатические условия в районе сооружения линии задаются в табл. 4.1.

Таблица 4.1

№ бригады	Марка провода	$l, \text{м}$	Район по гололёду	Район по ветру	Температура воздуха
1	A-120	150	I	II	Для всех вариантов: высшая температура воздуха $\theta_{\text{нб}} = 40^{\circ} \text{C}$; низшая температура воздуха $\theta_{\text{нм}} = -40^{\circ} \text{C}$; среднегодовая температура воздуха $\theta_{\text{сг}} = +5^{\circ} \text{C}$.
2	A-240	200	III	I	
3	A-150	170	II	III	
4	A-185	180	II	II	
5	A-120	130	II	I	
6	A-185	200	I	IV	
7	A-150	190	I	I	
8	A-240	200	II	IV	

Рассматриваемый участок линии проходит по ненаселённой местности. Схема пролёта ВЛ, ограниченного промежуточными опорами, и размеры последних приведены на рис. 4.2. Здесь h_{T} – габарит линии, для ненаселённой местности при $U_{\text{ном}} = 110 \text{ кВ}$ $h_{\text{T}} = 6 \text{ м}$; l – длина пролёта; L – длина провода; f – стрела провеса; h – высота подвеса провода, расстояние от нижней точки гирлянды изоляторов до земли, λ – длина гирлянды изоляторов (для $U = 110 \text{ кВ}$ гирлянда содержит 8 изоляторов типа ПС6–А и имеет длину $\lambda = 1,35 \text{ м}$ [1]).

Расчётная часть работы

1. Рассчитать семь удельных механических нагрузок для провода (на 1 м длины и 1 мм^2 площади поперечного сечения). Конструктивные размеры и масса провода определяются по [3].

В соответствии с $U_{\text{ном}}$ ВЛ и районом её сооружения по гололёдообразованию [1,2] нормируется толщина стенки гололёда $\epsilon_{\text{н}}$, соответствующая подвеске стержня диаметром 10 мм на высоте 10 м, температура воздуха при этом $\theta = -5^{\circ} \text{C}$. Расчётная толщина стенки гололёда для провода

$$\epsilon_{\text{Г}} = k_{\epsilon}^d \cdot k_{\epsilon}^h \cdot \epsilon_{\text{н}},$$

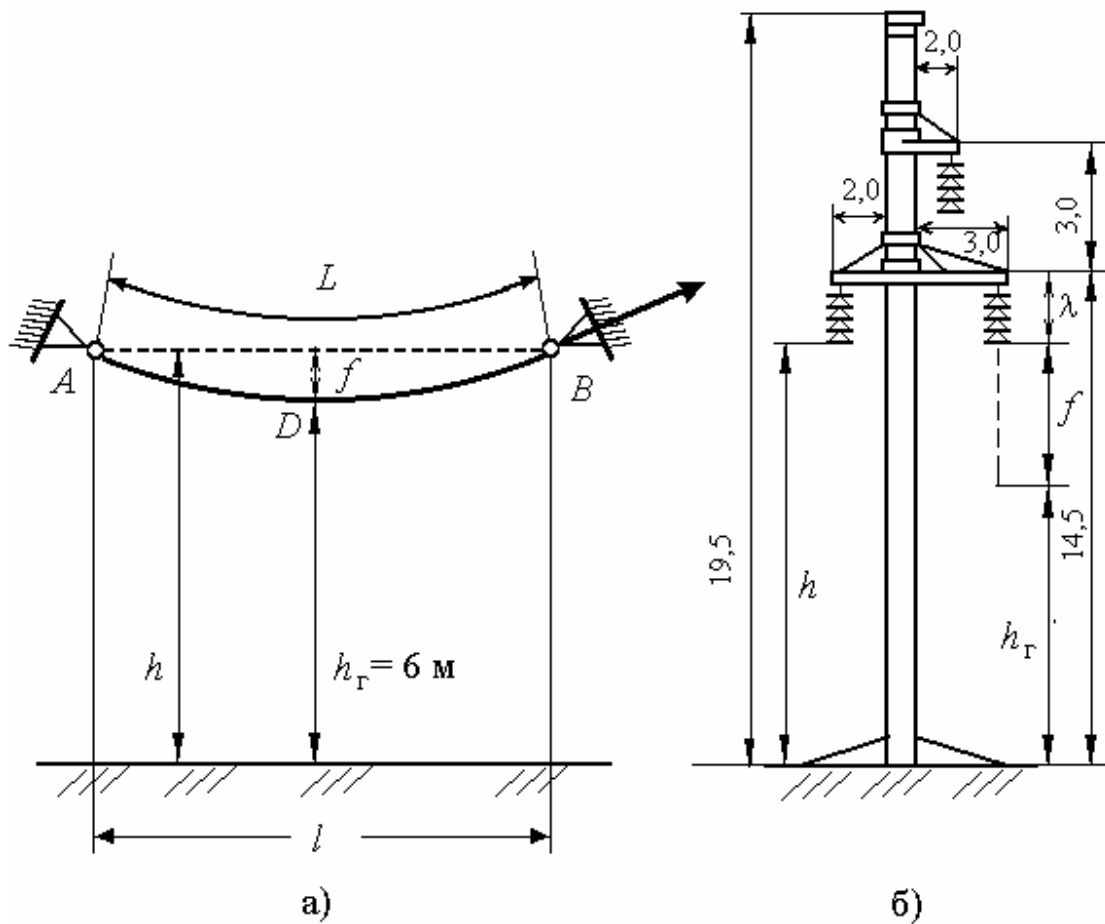


Рис.4.2 Воздушная одноцепная линия: а) схема пролёта; б) размеры промежуточной опоры

где k_e^d – поправочный коэффициент на диаметр провода d , мм:

$$k_e^d = \frac{0,83}{\sqrt{0,1d}} + 0,17;$$

k_e^h – поправочный коэффициент на высоту подвески проводов:

$$k_e^h = \left(\lg \sqrt{7h_{уГ}^*} \right)^2.$$

Здесь $h_{уГ}^*$ – высота расположения в м приведённого центра тяжести всех проводов:

$$h_{уГ}^* = h_{cp} - \frac{2}{3} f.$$

где h_{cp} – средняя высота крепления проводов к изоляторам, f – стрела провеса принимаются в соответствии с рис.4.2, б.

При высоте расположения приведённого центра тяжести проводов до 25 м поправки k_e^d и k_e^h не вводятся [2]. Плотность чистого гололёда $g_0=900$ кг/м³

Нормированный скоростной напор ветра $q_{вн}$ задаётся на высоте до 15 м от земли. При расположении центра тяжести провода на высоте более 15 м вводится поправочный коэффициент

$$k_q^h = \left(\lg \sqrt{10 h_{цт}^*} \right)^2 \quad \text{и} \quad q_v = k_q^h q_{вн}.$$

Коэффициент k_l , учитывающий влияние длины пролёта на ветровую нагрузку, выбирается в соответствии с табл. 4.2 [2].

Таблица 4.2

$l, \text{ м}$	≤ 50	100	150	200 м и более
k_l	1,2	1,1	1,05	1

Промежуточные значения находятся путём интерполяции.

Коэффициент α , учитывающий неравномерность скоростного напора ветра по пролёту принимает следующие значения:

$$\alpha=1 \text{ при } q_{вн} = 270 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2};$$

$$\alpha = \frac{0,9}{\sqrt[4]{0,01 q_{вн} - 1,7}} + 0,1 \text{ или } \alpha=0,85, \text{ если } 270 < q_{вн} < 745 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2};$$

$$\alpha= 0,7, \text{ если } q_{вн} = 745 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}.$$

Аэродинамический коэффициент лобового сопротивления провода $C_x= 1,1$ для проводов $d < 20$ мм, свободных от гололёда, во всех остальных случаях принимается равным 1,2, принять $\alpha=0,85$, $k_l= 1$.

2. Подобрать для заданной марки провода физико–механические характеристики и допустимые механические напряжения при различных климатических условиях [1, 2]

3. Определить критический пролёт воздушной линии и выбрать расчётные сочетания климатических условий для нормальной работы ВЛ.

Для монометаллических алюминиевых проводов определяющим для выбора расчётных климатических условий является второй критический пролёт [4].

4. Рассчитать критическую температуру и найти наибольшую стрелу провеса.

4.1 По уравнению состояния провода (4.1) определить напряжение в проводе при наибольшей вертикальной нагрузке γ_3 и температуре гололёда

$$\sigma_3 - \frac{E\gamma_3^2 l^2}{24\sigma_3^2} + \alpha E \theta_\Gamma = [\sigma] - \frac{\gamma_{[\sigma]}^2 l^2 E}{24 \cdot [\sigma]^2} + \alpha E \theta_{[\sigma]}. \quad (4.2)$$

В правую часть уравнения подставляются значения величин, полученные по результатам расчёта в п.3.

Вводя следующие обозначения:

$$A = [\sigma] - \frac{\gamma_{[\sigma]}^2 l^2 E}{24 \cdot [\sigma]^2} + \alpha E (\theta_{[\sigma]} - \theta_\Gamma),$$

$$B = \frac{E\gamma_3^2 \cdot l^2}{24},$$

перепишем выражение (4.2) в виде

$$\sigma_3^3 - A\sigma_3^2 - B = 0. \quad (4.3)$$

Решение уравнения (4.3) может быть получено методом последовательных приближений.

Формула итерационного процесса:

$$\sigma_{3(i+1)} = \frac{\sigma_{3(i)}^2 (2 \cdot \sigma_{3(i)} - A) + B}{\sigma_{3(i)} (3 \cdot \sigma_{3(i)} - 2A)}.$$

Здесь: $\sigma_{3(i)}$, $\sigma_{3(i+1)}$ – соответственно механическое напряжение в проводе для i и $(i+1)$ приближения. Начальное значение $\sigma_{3(0)}$ ориентировочно может быть принято: $\sigma_{3(0)} = [\sigma]$.

Предложенная методика используется для расчёта механических напряжений при любых климатических условиях.

4.2 Рассчитать критическую температуру

$$\theta_{кр} = \theta_\Gamma + \frac{\sigma_3}{\alpha E} \left(1 - \frac{\gamma_1}{\gamma_3} \right).$$

4.3 Определить условия, при которых в рассматриваемом пролёте, возникает наибольшая стрела провеса $f_{нб}$:

$$\left. \begin{array}{l} \theta_{\text{нб}} > \theta_{\text{кр}} \\ \theta_{\text{нб}} < \theta_{\text{кр}} \end{array} \right\} f_{\text{нб}} \text{ имеет место } \left\{ \begin{array}{l} \theta_{\text{нб}}, \gamma_1, \sigma_1 \\ \theta_{\text{г}}, \gamma_3, \sigma_3 \end{array} \right. \text{ или } \theta_f, \gamma_f, \sigma_f.$$

Найти по уравнению состояния σ_f и рассчитать значение $f_{\text{нб}}$.

4.4 Проверить габаритную высоту для принятой опоры и выбранного пролёта (рис. 4.2) $h_{\text{г}} \leq 6 \text{ м}$.

5. Построить монтажные кривые, используя уравнение состояния, для $\theta = -20^\circ \text{ С}$, 0° С , 20° С и 40° С . Определить стрелы провеса провода, механическое напряжение в точке провисания провода. В качестве расчётных климатических условий принять определённые в п. 3.

При монтаже провода ветер незначителен и гололёд отсутствует, следовательно, при расчёте используется нагрузка γ_1 .

6. При максимальной стреле провеса рассчитать механические напряжения и тяжение в нижней точке провисания провода и в точке закрепления.

Программное обеспечение

Лабораторная работа выполняется на ПЭВМ в операционной системе Windows по программе, записанной в файл под именем EIS7.exe или в библиотеку под именем EIS7.lib.

После активизации файла на экране появляется фронтальная панель виртуального устройства (рис. 4.3).



Рис. 4.3. Фронтальная панель виртуального устройства

В левом верхнем углу панели размещаются цифровые задатчики параметров исследуемого провода и климатических условий.

Ниже располагается диаграмма с изображением пролёта l и части условных опор от основания до высоты 20 м по концам его.

Ещё ниже расположен индикатор массива, в котором хранятся рассчитанные удельные нагрузки в $\text{Н/м}\cdot\text{мм}^2$. Элементы массива имеют нумерацию от 0 до 6, что соответствует нагрузкам от γ_1 до γ_7 . Номер элемента устанавливается с помощью мыши курсором в виде «руки».

В правой половине фронтальной панели расположены устройства, позволяющие провести подвеску провода в пролёте. Здесь устанавливается высота подвеса, габарит и температура воздуха во время проведения работ по монтажу провода, а также имитируется тяжение на механизме, используемом для натяжки провода.

Ниже расположены индикаторы стрелы провеса f_M и механического напряжения σ_M провода. Кривая провисания изображается на диаграмме. Кнопка «stop» используется для окончания процесса подвески.

Здесь же расположены индикаторы, используемые для отображения f и σ при различных климатических условиях.

В нижнем правом углу расположены необходимые индикаторы, отображающие расчётные условия и монтажные кривые.

Порядок выполнения работы

1. Активизировать программу и установить исходные данные: пролёт, расчётное сечение и диаметр провода; массу одного погонного метра в кг; допустимое напряжение $[\sigma]_{\theta_{нм}} = [\sigma]_{\gamma_{нб}} = [\sigma]$; климатические условия в соответствии с вариантом задания; скоростной напор и толщину стенки гололёда учесть нормированными значениями; установить высоту подвеса провода и габарит. Запустить программу.

2. Сравнить рассчитанные значения удельных нагрузок с результатами вычислений на ЭВМ, просматривая массив удельных нагрузок. При этом нумерация элементов массива начинается с нуля. Зафиксировать нагрузки.

3. Провести подвеску провода в пролёте. Установить произвольную температуру воздуха на момент подвески (желательно положительную). Кривую провисания провода в пролёте можно наблюдать на диаграмме. Меняя относительное тяжение, обеспечить желаемую стрелу провеса, разумную для принятой температуры. Цифровые значения стрелы провеса в м и напряжения в проводе в даН / мм² выводятся на экран. Завершив процедуру натяжки провода в пролёте, нажать кнопку «stop». При неудачных тяжениях возможно закливание при решении уравнения.

4. Для принятых условий по результатам расчёта на экране изображаются зависимости стрелы провеса и механического напряжения в расчётном диапазоне изменения температуры окружающей среды. Здесь же указываются значения этих параметров для гололёда с заданной толщиной стенки. Проверить условия работы провода по допустимому напряжению и максимальной стреле провеса.

Если при расчётных условиях механические напряжения или стрела провеса превысят допустимые значения или имеют большой запас, необходимо изменить тяжение при монтаже провода, повторив пункт 3.

5. В соответствии с методикой, изложенной в теоретической части работы, ЭВМ определяет второй критический пролёт, выбирает расчётные условия, рассчитывает критическую температуру и строит монтажные кривые. Результаты, представленные на экране, сравнить с расчётными.

6. По монтажным кривым определить стрелу провеса и напряжение для принятой в п. 3 температуры воздуха и, вновь запустив программу, подобрать соответствующее тяжение провода в момент подвески. Нажать кнопку «stop» и провести анализ полученных результатов, определяющих работу провода в различных климатических условиях.

Содержание отчёта

1. Включить в отчёт аккуратно оформленную расчётную часть работы
2. Сравнить результаты расчёта с опытными данными и сделать выводы о влиянии температуры и гололёда на механические напряжения в проводах и стрелу провеса.
3. Составить монтажные кривые.
4. Все этапы исследования отразить в отчёте.

Контрольные вопросы

1. Указать факторы, влияющие на механическую прочность проводов ВЛ, объяснить их воздействие на линии передачи.
2. Указать область применения монометаллических проводов.
3. Как учитываются климатические условия местности, в которой сооружается линия?
4. Объяснить физический смысл удельных механических нагрузок.
5. Для каких целей используется основное уравнение состояния провода в пролёте?
6. Какие сочетания расчётных климатических условий являются определяющими при механическом расчёте проводов из алюминия?
7. Что такое критический пролёт? Как определить второй критический пролёт для монометаллического алюминиевого провода ?
8. Выбор расчётных климатических условий для заданного пролёта воздушной линии.
9. Что понимается под критической температурой?
10. Как рассчитать необходимую стрелу провеса?
11. В каких точках провода в пролёте напряжения и тяжения наибольшие?
12. Для чего и как используются монтажные кривые и таблицы?
13. Порядок расчёта монтажных кривых и составления монтажных таблиц.
14. Конструкции проводов ВЛ из алюминия.
15. Конструкции и назначения опор ВЛ для номинального напряжения до 110 кВ

Лабораторная работа № 5

МЕХАНИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ СТАЛЕАЛЮМИНИЕВЫХ ПРОВОДОВ.

Цель работы: определение фиктивных физико–механических характеристик сталеалюминиевого провода; исследование влияния климатических условий на механическую прочность комбинированных проводов воздушных линий передач; выбор расчётных условий для механического расчёта и монтаж проводов в заданном пролёте.

Теоретическая часть

Необходимость повышения механической прочности алюминиевых проводов привела к разработке конструкций сталеалюминиевых проводов.

Сталеалюминиевые провода имеют стальной сердечник в виде гибкого троса из одной или нескольких стальных оцинкованных проволок. Алюминиевые проволоки скручиваются со стальным сердечником одним, двумя или тремя повивами и являются токоведущей частью, т.к. электропроводность стального сердечника практически не влияет на электрическое сопротивление провода.

Соотношение сечений алюминиевой и стальной частей провода

$$k = \frac{F_a}{F_c} = \frac{A}{C}$$

различно и указывается в марке провода. Оно выбирается в соответствии с климатическими и природными условиями местности, в которой сооружается ВЛ, и обеспечивает как электрические характеристики линии, так и механическую прочность.

Для сталеалюминиевых проводов рекомендуются следующие области применения:

1. В районах с толщиной стенки гололёда до 20 мм: при сечении до 185 мм² – с соотношением алюминия к стали А:С= 6,0–6,25; при сечении 240 мм² и более – с отношением А:С=7,71–8,04.

2. В районах с толщиной стенки гололёда более 20 мм: при сечениях до 95 мм² – с отношением А:С=6,0; при сечениях 120–400 мм² с отношением А:С=4,29–4,39; при сечениях 450 мм² и более с соотношением А:С=7,71–8,04.

3. На больших переходах с пролётами более 800 м – с соотношением А:С=1,46.

Выбор других марок проводов обосновывается технико-экономическими расчётами.

Соотношения расчётных климатических условий для комбинированных проводов выбираются по тем же критериям, что и для монометаллических, для механического расчёта справедливы все формулы, полученные ранее (см. лабораторную работу № 4), но при этом используют фиктивные: напряжение – σ_0 , модуль упругости – E_0 , коэффициент температурного расширения – α_0 , которые относятся ко всему проводу в целом. Сталь и алюминий имеют разные физико-механические характеристики и по разному воспринимают нагрузку растяжения (модули упругости алюминия E_a и стали E_c не равны) и нагрузку из-за изменения температуры (коэффициенты температурного расширения алюминия α_a и стали α_c также не равны).

Рассмотрим действие указанных нагрузок на провод поочерёдно:

1. Натянутый с силой T_T сталеалюминиевый провод получит относительное упругое удлинение Δl_T^* (рис. 5.1):

$$\Delta l_T^* = \frac{\sigma_{aT}}{E_a} = \frac{\sigma_{cT}}{E_c} = \frac{\sigma_T}{E_0}. \quad (5.1)$$

Здесь: σ_T напряжение в проводе от механической нагрузки.

Сила T_T , действующая на провод:

$$T_T = T_{cT} + T_{aT}. \quad (5.2)$$

Фиктивное напряжение, действующее на провод в целом $\sigma_T = \frac{T_T}{F_p}$,

при этом напряжения в стальной и алюминиевой частях:

$$\sigma_{cT} = \frac{T_{cT}}{F_c} \quad \text{и} \quad \sigma_{aT} = \frac{T_{aT}}{F_a}.$$

Используя соотношения (5.1) и (5.2), получим:

$$E_0(F_c + F_a) = E_c F_c + E_a F_a, \quad \text{откуда}$$

$$E_0 = \frac{E_c + E_a k}{1 + k}.$$

Фиктивный коэффициент упругого удлинения провода

$$\beta_0 = \frac{1}{E_0} = \frac{1 + k}{E_c + E_a k}.$$

Модуль упругости стали, примерно, в 3 раза больше модуля упругости алюминия, следовательно, напряжение в стальной части провода значительно больше, чем в алюминиевой (рис. 5.2). Так как предел прочности стали при растяжении почти в 8 раз больше, чем алюминия, то механическую нагрузку провода ограничивает напряжение в алюминиевой части.

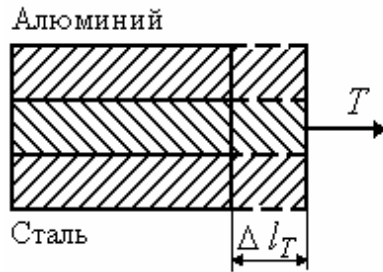


Рис. 5.1 Растяжение сталеалюминиевого провода

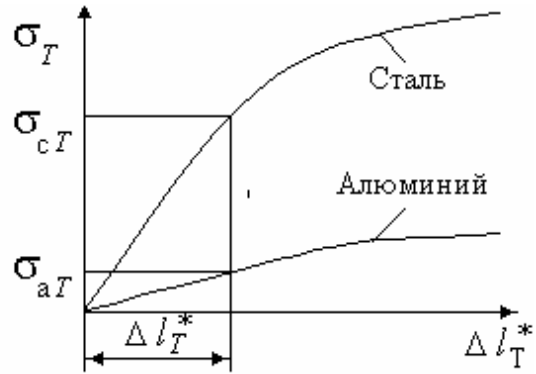


Рис. 5.2 Напряжения в стальной и алюминиевой частях провода при растяжении

Исходя из (5.1), **фиктивное напряжение от нагрузки**, растягивающей провод:

$$\sigma_T = \sigma_{aT} \frac{E_0}{E_a}. \quad (5.3)$$

2. Напряжение в сталеалюминиевом проводе, возникающее при изменении температуры, обусловлено тем, что температурный коэффициент расширения алюминия α_a почти в 2 раза больше, чем стали – α_c .

Если температура провода θ больше температуры его изготовления θ_0 ($\theta > \theta_0$), то при отсутствии трения между частями провода алюминиевая его часть получила бы большее удлинение, чем стальная (рис.5.3,б). Очевиден и обратный результат: при снижении температуры $\theta < \theta_0$ алюминиевая часть стала бы короче стальной. Однако провод ведёт себя как единое целое, поэтому удлинение алюминия и стали при нагревании будет одинаковым (рис. 5.3, в), но при этом алюминиевая часть провода будет испытывать сжимающее усилие, а стальная растягивающее. Таким образом в проводе возникают температурные напряжения.

При $\theta > \theta_0$ и отсутствии связи между алюминием и сталью (рис.5.3, б) части провода получили бы удлинения:

$$\Delta l_a = \alpha_a l (\theta - \theta_0);$$

$$\Delta l_c = \alpha_c l (\theta - \theta_0).$$

В действительности удлинение провода составит (рис. 5.3, в)

$$\Delta l_\theta = \alpha_0 l (\theta - \theta_0).$$

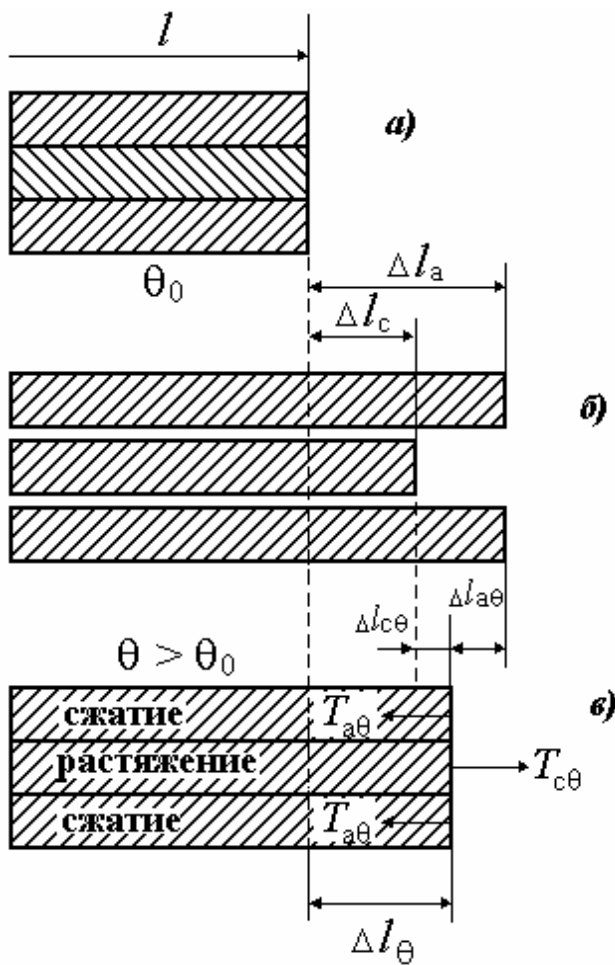


Рис. 5.3 Температурные напряжения в сталеалюминиевом проводе:
 а) провод при θ_0 ;
 б) провод при независимом расширении алюминия и стали;
 в) провод как одно целое при $\theta > \theta_0$

Таким образом, температурное усилие в алюминиевой части $T_{a\theta}$ должно сжать её на

$$\Delta l_{a\theta} = (\alpha_a - \alpha_0)l(\theta - \theta_0),$$

а в стальной части $T_{c\theta}$ растянуть –

$$\Delta l_{c\theta} = (\alpha_0 - \alpha_c)l(\theta - \theta_0).$$

По закону Гука (5.1):

$$\sigma_{a\theta} = \Delta l_{a\theta}^* E_a \quad \text{и} \quad \sigma_{c\theta} = \Delta l_{c\theta}^* E_c. \quad (5.7)$$

Здесь: $\Delta l_{a\theta}^*$, $\Delta l_{c\theta}^*$ – удлинения, отнесённые к длине провода.

Учитывая указанные соотношения и подставляя в (5.6) (5.4) и (5.5), получим:

$$(\alpha_0 - \alpha_c)(\theta - \theta_0)E_c F_c = (\alpha_a - \alpha_0)(\theta - \theta_0)E_a F_a,$$

откуда: **фиктивный коэффициент температурного расширения** провода:

$$\alpha_0 = \frac{\alpha_a E_a F_a + \alpha_c E_c F_c}{E_c F_c + E_a F_a}.$$

Фиктивное напряжение в алюминиевой части провода при изменении температуры (5.7)

$$\sigma_{a\theta} = (\alpha_a - \alpha_0)(\theta - \theta_0)E_a \quad (5.8)$$

Результирующее напряжение в сталеалюминевом проводе определяется, как отмечалось выше, по алюминиевой его части на единицу длины провода:

$$\sigma_a = \sigma_{aT} - \sigma_{a\theta}.$$

С учётом (5.8) получим:

$$\sigma_{aT} = \sigma_a + \sigma_{a\theta} = \sigma_a + (\alpha_a - \alpha_0)(\theta - \theta_0)E_a,$$

Фиктивное напряжение провода в целом (5.3) равно:

$$\sigma_0 = \left[\sigma_a + (\alpha_a - \alpha_0)(\theta - \theta_0)E_a \right] \frac{E_0}{E_a}.$$

Допустимое напряжение сталеалюминиевого провода определяется, если принять $\sigma_a = [\sigma]_a$, т.е.:

$$[\sigma] = \left\{ [\sigma]_a + (\alpha_a - \alpha_0)(\theta - \theta_0)E_a \right\} \frac{E_0}{E_a}.$$

При проведении механических расчётов выделяют три значения допустимых напряжений для сталеалюминевых проводов: допустимое напряжение при наименьшей температуре $[\sigma]_{\theta_{\text{нм}}}$ и наибольшей нагрузке $[\sigma]_{\gamma_{\text{нб}}}$ (они равны $[\sigma]_{\theta_{\text{нм}}} = [\sigma]_{\gamma_{\text{нб}}} = [\sigma]$) и допустимое напряжение при среднегодовой температуре $[\sigma]_{\theta_{\text{сг}}}$.

При механическом расчёте сталеалюминевых проводов в отличие от монометаллических необходимо проверять механические напряжения в проводе, сравнивая их с допустимыми, для трех наиболее опасных условий: 1) при наименьшей температуре: $\sigma_{\theta_{\text{нм}}} \leq [\sigma]$; 2) при наибольшей нагрузке: $\sigma_{\gamma_{\text{нб}}} \leq [\sigma]$; 3) при среднеэксплуатационных условиях: $\sigma_{\theta_{\text{сг}}} \leq [\sigma]_{\theta_{\text{сг}}}$.

При выборе из трёх названных расчётного условия помимо второго критического пролёта вводятся понятия первого и третьего критических пролётов, которые также как и второй определяются по равенству допустимых напряжений при разных условиях.

Для **первого критического пролёта** допустимое напряжение достигается дважды: при наименьшей температуре (в уравнении состояния индексу n соответствуют условия $[\sigma]_{\theta_{\text{HM}}}, \gamma_1, \theta_{\text{HM}}$) и при среднеэксплуатационных условиях (в уравнении состояния в соответствии с индексом m подставляются $[\sigma]_{\theta_{\text{сг}}}, \gamma_1, \theta_{\text{сг}}$).

Для **третьего критического пролёта** допустимое напряжение достигается также два раза: при $n - [\sigma]_{\theta_{\text{сг}}}, \gamma_1, \theta_{\text{сг}}$ и $m - [\sigma]_{\gamma_{\text{нб}}}, \gamma_{\text{нб}}, \theta_{\Gamma}$.

Таким образом для любого критического пролёта из уравнения состояния следует:

$$l_{\text{кp}i} = \frac{2[\sigma]_n}{\gamma_m} \sqrt{\frac{6\{([\sigma]_n - [\sigma]_m) \cdot \beta + \alpha(\theta_n - \theta_m)\}}{\left(\frac{\gamma_n}{\gamma_m}\right)^2 - \left(\frac{[\sigma]_n}{[\sigma]_m}\right)^2}}.$$

Если для реальных линий электропередач при определённых соотношениях климатических условий местности, где сооружается линия, не достигается равенство $[\sigma]_n \neq [\sigma]_m$, то в этом случае критического пролёта не существует, его называют мнимым критическим пролётом. Если критический пролет существует, но не влияет на выбор расчётных климатических условий, он называется фиктивным. Соотношения между критическими пролётами могут быть самыми различными в зависимости от марок провода и механических нагрузок.

Выбор расчётных условий для конкретной линии и заданного пролёта производится в соответствии с табл. 5.1.

Правильно выбранные по табл. 5.1 **расчётные условия** позволяют обеспечить надёжную работу передачи и грамотно провести монтаж провода в пролёте, т.е. при любых соотношениях климатических условий механические напряжения, возникающие в проводе, не превысят допустимых значений. Величина этих напряжений определяется по уравнению состояния провода для фиктивных физико-механических характеристик.

Для **расчёта тяжений, длин провода в пролёте, стрел провеса, для составления монтажных кривых и таблиц** необходимо использовать рекомендации и формулы, представленные в теоретической части лабораторной работы № 4.

Таблица 5.1

Соотношение критических пролётов	Расчёт прол.	Соотношения действ. и критич. прол.	Исходные расчётные условия
----------------------------------	--------------	-------------------------------------	----------------------------

$l_{1\text{кр}} < l_{2\text{кр}} < l_{3\text{кр}}$ $l_{2\text{кр}}$ – фиктивный	$l_{1\text{кр}}$ $l_{3\text{кр}}$	$l < l_{1\text{кр}}$ $l_{1\text{кр}} < l < l_{3\text{кр}}$ $l > l_{3\text{кр}}$	$[\sigma]_{\theta_{\text{HM}}, \theta_{\text{HM}}, \gamma_1}$ $[\sigma]_{\theta_{\text{CG}}, \theta_{\text{CG}}, \gamma_1}$ $[\sigma]_{\gamma_{\text{нб}}, \theta_{\Gamma}, \gamma_{\text{нб}}}$
$l_{3\text{кр}} < l_{2\text{кр}} < l_{1\text{кр}}$ $l_{1\text{кр}}$ и $l_{3\text{кр}}$ – фикт.	$l_{2\text{кр}}$	$l < l_{2\text{кр}}$ $l > l_{2\text{кр}}$	$[\sigma]_{\theta_{\text{HM}}, \theta_{\text{HM}}, \gamma_1}$ $[\sigma]_{\gamma_{\text{нб}}, \gamma_{\text{нб}}, \theta_{\Gamma}}$
$l_{2\text{кр}} < l_{3\text{кр}}$ $l_{1\text{кр}}$ – мнимый	$l_{3\text{кр}}$	$l < l_{3\text{кр}}$ $l > l_{3\text{кр}}$	$[\sigma]_{\text{сэ}, \theta_{\text{CG}}, \gamma_1}$ $[\sigma]_{\gamma_{\text{нб}}, \theta_{\Gamma}, \gamma_{\text{нб}}}$
$l_{1\text{кр}} < l_{2\text{кр}}$ $l_{3\text{кр}}$ – мнимый	$l_{1\text{кр}}$	$l < l_{1\text{кр}}$ $l > l_{1\text{кр}}$	$[\sigma]_{\theta_{\text{HM}}, \gamma_1, \theta_{\text{HM}}}$ $[\sigma]_{\text{сэ}, \gamma_1, \theta_{\text{CG}}}$

Объект исследования

В работе исследуются механические характеристики проводов воздушной двухцепной линии $U_{\text{НОМ}} = 220\text{кВ}$. Провода закрепляются по вершинам треугольника (бочка) на одноствоечной металлической опоре. Марка провода, сечение, длина пролёта и климатические условия в районе сооружения линии задаются в табл.5.2. Расчёт проводят для одной цепи ВЛ. Воздушная линия проложена в ненаселённой местности. В поддерживающей провод гирлянде изоляторов 14 штук типа ПС6–А, длина гирлянды $\lambda = 2$ м [5].

Таблица 5.2

№ бригады	Марка провода	$l, \text{м}$	Район по гололёду	Район по ветру	Температура, °С		
					Наибольшая	Наименьшая	Средне-годовая
1	АС–240/32	200	II	III	35	–30	+5
2	АС–300/39	250	III	I	30	–35	10
3	АС–400/22	300	I	III	40	–40	10
4	АС–240/56	300	III	II	25	–40	–10
5	АС–300/66	350	IV	II	40	–40	5
6	АС–400/51	350	II	IV	35	–35	0
7	АС–300/46	300	III	IV	30	–30	5
8	АС–400/64	400	IV	I	40	–35	10

Схема пролёта и размеры промежуточной опоры представлены на рис. 5.4.

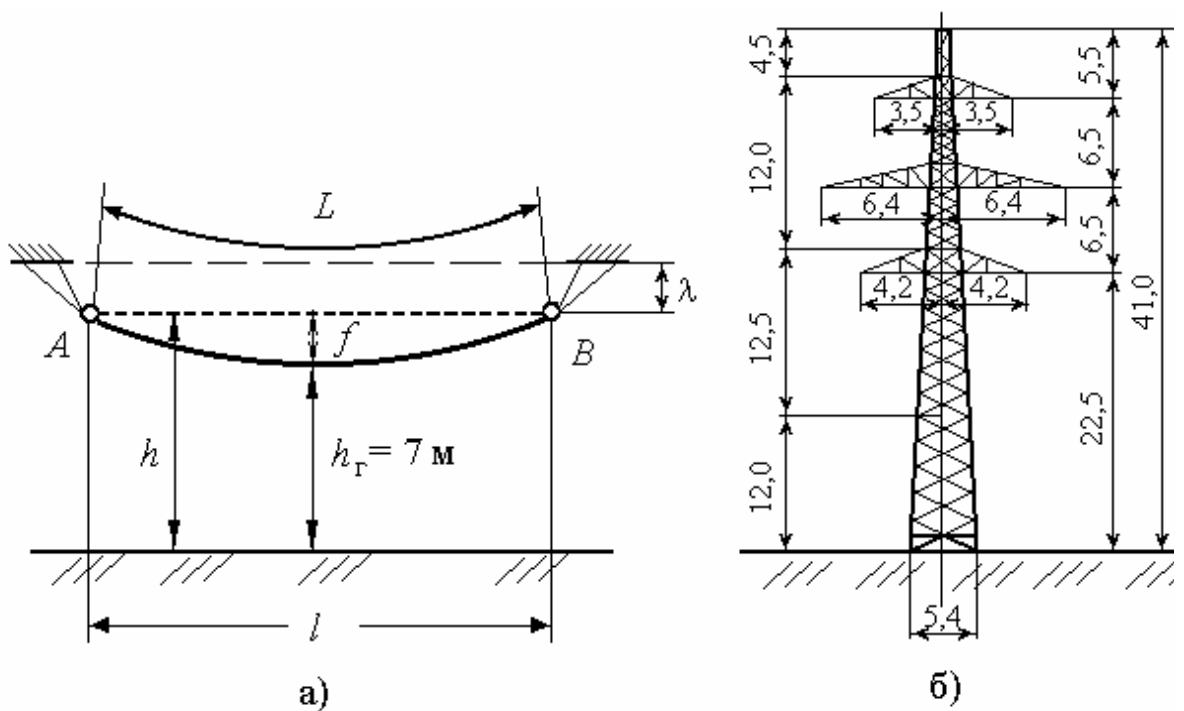


Рис. 5.4 Воздушная двухцепная линия:

а) схема пролёта ВЛ; б) размеры промежуточной опоры

Расчётная часть работы

Методику расчёта см. в лабораторной работе № 4.

1. Рассчитать удельные механические нагрузки на провод. Учитывая высоту расположения приведённого центра тяжести проводов при определении скоростного напора принять поправочный коэффициент на возрастание скорости ветра по высоте $k_q^h = 1,25$; $k_l = 1$; $\alpha = 0,85$; $C_x = 1,1$ для проводов диаметром $d < 20$ мм, свободных от гололёда, во всех остальных случаях $C_x = 1,2$ [1].

2. Определить для заданной марки провода фиктивные физико-механические характеристики α_0, E_0, β_0 . Принять:

$$\alpha_a = 23 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{оС}}, \alpha_c = 12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{оС}}, E_a = 63 \cdot 10^3 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2},$$

$$E_c = 200 \cdot 10^3 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}.$$

Сравнить полученные характеристики со значениями, приведёнными для заданной марки провода в [1,2].

Выбрать нормированные значения допустимых механических напряжений для провода в целом $[\sigma]_{\theta_{\text{нм}}}$, $[\sigma]_{\gamma_{\text{нб}}}$, $[\sigma]_{\theta_{\text{сг}}}$ [1].

3. Для заданного пролёта l определить расчётные климатические условия, рассчитав и сравнив три критических пролёта.

4. Определить критическую температуру и найти наибольшую стрелу провеса. Проверить габарит для принятой опоры.

5. Построить монтажные кривые, используя уравнение состояния, для $\theta_{\text{нм}}$, -20° , 0° , $+20^{\circ}$, $\theta_{\text{нб}}$. Определить стрелы провеса и напряжения в нижней точке провода.

6. Рассчитать длину провода в пролёте при $\theta_{\text{нб}}$, определить напряжения и тяжения в точках закрепления провода при $\theta_{\text{нм}}$.

Программное обеспечение

Работа выполняется по программе, записанной в файл под именем ELS8.exe или в библиотеку под именем ELS8.lib.

После активизации файла на экране изображается **фронтальная панель** (рис 5.5). В левой верхней части располагаются цифровые задатчики исходных данных исследуемого провода и климатических условий.

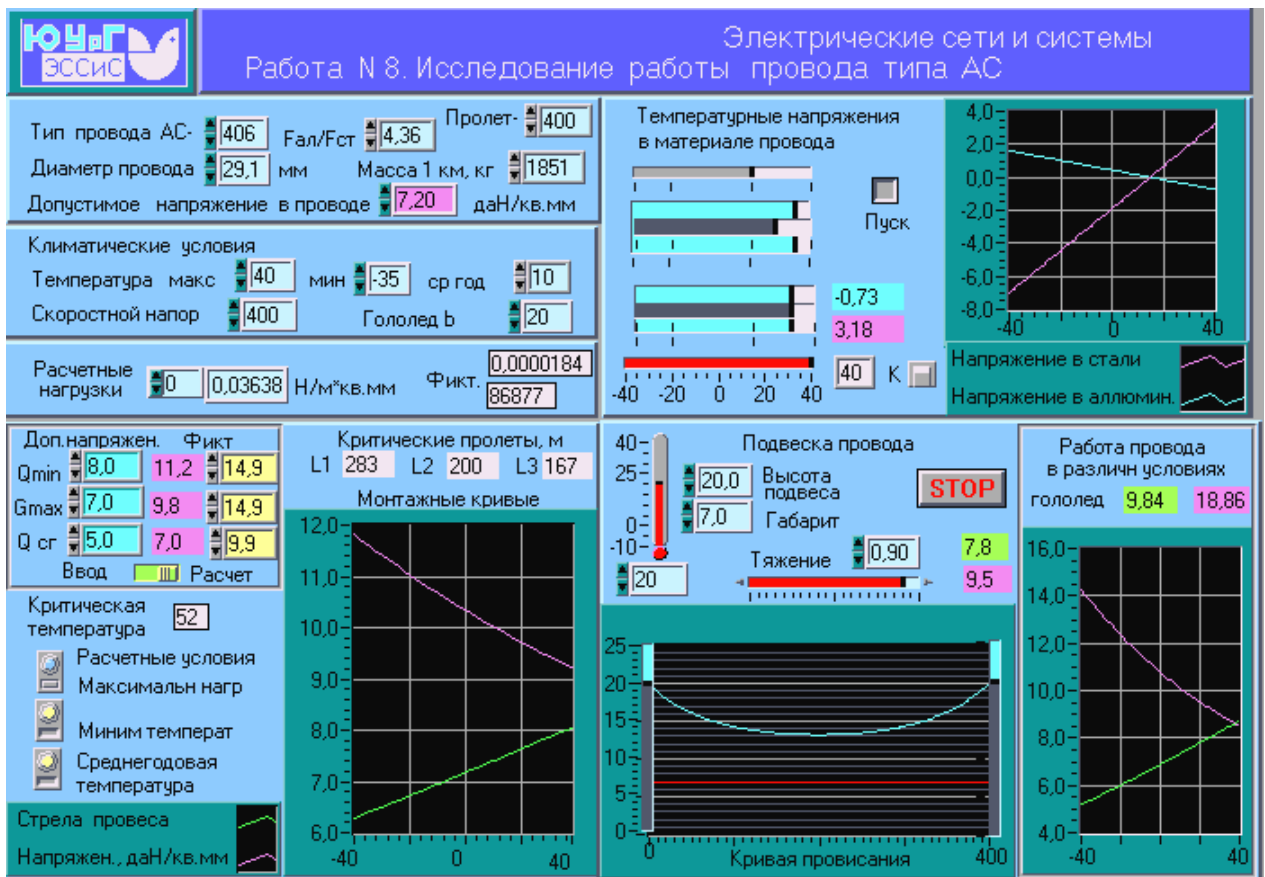


Рис. 5.5. Фронтальная панель виртуального устройства

Ниже расположены массив с **расчётными нагрузками** и индикаторы, на которые выведены коэффициент температурного расширения и модуль упругости провода в целом.

Справа в верхней части панели расположены индикаторы, диаграмма и кнопки, используемые при исследовании **температурных напряжений** в стальной и алюминиевой частях провода.

В левой нижней части размещены задатчики **допустимых механических напряжений** в алюминии провода, индикаторы фиктивных напряжений и допускаемые по ПУЭ фиктивные напряжения в проводе для разных климатических условий.

Здесь же представляются результаты расчёта трёх критических пролётов, критической температуры, кнопки со светодиодами для ввода выбранного расчётного режима и диаграмма с монтажными кривыми.

В центре нижней части фронтальной панели представлены необходимые приборы для **имитации процесса подвески провода** в пролёте, включающие задатчики высоты подвеса, габарита, температуры наружного воздуха и относительного тяжения. Здесь же выводится кривая провисания провода в пролёте, стрела провеса и механическое напряжение в проводе. Кнопка «stop» служит для фиксации установленного тяжения при натяжке провода.

В правой части приводятся результаты проверки работы натянутого в пролёте провода при различных климатических условиях.

Порядок выполнения работы

1. Активизировать программу. Ввести следующие исходные данные: пролёт – l , м; для провода – расчётное сечение алюминиевой части, соотношение алюминия к стали, общий диаметр провода и массу провода в кг/км; допустимое напряжение в проводе для алюминия, даН/мм²; климатические условия – температуру максимальную, минимальную, среднегодовую, °С, нормированный скоростной напор, Н/мм² [1] и нормированную толщину стенки гололёда, мм.

2. Запустить программу и строго соблюдать порядок исследования. Сравнить рассчитанные удельные нагрузки с нагрузками, определёнными ЭВМ и представленными в массиве «Расчётные нагрузки». (Нумерация элементов массива с нуля).

Также сравнить с расчётными выведенные значения фиктивных коэффициентов линейного расширения провода и модуля упругости.

3. Исследовать температурные напряжения в материале провода в диапазоне температур от -40° до $+40^{\circ}$ С. С этой целью нажать кнопку «пуск» и наблюдать изменение деформаций и механических напряжений при росте температуры (изменение можно остановить нажатием кнопки «к»). Изобразить график и проанализировать температурные напряжения в алюминиевой и стальной частях провода. По индикаторам определить температурные напряжения при температуре: минимальной, гололёда (нагрузка максимальная) и среднегодовой.

4. Определить допустимые напряжения от механической нагрузки в алюминиевой части при тех же температурах и установить на соответствующих датчиках, имеется ввиду, что $[\sigma]_{\theta_{\text{HM}}}^a = [\sigma]_{\gamma_{\text{H6}}}^a = 7,2 \text{ даН/мм}^2$,

$$[\sigma]_{\theta_{\text{CT}}}^a = 4,8 \text{ даН/мм}^2. [\sigma]_{aT}^a = [\sigma]_a^a - \sigma_{\theta}..$$

По результатам расчёта на индикаторы выводятся фиктивные допустимые механические напряжения для провода.

Если полученные напряжения отличаются от нормированных в ПУЭ значений, необходимо здесь же на датчиках жёлтого цвета ввести нормированные допустимые напряжения [1] для провода в целом, даН/мм²

5. Перевести положение переключателя в режим «расчёт». Сравнить критические пролёты с рассчитанными ранее, выбрать расчётные условия и проверить критическую температуру, проанализировать монтажные кривые.

6. Провести подвеску провода в пролёте, используя монтажные кривые, для этого задать: высоту подвеса провода, габарит и температуру воздуха во время проведения работы.

7. Проанализировать работу подвешенного провода при разных климатических условиях. Если при расчётных условиях напряжения или стрела провеса превысят допустимые значения или имеют большой запас, следует изменить тяжения при монтаже..

8. Студенту представляется возможность провести исследования по своему усмотрению.

Перед пуском программы необходимо все рабочие кнопки вернуть в исходное положение.

Содержание отчёта

1. Включить в отчёт аккуратно оформленную расчётную часть.
2. Сравнить результаты расчёта с экспериментальными данными и сделать выводы о влиянии температуры, гололёда, ветра на механические напряжения и стрелы провеса провода.
3. Составить монтажные кривые.

Контрольные вопросы

1. Конструкции сталеалюминиевых проводов.
2. Области применения сталеалюминиевых проводов.
3. Физический смысл фиктивного модуля упругости и его определение.
4. Физический смысл фиктивного коэффициента температурного расширения и его определение.
5. Механические напряжения, возникающие в АС проводе от действия нагрузки растяжения и нагрузки из-за изменения температуры.
6. Какие допустимые напряжения АС провода учитываются при механическом расчёте?
7. Какие соотношения климатических условий используются в качестве расчётных для АС проводов?
8. Что такое первый, второй и третий критические пролёты, как они рассчитываются?
9. В каком случае критический пролёт называется фиктивным?
10. В каком случае критический пролёт называется мнимым?
11. Как производится выбор расчётных условий для заданного пролёта?
12. Что такое критическая температура?
13. Как построить монтажные кривые?
14. Как использовать уравнения состояния провода для определения напряжения в проводе по длине пролёта при заданных расчётных условиях?

Литература

1. Правила устройства электроустановок / Минтопэнерго РФ. – 6-е изд. – М.: Главэнергонадзор, 1998.
2. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / Под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро – М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. Крюков К.П. Новгородцев Б.П. Конструкции и механический расчёт линий электропередачи. – Л.: Энергия, 1979.
5. Электротехнический справочник. – В 3-х т. – 7-е изд.. / Под общ. ред. И.Н. Орлова (гл. ред.) и др. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – Т.2; Т.3.
6. Электрические системы. Электрические сети / Под ред. В.А. Веникова, В.А. Строева. – М.: Высшая школа, 1998.

Оглавление

Введение.	3
Лабораторная работа № 1. Исследование режима сложной замкнутой электрической сети.	5
Лабораторная работа № 2. Исследование режима сети с автотрансформаторами.	16
Лабораторная работа № 3. Круговые диаграммы мощности линии электропередачи.	28
Лабораторная работа № 4. Механическая прочность монометаллических проводов.	42
Лабораторная работа № 5. Механическая прочность сталеалюминевых проводов.	58
Литература	70