МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ
Проректор
_____ Т.Ю. Ткачева
«_2_» _11_ 2026

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Методические указания к практическим занятиям для студентов направления подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Курск 2026

УДК 621.31

Составители: О.М. Ларин, Чаплыгин В.А.

Рецензент:
Кандидат технических наук, зав. кафедрой «Электроэнергетика и электротехника», доцент *И.В. Ворначева*

Анализ режимов в электроэнергетических системах: методические указания к практическим занятиям для студентов направления подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: О.М. Ларин, В.А. Чаплыгин – Курск, 2026. – 25 с.: ил. 2. – Библиогр.: с. 25.

Содержат методические указания для практических занятий по дисциплине «Анализ режимов в электроэнергетических системах».

Методические указания соответствуют требованиям программы, для направления подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Предназначены для студентов направления подготовки 13.04.02 всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 2.11.26 . Формат 60x84 1/16.
Усл.печ.л. 1,45 . Уч.–изд.л 1,32 . Тираж 100 экз. Заказ 944. Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г.Курск, ул.50 лет Октября, 94

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №1

АНАЛИЗ И СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ГРАФИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Цель занятия: *ознакомление с показателями качества электроэнергии, формулами для их расчета, нормативными значениями этих показателей* **.**

Краткие методические указания

График электрических нагрузок представляет зависимости потребляемой мощности, записанные по показаниям счетчиков активной и реактивной энергии, снятым через определенные одинаковые интервалы времени.

Форма суточного графика нагрузок определяется режимом работы предприятия. Для предприятий с односменным режимом работы наблюдается один ярко выраженный максимум, соответствующий началу работы (8-9 часов утра). При двух- и трехсменном режиме появляется второй максимум (в районе 16-17 часов), который может быть больше или меньше первого в зависимости от продолжительности светового дня.

При этом электрическая нагрузка потребителей и генерация источников зависят от большого числа случайных факторов. Поэтому они являются случайными величинами.

Для анализа и сжатия информации о нагрузках, представленных суточными графиками, используются выборочные точечные и интервальные оценки случайных величин.

Выборочная средняя мощность (математическое ожидание) нагрузки:

$$P_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_i}{n}; \qquad (1)$$

$$Q_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_i}{n}; \qquad (2)$$

где P_i, Q_i – активная и реактивная мощности на i -й ступени графика, МВА;

n – количество ступеней графика нагрузки.

Среднее квадратическое (стандартное) отклонение для активной и реактивной мощности:

$$S_P = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} P_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{P_i}{n}\right)^2}{n-1}}; \quad (3)$$

$$Q_P = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} Q_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{Q_i}{n}\right)^2}{n-1}}. \quad (4)$$

Дисперсия случайной величины:

$$\begin{aligned} D_P &= S_p^2; \\ D_Q &= S_Q^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Для определения достоверности точечных оценок, полученных с использованием ограниченного массива данных, в математической статистике рассматриваются доверительные интервалы:

- доверительный интервал средней величины:

$$\begin{aligned} P_{cp} &\pm t_{n-1,\alpha} \cdot \sigma_P / \sqrt{n}; \\ Q_{cp} &\pm t_{n-1,\alpha} \cdot \sigma_Q / \sqrt{n}; \end{aligned} \quad (6)$$

где $t_{n\text{-}1,\alpha}$ - коэффициенты распределения Стьюдента с (n −1) степенями свободы и уровнем достоверности α (обычно принимается равным 0,95 или 0,9);

- доверительный интервал стандартного отклонения или дисперси:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_P^2 \cdot (n-1)}{\chi^2_{n-1,\beta/2}} &\le \sigma_P^2 \le \frac{\sigma_P^2 \cdot (n-1)}{\chi^2_{n-1,1-\beta/2}}; \\ \frac{\sigma_Q^2 \cdot (n-1)}{\chi^2_{n-1,\beta/2}} &\le \sigma_Q^2 \le \frac{\sigma_Q^2 \cdot (n-1)}{\chi^2_{n-1,1-\beta/2}}; \end{aligned} \quad (7)$$

где $\chi^2_{n1-1,\beta/2}$ – коэффициенты распределения Пирсона при $(n-1)$ степенях свободы и статистической надежности β.

Параметры $t_{n\text{-}1,\alpha}$ и $\chi^2_{n1-1,\beta/2}$ определяются по справочным таблицам или рассчитываются на вычислительной технике.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с точечными и интервальными оценки случайных величин.
2. Изучить формулы для их расчета.
3. По заданным графику электрической нагрузки определить значения точечных и интервальных оценок случайных величин.
4. Сделать выводы о допустимости найденных значений показателей КЭ.

Контрольные вопросы

1. Как определяется график нагрузки?
2. Чем определяется форма суточного графика нагрузок?
3. Почему электрическая нагрузка потребителей является случайной величиной?
4. Как определяется математическое ожидание) нагрузки?
5. Что относится к случайным событиям при рассмотрении графиков нагрузки?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 2

СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ЛИНИЙ И РАСЧЕТ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ

Цель занятия: *ознакомление с типовыми схемами замещения отдельных элементов систем электроснабжения, методами составления упрощенных и полных схем замещения систем электроснабжения.*

Краткие методические указания

Используя типовые схемы замещения отдельных фрагментов сети (воздушные и кабельные линии, трансформаторы) и ее структурную схему, надо составить схему замещения сети. Она может быть полной или упрощенной, например, в схеме замещения отсутствуют поперечные ветви – проводимости.

Сопротивления линий электропередачи в общем случае, в том числе и при параллельной работе, определяются по формулам:

$$R_{л} = r_0 \cdot L/n; \quad (1)$$

$$X_{л} = x_0 \cdot L/n; \quad (2)$$

где r_0 , x_0 – погонные активное и реактивное сопротивления, Ом/км;

L – длина линии, км;

n – количество параллельно работающих цепей линии.

Справочные значения приводятся для температуры окружающей среды 20°С. Активное сопротивление зависит от температуры, но при расчетах эта зависимость обычно не учитывается (принимаются табличные значения удельного активного сопротивления), за исключением случаев, когда линии работают в экстремальных условиях.

Зависимость r_0 от температуры t имеет вид:

$$r_{0,t} = r_{0,20^\circ}(1 + 0{,}004(t - 20^\circ)). \quad (3)$$

Индуктивное сопротивление воздушной линии (ВЛ) определяется индуктивностью фаз ВЛ по отношению к земле и взаимоиндукцией между фазами и, следовательно, зависит от взаимного расположения фаз, расстояния между фазами и диаметра

провода. Для устранения разницы в величине индуктивного сопротивления фаз (крайних и средней) производится транспозиция проводов.

Индуктивное сопротивление фазы одноцепной транспонированной линии с проводами из цветных металлов (медь, алюминий, сталеалюминий) подсчитывается с учетом взаимодействия фаз по соотношению:

$$x_0 = 0{,}1445 \lg \frac{D_{ср}}{r_{эк}} + \frac{0{,}0157}{m}, Ом / км, \qquad (4)$$

где $D_{ср}$ - среднегеометрическое расстояние между фазами, м;

$r_{эк}$ - эквивалентный радиус фазы, м;

m - число проводов в фазе.

При значительном номинальном напряжении $U_{ном}$ ВЛ напряженность электрического поля вокруг проводов может превысить критическую напряженность, соответствующую электрической прочности воздуха. Тогда вокруг провода возникает тлеющий электрический разряд (корона), на поддержание которого расходуется электрическая энергия.

Для снижения или устранения напряженности электрического поля помимо расщепления проводов ограничивается минимально допустимое сечение провода. Тем не менее, при некоторых условиях (неблагоприятных атмосферных) корона может возникать.

В справочной литературе приводятся данные по максимальным и минимальным удельным (на 1 км длины ВЛ) потерям активной мощности ($\Delta P_{к.о}$) на корону. По этой величине определяется удельная активная проводимость ВЛ G_0, См/км:

$$G_0 = \frac{\Delta P_{к.о}}{U^2_{ном}}. \qquad (5)$$

Емкостная проводимость линии определяется токами смещения за счет электростатического поля линии (между фазами и по отношению к земле). Эта проводимость создает так называемый зарядный, или емкостный, ток, вектор которого опережает на 90° вектор напряжения линии. Величина удельной емкостной проводимости B_0, См/км, определяется следующим образом:

$$B_0 = \frac{7{,}58}{\lg \dfrac{D_{ср}}{r_{экв}}} \cdot 10^{-6}. \qquad (6)$$

При расчете режима работы электрической сети воздушная трехфазная линия переменного тока напряжением $U_{ном} \leq 500$ кВ и длиной до 300 км может быть представлена схемой замещения с сосредоточенными параметрами П-образного или Т-образного вида (рис. 1).

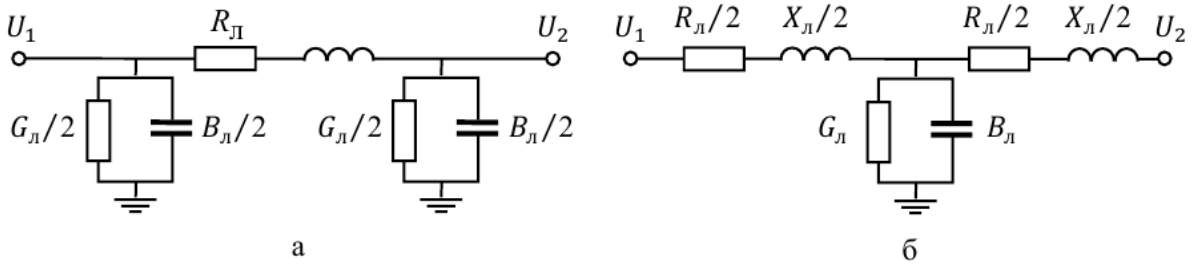


Рис. 1. Схемы замещения воздушной линии электропередачи:
а – П-образная; б – Т-образная

Для расчета режимов электрической сети, как правило, используется П-образная схема замещения сети, параметры схемы замещения вычисляются для одной фазы.

Порядок выполнения работы

1. По заданным преподавателем данным для ВЛ произвести расчет параметров П-образной схемы замещения.
2. По заданным преподавателем данным для КЛ произвести расчет параметров П-образной схемы замещения.
3. Повторить п.1 и п.2 для других линий .
4. Выполнить расчет параметров Т-образной схемы замещения.

Контрольные вопросы

1. Назначение схем замещения.
2. Различия между П- и Т-образными схемами замещения.
3. Требования к схемам замещения.
4. Что учитывает активная проводимость в схемах замещения?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 3

СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ И РАСЧЕТ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ

Цель занятия: *ознакомление с типовыми схемами замещения трансформаторов и автотрансформаторов, методами составления упрощенных и полных схем замещения систем электроснабжения.*

Краткие методические указания

На подстанциях электроэнергетических систем применяются двух- и трехобмоточные трансформаторы и автотрансформаторы. Трансформаторы выполняются трехфазными или однофазными. В последнем случае три однофазных трансформатора на подстанциях составляют одну трехфазную группу. Однофазные трансформаторы, предназначенные для трехфазных электрических систем, применяются при большой мощности трансформаторов (трехфазная номинальная мощность не менее 400 МВА), т. е. при наибольшем, восьмом, габарите, когда они по размерам становятся негабаритным грузом для перевозки по железной дороге.

Все параметры двухобмоточного трансформатора, как правило, приводятся к высшему напряжению. В каталоге двухобмоточного трансформатора указываются:

$S_{н}$ - номинальная мощность трансформатора, кВА;

$U_{в.н}$, $U_{н.н}$ - номинальные напряжения обмоток, кВ;

$U_{к\%}$ - напряжение короткого замыкания в процентах от номинального высшего напряжения;

$\Delta P_{к.з}$ - потери короткого замыкания, кВт;

$I_{х.х\%}$ - ток холостого хода в процентах от номинального тока обмотки высшего напряжения;

$\Delta P_{х.х}$ - потери холостого хода, кВт.

Схема замещения двухобмоточного трансформатора приведена на рис.1.

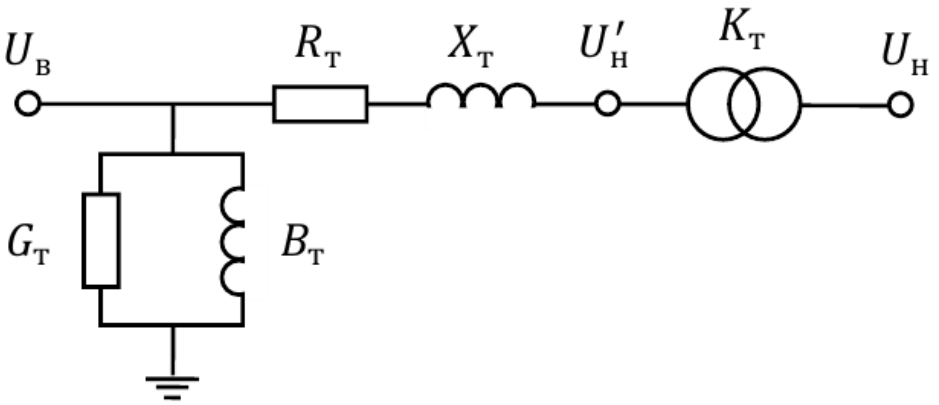


Рисунок 1. Схема замещения двухобмоточного трансформатора

Активное сопротивление $R_{т}$ определяется через каталожные параметры трансформатора, Ом, по следующей формуле:

$$R_T = \frac{\Delta P_{к.з} U_н^2}{S_н^2}, \quad (1)$$

где $U_{н}$ - номинальное линейное (обычно высшее) напряжение обмотки, к которой приводится сопротивление;

$S_{н}$ - номинальная трехфазная мощность трансформатора.

Индуктивное сопротивление $X_{т}$ определяется через каталожные параметры трансформатора, Ом, по следующей формуле:

$$X_T = \frac{u_{к\%} U_н^2}{100 S_н}. \quad (2)$$

Активная и индуктивная проводимости трансформатора обусловлены соответственно нагревом стали за счет вихревых токов и потерями на намагничивание.

Активная проводимость $G_{т}$ определяется через каталожные параметры трансформатора, См, по следующей формуле:

$$G_T = \frac{\Delta P_{х.х}}{U_{в.н}^2}. \quad (3)$$

Индуктивная проводимость $B_{т}$ определяется через каталожные параметры трансформатора, См, по следующей формуле:

$$B_T = \frac{i_{х.х\%} S_н}{100 U_н^2}. \quad (4)$$

Порядок выполнения работы

1. По заданным преподавателем данным для ВЛ произвести расчет параметров П-образной схемы замещения.

2. По заданным преподавателем данным для КЛ произвести расчет параметров П-образной схемы замещения.

3. Повторить п.1 и п.2 для других линий .

4.Выполнить расчет параметров Т-образной схемы замещения.

Контрольные вопросы

1. Назначение схем замещения.
2. Различия между П- и Т-образными схемами замещения.
3. Требования к схемам замещения.
4. Что учитывает активная проводимость в схемах замещения?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 4

РАСЧЕТ ТОКОВ В ВЕТВЯХ РАЗОМКНУТОЙ СЕТИ ПРИ ПОМОЩИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

***Цель занятия**: ознакомление с методами расчета токов в ветвях разомкнутой сети системы электроснабжения, анализа полученных результатов.*

Краткие методические указания

Расчет рабочего состояния сети (системы) по составленной схеме замещения сводится к обычному расчету электрической цепи известными методами теоретических основ электротехники. Содержание поставленной инженерной задачи, сложность схемы замещения, большое количество исследуемых параметров не позволяют непосредственно использовать классические расчетные методы. Они модифицируются с тем, чтобы достаточно просто, но вместе с тем и наиболее полно, отразить специфику электрических сетей. С этой целью широко используется матричная форма представления параметров сети и режима и теория графов.

Так, применяя теорию графов к электрическим цепям, в схеме замещения выделяют узлы, независимые контуры, дерево и хорды. Контур предусматривает замкнутый путь, состоящий из последовательного прохождения ветвей, имеющих отношение к данному контуру. Каждый следующий контур добавляет по крайней мере одну дополнительную ветвь, однако последний контур содержит все ветви, принадлежащие уже рассмотренным контурам. Поэтому последний контур называют зависимым от предыдущих.

Затем все элементы последовательно нумеруются, а их взаимное положение описывается специальными матрицами.

На этом этапе работы рекомендуется придерживаться следующих правил:

1. Нумерация узлов (вершин) ведется снизу вверх по иерархии дерева схемы, т.е. в направлении от наиболее удаленных узлов к балансирующему. Балансирующий узел является последним в нумерации узлов.

2. Далее нумеруются ветви дерева схемы. Их направление выбирается от балансирующего узла к нагрузке. Каждой ветви присваивается номер конечной вершины.

3. В схеме замещения выделяются и нумеруются независимые контуры, выбирается направление их обхода.

4. Выделяются хорды схемы, не допуская более одной хорды в каждом независимом контуре. Хорды нумеруются во вторую очередь и в соответствии с последовательностью нумерации контуров. Направления хорд должны совпадать с направлением обхода контуров.

При расчете разомкнутых сетей решается только одно узловое матричное уравнение:

$$\boldsymbol{I} = \boldsymbol{C}_{\text{Р}} \cdot \boldsymbol{J} \; ; \qquad (1)$$

где $\boldsymbol{I}$ – матрица токов в ветвях схемы;

$\boldsymbol{J}$ – матрица узловых задающих токов;

$\boldsymbol{C}_{\text{Р}}$ – матрица коэффициентов распределения токов.

Алгоритм расчета:

1. Выполнить нумерацию узлов и ветвей схемы замещения сети.

2. Составить матрицу узловых токов по данным.

3. Составить диагональную матрицу сопротивлений ветвей схемы - $\boldsymbol{Z}_{\text{в}}$.

4. Составить первую матрицу соединений $\boldsymbol{M}_{\text{Р}}$, включая в нее все узлы, кроме базисного.

5. По матрице $\boldsymbol{M}_{\text{Р}}$ получить обратную матрицу $\boldsymbol{C}_{\text{Р}} = \boldsymbol{M}_{\text{Р}}^{-1}$ или составить ее, используя для этого граф схемы.

6. Решить узловое уравнение (1) относительно токов в ветвях.

7. Определить падение напряжения в ветвях:

$$\boldsymbol{U}_{\text{в}} = \boldsymbol{C}_{\text{Р}} \cdot \boldsymbol{I}. \qquad (2)$$

8. Определить матрицу узловых напряжений:

$$\boldsymbol{U}_{\text{у}} = \boldsymbol{C}_{\text{Р}}^{\text{Т}} \cdot \boldsymbol{U}_{\text{в}} \; , \qquad (3)$$

где $\boldsymbol{C}_{\text{Р}}^{\text{Т}}$ – транспонированная матрица коэффициентов токораспределения.

Порядок выполнения работы

1. Для заданной преподавателем схемы электрической сети системы электроснабжения выделить узлы, независимые контуры, дерево и хорды.
2. Выполнить нумерацию выделенных элементов электрической сети системы электроснабжения.
3. Составить соответствующие матрицы.
4. Решить матричные уравнения по формулам (1-3).
5. Выполнить анализ полученных результатов.

Контрольные вопросы

1. Что такое граф электрической схемы?
2. Какой контур называется независимым?
3. Как находится для заданной матрицы обратная?
4. Как производится транспонирование матрицы?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 5

ПРЯМОЙ МЕТОД РАСЧЕТА СЛОЖНОЗАМКНУТЫХ СЕТЕЙ

Цель занятия: *ознакомление с методами расчета сложнозамкнутых схем системы электроснабжения, анализа полученных результатов.*

Краткие методические указания.

Составление контурных уравнений опирается на использование I и II законов Кирхгофа. Для записи законов Кирхгофа в матричной форме необходимо составить топологические матрицы схемы.

Метод расчета, основанный на применении уравнений 1 и II законов Кирхгофа без какого-либо их предварительного преобразования, может быть условно назвав прямым методом расчета сети.

Рабочий режим любой сложнозамкнутой схемы замещения определяется полностью системой узлового и контурного уравнений состояния:

$$\boldsymbol{M} \cdot \boldsymbol{I} = \boldsymbol{J}\ , \qquad (1)$$

$$\boldsymbol{N} \cdot \boldsymbol{Z}_{\text{в}} \cdot \boldsymbol{I} = \boldsymbol{E}_{\text{к}}\ , \qquad (2)$$

где $\boldsymbol{N}$ – вторая матрица соединений;

$\boldsymbol{E}_{\text{к}}$ – матрица контурных ЭДС.

В каждое уравнение системы (5-8) входит матрица искомых токов ветвей $\boldsymbol{I}$. Однако каждое из них, взятое отдельно, не позволяет найти эти токи, поскольку матрицы $\boldsymbol{M}$ и $\boldsymbol{NZ}_{\text{в}}$ - не квадратные и, следовательно, для них не могут быть найдены обратные матрицы. Для определения токов $\boldsymbol{I}$ должна быть, следовательно, использованы системы уравнений (1) и (2).

Алгоритм проведения расчета:

1. Выполнить нумерацию узлов и ветвей схемы замещения сети.

2. Составить матрицу задающих узловых токов $\boldsymbol{J}$.

3. Составить матрицы сопротивлений ветвей дерева $\boldsymbol{Z}_{\text{в.}\alpha}$ и хорд $\boldsymbol{Z}_{\text{в.}\beta}$.

4. Составить первые матрицы соединений для дерева $\boldsymbol{M}_{\alpha}$ и хорды $\boldsymbol{M}_{\beta}$.

5. Составить вторые матрицы соединений для дерева $\boldsymbol{N}_{\alpha}$ и хорды $\boldsymbol{N}_{\beta}$.

6. Определить матрицу коэффициентов распределения токов в ветвях дерева $\boldsymbol{C}_{\text{Р}}$ по матрице $\boldsymbol{M}_{\alpha}$ или составить, используя граф схемы.

7. Рассчитать токи хордах по матричному уравнению:

$$\boldsymbol{I}_{\beta} = (\boldsymbol{Z}_{\text{в.}\beta} + \boldsymbol{N}_{\alpha}\cdot\boldsymbol{Z}_{\text{в.}\alpha}\cdot\boldsymbol{N}_{\alpha}^{\text{Т}})^{-1}\cdot(\boldsymbol{N}_{\alpha}\cdot\boldsymbol{Z}_{\text{в.}\alpha}\cdot\boldsymbol{C}_{\text{Р}}\cdot\boldsymbol{J}). \qquad (3)$$

8. Рассчитать токи в ветвях дерева по выражению:

$$\boldsymbol{I}_{\alpha} = \boldsymbol{C}_{\text{Р}}(\boldsymbol{J} - \boldsymbol{M}_{\beta}\cdot\boldsymbol{I}). \qquad (4)$$

9. Определить матрицу узловых напряжений:

$$\boldsymbol{U}_{\text{у}} = \boldsymbol{C}_{\text{Р}}^{\text{Т}}\cdot\boldsymbol{Z}_{\text{в.}\alpha}\cdot\boldsymbol{I}_{\alpha}. \qquad (5)$$

Фактические потери мощности и электроэнергии могут быть разделены на четыре составляющие:

Порядок выполнения работы

1.Для заданной преподавателем системы электроснабжения составить матрицы по I и II законам Кирхгофа.

2. Определить элементы матриц, характеризующих рассматриваемую систему электроснабжения.

3. Составить матричные уравнения (1) и (2).

4. Выполнить решение составленных матричных уравнений.

Контрольные вопросы

1. Правила составления матриц схемы по I и II законам Кирхгофа.

2. Почему для матриц $\boldsymbol{M}$ и $\boldsymbol{NZ}_{\text{в}}$ нельзя найти обратные?

3. Способы решения матричных уравнений.

4. Достоинства и недостатки прямого метода расчета сетей.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 6

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНТУРНЫХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Цель занятия: *ознакомление с методами расчета сложнозамкнутых схем системы электроснабжения, анализа полученных результатов.*

Краткие методические указания

Метод контурных уравнений предназначен для расчета параметров установившихся режимов сложнозамкнутых электрических сетей. Суть метода заключается в составлении и решении системы контурных уравнений и определении на их основе параметров режима. Система контурных уравнений может быть записана в форме токов или мощностей. Число независимых контурных уравнений соответствует числу независимых контуров схемы.

Правило записи контурных уравнений сформулировано с использованием элементов теории графов и содержит следующие основные этапы.

1. Составляется граф электрической сети с выделением дерева сети и хорд.
2. Определяются независимые контуры и число независимых контурных уравнений в соответствии с числом хорд в сети.
3. Выбираются направления обхода контуров заданием направлений контурных токов, протекающих в хордах.
4. Вычисляются собственные сопротивления контуров как сумма сопротивлений всех ветвей в каждом контуре. Знак собственного сопротивления контура всегда положительный.
5. Определяются знаки и значения взаимных сопротивлений контуров; значение равно сумме сопротивлений ветвей, входящих одновременно в два соседних контура, знак выбирается положительным при совпадении контурных токов этих двух контуров в общих ветвях и отрицательным — при встречном направлении контурных токов.

6. Контурное уравнение для каждого контура включает: собственный контурный ток, умноженный на его собственное сопротивление; контурные токи соседних контуров, умноженные на взаимные сопротивления данного контура с соседними с соответствующими знаками; свободный член каждого уравнения.

Искомое токораспределение может быть найдено путем решения следующей системы уравнений:

$$\boldsymbol{I}_к = -\boldsymbol{Y}_к \cdot \boldsymbol{N} \cdot \boldsymbol{Z}_\alpha \cdot \boldsymbol{J}, \qquad (1)$$

где $\boldsymbol{I}_к$ - матрица контурных токов (токов в хордах графа);

$\boldsymbol{Y}_к$ - матрица контурных проводимостей;

$\boldsymbol{Z}_\alpha$ - матрица, полученная путем объединения матриц $\boldsymbol{Z}_{\alpha\alpha}$ и $\boldsymbol{Z}_{\beta\beta}$.

Алгоритм расчета:

1. В графе схемы выделить дерево (α) и хорды (β).

2. Выполнить нумерацию узлов.

3. Выделить независимые контуры, указать направление обхода и пронумеровать их.

4. Выбрать условное направление ветвей схемы. Пронумеровать ветви дерева и хорды.

5. Составить матрицу узловых задающих токов $\boldsymbol{J}$.

6. Составить матрицу сопротивлений ветвей схемы: $\boldsymbol{Z}_{\beta\alpha}$ и выделить из нее подматрицу (блок) сопротивлений ветвей дерева.

7. Составить вторую матрицу соединений $\boldsymbol{N}$ и выделить из нее подматрицу для дерева схемы $\boldsymbol{N}_\alpha$.

8. Составить первую матрицу соединений для дерева схемы $\boldsymbol{M}_\alpha$.

9. Транспонировать матрицы $\boldsymbol{N}$, $\boldsymbol{N}_\alpha$, получив матрицы $\boldsymbol{N}_Т$, $\boldsymbol{N}_{\alpha Т}$.

10. По матрице $\boldsymbol{M}_\alpha$ определить матрицу коэффициентов распределения токов в ветвях дерева схемы $\boldsymbol{C}_Р$ или составить её по схеме.

11. Рассчитать матрицу контурных сопротивлений:

$$\boldsymbol{Z}_к = \boldsymbol{N} \cdot \boldsymbol{Z}_в \cdot \boldsymbol{N}_Т . \qquad (2)$$

12. Определить матрицу контурных проводимостей:

$$\boldsymbol{Y}_к = \boldsymbol{Z}_к^{-1}. \qquad (3)$$

13. Определить матрицу:

$$\boldsymbol{H} = \boldsymbol{Y}_к \cdot \boldsymbol{N} \cdot \boldsymbol{Z}_{\beta\alpha} . \qquad (4)$$

13. Рассчитать токи в хордах:

$$\boldsymbol{I}_{\beta} = \boldsymbol{I}_{к} = -\boldsymbol{H}\cdot\boldsymbol{C}_{Р}\cdot\boldsymbol{J}. \quad (5)$$

14. Рассчитать токи в ветвях дерева по следующему выражению:

$$\boldsymbol{I}_{\alpha} = (1 - \boldsymbol{N}_{\alpha}^{Т}\cdot\boldsymbol{H})\cdot\boldsymbol{C}_{Р}\cdot\boldsymbol{J}. \quad (6)$$

15. Определить матрицу узловых напряжений:

$$\boldsymbol{U}_{у} = \boldsymbol{C}_{Р}^{Т}\cdot\boldsymbol{Z}_{\beta\alpha}\cdot\boldsymbol{I}_{\alpha}. \quad (7)$$

Порядок выполнения работы

1.Для заданной преподавателем системы электроснабжения составить матрицы по I и II законам Кирхгофа.

2. Определить элементы матриц, характеризующих рассматриваемую систему электроснабжения.

3. Составить матричные уравнения.

4. Выполнить решение составленных матричных уравнений.

Контрольные вопросы

1. Правила составления матриц схемы по I и II законам Кирхгофа.

2. Как выделяются хорды схемы?

3. Способы решения матричных уравнений.

4. Достоинства и недостатки метода контурных уравнений.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №7

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА УЗЛОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

***Цель занятия**: ознакомление с методами расчета сложнозамкнутых схем системы электроснабжения, анализа полученных результатов.*

Краткие методические указания

Одним из методов расчета сложнозамкнутых сетей является метод узловых напряжений. В методе узловых напряжений независимыми переменными являются напряжения узлов цепи относительно выбранного базисного (опорного) узла. Эти величины называют узловыми напряжениями. Положительные направления узловых напряжений указывают стрелками от рассматриваемых узлов к базисному. В качестве последнего удобно выбирать заземленный узел или узел, в котором сходится наибольшее число ветвей.

Достоинство метода проявляется в выборе в качестве независимых переменных узловых напряжений. Количество узловых напряжений, равное числу независимых узлов, значительно меньше количества ветвей, для которых определяют искомые токи.

Алгоритм расчета:

1. В схеме замещения электрической сети выделить дерево и хорды.
2. Выполнить нумерацию узлов и ветвей схемы.
3. Составить матрицу узловых задающих токов $\boldsymbol{J}$.
4. Составить матрицу сопротивлений ветвей схемы, разделив её на две подматрицы - для дерева $\boldsymbol{Z}_{\text{В.}\alpha}$ и хорд $\boldsymbol{Z}_{\text{В.}\beta}$.
5. Составить первую матрицу соединений $\boldsymbol{M}$ и разделить её на две подматрицы - для дерева $\boldsymbol{M}_{\alpha}$ и хорд $\boldsymbol{M}_{\beta}$.
6. Транспонировать матрицы $\boldsymbol{M}$, $\boldsymbol{M}_{\alpha}$ и $\boldsymbol{M}_{\beta}$.
7. Расчетным путем получить матрицы проводимостей ветвей:

- для всей схемы:

$$\boldsymbol{Y}_{\text{в}} = \boldsymbol{Z}_{\text{в}}^{-1}\ , \qquad (1)$$

- для дерева:

$$\boldsymbol{Y}_{в.\alpha} = \boldsymbol{Z}_{в.\alpha}^{-1}, \quad (2)$$

- для хорд:

$$\boldsymbol{Y}_{в.\beta} = \boldsymbol{Z}_{в.\,\beta}^{-1}. \quad (3)$$

8. Рассчитать элементы матрицы узловых проводимостей:

$$\boldsymbol{Y}_{у} = \boldsymbol{M}_{\alpha} \cdot \boldsymbol{Y}_{в.\alpha} \cdot \boldsymbol{M}_{\alpha}^{T} + \boldsymbol{M}_{\beta} \cdot \boldsymbol{Y}_{в.\beta} \cdot \boldsymbol{M}_{\beta}^{T}. \quad (4)$$

9. Определить матрицу узловых сопротивлений:

$$\boldsymbol{Z}_{у} = \boldsymbol{Y}_{у}^{-1}. \quad (5)$$

10. Определить матрицу узловых напряжений:

$$\boldsymbol{U}_{у} = \boldsymbol{Z}_{у} \cdot J\ . \quad (6)$$

11. Рассчитать токи в ветвях схемы:

$$\boldsymbol{I} = \boldsymbol{Y}_{в} \cdot \boldsymbol{M}^{T} \cdot \boldsymbol{Y}_{у}\ . \quad (7)$$

Проверка результатов расчета производится по балансу мощностей в узлах схемы – по первому закону Кирхгофа.

Порядок выполнения работы

1.Для заданной преподавателем системы электроснабжения составить матрицы по I и II законам Кирхгофа.

2. Определить элементы матриц, характеризующих рассматриваемую систему электроснабжения.

3. Составить матричные уравнения по методу узловых нпряжений.

4. Выполнить решение составленных матричных уравнений.

Контрольные вопросы

1. Правила составления матриц схемы по I и II законам Кирхгофа.

2. Как применяется метод узловых напряжений?

3. Способы решения матричных уравнений.

4. Достоинства и недостатки метода узловых напряжений.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 8

ПРИМЕНЕНИЕ РЕГРЕССИОННОГО МЕТОДА АНАЛИЗА РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

***Цель занятия**: ознакомление с регрессионными методами анализа режимов электропотребления в системах электроснабжения.*

Краткие методические указания

Особое значение при прогнозировании электрических нагрузок имеет задача предсказания расхода электроэнергии при любых заданных значениях зависимых технологических факторов производства: производительности основного оборудования, сортамента готовой продукции, состава сырья и т.п.

Для построения относительно простого математического описания таких сложных объектов широкое распространение получил метод множественного регрессионного анализа, в котором многофакторные зависимости описываются эмпирическим уравнением вида:

$$Y = b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + ... + b_nX_n ; \qquad (1)$$

где $b_1,b_2,b_3, ...b_n$ - неизвестные постоянные коэффициенты;

n - число входных переменных;

Y - наблюдаемое значение выходной переменной;

$X_1,X_2,X_3,....X_n$ - наблюдаемые значения независимых переменных.

Задача регрессионного анализа состоит в том, чтобы по данным выборки, содержащей $N > n$ наблюдений выходной и независимых переменных найти такие значения неизвестных коэффициентов, которые бы наилучшим образом (с минимальной ошибкой) описывали экспериментальные данные.

Параметры уравнения регрессии определяются по методу наименьших квадратов, сущность которого заключается в том, что сумма квадратов отклонений экспериментальных значений от рассчитанных по уравнению регрессии должна быть минимальна. В матричной форме это условие записывается следующим образом:

$$(\boldsymbol{Y} - \boldsymbol{X}\cdot\boldsymbol{B})^2 \rightarrow \min, \qquad (1)$$

где $\boldsymbol{Y}$ - вектор экспериментальных значений целевой функции;

$\boldsymbol{X}$ - матрица сочетаний независимых переменных;

$\boldsymbol{B}$ - вектор коэффициентов уравнения регрессии.

Алгоритм расчета:

1. Выделить из всего массива данных значимые факторы и упорядочить их по степени статистической значимости на основании коэффициентов парной корреляции. Одновременно с этим все взаимно коррелированные факторы должны заведомо исключаться из рассмотрения, поскольку они создают ложные статистические связи и повышают погрешность уравнения регрессии.

Удобнее всего анализировать корреляционные таблицы, в которых отражены все парные зависимости между независимыми переменными и функцией отклика.

2. Построить корреляционные поля точек и проанализировать форму каждой парной зависимости (линейная, нелинейная, степенная функция и т.п.).

3. При необходимости проверить выборку на «подозрительность».

4. Составить матрицы значений варьируемых факторов и матрицу-столбец функции отклика.

5. Рассчитать матрицу коэффициентов регрессии:

$$\boldsymbol{B} = (\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\cdot\boldsymbol{X})^{-1}\cdot\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\cdot\boldsymbol{Y}. \qquad (2)$$

6. Оценить адекватность расчетной модели экспериментальным данным, например, по величине среднеквадратической ошибки:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n-1}\cdot\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{Y_i^{эксп.} - Y_i^{расч.}}{Y_i^{эксп.}}\right)}\cdot 100\%, \qquad (3)$$

где $Y_i^{эксп.}$ и $Y_i^{расч.}$ - соответственно экспериментальное и расчетное значение целевой функции;

n - число экспериментальных точек данных.

Допустимой в инженерных расчетах является погрешность не выше 5%. Если это условие не выполняется, необходимо рассмотреть другую, более сложную (как правило, нелинейную) форму модели Y (X и)ли включить в уравнение большее число

факторов.

Порядок выполнения работы

1. Для заданного преподавателем массива данных выделить значимые факторы.
2. Упорядочить выделенные данные по степени статистической значимости на основании коэффициентов парной корреляции.
3. Построить корреляционные поля точек и проанализировать форму каждой парной зависимости.
4. Рассчитать матрицу коэффициентов регрессии.
5. Оценить адекватность расчетной модели.

Контрольные вопросы

1. Правила выделения из массива данных значимых факторы.
2. Как определить вид полученной корреляционной зависимости?
3. Способы расчета матрицы коэффициентов регрессии.
4. Как оценить адекватность расчетной модели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.

2. ГОСТ 30804.4.30-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. – М.: Стандартинформ, 2014. – 52 с.

3. Сибикин, Ю. Д. Электроснабжение промышленных предприятий и установок [Электронный ресурс] : учебник / Ю. Д. Сибикин, М. Ю. Сибикин, В. А. Яшков. - М.|Берлин : Директ-Медиа, 2014. - 337 с.

4. Филиппова Т.А. Энергетические режимы электрических станций и электроэнергетических систем: учебник [Электронный ресурс] / Т.А. Филиппова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 294с. Режим доступа - URL: https://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&
book_id=435976.

5. Железко, Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии [Электронный ресурс]: руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко. – Москва: ЭНАС, 2009. – 456 с.

6. Управление качеством электроэнергии [Текст] : учебное пособие : / И. И. Карташев, В. Н. Тульский, Р. Г. Шамонов ; под ред. Ю. В. Шарова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. - 355 с.