

Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального
образования

«Владимирский государственный университет имени Александра
Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
Кафедра электротехники и электроэнергетики

Максимов Ю.П.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ ПО
ДИСЦИПЛИНЕ**

**«Современные проблемы энергетики в
электромашиностроении»**

Анализ установившихся режимов системы
электропитания промышленного предприятия

Направление подготовки: 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Программа подготовки: «Оптимизация электроэнергетических сетей»

Уровень высшего образования: магистратура

Владимир 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Введение

1. Общие положения
 2. Исходные данные к курсовому проекту
 3. Анализ и статистическая обработка графиков электрических нагрузок
 4. Составление схемы замещения сети и расчет ее параметров
 5. Расчет установившегося режима системы электроснабжения
 - 5.1. Расчет токов в ветвях разомкнутой сети при помощи коэффициентов токораспределения
 - 5.2. Прямой метод расчета сложнзамкнутых сетей
 - 5.3. Метод контурных уравнений
 - 5.4. Метод узловых напряжений
 6. Регрессионный анализ режима электропотребления
- Библиографический список

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании и эксплуатации системы электроснабжения промышленного предприятия требуется решать разнообразные задачи, связанные с анализом установившихся режимов ее работы. Для этого широко применяются вычислительные методы высшей математики. Так расчет установившихся режимов электрических сетей сводится к составлению и решению системы линейных (и нелинейных) алгебраических уравнений с использованием понятий, которые хорошо известны из общего курса математического анализа.

Кроме того, в расчетах часто приходится иметь дело с вероятностно-заданной информацией об электрических нагрузках, генерируемых мощностях источников и т.п. Необходимость в учете случайного характера исходных данных приводит к усложнению электроэнергетических задач. Значительный объем постановочной задачи, большая размерность фактических объектов исследования, затрудняют их «классическое» решение. Поэтому основное внимание в указаниях сосредоточено на методах, которые способны существенно упростить и в максимальной степени формализовать процедуру расчета. Это создает предпосылки для применения в расчетах персональных ЭВМ: не только для производства вычислений, но и для выбора рационального решения и последующего его анализа.

При этом современные математические программные пакеты позволяют довольно просто и наглядно решать подобные инженерные задачи без знания языков программирования, а также обладают богатыми графическими возможностями для визуализации результатов расчета. В большинстве подобных программ используются общепринятые математические обозначения и интуитивно понятные имена встроенных функций, что облегчает работу с ним пользователям, не знакомым с программированием. В частности, в методических указаниях рассмотрены возможности применения математических программных пакетов *Mathcad* и *MATLAB* при изучении курса «Современные проблемы энергетического электромашиностроения» и выполнение курсового проекта по данной дисциплине.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Курсовой проект - это документ, представляющий собой форму отчетности о самостоятельной работе студента по дисциплине, включающий аналитическую и расчетную части, и представляющий собой законченное решение поставленной проблемы в рамках изучаемой дисциплины [1].

Основной задачей курсового проекта по дисциплине «Современные проблемы энергетического электромашиностроения» является расчет и анализ установившихся режимов системы электроснабжения крупного предприятия, которая имеет наряду со сложноразомкнутой сетью достаточно развитую разомкнутую сеть и питается от одного источника (районной энергосистемы).

Курсовой проект предусматривает статистическую обработку и анализ графиков нагрузки, расчет параметров схемы замещения сети и расчет естественного распределения потоков мощности для разомкнутой и замкнутой сетей, а также регрессионный анализ и математическое моделирование зависимости электрических нагрузок сети от параметров технологического режима предприятия.

Проект оформляется в виде рукописи (пояснительной записки), объемом не более 20-25 страниц, излагающей постановку и решение задачи, содержание исследования и его основные результаты. Обязательным структурным элементом курсового проекта является аналитический обзор темы, содержащий обобщенные, систематизированные и критически осмысленные сведения об истории, современном состоянии, тенденциях и перспективах развития предмета исследования.

В пояснительную записку должны быть включены схема замещения, с нанесенными на нее параметрами и номерами узлов и ветвей и структурная схема с результатами расчетов режимов (токи в ветвях и напряжения в узлах), которые вычерчиваются на отдельных листах вручную или с применением ЭВМ. К ним прилагаются файлы отлаженных программ и исходных данных.

При выполнении всех разделов следует использовать специальные вычислительные методы, которые реализуются на ЭВМ с использованием языков программирования или известных программных пакетов.

Отлаженность программ подтверждается сравнением результатов фрагмента расчета, выполненного вручную и на ЭВМ.

Курсовой проект завершается заключением, в котором излагаются выводы, сформулированные из анализа параметров расчетных режимов и возможностей разработанных программ.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ

Структурные схемы системы электроснабжения по вариантам приведены в приложении 1. Питание системы электроснабжения завода осуществляется от районной энергосистемы через одну крупную системную подстанцию (п/с). Электрические сети представлены структурной схемой с указанием длины линии (км), марки и сечения проводов. При этом сети высокого напряжения выполнены воздушными линиями электропередачи, а низковольтные являются кабельными.

Районная энергосистема имеет характерные часы максимальной нагрузки: утром - с 9 до 11 ч, вечером - с 18 до 22 ч и часы минимальных нагрузок - ночью с 0 до 5 ч.

В индивидуальном задании (раздаточном материале) представлены электрические нагрузки в узлах сети *A, B, B, Г, D* в форме суточных графиков активной и реактивной мощности. Мощность нагрузки в узлах *E, F, G* считается неизменной во времени.

Напряжение на шинах районной подстанции в часы максимальных нагрузок энергосистемы задается вариантом задания (приложение 2), а в часы минимальных нагрузок - принимается равным номинальной величине.

Для анализа и моделирования электропотребления промышленного предприятия используются экспериментальные данные, отражающие изменение основных показателей технологического процесса за те же сутки.

3. АНАЛИЗ И СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ГРАФИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

График электрических нагрузок представляет зависимости потребляемой мощности, записанные по показаниям счетчиков активной и реактивной энергии, снятым через определенные одинаковые интервалы времени (30 минут).

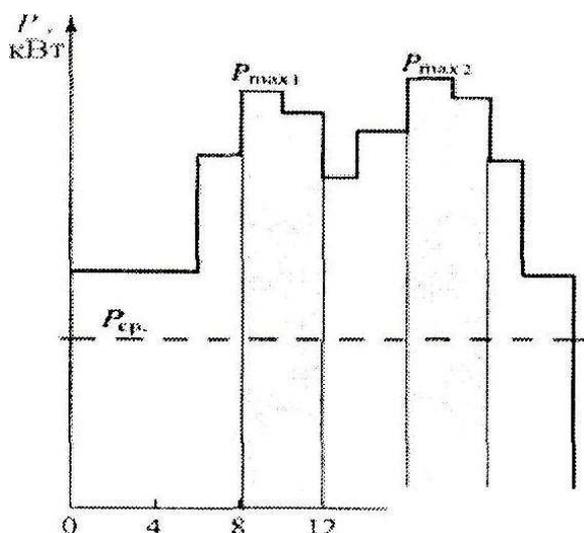


Рис. 3.1. Суточный график электрических нагрузок

Форма суточного графика нагрузок (рис. 3.1) 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 [2-3]. (Веников, Гурман)

Выборочная средняя мощность (математическое ожидание) нагрузки:

$$P_{\text{ср.}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}; \quad Q_{\text{ср.}} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n}; \quad (3.1)$$

где P_i, Q_i - активная и реактивная мощности на i -й ступени графика, МВ А; n - количество ступеней графика нагрузки.

Среднее квадратическое (стандартное) отклонение:

$$S_P = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}\right)^2}{n-1}}; \quad S_Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Q_i^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n}\right)^2}{n-1}}. \quad (3.2)$$

Дисперсия случайной величины:

$$D_P = S_P^2; \quad D_Q = S_Q^2. \quad (3.3)$$

Коэффициент вариации - относительный разброс значений случайной величины относительно среднего:

$$v_P = \frac{S_P}{P_{\text{ср}}}; \quad v_Q = \frac{S_Q}{Q_{\text{ср}}}; \quad (3.4)$$

Коэффициент парной корреляции оценивает статистическую тесноту связи между двумя случайными величинами x и y (например, между активными нагрузками двух разных узлов):

$$r(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_i) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i) \cdot \sum_{i=1}^n (y_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}}. \quad (3.5)$$

Как видно из выражения, количество замеров обеих величин должно быть одинаковым.

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

- доверительный интервал средней величины:

$$P_{cp} \pm t_{n-1, \alpha} \cdot \sigma_P / \sqrt{n}; \quad Q_{cp} \pm t_{n-1, \alpha} \cdot \sigma_Q / \sqrt{n}; \quad (3.6)$$

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

$$\alpha = 1 - \beta; \quad (3.7)$$

где β - статистическая надежность (относительная погрешность);

- доверительный интервал стандартного отклонения (или дисперсии):

$$\frac{\sigma_P^2 \cdot (n-1)}{\chi_{n-1, \beta/2}^2} \leq \sigma_P^2 \leq \frac{\sigma_P^2 \cdot (n-1)}{\chi_{n-1, 1-\beta/2}^2}; \quad (3.8)$$

$$\frac{\sigma_Q^2 \cdot (n-1)}{\chi_{n-1, \beta/2}^2} \leq \sigma_Q^2 \leq \frac{\sigma_Q^2 \cdot (n-1)}{\chi_{n-1, 1-\beta/2}^2}; \quad (3.9)$$

где $\chi_{n-1, \beta/2}^2$ - коэффициенты распределения Пирсона при $(n-1)$ степенях

свободы и статистической надежности β .

Параметры $t_{n-1, \alpha}$ и $\chi_{n-1, \beta/2}^2$ определяются по справочным таблицам [2-3] или рассчитываются на ЭВМ.

4. СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ СЕТИ И РАСЧЕТ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ

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:

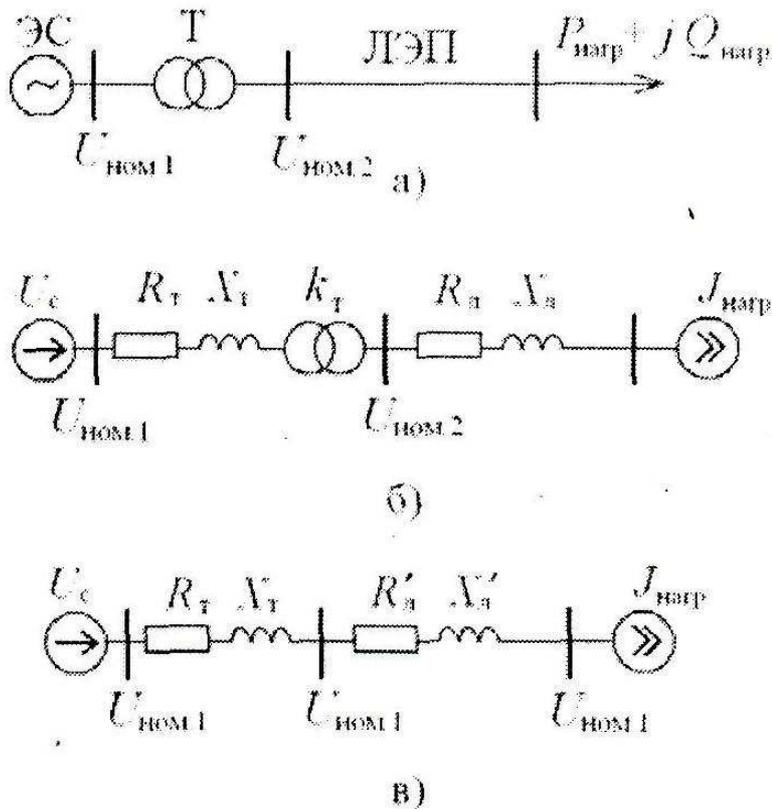


Рис. 4.1. Преобразование однолинейной схемы электрической сети (а) в схему замещения двух напряжений (б), и одного напряжения (в).

Сопротивления линий электропередачи определяются по формулам:

$$R_{л} = r_0 \cdot L/n; \quad X_{л} = x_0 \cdot L/n; \quad (4.1)$$

$$R_T = \frac{\Delta p_k \cdot U_{\text{НОМ.}}^2 \cdot 10^3}{n \cdot S_{\text{T.НОМ.}}^2}, \quad (4.2)$$

$$X_T = \frac{u_k \cdot U_{\text{НОМ.}}^2 \cdot 10}{n \cdot S_{\text{T.НОМ.}}}, \quad (4.3)$$

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

L - длина линии, км;

n - количество параллельно работающих цепей ЛЭП.

Сопротивления силового трансформатора:

где n - количество параллельно работающих трансформаторов;

Δp_k - потери активной мощности в опыте короткого замыкания, кВт;

u_k - напряжение короткого замыкания, %;

$U_{\text{НОМ.}}$ - номинальное напряжение обмотки ВН трансформатора, кВ;

$S_{\text{T.НОМ.}}$ - номинальная мощность трансформатора, кВА.

При расчете рекомендуется использовать данные [6] (Веников т2). При этом. Для трансформаторов с расщепленной обмоткой низкого напряжения (типа ТРДН, ТРДЦН, ТРДНС) расчет сопротивлений выполняется по формулам (4.2-4.3) в предположении, что обмотки низкого напряжения включены параллельно.

Узловые токи нагрузки определяются, используя средние значения мощности за рассматриваемый период:

$$J_i = \frac{P_{i \text{ ср.}} + jQ_{i \text{ ср.}} \cdot 10^3}{\sqrt{3} U_{\delta}}, \quad (4.4)$$

где U_{δ} - напряжение балансирующего узла, кВ.

Параметры схемы замещения следует привести к одному напряжению. В качестве базисного можно выбрать любое напряжение. Приведение сопротивлений выполняется по формулам:

$$R' = R \cdot k_T^2; \quad X' = X \cdot k_T^2; \quad (4.5)$$

где R , X - активное и реактивное сопротивления элемента сети, Ом, приве-

денные к собственной ступени напряжения (U_{HH});

R', X' - активное и реактивное сопротивления того же элемента, приведенные к базисному напряжению (U_{BH}), Ом;

k_T - коэффициент приведения (коэффициент трансформации).

$$k_T = \frac{U_{BH}}{U_{HH}}; \quad (4.5)$$

После вычерчивания схемы замещения сети на нее наносятся полученные значения сопротивлений и мощности или токи нагрузки. В зависимости от принятого метода расчета эти характеристики могут быть представлены числами в комплексной форме. В случае предварительного использования метода расщепления составляются две схемы замещения. Одна содержит активные сопротивления и реактивные мощности (токи) нагрузки, а вторая схема - реактивные сопротивления и активные мощности (токи) нагрузки.

5. РАСЧЕТ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

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 [11-12].

Так, применяя теорию графов к электрическим цепям, в схеме замещения выделяют узлы, независимые контуры, дерево и хорды. 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.

Рассмотрим алгоритмы расчета для некоторых матричных методов подробнее.

5.1. Расчет токов в ветвях разомкнутой сети при помощи коэффициентов токораспределения

При расчете разомкнутых сетей решается только одно узловое матричное уравнение:

$$\mathbf{I} = \mathbf{C}_p \cdot \mathbf{J}; \quad (5.1)$$

где \mathbf{I} -- Матрица токов в ветвях схемы;

\mathbf{J} - столбцевая матрица узловых задающих токов;

\mathbf{C}_p - матрица коэффициентов распределения токов.

Алгоритм расчета:

1. Выполнить нумерацию узлов и ветвей схемы замещения сети.
2. Составить матрицу узловых токов по данным (4.4)
3. Составить диагональную матрицу сопротивлений ветвей схемы - \mathbf{Z}_B .
4. Составить первую матрицу соединений \mathbf{M}_p , включая в нее все узлы, кроме базисного.
5. По матрице \mathbf{M}_p получить обратную матрицу $\mathbf{C}_p = \mathbf{M}_p^{-1}$ или составить ее, используя для этого граф схемы.
6. Решить узловое уравнение (5.1) относительно токов в ветвях.
7. Определить падение напряжения в ветвях:

$$\mathbf{U}_B = \mathbf{Z}_B \cdot \mathbf{I} \quad (5.2)$$

8. Определить матрицу узловых напряжений:

$$\mathbf{U}_y = \mathbf{C}_p^T \cdot \mathbf{U}_B \quad (5.3)$$

где \mathbf{C}_p^T - транспонированная матрица коэффициентов распределения.

5.2. Прямой метод расчета сложноразомкнутых сетей

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

$$\mathbf{M} \cdot \mathbf{I} = \mathbf{J} \quad (5.4)$$

$$\mathbf{N} \cdot \mathbf{Z}_B \cdot \mathbf{I} = \mathbf{E}_K \quad (5.5)$$

где \mathbf{N} - вторая матрица соединений;

\mathbf{E}_K - матрица контурных ЭДС.

Алгоритм расчета:

1. Выполнить нумерацию узлов и ветвей схемы замещения сети.
2. Составить матрицу задающих узловых токов \mathbf{J} .
3. Составить матрицы сопротивлений ветвей дерева $\mathbf{Z}_{B,\alpha}$ и хорд $\mathbf{Z}_{B,\beta}$.
4. Составить первые матрицы соединений для дерева \mathbf{M}_α и хорды \mathbf{M}_β .
5. Составить вторые матрицы соединений для дерева $\mathbf{N}_{\alpha-}$ и хорды \mathbf{N}_β .
6. Определить матрицу коэффициентов распределения токов в ветвях дерева \mathbf{C}_P по матрице \mathbf{M}_α или составить, используя граф схемы.

7. Рассчитать токи хордах по матричному уравнению:

$$\mathbf{I}_\beta = (\mathbf{Z}_{B,\beta} + \mathbf{N}_\alpha \cdot \mathbf{Z}_{B,\alpha} \cdot \mathbf{N}_\alpha^T)^{-1} \cdot (-\mathbf{N}_\alpha \cdot \mathbf{Z}_{B,\alpha} \cdot \mathbf{C}_P \cdot \mathbf{J}). \quad (5.6)$$

8. Рассчитать токи в ветвях дерева по выражению:

$$\mathbf{I}_\alpha = \mathbf{C}_P (\mathbf{J} - \mathbf{M}_\beta \cdot \mathbf{I}). \quad (5.7)$$

9. Определить матрицу узловых напряжений:

$$\mathbf{U}_y = \mathbf{C}_P^T \cdot \mathbf{Z}_{B,\alpha} \cdot \mathbf{I}_\alpha. \quad (5.8)$$

\

5.3. Метод контурных уравнений

Искомое токораспределение может быть найдено путем решения следующей системы уравнений:

$$\mathbf{I}_K = -\mathbf{Y}_K \cdot \mathbf{N} \cdot \mathbf{Z}_\alpha \cdot \mathbf{C}_P \cdot \mathbf{J} \quad (5.9)$$

при $\mathbf{E} = 0$ и $\mathbf{J} \neq 0$,

где \mathbf{I}_K - матрица контурных токов (токов в хордах графа);

\mathbf{Y}_K - матрица контурных проводимостей;

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

Матрица $\mathbf{Z}_{\beta\alpha}$ является нулевой при отсутствии взаимных сопротивлений между ветвями дерева и хорд:

$$\mathbf{Z}_\alpha = \begin{Bmatrix} \mathbf{Z}_{\alpha\alpha} \\ \mathbf{Z}_{\beta\alpha} \end{Bmatrix} \quad \text{или} \quad \mathbf{Z}_\alpha = \begin{Bmatrix} \mathbf{Z}_{\alpha\alpha} \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Алгоритм расчета:

1. В графе схемы выделить дерево (а) и хорды ((3)).
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.
6. Составить матрицу узловых задающих токов \mathbf{J} .
7. Составить матрицу сопротивлений ветвей схемы: $\mathbf{Z}_{B,\alpha}$ и выделить из нее подматрицу (блок) сопротивлений ветвей дерева $\mathbf{Z}_{B,\alpha}$.
8. Составить вторую матрицу соединений \mathbf{N} и выделить из нее подматрицу для дерева схемы \mathbf{N}_α .
9. Составить первую матрицу соединений для дерева схемы \mathbf{M}_α .
10. Транспонировать матрицы \mathbf{N} , \mathbf{N}_α , получив матрицы \mathbf{N}_T , $\mathbf{N}_{\alpha T}$.
11. По матрице \mathbf{M}_α определить матрицу коэффициентов распределения токов в ветвях дерева схемы \mathbf{C}_p или составить её* по схеме.
12. Рассчитать матрицу контурных сопротивлений:

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{N} \cdot \mathbf{Z}_B \cdot \mathbf{N}^T \quad (5.10)$$

или составить её по схеме замещения.

13. Определить матрицу контурных проводимостей:

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{Z}_k^{-1} \quad (5.11)$$

14. Определить матрицу:

$$\mathbf{H} = \mathbf{Y}_k \cdot \mathbf{N} \cdot \mathbf{Z}_{B,\alpha} \quad (5.12)$$

15. Рассчитать токи в хордах:

$$\mathbf{I}_\beta = \mathbf{I}_k = -\mathbf{H} \cdot \mathbf{C}_p \cdot \mathbf{J} \quad (5.13)$$

16. Рассчитать токи в ветвях дерева по следующему выражению:

$$\mathbf{I}_\alpha = (1 - \mathbf{N}_\alpha^T \cdot \mathbf{H}) \cdot \mathbf{C}_p \cdot \mathbf{J} \quad (5.14)$$

или по формуле (5.7).

17. Определить матрицу узловых напряжений:

$$\mathbf{U}_y = \mathbf{C}_{pT} \cdot \mathbf{Z}_{B\alpha} \cdot \mathbf{I}_\alpha \quad (5.15)$$

Примечание: Составление второй матрицы соединений можно исключить из алгоритма (п.8), т.к. при соблюдении правил нумерации хорд и независимых контуров матрица \mathbf{N}_α может быть получена:

$$\mathbf{N}_\alpha = -\mathbf{M}_\beta^T \cdot (\mathbf{M}_\alpha^T)^{-1} \quad (5.16)$$

или

$$\mathbf{N}_\alpha = -\mathbf{M}_\beta^T \cdot \mathbf{C}_p^T, \quad (5.17)$$

а полную вторую матрицу соединений \mathbf{N} можно получить, если к матрице

\mathbf{N}_α добавить единичную матрицу в виде блока \mathbf{N}_β , т.е.

$$\mathbf{N} = \left\| \begin{array}{c} \mathbf{N}_\alpha \\ \mathbf{N}_\beta \end{array} \right\| \quad (5.18)$$

5.4. Метод узловых напряжений [7-8]

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 \mathbf{J} .
4. Составить матрицу сопротивлений ветвей схемы, разделив её на две подматрицы - для дерева $\mathbf{Z}_{B,\alpha}$ и хорд $\mathbf{Z}_{B,\beta}$.
5. Составить первую матрицу соединений \mathbf{M} и разделить её на две подматрицы - для дерева \mathbf{M}_α и хорд \mathbf{M}_β .
6. Транспонировать матрицы \mathbf{M} , \mathbf{M}_α и \mathbf{M}_β .
7. Расчетным путем получить матрицы проводимостей ветвей:

- для всей схемы: $\mathbf{Y}_B = \mathbf{Z}_B^{-1}$, (5.19)

- для дерева: $\mathbf{Y}_{B,\alpha} = \mathbf{Z}_{B,\alpha}^{-1}$, (5.20)

- для хорд: $\mathbf{Y}_{B,\beta} = \mathbf{Z}_{B,\beta}^{-1}$ (5.21)

10. Рассчитать элементы матрицы узловых проводимостей:

$$\mathbf{Y}_y = \mathbf{M}_\alpha \cdot \mathbf{Y}_{B,\alpha} \cdot \mathbf{M}_\alpha^T + \mathbf{M}_\beta \cdot \mathbf{Y}_{B,\beta} \cdot \mathbf{M}_\beta^T. \quad (5.22)$$

11. Определить матрицу узловых сопротивлений:

$$\mathbf{Z}_y = \mathbf{Y}_y^{-1}. \quad (5.23)$$

12. Определить матрицу узловых напряжений:

$$\mathbf{U}_y = \mathbf{Z}_y \cdot \mathbf{J}. \quad (5.24)$$

13. Рассчитать токи в ветвях схемы:

$$\mathbf{I} = \mathbf{Y}_B \cdot \mathbf{M}^T \cdot \mathbf{U}_y. \quad (5.25)$$

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

Окончательный пересчет токов и напряжений для реальной схемы электроснабжения выполняется:

- для напряжений узлов без учета коэффициента трансформации:

$$U_i = U_B - U_{yi}; \quad (5.26)$$

- для напряжений узлов с коэффициентом трансформации:

$$U_i = \frac{U_B - U_{yi}}{k_T} = \frac{(U_B - U_{yi})U_{HH}}{U_{BH}}; \quad (5.27)$$

- для токов ветвей с учетом коэффициента трансформации:

$$I'_i = k_T I_i = I_i \frac{U_{BH}}{U_{HH}}. \quad (5.27)$$

Структурные схемы с результатами расчетов максимального и минимального режимов должны быть вычерчены на отдельных листах и включены в основную часть пояснительной записки. Тексты программ для ЭВМ размещаются в приложении.

6. РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

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 [10], в котором многофакторные зависимости описываются эмпирическим уравнением вида:

$$Y \approx b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_n X_n + b_0 X_0; \quad (6.1)$$

где b_1, b_2, \dots, b_n - неизвестные постоянные коэффициенты;

n - число входных переменных;

Y - наблюдаемое значение выходной переменной;
 X_1, X_2, \dots, X_n - наблюдаемые значения независимых переменных;
 X_0 - фиктивная переменная ($X_0 = 1$)..

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:

$$(\mathbf{Y}_{\text{расч.}} - \mathbf{X} \cdot \mathbf{B})^2 \rightarrow \min ; \quad (6.2)$$

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

\mathbf{X} - матрица сочетаний независимых переменных;

\mathbf{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 (3.5). Одновременно с этим все взаимно коррелированные факторы должны заведомо исключаться из рассмотрения, поскольку они соз-

дают ложные статистические связи и повышают погрешность уравнения регрессии.

Удобнее всего анализировать корреляционные таблицы (табл. 6.1), 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» [10].

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

5. Рассчитать матрицу коэффициентов регрессии:

$$\mathbf{B} = (\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X})^{-1} \cdot \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{Y} . \quad (6.3)$$

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

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{Y_i^{\text{эксп.}} - Y_i^{\text{расч.}}}{Y_i^{\text{эксп.}}} \right)^2} \cdot 100\% , \quad (6.4)$$

где $Y_i^{\text{эксп.}}$ и $Y_i^{\text{расч.}}$ - 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 $Y(X)$ или включить в уравнение большее число факторов.

Расчет обязательно должен быть подкреплён кратким описанием технологического процесса исследуемого предприятия и теоретическим анализом значимости выделенных факторов.

Приложения

В таблице 1 представлена мощность, заданная в пунктах А,Б,В,Г,Д и соответствующий $\cos\varphi$.

Таблица 1

№ вар-та	З а д а н н ы е з н а ч е н и я м о щ н о с т и, МВт				
	$P_A/\cos\varphi_A$	$P_B/\cos\varphi_B$	$P_V/\cos\varphi_V$	$P_G/\cos\varphi_G$	$P_D/\cos\varphi_D$
1	12,62/0,91	47,30/0,92	40,63/0,9	11,80/0,93	12,30/0,91
2	12,70/0,91	47,40/0,92	41,60/0,9	11,40/0,93	11,40/0,91
3	13,15/0,91	46,50/0,92	45,70/0,9	13,20/0,93	44,50/0,91
4	15,20/0,91	44,80/0,92	23,00/0,9	14,60/0,93	42,80/0,91
5	15,60/0,91	47,80/0,92	45,60/0,9	17,50/0,93	46,80/0,91
6	14,20/0,91	43,20/0,92	46,80/0,9	17,50/0,93	45,60/0,91
7	15,80/0,91	42,40/0,92	27,50/0,9	12,50/0,93	47,50/0,91
8	10,30/0,91	45,00/0,92	42,50/0,9	11,50/0,93	38,50/0,91
9	12,30/0,91	47,00/0,92	43,00/0,9	12,50/0,93	39,40/0,91
10	13,40/0,91	48,00/0,92	42,80/0,9	10,50/0,93	44,50/0,91
11	15,50/0,91	47,50/0,92	44,50/0,9	15,70/0,93	45,00/0,91
12	16,70/0,91	42,30/0,92	47,00/0,9	14,50/0,93	48,20/0,91
13	14,30/0,91	41,50/0,92	42,80/0,9	17,20/0,93	46,20/0,91
14	13,50/0,91	20,00/0,92	43,20/0,9	21,20/0,93	46,50/0,91
15	17,20/0,91	21,00/0,92	44,00/0,9	20,00/0,93	45,00/0,91
16	15,50/0,91	48,00/0,92	42,70/0,9	12,50/0,93	43,20/0,91
17	14,70/0,91	49,00/0,92	47,50/0,9	13,50/0,93	45,50/0,91
18	18,50/0,91	49,50/0,92	42,70/0,9	15,70/0,93	42,00/0,91
19	14,20/0,91	45,50/0,92	41,80/0,9	16,40/0,93	47,20/0,91
20	25,40/0,91	37,40/0,92	45,70/0,9	15,20/0,93	48,20/0,91
21	28,30/0,91	40,00/0,92	48,00/0,9	12,40/0,93	47,00/0,91
22	32,30/0,91	37,00/0,92	49,50/0,9	13,20/0,93	21,00/0,91
23	35,00/0,91	40,00/0,92	25,70/0,9	14,70/0,93	36,00/0,91
24	37,00/0,91	35,50/0,92	32,20/0,9	17,50/0,93	28,00/0,91
25	40,00/0,91	37,00/0,92	40,00/0,9	30,00/0,93	38,00/0,91
26	35,00/0,91	45,00/0,92	27,50/0,9	22,00/0,93	25,00/0,91
27	22,30/0,91	27,00/0,92	40,00/0,9	17,50/0,93	33,40/0,91
28	11,50/0,91	28,00/0,92	40,00/0,9	15,60/0,93	22,90/0,91
29	16,00/0,91	20,50/0,92	47,50/0,9	12,00/0,93	35,60/0,91
30	20,50/0,91	16,40/0,92	21,00/0,9	21,00/0,93	34,00/0,91

В таблице 2 представлены расстояния в километрах от пунктов А,Б,В,Г,Д до центральной подстанции и расстояния между пунктами

Таблица 2

№ вар-та	L _A	L _Б	L _В	L _Г	L _Д	L _{АБ}	L _{БВ}	L _{ВГ}	L _{ГД}
1	25	95	45	80	25	70	90	60	65
2	27	110	35	85	25	60	110	75	60
3	28	90	36	86	26	65	105	61	59
4	30	91	37	87	27	72	102	60	58
5	31	93	38	88	28	63	103	59	57
6	35	94	39	89	29	60	104	58	56
7	32	95	40	90	30	61	105	57	55
8	34	92	41	91	31	58	103	55	54
9	36	100	42	92	32	64	101	54	53
10	32	102	43	93	33	70	102	53	52
11	35	97	33	94	34	62	103	52	51
12	27	95	34	85	35	68	100	50	50
13	28	98	35	84	36	70	102	49	49
14	30	100	36	83	35	70	104	48	48
15	31	102	37	82	34	71	100	47	47
16	32	105	38	81	33	73	95	45	45
17	34	101	39	80	32	68	94	44	44
18	33	95	40	89	30	62	95	43	43
19	30	96	41	90	31	66	94	42	42
20	32	97	42	91	29	65	95	41	41
21	28	98	43	92	27	70	97	40	40
22	29	95	44	93	28	66	98	41	39
23	30	100	45	94	25	70	95	42	42
24	32	110	44	95	24	78	90	43	43
25	34	107	43	96	23	73	91	44	44
26	35	108	42	97	32	73	92	45	45
27	33	103	41	90	31	70	93	46	46
28	29	104	40	89	32	75	94	47	47
29	25	105	39	88	35	80	95	48	48
30	27	106	40	87	30	79	96	50	50

В таблице 3 представлен состав потребителей нагрузки в пунктах питания с учетом категорий надежности

Таблица 3

№ варианта	Пункты питания	П о т е р е б и т е л и в %		
		1 категория	II категория	III категория
1,6, 11, 16, 21, 26	А	-	50	50
	Б	-	70	30
	В	20	20	60
	Г	15	45	40
	Д	40	30	30
2, 7, 12, 17, 22, 27	А	50	20	30
	Б	-	60	40
	В	40	50	10
	Г	30	30	40
	Д	-	80	20
3, 8, 13, 18, 23. 28	А	20	70	10
	Б	25	45	30
	В	-	40	60
	Г	20	30	50
	Д	-	65	35
4, 9, 14, 19, 24, 29	А	30	60	10
	Б	40	50	10
	В	-	40	60
	Г	-	45	55
	Д	20	40	40
5, 10, 15, 20, 25, 30	А	-	70	30
	Б	15	45	40
	В	40	40	20
	Г	-	65	35
	Д	25	60	15

Таблица 4

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ	0 - 3ч	4 - 6ч	7 – 9ч	10 -12ч	13-15ч	16-18	19-21	22-24ч
Черная металлургия	85	90	95	100	90	100	90	85
Цветная металлургия	90	90	95	100	100	95	90	90
Угледобыча	80	85	90	95	90	100	95	80
Торфопредприятия	85	90	100	100	90	85	80	70
Автомобильная	60	40	80	100	90	100	80	70
Станкостроительная	45	70	90	100	100	60	50	40
Тяжелое машиностроение	100	60	70	80	70	75	80	100
Транспортное машиностроение	85	90	95	100	100	90	90	80
Химическая промышленность	75	80	90	100	100	90	85	70
Целлюлозно-бумажная	85	90	100	80	80	100	90	90
Прядильно-ткацкая	90	90	100	100	90	100	100	90
Деревообрабатывающая	70	60	90	100	90	100	90	80
Строительных материалов	90	80	90	100	100	90	95	90
Легкая	50	60	70	90	95	90	80	70
Пищевая	60	70	80	100	95	80	75	70
Агропромышленный комплекс	50	70	100	70	90	80	60	55
Городская	70	50	90	70	60	70	90	95

Данные приведены в процентах

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СМК-О-СМГТУ-42-09 Курсовой проект (работа): структура, содержание, общие правила выполнения и оформления. - Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010.-31 с.
2. Электрические системы. Т.1: Математические задачи электроэнергетики. / Под ред. В.А. Веникова. - М.: Высш. шк., 1970. - 334 с.
3. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб.пособие. - М.: Высш. шк., 2001. - 479 с.
4. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Статистический анализ данных на компьютере. - М.: Инфра-М, 1998. - 528 с.
5. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. - М.: Энергоатомиздат, 1989.-592 с.
6. Электрические системы. Т.2: Электрические сети. / Под ред. В.А. Веникова. - М.: Высш. шк., 1971. - 438 с.
7. Справочник по проектированию электрических сетей / Под ред. Д.Л. Файбисовича. - М.: НЦ ЭНАС, 2006. - 352 с.
8. Бессонов В.Е. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник. - М.: Гардарики, 2001. - 479 с.
9. Мельников Н.А. Матричный метод анализа электрических цепей. - М.: Энергия, 1966.-423 с.
10. Пригода В.П. Введение в теорию эксперимента: Учебное пособие. - Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. - 210 с.
11. Олейников В.К., Никифоров Г.В. Анализ и управление электропотреблением на металлургических предприятиях: Учебное пособие. - Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 1999. - 219 с.
12. Компьютер для студентов, аспирантов и преподавателей: Учебное пособие / Под ред. В.Б. Комягина. - М.: ТРИУМФ, 2001. - 656 с.
13. Дьяконов В.П. Mathcad 2000: Учебный курс. - СПб.: Питер, 2001. - 560 с.