

РАЗДЕЛ 1. МАТРИЧНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА НОРМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

1. ОПИСАНИЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАТРИЦ ИНЦИДЕНЦИЙ

Расчёты установившегося режима ЭЭС выполняются с помощью схемы замещения, представляющей собой графическое изображение участков электрической сети, показывающее последовательность соединения отдельных элементов и отображающее свойства рассматриваемой электрической схемы.

Ветвью называется участок цепи, состоящий из последовательно соединённых ЭДС и сопротивления (либо только сопротивления) и вдоль которого в любой момент времени ток имеет одно и значение. Узел определяется как точка соединения двух и более ветвей, а контур – как участок цепи, образованный таким последовательным соединением нескольких ветвей, при котором в одном узле начало первой ветви контура соединено с концом последней. Элементы схем замещения делятся на активные и пассивные. К активным элементам схем замещения относят источники ЭДС и тока. Для них наиболее характерно то, что они определяют напряжения или токи в точках присоединения этих элементов в соответствующей цепи, независимо от её остальных параметров. Пассивные элементы схем замещения (в первую очередь, сопротивления и проводимости) создают пути для протекания электрических токов. Пассивные элементы обычно разделяют на поперечные и продольные[1].

Источники электроэнергии могут быть представлены в виде источника напряжения с ЭДС, и внутреннего сопротивления, Z (рис 1.1, а), либо в виде источника задающего тока, имеющего значение тока J и значение внутреннего сопротивления равное бесконечности (рис. 1.1, б,в). Потребители электроэнергии (нагрузка) имеют схему замещения в виде сопротивлений Z (рис.1.1, г), либо, аналогично источнику питания, в виде источника тока, равному взятому с обратным знаком току нагрузки (рис. 1.1, д), либо в виде задающего тока J (рис. 1.1, е).

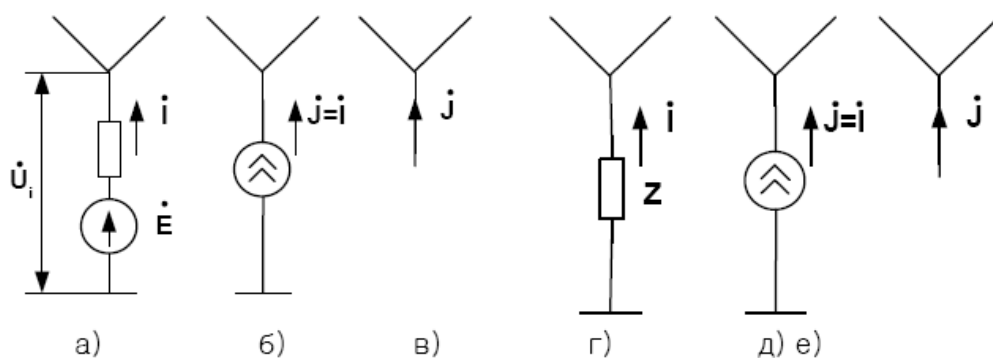


Рис. 1.1. Схемы замещения отдельных элементов

Схема замещения всей электрической сети может рассматриваться как граф, представляющий собой совокупность общепринятых для моделирования установившихся режимов схем замещения отдельных элементов – генераторов, трансформаторов, линий, нагрузок. Факт совпадения конечной точки ветви с отдельным узлом графа называют инцидентом (отношением). Схема замещения состоит из ветвей, связывающих различные узлы. Эти ветви организуют цепочки (пути графа), которые, замыкаясь, могут образовывать замкнутые контуры. Все величины, характеризующие режимные параметры ветвей (токи, ЭДС, напряжения) имеют определённые направления. Таким образом, схема замещения электрической сети обычно является связанным направленным (ориентированным) графом, для описания которого используется математическая модель.

Математическая модель режима электрической сети представляет собой совокупность организованных определённым образом (в базы данных) числовых массивов информации о конфигурации и параметрах электрической сети, заданных характеристиках режима по узлам сети и программ обработки этой информации, реализующих уравнения связи между зависимыми и независимыми характеристиками режима на основе параметров схемы сети. Принципиально в одних методах расчёта режима вначале определяются токи и потоки мощностей по ветвям, а затем падения напряжений на ветвях и напряжения в узлах сети (на шинах подстанций), а в других методах идут от расчёта напряжений на шинах подстанций к определению токов, потоков и потерь мощности по линиям сети.

При расчётах установившихся режимов электрические схемы наиболее удобно представлять в виде следующих матриц инцидентий:

1. **Матрица соединений в узлах (M)** - предназначена для аналитического описания ориентированного графа электрической сети и

отображает связь отдельных узлов в этой схеме. Условием правильности составления матрицы является наличие только одной положительной единицы и только одной отрицательной единицы в каждом столбце матрицы. Следовательно, сумма всех строк этой матрицы (по столбцам) должна давать нулевую строчную матрицу. Матрица представляет собой таблицу, каждая строка которой отвечает одному из узлов схемы, за исключением балансирующего, а каждый столбец – одной из ее ветвей. В клетках проставляется «0», если ветвь не связана с узлом, которому соответствует строка. Если ветвь связана с узлом, то в клетке ставится «+1» или «-1» [2].

«+1» – если узел является началом ветви;

«-1» – если ветвь входит в узел.

2. **Матрица контуров(N)** -служит для обобщённого аналитического описания соединений ветвей схемы в линейные замкнутые независимые контура. Условием правильности составления матрицы контуров является наличие хотя бы одной положительной, либо отрицательной единицы в отдельном столбце этой матрицы. Исключение составляют столбцы, содержащие ветви, не входящие ни в один линейный замкнутый независимый контур графа. В этом случае такие столбцы матрицы будут содержать только нулевые элементы. Если та или иная ветвь входит в контур, то на пересечении соответствующих строки и столбца ставится «+1» или «-1».

«+1» – если направление ветви совпадает с направлением обхода контура. Если ветвь не входит в контур, то в матрице **N** на пересечении строки и столбца записывается «0».

Рассмотрим алгоритм для составления матриц инциденций. Предположим, имеется граф электрической сети состоящий из одного генерирующего узла, пяти узлов потребления (нагрузка) и шести ветвей, изображенный на рис. 1.2.

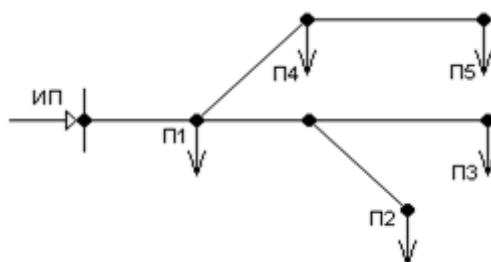


Рис. 1.2. Граф электрической сети

ИП – источник питания, П1-5 – узлы потребления

Перед составлением матриц инцидентий необходимо выполнить следующие действия:

1). **Пронумеровать узлы нагрузок.** Согласно теории графов однолинейную схему замещения трехфазной симметричной сложнозамкнутой электрической сети соответствует **связанный направленный граф**, который состоит из **вершин** и **ребер**, образующих **дерево** и **хорды** схемы. Аналогичные понятия и термины из теории цепей – **узел**, **ветвь**, **разветвленная разомкнутая сеть** и ветви, замыкающие контуры или **контурные ветви**. В общем случае нумерация элементов схемы может быть произвольная, но на стадии освоения предмета для обеспечения наглядной структуры матриц параметров сети и уравнений состояния, целесообразно вести упорядоченную нумерацию элементов схем с использованием **принципа ярусности**: в схеме электрической системы выбирают **балансирующий узел (БУ)** – шины электростанции или крупной подстанции энергосистемы, мощность которого, в отличие от других узлов сети, не фиксируется. Балансирующему узлу присваивается последний (n+1) -й номер.

Порядок нумерации схем с учетом принципа ярусности:

а). Последовательно числами натурального ряда на графе схемы нумеруются все ветви, берущие свое начало в балансирующем узле, и такие же номера присваиваются узлам (вершинам), которые являются концами этих ветвей (концом первой ветви должен быть узел 1, концом второй – узел 2, и т. д.). Эти ветви составят **первый ярус** схемы.

б). Затем, начиная с 1-ой вершины графа, по аналогичному принципу, выбираются и нумеруются ветви **второго яруса**, оттекающие от конечных вершин ветвей первого яруса, затем ветви **третьего яруса**, оттекающие от конечных вершин ветвей второго яруса и т.п. То есть, начальными вершинами ветвей последующего яруса служат концы ветвей предыдущего яруса, и рассмотрение узлов ведется в порядке возрастания их номеров: - в этом суть принципа ярусности (в реальной схеме электрической сети может быть несколько сотен ветвей). Совокупность n ветвей схемы, составляющих минимальный связанный подграф, обеспечивающий связь балансирующего узла со всеми n независимыми узлами схемы, образует так называемое **дерево сети**.

в). Когда в ходе нумерации встречается ветвь, подтекающая к ранее пронумерованному узлу, то эта ветвь замыкает собой **контур** – и называется **хордой**.

2. Выбрать в линиях направления токов принимаемых за положительные. Для всех ветвей, согласно принципу урусности за положительное принимается направление от начальной вершины к конечной и номер начала ветви меньше номера конца ($N_{\text{нач}} < N_{\text{кон}}$). Для каждой из хорд за положительное также принимается направление от начальной вершины к конечной. Хорды условно помечаются на схеме и отдельно нумеруются (I, II, III, ... k, где k – число контуров) в дополнение к сквозной нумерации ветвей $i = 1, 2, \dots, m$.

3. Сформировать матрицу инциденций. В результате нумерации схемы формируется массив номеров (и наименований) ветвей дерева из n элементов, массив номеров (и наименований) узлов N_n – из n элементов, и массив номеров (и наименований) хорд схемы – k элементов, где $k + n = m$ – полному числу ветвей схемы.

Для составления матрицы инциденций M заготавливается таблица, состоящая из n строк (по числу узлов) и m столбцов (по числу ветвей), где $m = n + k$. Строки ее соответствуют узлам, а столбцы – ветвям схемы замещения.

Номер строки матрицы соответствует номеру рассматриваемого узла i . Номер столбца j соответствует номеру рассматриваемой ветви в объединенном массиве информации о ветвях. Элемент $m_{i,j}$ матрицы, принадлежащий i -й строке и j -ому столбцу, может принимать одно из трех значений: +1, -1, или 0

$m_{i,j} = 1$ - если узел i является начальной вершиной ветви j (ветвь j “оттекает” от узла i).

$m_{i,j} = -1$ - если узел i является конечной вершиной ветви j (ветвь j “подтекает” к узлу i).

$m_{i,j} = 0$ - если узел i не является вершиной ветви j , т.е. не связан с этой ветвью.

Составим для графа представленного на рис. 1.2. матрицу инциденций M . Для составления матрицы соединений в узлах M выберем направления токов принимаемых за положительные в каждой ветви (рис. 1.3), и согласно правилам составим матрицу:

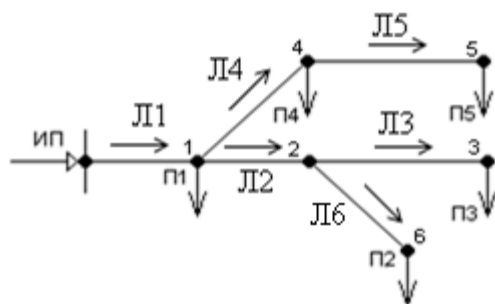


Рис. 1.3. Граф электрической сети

M =

-1	1	0	1	0	0	1
0	-1	1	0	0	1	2
0	0	-1	0	0	0	3
0	0	0	-1	1	0	4
0	0	0	0	-1	0	5
0	0	0	0	0	-1	6
1	2	3	4	5	6	

узлы

ветви

Для составления матрицы контуров N, разобьем электрическую сеть на два контура, и выберем направление обхода каждого контура принимаемого за положительное:

N =

1	-1	0	0	-1	0	I
0	0	0	-1	1	1	II
1	2	3	4	5	6	

ветви

контуры

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

ЗАДАЧА 1.1. Составьте матрицу инциденций M для схемы электрической сети представленной на рис. 1.3.

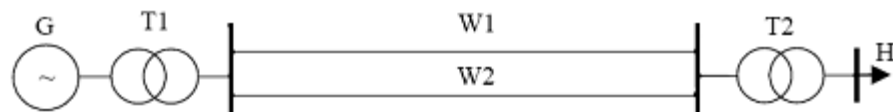


Рис. 1.3. Схема электрической сети

G - генератор; T1, T2 - трансформаторы; W1, W2 - воздушные линии электропередачи; H - нагрузка потребителей электроэнергии

ЗАДАЧА 1.2. Выберите направления токов принимаемых за положительные и составьте матрицы инциденций M и N для схемы электрической сети представленной на рис. 1.4.

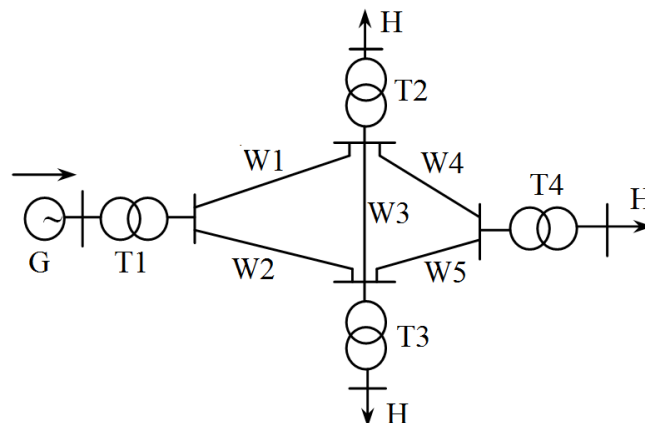


Рис. 1.4. Принципиальная схема электрической системы

ЗАДАЧА 1.3. Составьте матрицу инциденций M , а затем с помощью программы Optima (в целях сокращения материала, интерфейс программы не

рассматривается, тем более что она широко применяется на лабораторных занятиях и курсовому проектированию по данной дисциплине) рассчитайте токи в линиях и напряжения в узлах следующей схемы электрической сети рассчитанной на напряжение $U = 110$ кВ (рис.1.5). Длины линий, и мощности нагрузки приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Расчетные данные

Сечение провода, мм ² / Длина линии, км			Мощность нагрузки P/Q , МВА	
W1, W2	W3	W4	2	3
2x95/60	150/38	120/22	24/7.2	25/7.5

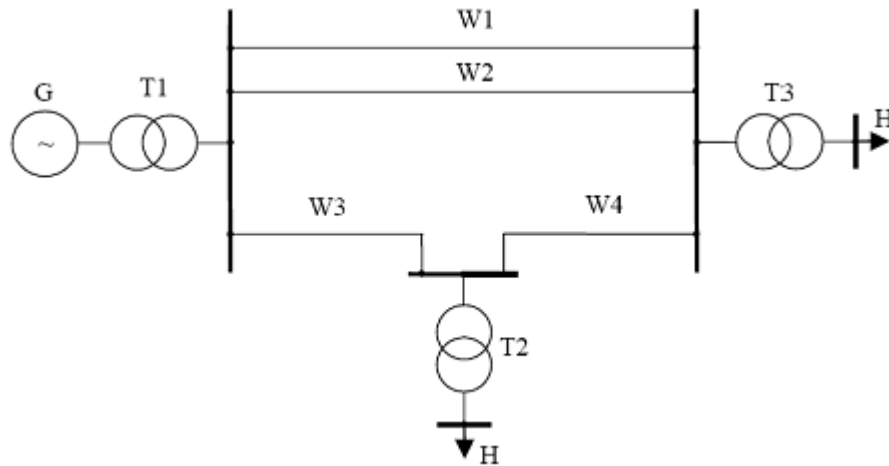


Рис. 1.5. Расчетная схема электрической сети.

G генератор; T1, T2 трансформаторы; W1, W2, W3, W4 воздушные линии электропередачи; H -нагрузка потребителей электроэнергии

ЗАДАЧА 1.4. Составьте матрицу инциденций M, а затем с помощью программы Optima рассчитайте токи в линиях и напряжения в узлах схемы электрической сети рассчитанной на напряжение $U = 110$ кВ (рис.1.6). Длины линий, и мощности нагрузки приведены в таблице 1.3.

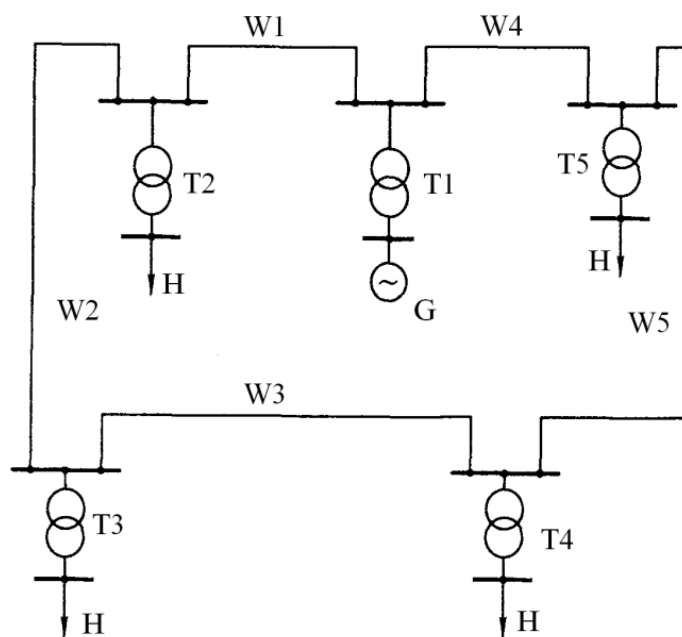


Рис. 1.6. Расчетная схема электрической сети.

Таблица 1.3. Расчетные данные

Сечение провода, мм ² / Длина линии, км			Мощность нагрузки P/Q, МВА			
W1, W2	W3, W5	W4	2	3	4	5
120/30	150/35	120/28	28/8.4	21/6.3	18/5.4	24/7.2

ЗАДАЧА 1.5. Составьте матрицу инциденций M , а затем с помощью программы Optima рассчитайте токи в линиях и напряжения в узлах схемы электрической сети. Напряжение генерирующего узла $U = 220$ кВ, напряжение в линиях W4, W5, $U = 110$ кВ, (рис.1.7). Автотрансформаторы на подстанциях 2 и 3 работают с номинальными коэффициентами трансформации. Потерями мощности в трансформаторах пренебречь. Длины линий, и мощности нагрузки приведены в таблице 1.4.

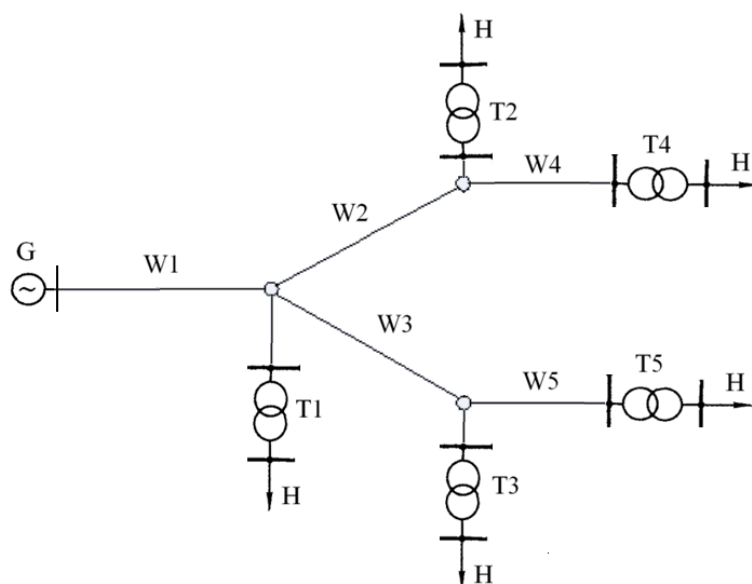


Рис. 1.6. Расчетная схема электрической сети.

Таблица 1.4. Расчетные данные

Сечение провода, мм ² / Длина линии, км			Мощность нагрузки P/Q , МВА		
W1	W2, W3	W4, W5	1	2,3	4,5
300/60	240/42	150/28	34/10.2	25/7.5	19/5.7

Контрольные вопросы

1. Назовите отличия матриц M, N ?
2. Чему равна сумма элементов столбца матрицы M ?
3. Чему равна сумма всех строк матрицы M , взятая по столбцу?
4. Чему равны диагональные элементы матрицы M при упорядоченной нумерации узлов и ветвей, основанной на принципе ярусности?
5. Как найти обратную матрицу?
6. Что значит рассчитать режим электрической системы?
7. Приведите состав исходной и выходной информации о режиме работы электрической сети.