

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Н. П. БАДАЛЯН

**АНАЛИЗ И РАСЧЕТ
МЕТОДОВ КОРРЕКЦИИ
УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Учебное пособие



Владимир 2017

УДК 621.31
ББК 31.26
Б15

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
А. Г. Самойлов

Доктор технических наук, профессор
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
С. А. Сбитнев

Доктор технических наук, доцент
профессор кафедры физики Ковровской государственной
технологической академии имени В. А. Дегтярева
Т. Е. Торопова

Печатается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

Бадалян, Н. П.

Б15 Анализ и расчёт методов коррекции установившихся режимов электрических систем : учеб. пособие / Н. П. Бадалян ; Владимир. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2017. – 119 с. – ISBN 978-5-9984-0790-1.

Предлагаются современные методы анализа и расчёта коррекции установившихся режимов электрических систем при любой форме задания состояния электрической сети. Сложная электрическая система как автоматически управляемая требует не только рассчитывать ее поведение при заданных фиксированных параметрах, но и оценивать те изменения в параметрах, которые осуществляются с помощью управляющих устройств. Путем безытерационного метода расчета определяется чувствительность режима к изменению ее параметров и устанавливается новый режим на базе уже известного установившегося режима.

Предназначено для студентов электроэнергетических специальностей вузов по направлениям 13.03.02 и 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника всех форм обучения. Будет полезно специалистам в области электроэнергетики.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Ил. 8. Табл. 13. Библиогр.: 40 назв.

УДК 621.31
ББК 31.26

ISBN 978-5-9984-0790-1

© ВлГУ, 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Основные термины и определения	6
Элементы энергосистем и их характеристика	7
1. СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА И КОРРЕКЦИИ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ	9
1.1. Задача расчета установившихся режимов электрических систем	9
1.2. Задача расчета установившихся режимов больших электрических систем методом декомпозиции.....	20
1.3. Анализ методов коррекции установившихся режимов электрических систем при изменении их параметров.....	23
2. УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ЕГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К ИЗМЕНЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ПРИ Y-ФОРМЕ ЗАПИСИ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ	29
2.1. Постановка задачи расчета установившегося режима.....	29
2.2. Уравнения установившегося режима алгебраической системы при Y-форме задания пассивных параметров	30
2.3. Решение системы нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима и основные выражения чувствительности	33
2.4. Чувствительность установившегося режима при Y-форме записи уравнений состояния	39
2.5. Вычислительный алгоритм коррекции установившегося режима и область его применения	43
2.6. Численный пример коррекции установившегося режима...	46
2.7. Выводы и рекомендации	50

3. УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ЕГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К ИЗМЕНЕНИЮ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ Z-ФОРМЕ ЗАДАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ	51
3.1. Уравнения установившегося режима в Z-форме задания пассивных параметров.....	51
3.2. Решение системы нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима	52
3.3. Чувствительность установившегося режима электрической системы при Z-форме задания пассивных параметров	54
3.4. Численный пример коррекции установившегося режима электрической системы	59
3.5. Выводы и рекомендации	81
4. КОРРЕКЦИЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ (Y – Z)-ФОРМЕ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ	82
4.1. Уравнения установившихся режимов электрических систем при (Y – Z)-форме записи состояния сети	82
4.2. Решение системы нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима	87
4.3. Смешанные уравнения установившегося режима при наличии стационарных узлов типа $P – U$ и соответствующие выражения чувствительности	93
4.4. Коррекция установившегося режима при наличии в системе стационарных узлов типов $P – U$ и $P – Q$	101
4.5. Численный пример коррекции режима электрической системы, основанной на использовании (Y – Z)-формы записи уравнений состояния	105
4.6. Выводы и рекомендации	108
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ	109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	112
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	114

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие посвящено современным методам анализа и расчёта коррекции установившихся режимов электрических систем при любой форме задания состояния электрической сети. Энергетическая система представляет собой совокупность электростанций, электрических и тепловых сетей, соединенных между собой и связанных общностью режима в непрерывном процессе производства, преобразования и распределения электрической энергии и тепла при общем управлении этим режимом, осуществляемом диспетчерской службой.

Электрическая часть энергетической системы, т. е. совокупность электрических станций, линий электропередач, преобразующих подстанций и потребителей электроэнергии, работающих как единое целое с точки зрения протекающих в ней физических процессов, называется электроэнергетической, или электрической системой.

Сложная электрическая система как автоматически управляемая требует изменения современного подхода к ее анализу. Для такой системы необходимо рассчитывать не только ее поведение при заданных фиксированных параметрах, но и оценивать те изменения в параметрах, которые осуществляются с помощью управляющих устройств.

Целью проверки ее поведения и управления первоочередной задачей является не точность расчета по заданным исходным параметрам, а точность непрерывной коррекции, осуществляемой на основе сведений о протекании режима, т. е. управление процессом.

С этой точки зрения весьма актуальна проблема коррекции текущих установившихся режимов электрических систем. Расчет установившихся режимов таких электрических систем связан с большими математическими и вычислительными трудностями. Первоочередная задача при расчете установившегося режима – построение соответствующей математической модели, которая представляется в виде системы нелинейных алгебраических уравнений.

Для этого при разработке соответствующих математических моделей используются положения современной математической теории чувствительности, которые позволяют, определяя чувствительность режима системы к изменению ее параметров, установить новый режим на базе уже известного установившегося режима путем безытерационного метода расчета.

В книге рассматриваются три вида математических моделей, которые называются Y , Z и $(Y - Z)$ -формами моделей, а также решение численных примеров, что облегчает освоение теоретического материала. Для решения соответствующих нелинейных алгебраических уравнений применяется метод Ньютона – Рафсона.

Основные термины и определения

Энергосистема – совокупность электростанций, электрических и тепловых сетей, электрически соединенных между собой и связанных общностью режима в непрерывном процессе производства, преобразования и распределения электрической и тепловой энергии при общем управлении этим режимом.

Электрическая система (электрическая часть энергосистемы) – совокупность электроустановок электрических станций и электрических сетей энергосистемы.

Электроэнергетическая система – электрическая часть энергосистемы и питающиеся от нее приемники электрической энергии, объединенные общностью процесса производства, передачи, распределения и потребления электрической энергии.

Система электроснабжения – совокупность электроустановок, предназначенных для обеспечения потребителей электрической энергией.

Узел нагрузки – подстанция высокого напряжения (источник электроэнергии), питающая сеть и различные электроприемники (двигатели, разного рода преобразователи, освещение, сварочные установки, электрические печи и т. д.).

Установившийся режим – режим электроэнергетической системы, который характеризуется неизменными параметрами. Медленные изменения режима, связанные с изменением потребления и генерации электроэнергии в течение суток, работой устройств регулирования частоты и активной мощности, рассматриваются как последовательность установившихся режимов.

Возмущение режима – дискретное изменение установившегося режима электроэнергетической системы под воздействием различных причин (например, включение и отключение электроприемников и источников электрической энергии, короткие замыкания, переключения на резервное питание и т. п.).

Переходный процесс – переход из одного установившегося режима электроэнергетической системы в другой, который начинается с момента возмущения и продолжается до окончания вызванных этим возмущением электромагнитных и электромеханических процессов.

Нормальный режим – режим электроэнергетической системы, при котором все потребители снабжаются электрической энергией надлежащего качества в соответствии с договорами и диспетчерскими графиками, а значения технических параметров режима системы и оборудования находятся в пределах допустимых; имеются нормативные оперативные резервы мощности.

Аварийный режим – режим, возникающий в результате аварий в электроэнергетической системе (короткое замыкание, аварийные отключения нагрузок, генераторов и др.).

Послеаварийный режим – режим, в котором находится электроэнергетическая система после локализации аварии до установления нормального режима.

Системная авария – нарушение нормального режима работы всей или значительной части электроэнергетической системы, связанное с массовым нарушением электроснабжения потребителей.

Элементы энергосистем и их характеристика

Электростанция – элемент энергосистемы, предназначенный для преобразования химической энергии топлива в тепловую и электрическую, состоит из топливного склада, котельного и турбинного агрегатов, генератора и распределительных устройств. На электростанции имеется большое хозяйство собственных нужд, служащее для обеспечения нормального технологического цикла. По особенностям технологического процесса производства электроэнергии и используемым видам топлива электростанции подразделяются на конденсационные (КЭС), теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), атомные (АЭС), гидростанции (ГЭС), гидроаккумулирующие (ГАЭС), газотурбинные (ГТС).

К КЭС обычно относятся электростанции, потребляющие органическое топливо (уголь, газ, мазут, торф, сланец), турбины которых работают по конденсационному циклу, когда практически весь пар, вырабатываемый парогенератором, конденсируется и его энергия преобразуется в механическую энергию вала турбины, а затем и в электрическую.

На ТЭЦ значительная часть тепловой энергии передается по трубам потребителям и используется непосредственно в технологиче-

ских процессах. И лишь часть тепловой энергии преобразуется в электрическую. На ТЭЦ для этого устанавливают турбоагрегаты двух типов: теплофикационные и противодавления.

АЭС используют энергию ядерного горючего, также преобразуемого в тепловую энергию пара. АЭС могут использоваться как КЭС и как ТЭЦ, соответственно они обозначаются АКЭС и АТЭЦ.

ГАЭС предназначены для выравнивания графика нагрузки энергосистемы.

По принципу работы они являются такими ГЭС, которые днем в часы максимального электропотребления системы генерируют электрическую энергию за счет сработки воды в водохранилище, а ночью в часы минимума электропотребления работают как потребители электрической энергии – насосы, закачивающие воду обратно в водохранилище. За счет этого снижается величина необходимой установленной генерирующей мощности в электроэнергетической системе (ЭЭС), а также улучшаются условия использования других электростанций, особенно АЭС, не допускающих резких изменений своей загрузки.

ГТС с помощью газовых турбин непосредственно преобразуют энергию сгорания газообразного топлива в механическую и затем электрическую энергию. Изготавливаются также парогазовые установки (ПГУ), работающие по смешанному циклу.

Разнообразны так называемые нетрадиционные типы электростанций. К ним относятся электростанции с магнетогидродинамическими (МГД) генераторами, приливные электростанции (ПЭС), ветровые, гелиоустановки и т. д. Как в настоящее время, так и в обозримом будущем эти типы электростанций не будут иметь существенной роли в энергобалансе страны.

Подстанция – электроустановка, служащая для преобразования и распределения электроэнергии и состоящая из трансформаторов, распределительных устройств, аккумуляторных батарей, устройств управления и собственных нужд.

Распределительный пункт – устройство, предназначенное для распределения электроэнергии на одном напряжении без преобразования и трансформации.

Воздушная линия электропередачи (ЛЭП) – устройство для передачи и распределения электроэнергии на большие расстояния по проводам, расположенным на открытом воздухе.

Объединение элементов в единую схему, работающую синхронно в общем режиме, образует энергосистему.

1. СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА И КОРРЕКЦИИ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

1.1. Задача расчета установившихся режимов электрических систем

Задача расчета установившихся режимов электроэнергетических систем, решение которой необходимо как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации системы, включая управление режимами ее работы, была и остается весьма актуальной. Множество научных работ как советских, так и зарубежных исследователей [1 – 40] посвящены методологии решения этой задачи.

Многое сделано в разработке отдельных аспектов теории анализа режимов электроэнергетических систем [1 – 40]. Однако непрерывный рост и усложнение электрических систем обуславливают необходимость дальнейших научных исследований в решении этой важной проблемы.

С математической точки зрения задача расчета текущих и оптимальных установившихся режимов сводится к решению систем нелинейных алгебраических уравнений, что связано с большими затруднениями. Математическая модель установившегося режима строится в виде системы нелинейных алгебраических уравнений, отражающих состояние сети, которую необходимо решить для получения параметров режима. При этом возникают два важных момента: выбор формы записи исходных нелинейных алгебраических уравнений и выбор метода решения полученных нелинейных алгебраических уравнений.

Структура математической модели расчета установившегося режима зависит также от формы задания исходных режимных параметров относительно узлов. Режим работы электрических систем характеризуется рядом параметров, которые в процессе ведения режима можно изменять, т. е. регулировать. Каждый узел электрической системы характеризуется четырьмя режимными параметрами: активной и реактивной мощностями, модулем и аргументом комплексного напряжения. В зависимости от характера задания исходных режимных параметров различают следующие типы узлов:

– узел типа $U - \Psi U$, для которого считаются заданными модуль и аргумент комплексного напряжения и необходимо определить активную и реактивную мощности. Узел такого типа принимается только один. Причем он выбирается одновременно в качестве базисного и балансирующего;

– узел типа $P - U$, для которого считаются заданными активная мощность и модуль напряжения и необходимо определить реактивную мощность и аргумент напряжения. Узлом такого типа могут быть только стационарные узлы;

– узел типа $P - Q$, для которого считаются заданными активная и реактивная мощности и необходимо определить модуль и аргумент комплексного напряжения. Узлом такого типа могут быть как стационарные, так и нагрузочные узлы.

Следует отметить, что с точки зрения построения вычислительных алгоритмов, исходя из построенной соответствующей математической модели, наиболее неблагоприятным случаем является случай одновременного наличия среди стационарных узлов заданной информации типа $P - U$ и $P - Q$.

Вышеуказанные искомые режимные параметры узлов определяются в результате решения соответствующей поставленной задачи. В зависимости от постановки задачи выбирается соответствующий состав независимых и зависимых переменных.

Как известно, нелинейные алгебраические уравнения, описывающие режим электрической системы, могут составляться в трех основных формах:

– в Y -форме задания пассивных параметров (в уравнениях используется матрица узловых проводимостей);

– форме Z (в уравнениях используется матрица узловых сопротивлений);

– форме $Y - Z$, когда для каждой исследуемой электрической системы строятся два типа нелинейных алгебраических уравнений (гибридный метод расчета).

Что касается методов решения уравнений установившегося режима, то можно отметить, что в настоящее время находят применение целый ряд математических методов: простой итерации, Гаусса – Зейделя, Ньютона – Рафсона, градиентный метод, метод по параметру, модифицированный метод Ньютона (метод Ньютона – Канторовича),

методы Ньютона – Рафсона второго порядка (с использованием матрицы Гессе), кибернетического моделирования, разделения энергосистемы на подсистемы в расчетах установившихся режимов и т. д.

До недавнего времени для расчета установившихся режимов, а также решения связанных с ним задач пользовались в основном Y -матрицей узловых собственных и взаимных проводимостей. В настоящей работе, как и во многих существующих сегодня разработках, используется Z -матрица узловых сопротивлений. Кроме того, предлагается использовать Z -форму задания пассивных параметров при определении чувствительности электрических систем к изменению их режимных параметров.

Остановимся вначале на позиции использования Y -матрицы узловых проводимостей.

Уравнения установившихся режимов электрических систем в Y -форме составляются на основании метода узловых напряжений (известного из курса теоретических основ электротехники – ТОЭ).

Начнем с того, что эта тенденция объясняется тем, что матрица Y формируется достаточно просто и содержит малое число ненулевых элементов. Первоначально наиболее распространенным способом решения уравнений состояния в Y -форме являлся метод Гаусса – Зейделя, привлекающий простотой программирования и не требующий запоминания предыдущих значений переменных. Достаточным условием сходимости по данному методу является условие строгого доминирования диагональных элементов матрицы Y . Для реальных сетей это условие может не выполняться: последовательное соединение сильно отличающихся по величине сопротивлений, большие емкости, длинные линии сверхвысокого напряжения, установки продольной и поперечной емкостной компенсации ухудшают сходимость, так как ослабляют доминирование диагональных элементов матрицы Y . Поэтому для улучшения сходимости применяются различные модификации метода Гаусса – Зейделя.

Однако получившие ранее широкое применение методы (итерация Зейделя с ускоряющими коэффициентами и другие), имеющие простую программную реализацию и экономное использование памяти ЭВМ, не обеспечивали необходимой скорости решения задачи установившегося режима больших электрических систем, а в случае расчета тяжелых режимов, близких к предельным по апериодической

статической устойчивости, не давали сходящегося вычислительного процесса. Поэтому в настоящее время основное внимание уделяется методу Ньютона – Рафсона и его различным модификациям. Основные преимущества этого метода заключаются в квадратичной сходимости. Однако обращение матрицы Якоби (так называемого Якобиана) или решение системы нелинейных уравнений на каждом шаге итерации в случае большой размерности системы все-таки связано со значительными потребностями расчетного времени и памяти ЭВМ. Более эффективно указанные процедуры можно реализовать, применив "слабый метод Ньютона". Основная идея этого метода заключается в использовании вместо точного Якобиана его приближенных выражений.

В учебном пособии рассматриваются возможные способы получения приближенного Якобиана, анализируется необходимая потребность памяти ЭВМ и исследуется сходимость решения. Представим схему электрической системы в следующем виде (рис. 1.1).

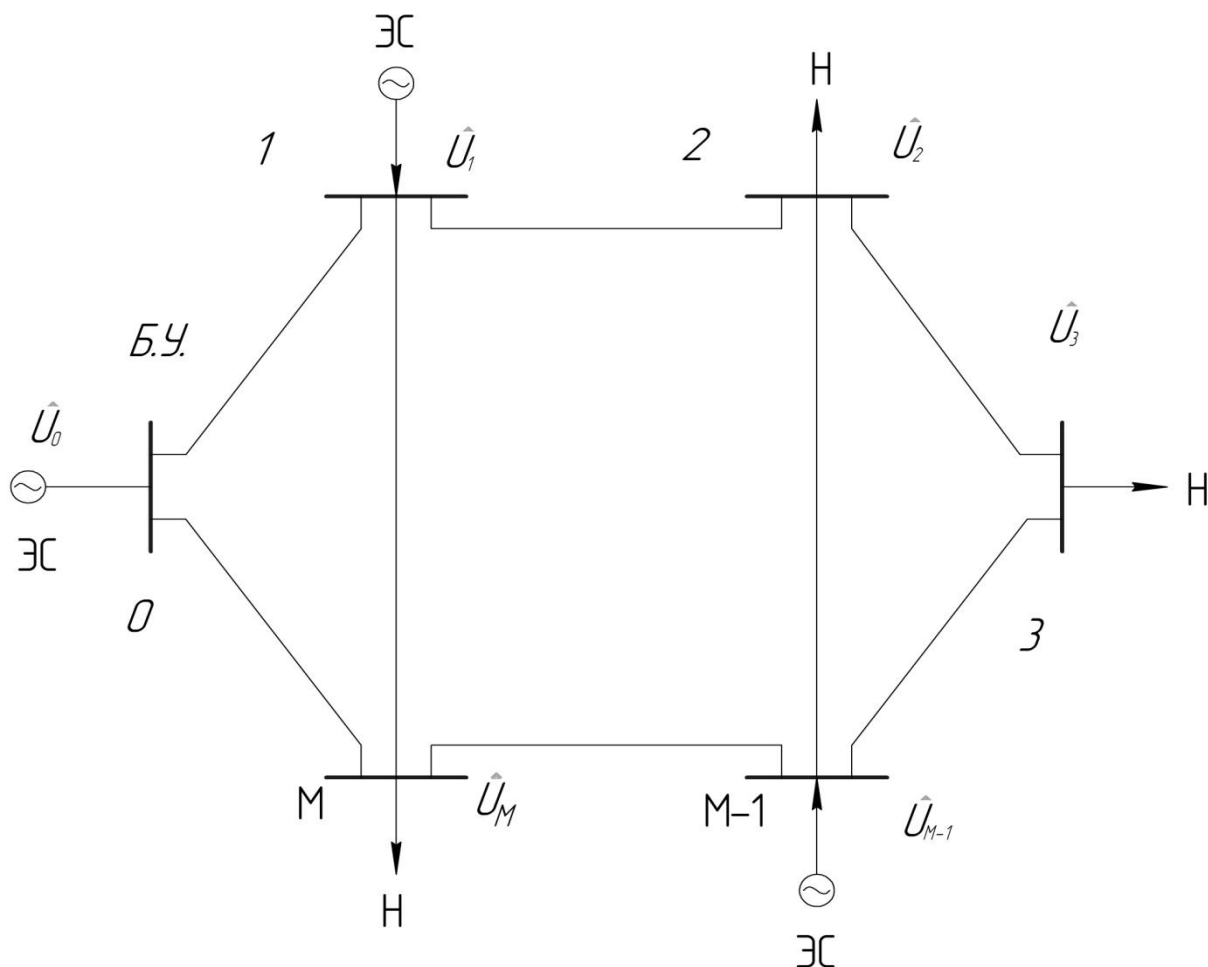


Рис. 1.1. Схематическое представление электрической системы

На рис. 1.1 электрические станции обозначены кружками, нагрузки – стрелками, а линии электропередач – прямыми линиями. Предполагается, что к каждому узлу может быть подключена либо электрическая станция, либо нагрузка. Необходимо отметить, что в случае, когда к данному узлу подключены станция и нагрузка, их всегда можно объединить и получить случай, когда к узлу подключена либо только станция, либо только нагрузка. Например, если мощность станции больше мощности нагрузки, то их объединение (т. е. алгебраическая сумма мощностей) всегда дает мощность, направленную в систему (т. е. электрическая станция), а если мощность станции меньше мощности нагрузки, то результирующая мощность будет иметь направление от системы (т. е. нагрузка).

После выбора узла с нулевым индексом в качестве базисного (балансирующего) и обозначения его комплексного напряжения через U_0 , (иногда обозначается через U_B , где индекс Б от слова «базисный» или «балансирующий»), а также отнесения комплексных напряжений остальных независимых узлов относительно этого напряжения системе уравнений состояния можно рассмотреть как конкретные формы приближенного Якобиана, для чего представим основные уравнения состояния установившегося режима системы в следующем виде:

$$\begin{cases} P_i = \sum_j U_i U_j [g_{ij} \cos(\Psi_i - \Psi_j) - b_{ij} \sin(\Psi_i - \Psi_j)]; \\ Q_i = \sum_j U_i U_j [g_{ij} \sin(\Psi_i - \Psi_j) + b_{ij} \cos(\Psi_i - \Psi_j)], \end{cases} \quad (1.1.1)$$

где g_{ij} и b_{ij} – элементы матрицы узловых проводимостей.

Общая форма итеративного процесса решения систем уравнений вида (1.1.1) основывается на известном соотношении, которое можно представить в виде матричного уравнения

$$\begin{bmatrix} \Delta\Psi \\ \Delta U \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} H & N \\ L & K \end{bmatrix}_k^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}_n, \quad (1.1.2)$$

где ΔP и ΔQ – векторы невязок; $\Delta\Psi^{k+1}$ и ΔU^{k+1} – векторы приращения угла и модуля напряжения на $k + 1$ шаге итерации; H, N, L, K – подматрицы приближенного Якобиана.

В обычной постановке метода Ньютона – Рафсона подматрицы H, N, L и K являются подматрицами точного Якобиана уравнений (1.1.1), т. е.

$$\begin{cases} H_{ij} = \frac{\partial P_i(U, \Psi)}{\partial \Psi_j}, & N_{ij} = \frac{\partial P_i(U, \Psi)}{\partial U_j}, \\ L = \frac{\partial Q_i(U, \Psi)}{\partial \Psi_j}, & K = \frac{\partial Q_i(U, \Psi)}{\partial U_j}. \end{cases} \quad (1.1.3)$$

Поскольку аналитические выражения узловых активных и реактивных мощностей известны (1.1.1), то нетрудно установить и аналитические выражения частных производных (1.1.3):

$$\begin{aligned} H_{ij} &= \begin{cases} U_i U_j [g_{ij} \sin(\Psi_i - \Psi_j) - b_{ij} \cos(\Psi_i - \Psi_j)], i \neq j, \\ -b_{ii} U_i^2 - Q_i, i = j \end{cases}, \\ N_{ij} &= \begin{cases} U [g_{ij} \cos(\Psi_i - \Psi_j) + b_{ij} \sin(\Psi_i - \Psi_j)], i \neq j, \\ g_{ii} U_i + P_i / U_i, i = j \end{cases}, \\ L_{ij} &= \begin{cases} -U_i U_j [g_{ij} \cos(\Psi_i - \Psi_j) + b_{ij} \sin(\Psi_i - \Psi_j)], i \neq j, \\ -g_{ii} U_i^2 + P_i, i = j \end{cases}, \\ K_{ij} &= \begin{cases} U_i [g_{ij} \sin(\Psi_i - \Psi_j) - b_{ij} \cos(\Psi_i - \Psi_j)], i \neq j, \\ -b_{ij} U_i + Q_i / U_i, i = j. \end{cases} \end{aligned}$$

Необходимый объем памяти ЭВМ при решении задачи расчета установившегося режима с точным Якобианом пропорционален величине $(N_P + N_Q)^2$, где N_P, N_Q – соответственно число узлов с заданными значениями активной и реактивной P и Q мощностей.

В электрических системах существуют относительно жесткие соотношения между величинами активной мощности и фазой напряжения, а также между величинами реактивной мощности и модулем напряжения. Эти соотношения выражаются в том, что элементы подматриц N и L точного Якобиана значительно меньше по сравнению с элементами матриц H и K . Поэтому одним из возможных способов получения приближенного Якобиана является допущение, что $N_{ij} = L_{ij} = 0$, а H_{ij}, K_{ij} при этом определяются по соответствующим выражениям. В этом случае предлагается использовать тот же подход с принятием дополнительных допущений, таких как $g_{ij} \ll b_{ij}$, а $U_j \approx 1$ отн. ед.

Тогда $N_{ij} = 0, L_{ij} = 0$.

$$\begin{aligned} H_{ij} &= \begin{cases} -b_{ij} \cos(\Psi_i - \Psi_j), i \neq j \\ -b_{ij} - Q_i, i = j, \end{cases} \\ K_{ij} &= \begin{cases} -b_{ij} \cos(\Psi_i - \Psi_j), i \neq j \\ -b_{ij} + Q_i, i = j. \end{cases} \end{aligned}$$

В этом случае объем памяти ЭВМ сокращается до $V = 0,5(N_P^2 + N_Q^2)$.

Дальнейшее упрощение может быть основано на следующем допущении: $\cos(\Psi_i - \Psi_j) \approx 1$, так как угол между векторами напряжений на концах линий электропередач в условиях нормальной работы обычно не превышает 30° . При использовании этого допущения получается неизменяющийся от итерации к итерации приближенный Якобиан, так как $H_{ij}K_{ij} = b_{ij}$ (при заземленных балансирующем узле и узлах с регулированием напряжения). Необходимый объем памяти сохраняется на уровне, который обеспечивает рассмотренный выше подход.

В работах [1 – 40] отмечается, что описанный выше метод совпадает с методом "аппроксимации схемой постоянного тока", если векторы невязок ΔP и ΔQ постоянны. Как показано в [1 – 40], сходимость решения при использовании упрощенных методов не отличается резко от сходимости метода Ньютона – Рафсона. Однако применение "слабого" метода Ньютона возможно лишь при выполнении определенных условий.

Пусть $F(X) = 0$ – исследуемая система нелинейных уравнений, решение которой осуществляется по рекуррентному выражению

$$X_{n+1} = X_n - M(X_{(n)}) \cdot F(X_{(n)}). \quad (1.1.4)$$

Если $M(X_{(n)}) = [F'(X_{(n)})]^{-1}$, то (1.1.4) соответствует методу Ньютона – Рафсона. Использование приближенного Якобиана требует выполнения условия

$$h = \frac{CDk}{1-y} \leq 2,$$

где $C = \max_{X_{(n)}} \|M(X_{(n)})\|$;

$$D = \max_{X_{(n)}} \|F(X_{(n)})\|;$$

$$k = \max_{X_{(n)}} \|F(X_{(0)})\|;$$

$$y = \max_{X_{(n)}} \|E - F'(X_{(n)})M(X_{(n)})\|$$

являются нормами соответствующих линейных операторов.

Экспериментально было установлено, что сходимость решения при использовании метода Ньютона не всегда выполняется. В [1 – 40] показано, что сходимость зависит от выбора начальной точки, формы записи уравнений состояния электрической системы и выбора независимых переменных. Сходимость метода Ньютона часто связана с уменьшением относительного значения Якобиана на рассматриваемом шаге итерации и с изменением его знака. В [1 – 40] рекомендуются некоторые практические приемы для увеличения эффективности метода Ньютона, основная идея которых заключается в изменении системы координат. С этим связана возможность возникновения ситуации, при которой начальная точка в новой системе координат будет находиться около поверхности, получающейся при нулевом значении Якобиана, и тогда метод Ньютона может не сойтись к решению. В этих случаях сходимость может быть обеспечена использованием параметра $\lambda \leq 1$, при котором итерационная схема примет следующий вид:

$$X_{(n+1)} = X_{(n)} - \lambda \left[\frac{\partial W}{\partial X} \right]^{-1} W(X_{(n)}),$$

где $W(X_{(n)})$ – вектор-функция небаланса мощности в точке $X = X_{(n)}$.

С точки зрения математики несходящийся процесс решения установившегося режима может быть вызван плохой обусловленностью матрицы Якоби. Элементы матрицы производных зависят как от параметров сети, так и от параметров режима. Поэтому плохая обусловленность матрицы Якоби может быть следствием как очень сильного различия параметров сети, так и близости рассчитываемого режима к предельному по существованию или апериодической статической устойчивости.

В таких ситуациях метод Ньютона – Рафсона дает расходящийся итерационный процесс, причем трудно определить, какие меры следует принять для ввода режима в область существования. Для преодоления указанных трудностей предлагается формулировать задачу нахождения установившегося режима как задачу нелинейного программирования.

Можно заметить, что во всех рассмотренных выше методах расчета установившихся режимов при составлении уравнений состояния используется Y -матрица узловых собственных и взаимных проводи-

ностей. Это объясняется такими преимуществами итеративных методов с матрицей Y , как малый объем памяти и высокое быстродействие.

Однако отношение к Y -форме представления уравнений установившихся режимов изменилось после появления работы группы американских ученых. Авторы этих работ на основании глубокого и многостороннего исследования установили, что Y -метод расчета установившихся режимов становится неприемлемым если:

- в схеме замещения электрической системы имеются ветви с очень малым сопротивлением;
- сопротивления отдельных ветвей сильно отличаются друг от друга;
- в схеме замещения электрической системы появляются отрицательные сопротивления.

Из-за указанных недостатков, а также в связи с усовершенствованием методов обращения матриц узловых проводимостей для расчета установившихся режимов начали проводиться работы по применению уравнений, составленных в форме Z .

Принципиальное различие итеративных методов с использованием матриц Y и Z заключается в том, что в последнем случае линейное уравнение $\dot{I} = Y \cdot \dot{U}$ решается непосредственно относительно напряжения \dot{U} при заданных токе \dot{I} и матрице, обратной Y :

$$\dot{U} = Y^{-1} \cdot \dot{I} = Z \cdot \dot{I},$$

где U – вектор напряжений узлов относительно балансирующего узла. В другом варианте перед обращением матрицы Y исключается уравнение для балансирующего узла согласно уравнению вида $\dot{U} = \alpha \dot{U}_B + Z \dot{I}$.

Таким образом, применение Z -метода расчета установившегося режима электрических систем вызывает дополнительные затруднения, связанные с определением собственных и взаимных сопротивлений независимых узлов. В связи с этим интенсивнее стали проводиться работы по разработке и усовершенствованию методов определения собственных и взаимных сопротивлений узлов.

С целью получения Z -матрицы узловых сопротивлений предлагается использовать методы, основанные на прямом обращении Y -матрицы узловых проводимостей. Однако прямое обращение Y -матрицы оправдывает себя для электрических схем с небольшим

количеством узлов. Поэтому необходимость определения Z -матрицы для электрических систем с большим числом узлов привела к использованию характерных особенностей самих электрических систем.

И, наконец, для определения Z -матрицы больших электрических систем оказалось целесообразным применение идеи декомпозиции [14, 29 – 37]. В этом случае заданная большая электрическая система представляется как совокупность радиально-связанных оптимальных подсистем [29 – 37], для каждой из которых устанавливаются значения элементов Z -матрицы. Затем, объединив определенным образом Z -матрицы отдельных подсистем, можно получить Z -матрицу обобщенных параметров электрической системы в целом.

Исследование по применению Z -формы позволило исследователям прийти к следующим важным выводам:

- применение Z -алгоритма расчета установившихся режимов гарантирует процесс сходимости при любых возможных режимах, что не характерно для Y -алгоритма;

- использование Z -алгоритма расчета установившихся режимов обеспечивает быструю сходимость итерационного процесса, чего также нельзя сказать об Y -алгоритме.

Необходимо, однако, заметить, что, обеспечивая высокую эффективность расчета установившихся режимов электрических систем, применение Z -метода сталкивается с серьезным затруднением при оперировании со стационарными узлами типа $P - U$. Иными словами, при наличии стационарных узлов с заданными активной мощностью и модулем напряжения необходимо определить реактивную мощность и аргумент напряжения; организация итерационного процесса связана с большими трудностями.

Дальнейшие исследования велись в направлении поиска новых подходов для улучшения итерационного процесса решения уравнений установившегося режима при наличии стационарных узлов типа $P - U$. А в связи с тем, что Y -форма задания пассивных параметров хорошо проявляет себя для независимых стационарных узлов типа $P - U$, появились так называемые гибридные методы расчета установившихся режимов [29 – 40], или $Y - Z (Z - Y)$ -метод.

Суть этого метода, как уже было сказано, заключается в том, что для каждой исследуемой электрической системы строятся два типа нелинейных алгебраических уравнений. Первый тип уравнений составляется для стационарных узлов типа $P - U$ (с использованием Y -матрицы), а второй тип – для остальных стационарных и всех нагрузочных узлов типа $P - Q$.

В настоящее время гибридные модели установившегося режима электрических систем являются весьма перспективными для решения различных режимных задач. Доказательством тому служат работы [29 – 40], авторы которых на основании глубокого численного анализа установили ряд следующих преимуществ гибридной модели:

- обеспечивает высокую эффективность для систем, в которых величины активных сопротивлений преобладают над реактивными $R > X$;
- сходимость итерационного процесса не зависит от выбора начальных значений зависимых параметров режима;
- гарантирует решение задачи для электрической системы, содержащей ветви с продольными емкостями;
- обеспечивает решение задачи для существующих тяжелых режимов.

Однако в существующих гибридных методах системы уравнений, составленных для узлов типов $P - U$ и $P - Q$, в отдельности решаются различными математическими аппаратами. Первый тип нелинейных алгебраических уравнений решается в основном с помощью метода Ньютона – Рафсона первого или второго порядка. Второй тип уравнений решается методом Зейделя. Это обстоятельство необходимо отнести к недостаткам такого гибридного подхода, так как оно вызывает большие затруднения при разработке единого вычислительного алгоритма для решения уравнений, составленных в Y и Z -формах. В то же время практика применения метода Ньютона – Рафсона к Z -форме уравнений установившегося режима в ряде работ, в том числе [29 – 40], показала его высокую эффективность при численном решении задач.

Исходя из этого в работах [29 – 40] предлагается решать подсистемы уравнений обоих типов, используя только метод Ньютона – Рафсона.

1.2. Задача расчета установившихся режимов больших электрических систем методом декомпозиции

Вышерассмотренные методы расчета установившихся режимов можно успешно использовать для задач, связанных с решением режимов небольших энергосистем. Проблема определения установившихся режимов современных больших сложных энергосистем требует принципиально нового подхода.

В настоящее время для решения проблемы установившихся режимов довольно широко используют идею декомпозиции разделения большой энергосистемы на ряд подсистем и их решение в отдельности с последующим обобщением результатов [29 – 40].

Отдельные подсистемы могут быть первоначально как полностью изолированы друг относительно друга, так и иметь связывающие ветви. Для решения задач установившихся режимов методом декомпозиции используются алгоритм Z -формы задания пассивных параметров [29 – 40] и алгоритм Y -формы [1 – 29]. Необходимо отметить, что в большинстве случаев идея диакоптики – декомпозиции применяется при Z -алгоритме расчета установившихся режимов.

При реализации математических моделей Z электрической системы использовался также принцип диакоптического расщепления. Название диакоптика в энергетической литературе впервые было использовано американским ученым электротехником Габриелом Кроном. Диакоптика – это греческое слово, причем «копти» означает разделить, а «диа» – система. Фактически слово диакоптика можно интерпретировать как разделенная система. Однако мы используем данное понятие как диакоптическая математическая модель. Г. Крон предлагает два типа диакоптики.

1. Диакоптика диффузионного типа, когда электрическая система представлена как комплекс радиально связанных подсистем, имеющих один общий узел, который может быть и базисным, (на рис. 1.2).

Как можно заметить, все N -подсистемы имеют электрическую связь только по одному узлу.

2. Диакоптика пуассонного типа, когда электрическая система представляется как совокупность разделенных друг от друга подсистем (рис. 1.3).

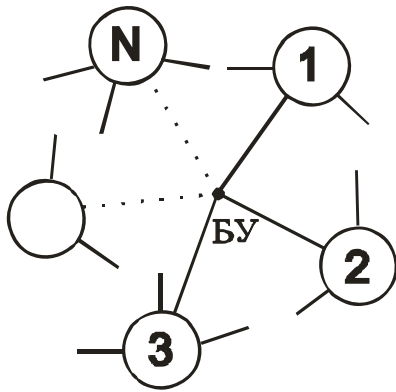


Рис. 1.2. Диакоптика диффузионного типа

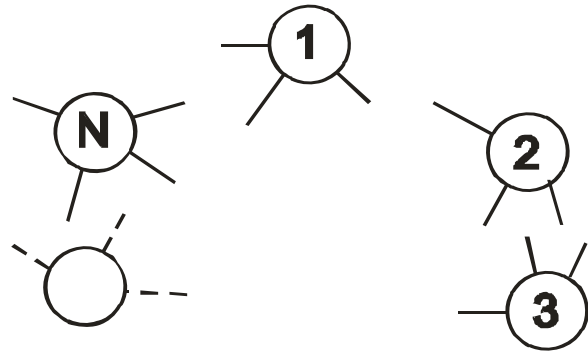


Рис. 1.3. Диакоптика пуассонного типа

Если диакоптика диффузионного типа требует ЭЭС особой структуры, которая ограничивает и даже исключает ее использование, то диакоптика пуассонного типа приводит к неразрешимости проблемы.

Одним из основных недостатков представления большой системы в виде совокупности изолированных подсистем является проблема стыковки режимов отдельных подсистем для определения режима исходной системы. Для обеспечения сходимости при стыковке нагрузки отдельных подсистем представляются поперечными комплексными сопротивлениями с последующим их включением в Z -матрицу. В этом случае возникают определенные затруднения при получении реальных режимных параметров.

С точки зрения обеспечения сходимости при стыковых решениях нелинейных алгебраических уравнений отдельных подсистем перспективной будет идея представления большой электрической системы в виде совокупности радиально связанных оптимальных подсистем. В отличие от религиозной диакоптической теории предлагается диакоптика нового качества.

Согласно новому диакоптическому направлению электрическая система представляется как совокупность радиально связанных подсистем (рис. 1.4).

Основное преимущество в том, что построенная диакоптическая модель абсолютно адекватна по отношению к соответствующей классической математической модели. Данные, полученные для каждой предыдущей подсистемы, используются для построения соответствующей математической модели следующей подсистемы. Реализация

каждого шага или итерации по отношению к подсистемам воспринимается как один шаг или итерация для электрической системы.

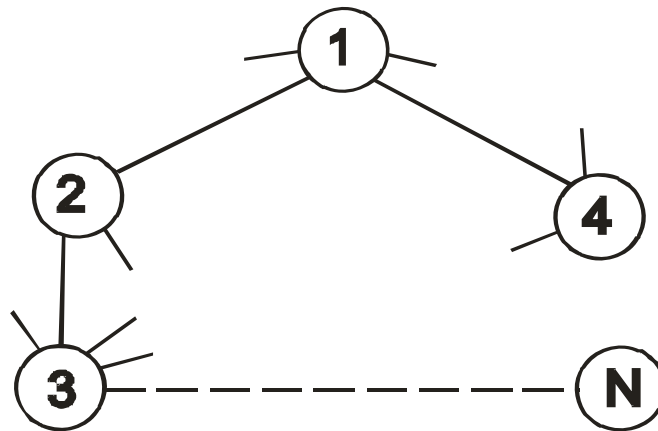


Рис. 1.4. ЭЭС как совокупность радиально связанных N -подсистем

Диакоптическая модель электрической системы реализуется по методу Ньютона – Рафсона, в основе которого лежит построение расчетной матрицы Z , имеющей следующий вид:

$Z_{i_1 j_1}$		$Z_{i_1 \gamma_1} - Z_{i_1 S_1}$	(1.2.1)
	$Z_{i_2 j_2}$	$Z_{i_2 \gamma_2} - Z_{i_2 S_2}$	
	
	$Z_{i_N j_N}$	$Z_{i_N \gamma_N} - Z_{i_N S_N}$	
		$Z_{\ell \delta} - Z.$	

Строятся уравнения отдельных подсистем установившегося режима

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{U}_{i_1} = \dot{U}_{B i_1} + Z_{i_1 j_1} \dot{I}_{j_1}, \\ \dot{U}_{i_2} = \dot{U}_{B i_2} + Z_{i_2 j_2} \dot{I}_{j_2}, \\ \dots \dots \dots \\ \dot{U}_{i_N} = \dot{U}_{B i_N} + Z_{i_N j_N} \dot{I}_{j_N}. \end{array} \right. \quad (1.2.2)$$

Отметим, что рассматриваемая в (1.2.2) новая система представлена как совокупность радиально связанных N -подсистем. В работах исследователей предлагается соответствующий алгоритм, по которому матрица Якоби приводится к блочно-диагональному виду и при этом разлагается на несколько подматриц. В предлагаемом алгоритме системы уравнений установившегося режима решаются одновременно для всей энергосистемы. В этом случае сходимость получается такая же, как и при расчете установившегося режима системы без разбиения на подсистемы. Исследования в этих направлениях продолжаются, в результате чего в работах [28 – 33] предлагается вычислительный алгоритм, обеспечивающий сходящийся процесс при стыковке решения нелинейных алгебраических уравнений отдельных подсистем, а также получение физически реальных режимных параметров. Сходимость этого метода получается такой же, что и при классической постановке задачи, когда энергосистема рассматривается как одно целое.

1.3. Анализ методов коррекции установившихся режимов электрических систем при изменении их параметров

Сложная система как автоматически управляемая требует совершенствования методов ее анализа. Для такой системы нужно уметь рассчитывать ее поведение не только при заданных фиксированных параметрах, но и рассматривать, и оценивать те изменения в параметрах, которые осуществляются с помощью управляющих кибернетических устройств. Расчеты должны выявлять воздействия, которые в ходе процесса необходимо реализовать, чтобы получить нужное его протекание. Иными словами, процессы должны рассматриваться как управляемые, подвергающиеся непрерывным воздействиям, изменяющим их в нужном направлении.

В этой идее анализа системы на первое место выдвигается уже не точность расчета на основе заданных исходных данных, а точность непрерывной коррекции, осуществляемой на основе сведений о протекании режима, т. е. кибернетическое управление в темпе процесса.

Вопросы управления уже давно стоят на повестке дня, в связи с чем целый ряд работ посвящен исследованию этой проблемы [1 – 40]. В широком аспекте этой проблемы большой интерес представляет круг задач, связанных с разработкой методов коррекции установившихся режимов быстрых и достаточно точных.

Необходимость в коррекции режимов возникает как при изменении активных параметров отдельных узлов, так и при изменении пассивных параметров схемы электрической системы. И в этом и в другом случае задача коррекции может быть выполнена двумя различными способами. Один из них основывается на классической постановке задачи расчета установившегося режима и является совершенно точным. Однако такой подход, как известно, связан с большими затруднениями и исключает возможность решения задачи в темпе процесса. В связи с этим велись серьезные исследования в направлении упрощения задачи коррекции с целью ее решения в реальном времени. В этом смысле представляет большой интерес задача разработки метода, позволяющего избежать решение системы нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима итерационным путем.

В последнее время для коррекции режимов электрических систем при изменении их параметров с успехом используется современная теория чувствительности. Что касается коррекции режимов при изменении пассивных параметров электрических систем, то для этой цели на сегодняшний день наиболее эффективной признана методика, основанная на применении теоремы Теледжена.

Необходимо отметить, что, сочетая в перспективе эти два подхода, можно получить общую методику анализа чувствительности режимов электрической системы к изменению любых параметров этой системы.

Опыт многочисленных исследований показывает, что анализ чувствительности – эффективный и достаточно точный метод при решении задач диспетчерского управления режимами и связанных с ними оптимизационных проблем.

В [1 – 29] показан обобщенный подход для вычисления чувствительности одного, а также нескольких зависимых переменных или некоторой целевой функции к изменению выбранных в качестве управляемых и любых других параметров электроэнергетической системы. При этом учитываются ограничения, задаваемые в виде равенств, отражающих известный режим системы и имеющиеся средства регулирования. Предлагается обобщенный подход и обеспечивается эффективный вычислительный алгоритм, раскрываются преимущества, вытекающие из метода, подобного методу Ньютона – Рафсона при решении задач установившегося режима [1 – 35].

Состояние электрической системы в установившемся режиме может быть представлено системой из N нелинейных уравнений

$$g(X, Y) = 0, \quad (1.3.1)$$

где X – вектор зависимых переменных размерности N ; Y – вектор независимых переменных. Выбор элементов в векторах X , Y определяется действующими и налагаемыми условиями.

При формировании выражения (1.3.1) обычно составляют N уравнений с N зависимыми переменными и N ограничений, представленных в виде равенств, куда входят независимые переменные. Вектор Y можно представить состоящим из двух подвекторов, V -элементы которого представляют управляемые переменные, P -элементы – независимые переменные и фиксированы в решаемой задаче.

Нелинейная система уравнений (1.3.1) может быть линеаризована в окрестности точки решения установившегося режима X_0 путем разложения в ряд Тейлора с пренебрежением членами второго и более высокого порядков

$$\left[\frac{\partial g}{\partial X}(X, V, P) \right] \cdot [\Delta X] = - \left[\frac{\partial g}{\partial V} \right] \cdot [\Delta V], \quad (1.3.2)$$

где $\partial g / \partial X$ – квадратная ($N \times N$) матрица Якоби, $\partial g / \partial V$ – матрица размерности $N \times M$ (где M – число элементов вектора V) является слабо-заполненной.

Недостатком этого метода можно назвать необходимость обращать матрицу Якоби. Для больших электрических систем размер-

ность Якобиана может достигать нескольких тысяч, но при этом он представляет собой очень слабозаполненную матрицу. Причем существует ряд методик, позволяющих преодолеть трудности задачи обращения матрицы Якоби, такие как треугольная факторизация, основанная на методе исключения Гаусса, специальные принципы программирования в условиях слабой заполненности.

Другое неудобство заключается в том, что матрица Якоби становится плохо обусловленной с увеличением размера сети. Для улучшения степени обусловленности матрицы Якоби можно принять ряд допущений, таких как представление электрических нагрузок постоянными сопротивлениями и включение их в состав матриц пассивных параметров.

Однако дальнейшие исследования показали, что все указанные выше трудности могут быть решены эффективно путем использования декомпозиции. Важно отметить, что декомпозиция не делает каких-либо допущений и упрощений моделей электрических систем в отличие от вышеприведенных методик и дает большие преимущества в точности расчета, а также при использовании многопроцессорной системы вычислительных машин – во времени расчета. И то и другое очень важно при использовании декомпозиции в анализе чувствительности с целью коррекции установившихся режимов электрических систем в темпе процесса.

С этой точки зрения представляют интерес те работы, в которых предлагается алгоритм определения матриц чувствительности, основанный на использовании декомпозиций. Во всех предшествующих алгоритмах анализа чувствительности используется только Y -форма задания исходных параметров.

Учитывая приведенные выше достоинства Z -формы представления пассивных параметров, в настоящей работе предлагается алгоритм анализа чувствительности, построенный на базе уравнений состояния, использующих Z -матрицу узловых сопротивлений.

Принимая во внимание преимущества гибридной модели при наличии узлов смешанного типа: стационарных узлов типа $P - U$, нагрузочных и остальных стационарных типа $P - Q$, предлагается ис-

пользовать блочную матрицу $Y - Z$ в алгоритме коррекции установившегося режима электрической системы. Таким образом совершенствуется метод оперативной коррекции режима электрической системы, основанный на применении современной теории чувствительности. А это означает, что основная задача – разработка методов коррекции установившихся режимов электроэнергетических систем и внедрение их в практику проектирования и эксплуатации.

Ставя перед собой эту задачу, исследователи считали необходимым разработать такие методы расчета, которые бы в наибольшей степени обеспечивали следующие требования:

- уменьшение объема вычислительных работ для быстрого получения результатов расчета;
- уменьшение объема занимаемой памяти, что приводит к возможности увеличения размера решаемой задачи;
- расширение диапазона вариаций исходных параметров, для которого можно осуществить достаточно точную коррекцию, что увеличит применительные возможности метода;
- решение задачи при любой форме задания информации для станционных узлов.

Трудность оперативной коррекции заключается в том, что связь между регулируемыми и контролируемыми параметрами является нелинейной, а математическое описание объекта достаточно сложно и, следовательно, решение указанной задачи классическим путем требует значительно больше машинного времени, нежели допустимо для решения задачи коррекции в реальном масштабе времени. Возможное упрощение алгоритма базируется на применении теории чувствительности с учетом линеаризации уравнений состояния электрической системы. Соответствующий алгоритм позволяет избежать итерационного процесса при получении нового установившегося режима, параметры которого устанавливаются на базе исходного установившегося режима в результате всего лишь одного обращения матрицы Якоби.

Таким образом было обосновано применение указанного метода при Y , Z , а также $(Y - Z)$ -формах задания пассивных параметров. Необходимо отметить, что точность предлагаемого метода зависит от величин вариаций исходных параметров режима.

Как известно, применение Z -алгоритма расчета установившегося режима по методу Ньютона – Рафсона приводит к сокращению числа итераций по сравнению с Y -алгоритмом. Очевидно, результат каждой итерации Z -алгоритма получается ближе к окончательному решению, вследствие чего применение в алгоритме чувствительности Z -формы задания пассивных параметров увеличивает точность коррекции, расширяя тем самым диапазон вариаций исходных параметров, для которого правомерно использование данного алгоритма. В учебном пособии приводится численный анализ, подтверждающий вышеприведенные выводы.

Учитывая также, что в большинстве практических задач преобладает смешанная форма задания режимных параметров в узлах, в настоящей работе предлагается для коррекции режима использовать $(Y - Z)$ -матрицу пассивных параметров. Это позволяет шире использовать алгоритм коррекции, применяя его в комплексе с $(Y - Z)$ -программой расчета установившегося режима.

Как известно, Y -блок математической модели установившегося режима позволяет успешно решать задачу для стационарных узлов типа $P - U$, тогда как доминирующий Z -блок обеспечивает быстродействие и точность решения. Указанные обстоятельства отражаются и на алгоритме коррекции режима.

Разработанный вычислительный алгоритм позволит обращение матрицы, порядок которой определяется числом независимых узлов исследуемой электрической системы, заменить обращением двух матриц, порядки которых определяются соответственно числом узлов типа $P - U$ и $P - Q$.

Благодаря этому уменьшаются объемы вычислительных работ и занимаемой памяти цифровой вычислительной машины. Предлагаемый метод в состоянии значительно повысить эффективность методов чувствительности, использующих идею декомпозиции.

2. УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ЕГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К ИЗМЕНЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ПРИ Y-ФОРМЕ ЗАПИСИ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ

2.1. Постановка задачи расчета установившегося режима

Как известно, под установившимся режимом понимается состояние электрической системы, при котором режимные параметры длительное время не меняются. Состояние электрической системы при этом определяется значениями параметров ее узлов. Каждый узел характеризуется четырьмя режимными параметрами: активной P и реактивной Q мощностями, модулем U и аргументом Ψ комплексного напряжения. На практике мы получаем информацию обычно о двух режимных параметрах для каждого узла, остальные два можно определить в результате решения системы нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима электрической системы.

В зависимости от характера задания исходной информации узлы можно классифицировать следующим образом:

1. Узел типа $U - \Psi_U$, для которого задаются модуль и аргумент комплексного напряжения и необходимо определить активную и реактивную мощности. В качестве такого узла выбирается стационарный узел, который назначается базисным.

2. Узел типа $P - U$, для которого задается активная мощность и модуль комплексного напряжения и необходимо определить реактивную мощность и аргумент комплексного напряжения. На практике узлами такого типа обычно являются только стационарные узлы.

3. Узел типа $P - Q$, для которого задаются активная и реактивная мощности и необходимо определить модуль и аргумент комплексного напряжения. Узлами такого типа могут быть как стационарные, так и нагрузочные узлы.

При решении любой из поставленных задач для конкретной сети, состоящей из $N+1$ узловых точек, необходимо построить систему нелинейных алгебраических уравнений, отражающих состояние данной электрической системы, иными словами, построить соответствующую математическую модель.

2.2. Уравнения установившегося режима алгебраической системы при Y -форме задания пассивных параметров

Как уже было отмечено, уравнения установившегося режима, отражающие состояние электрической системы, могут быть составлены в трех основных формах: Y -форме задания пассивных параметров, Z -форме, а также гибридной ($Y - Z$) или ($Z - Y$)-форме задания пассивных параметров.

В первом случае в качестве исходного для получения системы нелинейных уравнений состояния используется матричное уравнение

$$\dot{I} = \dot{U} \cdot Y, \quad (2.2.1)$$

во втором

$$\dot{U} = \dot{I} \cdot Z. \quad (2.2.2)$$

Относительно пассивных параметров это означает, что в первом случае считается заданной Y -матрица узловых проводимостей, а во втором – Z -матрица узловых сопротивлений.

Остановимся на получении систем уравнений состояния электрической системы методом узловых напряжений (см. рис. 1.1). Для этого рассмотрим электрическую систему, состоящую из $N+1$ узловых точек, в состав которых входят как стационарные, так и нагрузочные узлы. При этом один из $N+1$ узлов выбирается в качестве базисного и обычно назначается балансирующим.

Как известно, на основании выражения (2.2.1) можно написать следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= Y_{11} \dot{U}_{10} - Y_{20} \dot{U}_{20} - \dots - Y_{1N} \dot{U}_{N0}, \\ \dot{I}_2 &= -Y_{21} \dot{U}_{10} - Y_{22} \dot{U}_{20} - \dots - Y_{2N} \dot{U}_{N0}, \\ \dot{I}_N &= Y_{N1} \dot{U}_{10} - Y_{N2} \dot{U}_{20} - \dots - Y_{NN} \dot{U}_{N0}. \end{aligned} \right\} \quad (2.2.3)$$

Здесь $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dots, \dot{I}_N$ – комплексные узловые точки независимых узлов; $\dot{U}_{10}, \dot{U}_{20}, \dots, \dot{U}_{N0}$ – комплексные напряжения независимых узлов 1, 2 ... N относительно напряжений базисного или зависимого узла; Y_1, Y_2, \dots, Y_{NN} – собственные комплексные проводимости независимых узлов.

Остальные проводимости, входящие в состав системы уравнений (2.2.3) и взятые со знаком минус, представляют собой взаимные комплексные проводимости узлов.

Систему уравнений (2.2.3) можно представить в виде матричной записи:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_1 \\ \dot{i}_2 \\ \dots \\ \dot{i}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & -Y_{12} & \dots & -Y_{1N} \\ -Y_{21} & Y_{22} & \dots & -Y_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -Y_{N1} & -Y_{N2} & \dots & Y_{NN} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{U}_{10} \\ \dot{U}_{20} \\ \dots \\ \dot{U}_{N0} \end{bmatrix}, \quad (2.2.4)$$

но так как

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{10} \\ \dot{U}_{20} \\ \dots \\ \dot{U}_{N0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_1 - \dot{U}_0 \\ \dot{U}_2 - \dot{U}_0 \\ \dots \\ \dot{U}_N - \dot{U}_0 \end{bmatrix}, \quad (2.2.5)$$

то

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_1 \\ \dot{i}_2 \\ \dots \\ \dot{i}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & -Y_{12} & \dots & -Y_{1N} \\ -Y_{21} & Y_{22} & \dots & -Y_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -Y_{N1} & -Y_{N2} & \dots & Y_{NN} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{U}_{10} \\ \dot{U}_{20} \\ \dots \\ \dot{U}_{N0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (Y_{11} & -Y_{12} & -Y_{13} & \dots & Y_{1N}) & \dot{U}_1 \\ (-Y_{21} & Y_{22} & -Y_{23} & \dots & Y_{2N}) & \dot{U}_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ (-Y_{N1} & -Y_{N2} & -Y_{N3} & \dots & Y_{NN}) & \dot{U}_N \end{bmatrix}. \quad (2.2.6)$$

Учитывая, что

$$\left. \begin{array}{l} Y_{11} = Y_{10} + Y_{12} + \dots + Y_{1N} \\ Y_{22} = Y_{20} + Y_{21} + \dots + Y_{2N} \\ \dots \\ Y_{NN} = Y_{N0} + Y_{N1} + \dots + Y_{N-1N} \end{array} \right\}, \quad (2.2.7)$$

можно записать

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_1 \\ \dot{i}_2 \\ \dots \\ \dot{i}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{10} \dot{U}_0 \\ Y_{20} \dot{U}_0 \\ \dots \\ Y_{N0} \dot{U}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{11} & -Y_{12} & \dots & -Y_{1N} \\ -Y_{21} & Y_{22} & \dots & -Y_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -Y_{N1} & -Y_{N2} & \dots & Y_{NN} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dots \\ \dot{U}_N \end{bmatrix}. \quad (2.2.8)$$

В развернутом виде полученную систему уравнений можно представить следующим образом:

$$\left. \begin{array}{l} \dot{i}_1 = Y_{10} \dot{U}_0 - Y_{11} \dot{U}_1 - Y_{12} \dot{U}_2 - \dots - Y_{1N} \dot{U}_N \\ \dot{i}_2 = Y_{20} \dot{U}_0 - Y_{21} \dot{U}_1 - Y_{22} \dot{U}_2 - \dots - Y_{2N} \dot{U}_N \\ \dots \\ \dot{i}_N = Y_{N0} \dot{U}_0 - Y_{N1} \dot{U}_1 - Y_{N2} \dot{U}_2 - \dots - Y_{NN} \dot{U}_N \end{array} \right\}. \quad (2.2.9)$$

Система уравнений характеризует установившийся режим при задании комплексных токов в узлах схемы. Но так как исходная информация обычно задается активной и реактивной мощностями в узлах, то получим соответствующие уравнения, содержащие активную и реактивную мощности узлов. Для этого представим систему уравнений (2.2.9) в компактной форме:

$$\dot{I}_i = \sum_{j=0}^n Y_{ij} \dot{U}_j, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (2.2.10)$$

Умножив правую и левую части уравнения (2.2.10) на \hat{U}_i , получим

$$\dot{I}_i \cdot \hat{U}_i = \hat{U}_i \cdot \sum_{j=0}^n Y_{ij} \dot{U}_j \quad (2.2.11)$$

или

$$P_i - jQ_i = \hat{U}_i \cdot \sum_{j=0}^n Y_{ij} \dot{U}_j. \quad (2.2.12)$$

Используя показательную форму записи комплексных напряжений, можно записать

$$P_i - jQ_i = U_i e^{-j\Psi_i} \cdot \sum_{j=0}^n \dot{U}_j e^{j\Psi_j} \cdot Y_{ij} e^{-j\varphi_{ij}} \quad (2.2.13)$$

и затем

$$P_i - jQ_i = U_i \cdot \sum_{j=0}^n \dot{U}_j Y_{ij} \cdot e^{-j(\Psi_i - \Psi_j + \varphi_{ij})} \quad (2.2.14)$$

или

$$P_i - jQ_i = U_i \cdot \sum_{j=0}^n \dot{U}_j Y_{ij} \cdot [\cos(\Psi_i - \Psi_j - \varphi_{ij}) - j\sin(\Psi_i - \Psi_j - \varphi_{ij})]. \quad (2.2.15)$$

Разделяя действительные и мнимые составляющие уравнения (2.2.15), а также принимая обозначения

$$\begin{aligned} Y_{ij} \cos \varphi_{ij} &= \operatorname{Re}(Y_{ij}) = g_{ij}; \\ Y_{ij} \sin \varphi_{ij} &= \operatorname{Im}(Y_{ij}) = b_{ij}, \end{aligned} \quad (2.2.16)$$

получим выражения для активных и реактивных мощностей в узлах:

$$\left. \begin{aligned} P_i &= U_i \sum_{j=0}^N U_j \cdot [g_{ij} \cos(\Psi_i - \Psi_j) - b_{ij} \sin(\Psi_i - \Psi_j)] \\ Q_i &= U_i \sum_{j=0}^N U_j \cdot [g_{ij} \sin(\Psi_i - \Psi_j) + b_{ij} \cos(\Psi_i - \Psi_j)] \end{aligned} \right\}. \quad (2.2.17)$$

Система уравнений (2.2.17) может быть записана в виде следующих уравнений небаланса мощностей:

$$\left. \begin{aligned} P_i - f_{pi}(U, \Psi) &= 0 \\ Q_i - f_{qi}(U, \Psi) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.2.18)$$

или

$$\left. \begin{aligned} F_{pi} = P_i - f_{pi}(U, \Psi) = 0 \\ F_{qi} = Q_i - f_{qi}(U, \Psi) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.2.19)$$

Таким образом, для определения установившегося режима рассматриваемой системы при задании ее параметров в Y -форме необходимо решить систему из $2N$ уравнений вида (2.2.18).

2.3. Решение системы нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима и основные выражения чувствительности

Для удобства дальнейших рассуждений, а также для наглядности получения выражения чувствительности систему нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима (2.2.18) можно представить в виде следующей неявной формы:

$$\left. \begin{aligned} F_p(X, V, W) = 0 \\ F_q(X, V, W) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.3.1)$$

или

$$F(X, V, W) = 0. \quad (2.3.2)$$

Согласно этому выражению все режимные параметры, характеризующие состояние электрической системы, могут быть разделены на три группы:

X – вектор зависимых переменных состояния;

V – вектор независимых переменных управления;

W – вектор неуправляемых переменных возмущения.

Каждая из этих групп переменных в зависимости от постановки задачи расчета установившегося режима может представлять собой следующие режимные параметры:

$$X = \begin{cases} U & \text{для узлов типа } P - Q, \text{ т. е. при заданных } P, Q \\ \Psi & \text{в генераторных и нагрузочных узлах;} \\ Q & \text{для узлов типа } P - U, \text{ т. е. при заданных } P, U \\ \Psi & \text{в станционных узлах.} \end{cases} \quad (2.3.3)$$

$$V = \begin{cases} \{U_0 \text{ для балансирующего узла, т. е. для узла типа} \\ \{\Psi_0 \ U - \Psi_u \\ \{P \text{ для узлов типа } P - Q, \text{ т. е. при заданных } P, Q \\ \{Q \text{ в стационарных узлах} \\ \{P \text{ для узлов типа } P - U, \text{ т. е. при заданных } P, U \\ \{U \text{ в стационарных узлах.} \end{cases} \quad (2.3.4)$$

$$W = \begin{cases} \{P \text{ для нагрузочных узлов с заданными } P, Q \\ \{Q \text{ параметрами} \\ K_T - \text{коэффициенты трансформации трансформаторов.} \end{cases} \quad (2.3.5)$$

Отметим, что все независимые переменные вектора V могут регулироваться в соответствии с тем, какими регулирующими устройствами система располагает.

Например, напряжения на выводах генераторов регулируются изменением установок АРВ, активные мощности генераторов – изменением открытия регулирующих клапанов, реактивные мощности в узлах – посредством конспектирующих устройств.

Что касается активных и реактивных мощностей нагрузочных узлов, являющихся компонентами вектора W , то их значения изменяются согласно графикам электрической нагрузки потребителей, в соответствии с чем по условиям регулирования напряжения изменяются и коэффициенты трансформации.

Такова классификация переменных при общей постановке задачи. Из системы уравнения (2.2.18) можно заметить, что искомыми зависимыми переменными вектора X являются модуль U и фаза Ψ_U напряжения или действительная U' и мнимая U'' – составляющие комплексного напряжения в узлах схемы электрической системы.

По общей постановке задачи расчета установившегося режима необходимо найти параметры вектора состояния X при заданных значениях составляющих векторов V^0 и W^0 , удовлетворяющие системе уравнения (2.3.1).

Наиболее эффективным методом решения этой задачи в отношении времени расчета и памяти ЭВМ является итерационный метод Ньютона, реализованный с учетом оптимального упорядочивания переменных и компактной схемы хранения данных.

Как известно, сущность метода Ньютона заключается в том, что начальные значения вектора зависимых переменных состояния X^0 уточняются итерационным путем, до обеспечения следующего условия:

$$|F(X, V^0, W^0)| \leq \varepsilon, \quad (2.3.6)$$

т. е. небаланс в каждом узле через некоторое конечное число итерации не должен превышать некоторого заданного малого положительного значения ε , характеризующего точность решения векторного уравнения (2.3.2).

Для получения математической модели расчета установившегося режима электрической системы необходимо линеаризовать систему нелинейных алгебраических уравнений (2.3.1) путем разложения указанного вектора небалансов в ряд Тейлора и неучета членов разложения высших порядков.

Таким образом, разлагая векторное уравнение (2.3.2) в ряд Тейлора в окрестности заданных значений параметров режима X^0, V^0, W^0 , получим

$$F(X, V^0, W^0) = F(X^0, V^0, W^0) + \left. \frac{dF}{dX} \right|_{X^0} \Delta X + F_b. \quad (2.3.7)$$

Пренебрегая нелинейными по ΔX слагаемыми F_b , т. е. слагаемыми ряда Тейлора высших порядков, выражение (2.3.7) можно записать в следующем виде:

$$F(X, V^0, W^0) = F(X^0, V^0, W^0) + \left. \frac{dF}{dX} \right|_{X^0} \Delta X. \quad (2.3.8)$$

Решая линеаризованную систему уравнений относительно ΔX , получим

$$\Delta X^0 = - \left(\left. \frac{dF}{dX} \right|_{X^0} \right)^{-1} [F(X, V^0, W^0) - F(X^p, V^0, W^0)], \quad (2.3.9)$$

где X^p является решением векторного уравнения (2.3.2). Поскольку в точке решения $F(X^p, V^0, W^0) = 0$, то выражение (2.3.9) принимает следующий вид:

$$\Delta X^0 = - \left(\left. \frac{dF}{dX} \right|_{X^0} \right)^{-1} F(X^0, V^0, W^0). \quad (2.3.10)$$

При этом новое значение вектора искомых переменных X может быть определено с помощью рекуррентного выражения:

$$X^{k+1} = X^k + \Delta X^k, \quad (2.3.11)$$

или

$$X^{k+1} = X^k - \left(\left. \frac{dF}{dX} \right|_{X^k} \right)^{-1} F(X^k, V^0, W^0). \quad (2.3.12)$$

Как известно, матрица первых частных производных от небалансов $\frac{dF}{dX}$, порядок которой определяется числом независимых узлов электрической системы, является в данном случае квадратной и неособенной матрицей Якоби и поэтому имеет обратную матрицу.

Учитывая классификацию переменных, рекуррентное выражение (2.3.12) может быть записано в переменных состояния в виде следующих матричных уравнений:

$$\begin{bmatrix} U_i \\ \Psi_i \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} U_i \\ \Psi_i \end{bmatrix}^k - \begin{bmatrix} \frac{dF_{pi}}{dU_j} & \frac{dF_{pi}}{d\Psi_j} \\ \frac{dF_{qi}}{dU_j} & \frac{dF_{qi}}{d\Psi_j} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} F_{pi} \\ F_{qi} \end{bmatrix}, \quad (2.3.13)$$

или

$$\begin{bmatrix} U'_i \\ U''_i \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} U'_i \\ U''_i \end{bmatrix}^k - \begin{bmatrix} \frac{dF_{pi}}{dU'_i} & \frac{dF_{pi}}{dU''_i} \\ \frac{dF_{qi}}{dU'_i} & \frac{dF_{qi}}{dU''_i} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} F_{pi} \\ F_{qi} \end{bmatrix}, \quad (2.3.14)$$

последнее в развернутой форме будет

$$\begin{bmatrix} U'_1 \\ U'_2 \\ \dots \\ U'_N \\ U''_1 \\ U''_2 \\ \dots \\ U''_N \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} U'_1 \\ U'_2 \\ \dots \\ U'_N \\ U''_1 \\ U''_2 \\ \dots \\ U''_N \end{bmatrix}^k - \begin{bmatrix} \frac{dF_{p1}}{dU'_1} & \frac{dF_{p1}}{dU'_2} & \dots & \frac{dF_{p1}}{dU'_N} & \frac{dF_{p1}}{dU''_1} & \frac{dF_{p1}}{dU''_2} & \dots & \frac{dF_{p1}}{dU''_N} \\ \frac{dF_{p2}}{dU'_1} & \frac{dF_{p2}}{dU'_2} & \dots & \frac{dF_{p2}}{dU'_N} & \frac{dF_{p2}}{dU''_1} & \frac{dF_{p2}}{dU''_2} & \dots & \frac{dF_{p2}}{dU''_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{dF_{pN}}{dU'_1} & \frac{dF_{pN}}{dU'_2} & \dots & \frac{dF_{pN}}{dU'_N} & \frac{dF_{pN}}{dU''_1} & \frac{dF_{pN}}{dU''_2} & \dots & \frac{dF_{pN}}{dU''_N} \\ \frac{dF_{q1}}{dU'_1} & \frac{dF_{q1}}{dU'_2} & \dots & \frac{dF_{q1}}{dU'_N} & \frac{dF_{q1}}{dU''_1} & \frac{dF_{q1}}{dU''_2} & \dots & \frac{dF_{q1}}{dU''_N} \\ \frac{dF_{q2}}{dU'_1} & \frac{dF_{q2}}{dU'_2} & \dots & \frac{dF_{q2}}{dU'_N} & \frac{dF_{q2}}{dU''_1} & \frac{dF_{q2}}{dU''_2} & \dots & \frac{dF_{q2}}{dU''_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{dF_{qN}}{dU'_1} & \frac{dF_{qN}}{dU'_2} & \dots & \frac{dF_{qN}}{dU'_N} & \frac{dF_{qN}}{dU''_1} & \frac{dF_{qN}}{dU''_2} & \dots & \frac{dF_{qN}}{dU''_N} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F_{p1} \\ F_{p2} \\ \dots \\ F_{pN} \\ F_{q1} \\ F_{q2} \\ \dots \\ F_{qN} \end{bmatrix} \quad (2.3.15)$$

Перейдем к получению выражения чувствительности. Для этого предположим, что произошло изменение вектора состояния ΔX , вызванное изменением переменных управления ΔV и неуправляемых переменных ΔW . Тогда система уравнений (2.3.1) примет следующий вид:

$$F = (X^P + \Delta X, V^0 + \Delta V, W^0 + \Delta W) = 0, \quad (2.3.16)$$

где X^P – вектор переменных состояния в точке решения, соответствующей заданным V^0 и W^0 известного установившегося режима электрической системы.

Нелинейная система уравнений может быть линеаризована в окрестности точки X^P , V^0 , W^0 путем разложения в ряд Тейлора без учета членов порядка выше первого

$$F(X^P, V^0, W^0) + \left. \frac{dF}{dX} \right|_{X^P, V^0, W^0} \cdot \Delta X + \left. \frac{dF}{dV} \right|_{X^P, V^0, W^0} \cdot \Delta V + \left. \frac{dF}{dW} \right|_{X^P, V^0, W^0} \cdot \Delta W + \dots = 0. \quad (2.3.17)$$

Так как $F(X^P, V^0, W^0) = 0$, то, решая полученное выражение относительно ΔX , получим уравнение для поправок с зависимыми переменными состояния

$$\Delta X = - \left[\frac{dF}{dX} \right]^{-1} \cdot \frac{dF}{dV} \cdot \Delta V - \left[\frac{dF}{dX} \right]^{-1} \cdot \frac{dF}{dW} \cdot \Delta W, \quad (2.3.18)$$

где квадратная ($2N \times 2N$) матрица $\frac{dF}{dX}$ – известный Якобиан метода Ньютона – Рафсона, выражение для расчета элементов которой приводится в п. 2.4. Матрицы $\frac{dF}{dV}$ и $\frac{dF}{dW}$ имеют размеры $2N \times M$, где M – число элементов векторов V или W соответственно.

Новый установившийся режим получается определением скорректированных элементов вектора состояния

$$X^H = X^P + \Delta X. \quad (2.3.19)$$

Таким образом, уравнение (2.3.18) представляет собой линейную модель, в которой для определения изменения зависимых параметров необходимо один раз выполнить обращение Якобиана. Вводя обозначения, уравнение (2.3.18) можно записать в следующем виде:

$$\Delta X = S_V \Delta V + S_W \Delta W, \quad (2.3.20)$$

где S_V и S_W – матрицы чувствительности, имеющие размеры $2N \times M$, элементы которых могут быть определены по выражениям

$$S_V = - \left[\frac{dF}{dX} \right]^{-1} \cdot \frac{dF}{dV}; \quad (2.3.21)$$

$$S_W = - \left[\frac{dF}{dX} \right]^{-1} \cdot \frac{dF}{dW}. \quad (2.3.22)$$

Нетрудно заметить, что уравнение (2.3.18) дает возможность определить чувствительность режима системы к изменению не только какого-либо одного параметра управления или возмущения, но и, что более важно, к изменению всех этих параметров одновременно.

Если по условию решаемой задачи подлежат изменению параметры, принадлежащие не к обеим группам переменных V и W , а только к одной из них (т. е. к переменным управления или неуправляемым переменным возмущения), формула (2.3.18) принимает упрощенный вид

$$\text{при} \quad \Delta W = 0 \quad \Delta X = S_V \Delta V, \quad (2.3.23)$$

$$\text{при} \quad \Delta V = 0 \quad \Delta X = S_W \Delta W. \quad (2.3.24)$$

Если нас интересует реакция системы на изменение нескольких независимых переменных, например, управления (ΔV_i $i = 1, 2, \dots M$), необходимо решить уравнение (2.3.23), для чего сформировать матрицу чувствительности S_V , в которой матрица $\frac{dF}{dV}$ содержит столько столбцов, сколько переменных управления участвует в данной задаче. При этом матрица чувствительности, так же как и матрица $\frac{dF}{dV}$, имеет размеры $2N \times M$. Каждый столбец матрицы является вектором чувствительности $\frac{\Delta X}{\Delta V_j}$, а каждый элемент матрицы – так называемым коэффициентом чувствительности.

Для больших электрических систем размерность матрицы Якоби даже с применением декомпозиции может достигать значительных величин, поэтому использование треугольной факторизации, выполняемой на основе метода исключения Гаусса и специальных принципов программирования, позволяет получить значительный вычислительный эффект.

Однако в настоящей работе при построении математической модели расчета чувствительности предлагается использовать гибридную ($Y - Z$)-форму записи уравнений состояния, что позволяет вместо обращения одной матрицы Якоби обращать две матрицы несравненно меньших порядков, а при дальнейшем усовершенствовании алгоритма, о чем далее будет подробнее говориться, уменьшить вдвое порядок матрицы Y -блока рекуррентного уравнения чувствительности.

2.4. Чувствительность установившегося режима при Y-форме записи уравнений состояния

Выше были получены выражения чувствительности в общем виде, которые позволяют установить новый режим на базе уже известного установившегося режима. Таким образом, перед рассмотрением вопроса чувствительности предполагается, что известны все режимные параметры электрической системы. Рассмотрим постановку задачи, соответствующую узлам типа $P - Q$:

$$X = \begin{bmatrix} \{P_0 \text{ для базисного или балансирующего узла} \\ \{Q_0 \\ \{U_i \text{ или } \{U_i' \text{ для всех независимых узлов} \\ \{\Psi_{Ui} \text{ или } \{U_i'' \end{bmatrix}; \quad (2.4.1)$$

$$V = \begin{bmatrix} \{P_g \\ \{Q_g \end{bmatrix} \text{ для генераторных узлов }; \quad (2.4.2)$$

$$W = \begin{bmatrix} \{P_n \\ \{Q_n \end{bmatrix} \text{ для нагрузочных узлов }. \quad (2.4.3)$$

Допустим, необходимо скорректировать установившийся режим энергетической системы, содержащей N независимых узлов, после изменения некоторых параметров управления, а также других независимых параметров.

Уравнение для поправок к зависимым переменным состояния (2.3.18) при Y-форме записи уравнений состояния системы можно представить в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_i' \\ \dots \\ \Delta U_i'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dF_{pi}}{dU_j} & \vdots & \frac{dF_{pi}}{d\Psi_j} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{dF_{qi}}{dU_j} & \vdots & \frac{dF_{qi}}{d\Psi_j} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{dF_{pi}}{dP_{гк}} & \vdots & \frac{dF_{pi}}{dQ_{гк}} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{dF_{qi}}{dP_{гк}} & \vdots & \frac{dF_{qi}}{dQ_{гк}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{гк} \\ \dots \\ \Delta Q_{гк} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{dF_{pi}}{dU_j} & \vdots & \frac{dF_{pi}}{d\Psi_j} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{dF_{qi}}{dU_j} & \vdots & \frac{dF_{qi}}{d\Psi_j} \end{bmatrix}^{-1} \times \\ \times \begin{bmatrix} \frac{dF_{pi}}{dP_{нк}} & \vdots & \frac{dF_{pi}}{dQ_{нк}} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{dF_{qi}}{dP_{нк}} & \vdots & \frac{dF_{qi}}{dQ_{нк}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{нк} \\ \dots \\ \Delta Q_{нк} \end{bmatrix}, \quad (2.4.4)$$

где индекс $K = 1, 2, \dots, M$ означает число параметров управления и неуправляемых параметров соответственно. В данном случае элементы матрицы Якоби, развернутая форма которой содержится в выра-

жении (2.3.15), представляют собой частные производные уравнений установившегося режима по известным зависимым переменным заданного исходного режима. Имея аналитические выражения функций (2.2.19), нетрудно установить формулы для расчета элементов матрицы Якоби, которые при использовании Y -формы записи уравнений состояния могут быть представлены в следующем виде:

– при одинаковых индексах, когда $i = j$:

$$\frac{dF_{pi}}{dU_i} = - \left[\frac{P_i}{U_i} + U_i g_{ii} \right]; \quad (2.4.5)$$

$$\frac{dF_{pi}}{d\Psi_i} = - [Q_i - U_i^2 b_{ii}]; \quad (2.4.6)$$

$$\frac{dF_{qi}}{dU_i} = - \left[\frac{Q_i}{U_i} + U_i b_{ii} \right]; \quad (2.4.7)$$

$$\frac{dF_{qi}}{d\Psi_i} = - [-U_i^2 g_{ii} + P_i]. \quad (2.4.8)$$

– при различных индексах, когда $i \neq j$:

$$\frac{dF_{pi}}{dU_j} = -U_i \cdot [g_{ij} \cos(\Psi_i - \Psi_j) + b_{ij} \sin(\Psi_i - \Psi_j)]; \quad (2.4.9)$$

$$\frac{dF_{pi}}{d\Psi_j} = -U_i U_j \cdot [g_{ij} \sin(\Psi_i - \Psi_j) + b_{ij} \cos(\Psi_i - \Psi_j)]; \quad (2.4.10)$$

$$\frac{dF_{qi}}{dU_j} = -U_i \cdot [g_{ij} \sin(\Psi_i - \Psi_j) + b_{ij} \cos(\Psi_i - \Psi_j)]; \quad (2.4.11)$$

$$\frac{dF_{qi}}{d\Psi_j} = U_i U_j \cdot [g_{ij} \cos(\Psi_i - \Psi_j) - b_{ij} \sin(\Psi_i - \Psi_j)]. \quad (2.4.12)$$

Формирование элементов матриц $\frac{dF}{dV}$ и $\frac{dF}{dW}$ рассмотрим на примере четырехузловой схемы замещения электрической системы, представленной на рис. 2.2.

Схема содержит три стационарных узла и один нагрузочный. Узел 0 принимается за базисный с напряжением $220 < 0$. После совмещения с ним балансирующего узла схема будет содержать три независимых узла ($N = 3$). Число искомым параметров вектора X , а также число уравнений состояния (2.2.17) будет равно 6 ($2N = 6$).

Итак, считаются известными все параметры некоторого установившегося режима рассматриваемой системы (табл. 2.1). Допустим, произошло изменение активной P_3 или реактивной Q_3 мощностей нагрузочного узла на некоторую величину ΔP_3 или ΔQ_3 . Следовательно, в этом случае $\Delta V = 0$.

В качестве искомых параметров режима выступают элементы вектора $X = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \Psi_1 \\ \Psi_2 \\ \Psi_3 \end{bmatrix}$, а независимых, неуправляемых параметров – элементы вектора $W = [P_3]$ или $W = [Q_3]$.

Таблица 2.1

Исходный установившийся режим четырехузловой электрической системы (рис. 2.1)

Узлы	Параметры			
	P , МВт	Q , Мвар	U , кВ	Ψ , рад
ЭС-0	–	–	220,0	–
ЭС-1	161,29	80,64	–	–
ЭС-2	202,46	101,23	–	–
М-3	431,68	215,84	–	–

Тогда

$$\frac{dF}{dW} = \begin{bmatrix} \frac{dF_{p1}}{dP_3} \\ \frac{dF_{p2}}{dP_3} \\ \frac{dF_{p3}}{dP_3} \\ \frac{dF_{q1}}{dP_3} \\ \frac{dF_{q2}}{dP_3} \\ \frac{dF_{q3}}{dP_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \frac{dF}{dW} = \begin{bmatrix} \frac{dF_{p1}}{dQ_3} \\ \frac{dF_{p2}}{dQ_3} \\ \frac{dF_{p3}}{dQ_3} \\ \frac{dF_{q1}}{dQ_3} \\ \frac{dF_{q2}}{dQ_3} \\ \frac{dF_{q3}}{dQ_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

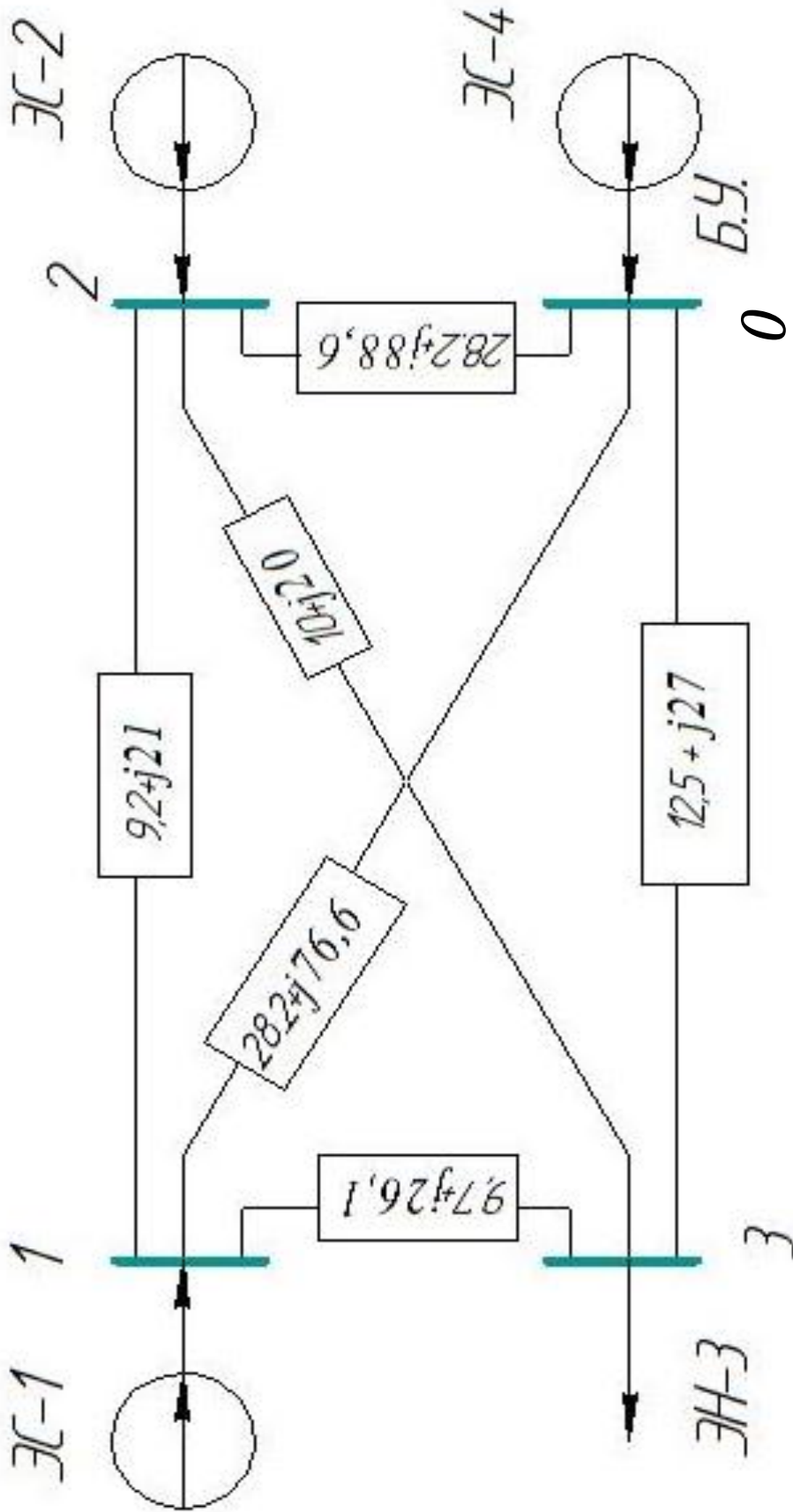


Рис. 2.1. Схема четырехузловой электрической системы

В рассмотренных случаях матрица $\frac{dF}{dW}$ представляет собой вектор-столбец, который состоит из нулей и +1. Однако чувствительность режима может быть установлена и к изменению обеих составляющих мощности нагрузочного узла. В этом случае вектор независимых переменных W будет состоять из двух параметров ($M = 2$) $W = \begin{bmatrix} P_3 \\ Q_3 \end{bmatrix}$. В соответствии с этим $\Delta W = \begin{bmatrix} \Delta P_3 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix}$.

Тогда матрица $\frac{dF}{dW}$ порядка (6×2) будет формироваться следующим образом:

$$\frac{dF}{dW} = \begin{bmatrix} \frac{dF_{p1}}{dP_3} & \frac{dF_{p1}}{dQ_3} \\ \frac{dF_{p2}}{dP_3} & \frac{dF_{p2}}{dQ_3} \\ \frac{dF_{p3}}{dP_3} & \frac{dF_{p3}}{dQ_3} \\ \frac{dF_{q1}}{dP_3} & \frac{dF_{q1}}{dQ_3} \\ \frac{dF_{q2}}{dP_3} & \frac{dF_{q2}}{dQ_3} \\ \frac{dF_{q3}}{dP_3} & \frac{dF_{q3}}{dQ_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

2.5. Вычислительный алгоритм коррекции установившегося режима и область его применения

Допустим, известны параметры схемы электрической системы, содержащей N независимых узлов. При известном установившемся режиме каждый узел этой системы характеризуется четырьмя режимными параметрами: активной и реактивной составляющими мощности, модулем и фазой напряжения.

Таким образом, заданным можно считать некоторый установившийся режим исследуемой электрической системы. Предположим, произошло изменение одного или нескольких независимых параметров управления и возмущения. Для того чтобы оценить влияние этого изменения, необходимо установить значения всех остальных пара-

метров нового установившегося режима. Решение этой задачи можно получить посредством уточнения исходного режима, реализуя программу коррекции установившегося режима, алгоритм которой представим в виде последовательности следующих операций.

1. Получение исходной информации, в качестве которой принимаются:

а) сведения о конфигурации схем сети и ее параметрах, включая коэффициенты трансформации трансформаторов;

б) параметры исходного режима исследуемой электрической системы;

в) величины изменений варьируемых независимых переменных и последующее определение по известным линейным проводимостям и матрице соединения узлов элементов матрицы собственных и взаимных проводимостей.

2. Расчет элементов матрицы Якоби $\frac{dF}{dX}$ по известным для исходного режима параметрам (при одинаковых индексах – (2.4.5 – 2.4.8), при разных – (2.4.9 – 2.4.12)).

3. Обращение матрицы $\frac{dF}{dX}$.

4. Расчет элементов матриц $\frac{dF}{dX}$ и $\frac{dF}{dX}$ по заданным параметрам управления V и возмущения W .

5. Определение матриц чувствительности S_V и S_W (2.3.21), (2.3.22), элементы которых представляют собой корректирующие коэффициенты чувствительности.

6. Расчет по выражению (2.3.20) элементов вектора изменения параметров состояния ΔX .

7. Определение параметров нового режима по формуле (2.3.19).

Предлагаемый алгоритм, реализованный в виде фортран-программы, может быть использован как в сочетании с соответствующими программами расчета установившихся и оптимальных режимов электроэнергетических систем, так и совершенно самостоятельно. В любом случае при достаточной точности он обеспечивает значительное сокращение времени расчета, что дает возможность использовать его при решении задач оперативного диспетчерского управления.

Анализ чувствительности, основанный на предлагаемом методе коррекции режима, может быть эффективно использован при решении вопросов регулирования напряжения и реактивной мощности, а также при разработке мероприятий по минимизации потерь мощности в электрических системах. Предлагаемый метод в состоянии значительно облегчить и ускорить работу проектировщика при пересчете режимов электрических систем в соответствии с графиком электрической нагрузки.

Применение чувствительности возможно также при проектировании развития электрических систем. Случается, проектировщик получает недопустимое решение задачи установившегося режима, что требует изменения некоторых независимых параметров в исходных данных для ввода решения в допустимую область. Кроме того, его может интересовать, в какой степени на состояние системы повлияют изменения тех или иных ее параметров. В обоих случаях, используя предлагаемый метод, можно получить необходимый ответ без проведения повторных расчетов установившегося режима.

Остановимся более подробно на вопросе применения данного метода. Полученное выражение (2.3.23), а именно $\Delta X = S \cdot \Delta V$ более конкретно можно записать в матричной форме

$$\begin{bmatrix} \Delta X_1 \\ \Delta X_2 \\ \vdots \\ \Delta X_{2N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & S_{1M} \\ S_{21} & S_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & S_{2M} \\ \vdots & \vdots & \cdot & \cdot & \cdot & \vdots \\ \vdots & \vdots & \cdot & \cdot & \cdot & \vdots \\ S_{2N1} & S_{2N2} & \cdot & \cdot & \cdot & S_{2NM} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_M \end{bmatrix} \quad (2.5.1)$$

Здесь представлена в развернутом виде матрица S порядка $2N \times M$, называемая матрицей чувствительности уравнений установившегося режима по отношению к вектору управляющих переменных V . Такая линейная зависимость может быть полностью использована в оптимизации регулирования напряжения и реактивной мощности в реальном масштабе времени.

Так, $\Delta X_i / \Delta V_j$ представляет собой ij -й элемент матрицы чувствительности S . Если, например, считать, что ΔV_j и ΔX_i являются следствием новых переключений емкости статистического конденсатора в j -м узле и соответствующего изменения напряжения i -го узла, то ij -й

элемент матрицы чувствительности S показывает, как изменяется напряжение i -го узла благодаря единичному регулированию статистического конденсатора, установленного в j -м узле.

Если переменные управления присутствуют в уравнениях состояния, постоянные чувствительности относительно этих переменных будут обусловлены соответствующими столбцами обратной матрицы Якоби. Что касается минимизации потерь в системе, то метод чувствительности способен значительно облегчить эту задачу, если она решается с помощью прямого поиска.

2.6. Численный пример коррекции установившегося режима

В данном пункте настоящей главы, а также в последующих главах будут приведены результаты численных экспериментов, заключающихся в решении конкретных практических задач. С целью иллюстрации предлагаемых методов рассматривались электрические системы, состоящие из 4, 10, 22, 47, 55, 100 и большего количества узловых точек. Однако из соображений экономии подробно приводятся численные результаты коррекции режимов электрических систем, состоящих из 4, 10 и 22 узловых точек, схемы замещения которых приведены соответственно на рис. 2.1, 2.2 и рисунке в гл. 3.

Обратимся к схеме электрической системы, состоящей из 10 узловых точек, пассивные параметры которой указаны на рис. 2.2. Численные значения соответствующей Y -матрицы узловых проводимостей представлены в табл. 2.2. Исходный установившийся режим, рассчитанный методом Ньютона – Рафсона, приведен в табл. 2.3.

Рассмотрим случай изменения реактивной мощности в нагрузочном узле 1. Для обоснования правомерности предлагаемого подхода, а также оценки его точности расчеты нового установившегося режима были выполнены классическим (точным) методом, а также методом чувствительности. Варьирование мощности нагрузки осуществлялось шагом по 5 Мвар в пределах 50 %. Результаты коррекции при изменении реактивной мощности на 10 и 15 Мвар приведены соответственно в табл. 2.4 и 2.5.

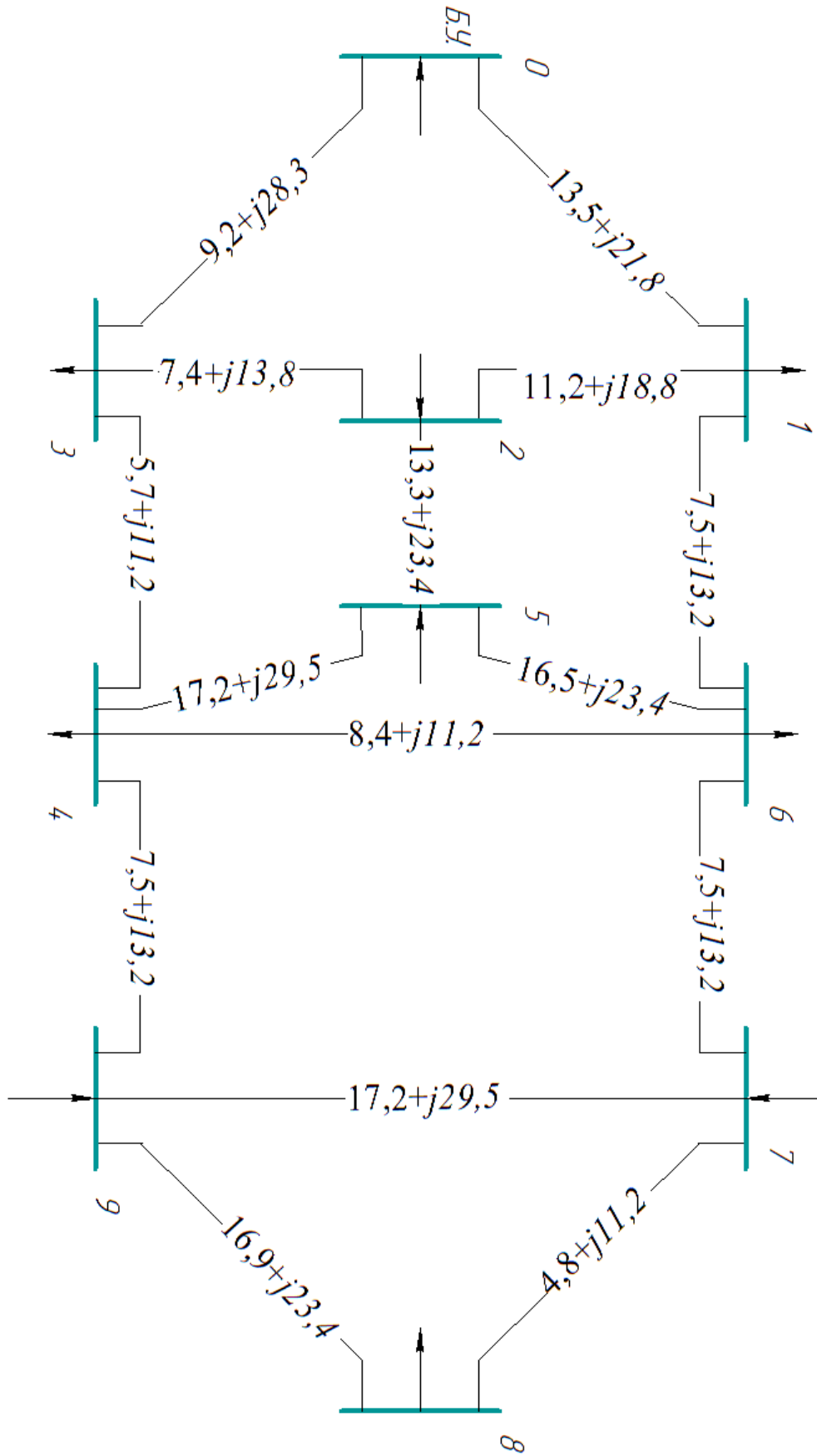


Рис. 2.2. Схема десятиузловой электрической системы

Таблица 2.2

Численные значения узловых проводимостей Y -матрицы

9	8	7	6	5	4	3	2	1	
0	0	0	$-0,0325 + j0,0573$	0	0	0	$-0,0234 + j0,0393$	$0,0765 - j0,1297$	1
0	0	0	0	$-0,0184 + j0,0323$	0	$-0,0302 + 0,0563$	$0,0720 - j0,1273$	$-0,0234 + 0,0393$	2
0	0	0	0	0	$-0,0361 + j0,0709$	$0,0767 - j0,1592$	$-0,0302 + j0,0563$	0	3
$-0,0163 + j0,0499$	0	0	$-0,0429 + j0,0571$	$-0,0148 + j0,0253$	$0,1099 - j0,2033$	$-0,0361 + j0,0709$	0	0	4
0	0	0	$-0,0201 + j0,02085$	$0,0532 - j0,0861$	$-0,0148 + j0,0253$	0	$-0,0184 + j0,0323$	0	5
0	0	$-0,0153 + j0,0321$	$0,1108 - j0,1750$	$-0,0201 + j0,0285$	$-0,4329 + j0,0571$	0	0	$-0,0325 + j0,0573$	6
$-0,0148 + j0,0253$	$-0,0323 + j0,0754$	$0,0624 - j0,1328$	$-0,0153 + j0,0321$	0	0	0	0	0	7
$-0,0203 + j0,0281$	$0,0526 - j0,1035$	$-0,0323 + j0,0754$	0	0	0	0	0	0	8
$0,0513 - j0,1033$	$-0,0203 + j0,0281$	$-0,0148 + j0,0253$	0	0	$-0,0163 + j0,0499$	0	0	0	9

Таблица 2.3

Исходный установившийся режим
десятиузловой электрической системы

Номер узла	P , МВт	Q , Мвар	U , кВ	Ψ , рад	$I = I' + jI''$, кА
БУ	150,2	89,9	220,0	0,0	$0,67075 - j0,40754$
1	110,0	-50,0	210,1348	-0,0295	$-0,5162 + j0,2533$
2	106,0	92,5	215,0896	-0,0143	$0,4866 - j0,437$
3	60,0	28,0	211,8829	-0,026	$-0,2796 + j0,1395$
4	104,0	51,0	208,7342	-0,0332	$-0,4898 + j0,2608$
5	85,0	-71,1	210,1065	-0,0029	$0,4056 + j0,3372$
6	100,0	48,0	208,1981	-0,0356	$-0,4718 + j0,2475$
7	60,0	136,7	214,9984	-0,0417	$0,2524 - j0,6469$
8	94,0	45,0	210,6339	-0,0495	$-0,4352 + j0,2354$
9	80,0	-5,8	212,2951	-0,249	$0,3774 + j0,0179$

Таблица 2.4

Результаты коррекции установившегося режима
десятиузловой электрической системы при $\Delta Q_1 = 10$ Мвар

Номер узла	Точный метод		Метод чувствительности	
	U , кВ	Ψ , рад	U , кВ	Ψ , рад
0	220,0	0	220,0	0
1	211,03	-0,0311	210,87	-0,0309
2	215,82	-0,0152	215,65	-0,0155
3	212,51	-0,0266	212,33	-0,0267
4	209,49	-0,0341	209,28	-0,0341
5	210,89	-0,004	210,75	-0,0043
6	209,01	-0,0366	208,87	-0,0372
7	215,78	-0,0424	215,73	-0,0438
8	211,43	-0,0501	210,66	-0,0481
9	213,06	-0,0258	212,74	-0,0256

Таблица 2.5

Результаты коррекции установившегося режима десятиузловой электрической системы при $\Delta Q_1 = 15$ Мвар

Номер узла	P , МВт	Q , Мвар	Точный метод		Метод чувствительности	
			U , кВ	Ψ , рад	U , кВ	Ψ , рад
0	–	–	220,0	0	220,0	0
1	110,0	35,00	211,2175	–0,0318	211,2338	–0,0317
2	106,0	92,5	215,9283	–0,0162	215,9360	–0,0162
3	60,0	28,0	212,5636	–0,0272	212,5721	–0,0271
4	104,0	51,0	209,5575	–0,0347	209,5691	–0,0347
5	85,0	–71,1	211,0360	–0,0050	211,0481	–0,0050
6	100,0	48,0	209,1781	–0,0378	209,1915	–0,0378
7	60,0	136,7	216,0163	–0,0444	216,0291	–0,0444
8	94,0	45,0	210,9518	–0,0487	211,0103	–0,0486
9	80,0	–5,8	213,0195	–0,0263	213,1445	–0,061

Анализ результатов коррекции режимных параметров рассматриваемой электрической системы при возмущениях в большем количестве узлов и во всех нагрузочных узлах показал, что при возмущениях, не превышающих 20 %, погрешность по модулю и фазе напряжений в узлах составляет в среднем 0,02 и 0,001 соответственно (см. табл. 2.3 – 2.5).

Что касается результатов, полученных при исследовании электрических систем, состоящих из 20, 46, 100 и большего количества узлов, то они показывают, что для тех же вариаций предлагаемый метод по сравнению с классическим дает расхождение, в среднем не превышающее 1 %.

2.7. Выводы и рекомендации

1. Разработана единая методика расчета и коррекции режимных параметров электрических систем при Y -форме записи уравнений состояния.

2. Предложенный алгоритм коррекции установившихся режимов электроэнергетической системы, обеспечивая необходимую точность, позволяет также значительно сократить время расчета.

3. По данному алгоритму составлена программа с учетом коэффициентов трансформации и поперечных проводимостей линий электропередач и трансформаторов.

4. Определена сфера применения данного метода, ограниченная в основном решением задач, связанных с установившимися режимами.

5. Метод чувствительности может быть использован для решения как эксплуатационных задач, так и задач проектного характера.

3. УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ЕГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К ИЗМЕНЕНИЮ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ Z-ФОРМЕ ЗАДАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ

3.1. Уравнения установившегося режима в Z-форме задания пассивных параметров

С целью получения Z-формы записи уравнений состояния электрической системы вернемся к выражению (2.2.2) и, выделяя напряжение базисного узла, запишем его в следующем виде:

$$\dot{U}_i = \dot{U}_B + Z_{ij}\dot{I}_j, \quad (3.1.1)$$

где \dot{U}_i – элементы столбцовой матрицы комплексных напряжений; \dot{I}_j – элементы столбцовой матрицы комплексных токов всех узлов за исключением базисного; \dot{U}_B – элементы столбцовой матрицы заданных комплексных напряжений базисного узла; Z_{ij} – элементы квадратной неособенной матрицы узловых сопротивлений.

В раскрытом виде матричное уравнение (3.1.1) можно записать следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dots \\ \dot{U}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_B \\ \dot{U}_B \\ \dots \\ \dot{U}_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{N1} & Z_{N2} & \dots & Z_{NN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dots \\ \dot{I}_N \end{bmatrix}. \quad (3.1.2)$$

Умножая обе части матричного уравнения (3.1.1) на сопряженное значение комплексного тока и производя необходимые преобразования, получим выражение для комплексной мощности в узле

$$P+jQ = (U'_B I'_i + U''_B I''_i + R_{ij} I'_j I'_i - X_{ij} I''_j I'_i + R_{ij} I_j I_i + X_{ij} I'_j I''_i) + \\ + j(U''_B I'_i - U'_B I''_i + R_{ij} I''_j I'_i + X_{ij} I'_j I'_i - R_{ij} I'_j I''_i + X_{ij} I''_j I''_i), \quad (3.1.3)$$

где

$$\begin{aligned} U'_B &= \text{Re}(\dot{U}_B), \quad U''_B = \text{Im}(\dot{U}_B); \\ I'_i &= \text{Re}(\dot{I}_i), \quad I''_i = \text{Im}(\dot{I}_i); \\ R_{ij} &= \text{Re}(Z_{ij}), \quad X_{ij} = \text{Im}(Z_{ij}). \end{aligned} \quad (3.1.4)$$

Разлагая уравнение (3.1.3) по действительной и мнимой составляющим, запишем уравнения баланса активной и реактивной мощностей i -го узла схемы электрической системы в виде выражений

$$\left. \begin{aligned} P_i &= (U'_B I'_i + U''_B I''_i) + \sum_{j=1}^N (I'_i A_{ij} + I''_i B_{ij}); \\ Q_i &= -(U'_B I'_i - U''_B I''_i) + \sum_{j=1}^N (I'_i B_{ij} + I''_i A_{ij}), \end{aligned} \right\} \quad (3.1.5)$$

в которых приняты следующие обозначения:

$$\left. \begin{aligned} A_{ij} &= R_{ij} I'_j - X_{ij} I''_j; \\ B_{ij} &= R_{ij} I''_j + X_{ij} I'_j. \end{aligned} \right\} \quad (3.1.6)$$

Система нелинейных уравнений, отражающих установившийся режим электрической системы, может быть представлена в следующей компактной форме:

$$\left. \begin{aligned} P_i - f_{pi}(I', I'') &= 0; \\ Q_i - f_{qi}(I', I'') &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (3.1.7)$$

или

$$\left. \begin{aligned} F_{pi}(I', I'') &= 0; \\ F_{qi}(I', I'') &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.1.8)$$

Нетрудно заметить, что функции f_{pi} и f_{qi} в выражениях (3.1.7) и (3.1.8) имеют размерности активных и реактивных мощностей соответственно.

3.2. Решение системы нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима

Как известно, по методу Ньютона – Рафсона нелинейная система уравнений (3.1.8) линеаризуется в окрестности точки X^p путем разложения в ряд Тейлора и неучета производных порядка выше первого. Линейная модель решения установившегося режима электрической системы может быть построена в виде следующего рекуррентного выражения:

$$\begin{bmatrix} I'_i \\ \dots \\ I''_i \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} I'_i \\ \dots \\ I''_i \end{bmatrix}^k - \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{pi}}{\partial I_j} & \frac{\partial F_{pi}}{\partial I_j} \\ \frac{\partial F_{qi}}{\partial I_j} & \frac{\partial F_{qi}}{\partial I_j} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} F_p(I'_i, I''_i) \\ \dots \\ F_q(I'_i, I''_i) \end{bmatrix}, \quad (3.2.1)$$

а в развернутой форме

$$\begin{bmatrix} I_1' \\ I_2' \\ \vdots \\ I_N' \\ I_1'' \\ I_2'' \\ \vdots \\ I_N'' \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} I_1' \\ I_2' \\ \vdots \\ I_N' \\ I_1'' \\ I_2'' \\ \vdots \\ I_N'' \end{bmatrix}^k - \begin{bmatrix} \frac{dF_{p1}}{dI_1'} & \frac{dF_{p1}}{dI_2'} & \vdots & \frac{dF_{p1}}{dI_N'} & \frac{dF_{p1}}{dI_1''} & \frac{dF_{p1}}{dI_2''} & \vdots & \frac{dF_{p1}}{dI_N''} \\ \frac{dF_{p2}}{dI_1'} & \frac{dF_{p2}}{dI_2'} & \vdots & \frac{dF_{p2}}{dI_N'} & \frac{dF_{p2}}{dI_1''} & \frac{dF_{p2}}{dI_2''} & \vdots & \frac{dF_{p2}}{dI_N''} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dF_{pN}}{dI_1'} & \frac{dF_{pN}}{dI_2'} & \vdots & \frac{dF_{pN}}{dI_N'} & \frac{dF_{pN}}{dI_1''} & \frac{dF_{pN}}{dI_2''} & \vdots & \frac{dF_{pN}}{dI_N''} \\ \frac{dF_{q1}}{dI_1'} & \frac{dF_{q1}}{dI_2'} & \vdots & \frac{dF_{q1}}{dI_N'} & \frac{dF_{q1}}{dI_1''} & \frac{dF_{q1}}{dI_2''} & \vdots & \frac{dF_{q1}}{dI_N''} \\ \frac{dF_{q2}}{dI_1'} & \frac{dF_{q2}}{dI_2'} & \vdots & \frac{dF_{q2}}{dI_N'} & \frac{dF_{q2}}{dI_1''} & \frac{dF_{q2}}{dI_2''} & \vdots & \frac{dF_{q2}}{dI_N''} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dF_{qN}}{dI_1'} & \frac{dF_{qN}}{dI_2'} & \vdots & \frac{dF_{qN}}{dI_N'} & \frac{dF_{qN}}{dI_1''} & \frac{dF_{qN}}{dI_2''} & \vdots & \frac{dF_{qN}}{dI_N''} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F_{p1} \\ F_{p2} \\ \vdots \\ F_{pN} \\ F_{q1} \\ F_{q2} \\ \vdots \\ F_{qN} \end{bmatrix}. \quad (3.2.2)$$

Сравнивая рекуррентные выражения (2.3.14) или (2.3.15) и (3.2.1) или (3.2.2), можно заметить, что если в выражении (2.3.14) или (2.3.15) зависимыми искомыми переменными являются составляющие узловых комплексных напряжений, то в выражении (3.2.1) или (3.2.2) составляющие узловых комплексных токов.

Численное решение задачи расчета установившегося режима при Z-форме записи уравнений состояния начинается предварительным вычислением значений узловых комплексных токов энергетической системы, действительные и мнимые составляющие которых определяются с помощью следующих выражений:

$$\begin{aligned} I_i' &= \frac{1}{U_i} (P_i \cos \psi_{U_i} + Q_i \sin \psi_{U_i}), \\ I_i'' &= \frac{1}{U_i} (P_i \sin \psi_{U_i} + Q_i \cos \psi_{U_i}). \end{aligned}$$

Для осуществления первого шага итерационного процесса, соответствующего рекуррентному выражению (3.2.1), в качестве модуля и фазы напряжения в узлах схемы сети принимаются их нулевые приближения ($U_i = U_B$; $\Psi_i = 0$).

Исходя из значения комплексного сопряженного тока $\hat{I}_i = I_i' - jI_i''$, полученного в результате каждой итерации, определяется соответствующее комплексное напряжение каждого узла с помощью выражения

$$\dot{U}_i = \frac{P_i + jQ_i}{\hat{I}_i}. \quad (3.2.3)$$

Итерационный процесс считается законченным, если обеспечивается условие

$$\left. \begin{aligned} |F_{pi}(I_{ai}, I_{pi})| = |P_i - f_{pi}(I_{ai}, I_{pi})| \leq \Delta P_i \\ |F_{qi}(I_{ai}, I_{pi})| = |Q_i - f_{qi}(I_{ai}, I_{pi})| \leq \Delta Q_i \end{aligned} \right\} \quad (3.2.4)$$

где ΔP_i и ΔQ_i – допустимые небалансы мощностей в узлах рассматриваемой системы.

3.3. Чувствительность установившегося режима электрической системы при Z-форме задания пассивных параметров

В предыдущей главе получена математическая модель определения чувствительности электрической системы к изменению ее режимных параметров в общем виде, а также при Y-форме задания пассивных параметров. Из п. 3.2 следует, что структура уравнений, отражающих состояние электрической системы, меняется с изменением формы представления обобщенных параметров. В соответствии с этим изменяется и структура выражений чувствительности.

Для получения соответствующих выражений при Z-форме представления пассивных параметров уточним классификацию переменных:

$$X = \begin{Bmatrix} I_a \\ I_p \end{Bmatrix}, \text{ или } \begin{cases} I' & \text{для всех независимых узлов как} \\ I'' & \text{нагрузочных, так и стационарных} \end{cases} \quad (3.3.1)$$

$$V = \begin{Bmatrix} U_0 \\ \Psi_0 \\ P_r \\ Q_r \end{Bmatrix}, \text{ или } \begin{cases} U'_0 & \text{для узла типа } U - \Psi_U, \\ U''_0 & \text{для стационарных узлов} \\ & \text{типа } P - Q; \end{cases} \quad (3.3.2)$$

$$W = \begin{Bmatrix} P_n \\ Q_n \end{Bmatrix} \text{ для нагрузочных узлов типа } P - Q \quad (3.3.3)$$

Таким образом, искомыми параметрами состояния электрической системы в данном случае являются составляющие узловых комплексных токов. Значения составляющих комплексных напряжений узлов схемы рассматриваемой электрической системы в соответствии с общей постановкой задачи нетрудно определить с помощью выражения (3.2.3).

Предположим, все параметры некоторого установившегося режима определены. Но произошло изменение одного или нескольких параметров группы W и для того, чтобы оценить влияние этого изменения на состояние электрической системы, необходимо рассчитать новый установившийся режим. Осуществить коррекцию режима можно с помощью выражения (2.3.14), в котором вектор-столбец поправок к зависимым переменным состояния при Z -форме записи уравнений можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta I'_i \\ \Delta I''_i \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{dF_{pi}}{dI'_j} & \frac{dF_{pi}}{dI''_j} \\ \frac{dF_{qi}}{dI'_j} & \frac{dF_{qi}}{dI''_j} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dF_{pi}}{dP_c} & \frac{dF_{pi}}{dQ_c} \\ \frac{dF_{qi}}{dP_c} & \frac{dF_{qi}}{dQ_c} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_c \\ \Delta Q_c \end{bmatrix} - \\ &- \begin{bmatrix} \frac{dF_{pi}}{dI'_j} & \frac{dF_{pi}}{dI''_j} \\ \frac{dF_{qi}}{dI'_j} & \frac{dF_{qi}}{dI''_j} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dF_{pi}}{dP_c} & \frac{dF_{pi}}{dQ_c} \\ \frac{dF_{qi}}{dP_c} & \frac{dF_{qi}}{dQ_c} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_H \\ \Delta Q_H \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (3.3.4)$$

где $C = 1 \dots M$ – индекс параметров управления, а $H = 1 \dots L$ – индекс направляемых параметров возмущения. Имея аналитические выражения функций (3.1.8), можно установить аналитические выражения для определения элементов матрицы Якоби, входящей как в рекуррентное выражение (3.2.1), так и в выражение (3.3.4).

Элементы квадратной матрицы $\frac{dF}{dX}$, представляющей собой матрицу частных производных уравнений установившегося режима по зависимым переменным состояния (в данном случае составляющим узловых комплексных токов) при одинаковых индексах ($i = j$), будут определяться с помощью следующих выражений:

$$\frac{dF_{pi}}{dI'_i} = - [H_{ii} + (R_{ii}I'_i + X_{ii}I''_i)]; \quad (3.3.5)$$

$$\frac{dF_{pi}}{dI''_i} = - [K_{ii} + (R_{ii}I''_i + X_{ii}I'_i)]; \quad (3.3.6)$$

$$\frac{dF_{qi}}{dI'_i} = - [K_{ii} - (R_{ii}I''_i - X_{ii}I'_i)]; \quad (3.3.7)$$

$$\frac{dF_{qi}}{dI''_i} = - [-H_{ii} + (R_{ii}I'_i - X_{ii}I''_i)]. \quad (3.3.8)$$

Здесь приняты следующие обозначения:

$$H_{ii} = U'_B + \sum_{i=1}^N A_{ij}; \quad (3.3.9)$$

$$K_{ii} = U''_B + \sum_{i=1}^N B_{ij}, \quad (3.3.10)$$

где

$$A_{ij} = R_{ij}I'_j - X_{ij}I''_j; \quad (3.3.11)$$

$$B_{ij} = R_{ij}I''_j + X_{ij}I'_j. \quad (3.3.12)$$

При различных индексах ($i \neq j$):

$$\frac{dF_{pi}}{dI'_j} = -(R_{ij}I'_i + X_{ij}I''_i); \quad (3.3.13)$$

$$\frac{dF_{pi}}{dI''_j} = -(R_{ij}I''_i - X_{ij}I'_i); \quad (3.3.14)$$

$$\frac{dF_{qi}}{dI'_j} = (R_{ij}I''_i - X_{ij}I'_i); \quad (3.3.15)$$

$$\frac{dF_{qi}}{dI''_j} = -(R_{ij}I'_i + X_{ij}I''_i). \quad (3.3.16)$$

Нетрудно заметить, что в данном случае

$$\frac{dF_{pi}}{dI'_j} = \frac{dF_{qi}}{dI''_j}, \quad \frac{dF_{pi}}{dI''_j} = -\frac{dF_{qi}}{dI'_j}.$$

С учетом принятых обозначений выражения для определения элементов векторов активных и реактивных узловых мощностей можно представить в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} P_i &= I'_i H_{ii} + I''_j K_{ii}, \\ Q_i &= I'_i K_{ii} - I''_j H_{ii} \end{aligned} \right\} \quad (3.3.17)$$

и, следовательно,

$$\left. \begin{aligned} F_{pi} &= P_i - (I_i H_{ii} + I_i K_{ii}), \\ F_{qi} &= Q_i - (I_i K_{ii} - I_i H_{ii}). \end{aligned} \right\} \quad (3.3.18)$$

Формирование элементов матриц частных производных уравнений состояния по параметрам управления $\frac{dF}{dV}$ и независимым неуправляемым параметрам режима $\frac{dF}{dW}$ рассмотрим на примере схемы электрической системы, представленной на рис. 2.1. Допустим, изменилась на некоторую величину ΔP активная мощность нагрузочного узла P_3 . Возникает необходимость в коррекции режима электрической системы.

Нетрудно заметить, что в качестве искомым подлежащих коррекции параметров при Z-форме уравнений состояния могут приниматься следующие элементы вектора:

$$X = [I'_1 \ I'_2 \ I'_3 \ I''_1 \ I''_2 \ I''_3]^t.$$

В данном случае единственным элементом вектора независимых неуправляемых параметров является активная мощность нагрузочного узла $W = [P_3]$, при изменении которой $\Delta W = [\Delta P_3]$ соответствующая матрица будет строиться следующим образом:

$$\frac{dF}{dW} = \left[\frac{dF_{p1}}{dP_3} \ \frac{dF_{p2}}{dP_3} \ \frac{dF_{p3}}{dP_3} \ \frac{dF_{q1}}{dP_3} \ \frac{dF_{q2}}{dP_3} \ \frac{dF_{q3}}{dP_3} \right]^t = [000001]^t.$$

При изменении реактивной мощности нагрузки $\Delta W = [\Delta Q_3]$ при $W = [Q_3]$ элементы матрицы

$$\frac{dF}{dW} = \left[\frac{dF_{p1}}{dQ_3} \ \frac{dF_{p2}}{dQ_3} \ \frac{dF_{p3}}{dQ_3} \ \frac{dF_{q1}}{dQ_3} \ \frac{dF_{q2}}{dQ_3} \ \frac{dF_{q3}}{dQ_3} \right]^t = [000001]^t.$$

Нетрудно заметить, что матрица $\frac{dF}{dW}$ порядка $(N \times L)$, где L – число независимых неуправляемых параметров, имеет столбцевую структуру, поскольку число независимых параметров вектора W равно единице.

При изменении комплексной мощности нагрузочного узла, т. е. обеих ее составляющих, вектор независимых переменных W будет состоять из двух элементов $L = 2$, $W = \begin{bmatrix} P_3 \\ Q_3 \end{bmatrix}$. В соответствии с чем $\Delta W = \begin{bmatrix} \Delta P_3 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix}$. Тогда матрица $\frac{dF}{dW}$ порядка (6×2) будет формироваться следующим образом:

$$\frac{dF}{dW} = \begin{bmatrix} \frac{dF_{p1}}{dP_3} & \frac{dF_{p1}}{dQ_3} \\ \frac{dF_{p2}}{dP_3} & \frac{dF_{p2}}{dQ_3} \\ \frac{dF_{p3}}{dP_3} & \frac{dF_{p3}}{dQ_3} \\ \frac{dF_{q1}}{dP_3} & \frac{dF_{q1}}{dQ_3} \\ \frac{dF_{q2}}{dP_3} & \frac{dF_{q2}}{dQ_3} \\ \frac{dF_{q3}}{dP_3} & \frac{dF_{q3}}{dQ_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Предположим, необходимость в коррекции режима вызвана изменением параметров управления. Тогда согласно (3.3.2):

1) если в качестве параметров управления вектора V выбраны действительная U'_0 , мнимая U''_0 составляющие комплексного напряжения балансирующего узла, то матрицу $\frac{dF}{dV}$ порядка (6×2) можно сформировать следующим образом:

$$\frac{dF}{dV} = \begin{bmatrix} \frac{dF_{p1}}{dU'_0} & \frac{dF_{p1}}{dU''_0} \\ \frac{dF_{p2}}{dU'_0} & \frac{dF_{p2}}{dU''_0} \\ \frac{dF_{p3}}{dU'_0} & \frac{dF_{p3}}{dU''_0} \\ \frac{dF_{q1}}{dU'_0} & \frac{dF_{q1}}{dU''_0} \\ \frac{dF_{q2}}{dU'_0} & \frac{dF_{q2}}{dU''_0} \\ \frac{dF_{q3}}{dU'_0} & \frac{dF_{q3}}{dU''_0} \end{bmatrix},$$

2) если в качестве параметров управления выбраны мощности станционных узлов P_1, Q_1 и P_2, Q_2 , то матрица $\frac{dF}{dV}$ с размерами 6×4 может быть записана так:

$$\frac{dF}{dV} = \begin{bmatrix} \frac{dF_{p1}}{dP_1} & \frac{dF_{p1}}{dQ_1} & \frac{dF_{p1}}{dP_2} & \frac{dF_{p1}}{dQ_2} \\ \frac{dF_{p2}}{dP_1} & \frac{dF_{p2}}{dQ_1} & \frac{dF_{p2}}{dP_2} & \frac{dF_{p2}}{dQ_2} \\ \frac{dF_{p3}}{dP_1} & \frac{dF_{p3}}{dQ_1} & \frac{dF_{p3}}{dP_2} & \frac{dF_{p3}}{dQ_2} \\ \frac{dF_{q1}}{dP_1} & \frac{dF_{q1}}{dQ_1} & \frac{dF_{q1}}{dP_2} & \frac{dF_{q1}}{dQ_2} \\ \frac{dF_{q2}}{dP_1} & \frac{dF_{q2}}{dQ_1} & \frac{dF_{q2}}{dP_2} & \frac{dF_{q2}}{dQ_2} \\ \frac{dF_{q3}}{dP_1} & \frac{dF_{q3}}{dQ_1} & \frac{dF_{q3}}{dP_2} & \frac{dF_{q3}}{dQ_2} \end{bmatrix}.$$

3.4. Численный пример коррекции установившегося режима электрической системы

На сегодняшний день все алгоритмы анализа чувствительности основаны на использовании матрицы узловых проводимостей Y . В настоящей работе предлагается при построении математической модели коррекции режима электрической системы в уравнениях состояния использовать матрицу узловых сопротивлений Z . Соответствующий алгоритм аналогичен приведенному в п. 2.5 с той лишь разницей, что в качестве пассивных параметров схемы берутся из базового режима или рассчитываются известным путем элементы Z -обобщенных параметров.

Рассмотрим одну из постановок коррекции режимных параметров электрической системы, состоящей в следующем: при известных параметрах базового режима и заданных изменениях мощностей в отдельных нагрузочных узлах определить модуль и фазу напряжений установившегося режима.

Для проведения необходимых количественных и качественных исследований рассматривались схемы электрических систем, состоящих из 4, 10, 22, 46, 100 и более узлов. Однако как и в предыдущей главе подробно приводятся результаты коррекции режимов 4-, 10 и 22-узловых электрических систем, исходные режимы которых представлены в табл. 3.1, 3.3.

Результаты этих расчетов при различных изменениях мощностей в отдельных нагрузочных узлах приведены соответственно в табл. 3.4, 3.5, 3.6.

Таблица 3.1

Исходный установившийся режим
четырёхузловой электрической системы (см. рис. 2.2)

Номер узла	P , МВт	Q , Мвар	U , кВ	Ψ , рад	$\dot{I} = I' + jI''$, кА
БУ	–	–	220,00	0,00	–
1	161,29	80,64	220,8807	0,0209	$0,7377 - j0,3498$
2	202,46	101,23	221,3602	0,0192	$0,9232 - j0,4397$
3	–431,68	–215,84	204,4301	–0,0453	$-2,0617 + j1,1503$

Элементы матрицы узловых сопротивлений для десятиузловой схемы электрической системы представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Матрицы узловых сопротивлений

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	8,0331 + +j14,7454	5,7832 + +j11,7574	4,2151 + +j9,5612	5,3773 + +j11,2612	5,8835 + +j11,9056	6,4743 + +j12,5540	5,9979 + +j12,0036	5,9103 + +j11,8898	5,6488 + +j11,6722
2	5,7832 + +j11,7574	9,6747 + +j19,4368	5,9264 + +j13,4505	6,3793 + +j13,8036	7,6613 + +j15,7061	6,3525 + +j13,6078	6,3654 + +j13,6078	6,3663 + +j13,6370	6,3834 + +j13,7038
3	4,2151 + +j9,5612	5,9264 + +j13,4505	7,0603 + +j16,4716	6,2471 + +j14,1218	5,8544 + +j13,2556	5,3674 + +j12,3618	5,7524 + +j13,1137	5,8197 + +j13,2662	6,0544 + +j13,5836
4	5,3773 + +j11,2612	6,3793 + +j13,8036	6,2471 + +j14,1218	9,6706 + +j19,8547	7,7612 + +j16,4029	7,6483 + +j16,2665	8,5316 + +j17,7986	8,6883 + +j18,1103	9,2119 + +j18,7595
5	5,8835 + +j11,9056	7,6613 + +j15,7061	5,8544 + +j13,2556	7,7612 + +j16,4029	12,9607 + +j24,5583	7,9193 + +j16,4198	7,8513 + +j16,4132	7,8380 + +j16,4111	7,8062 + +j16,4132
6	6,4743 + +j12,5540	6,3525 + +j13,4608	5,3674 + +j12,3618	7,6483 + +j16,2665	7,9193 + +j16,4198	10,1215 + +j19,4991	9,0461 + +j18,1216	8,8499 + +j17,8381	8,2495 + +j17,2848
7	5,9979 + +j12,0036	6,3654 + +j13,6079	5,7524 + +j13,1137	8,5316 + +j17,7986	7,8513 + +j16,4132	9,0461 + +j18,1216	15,6227 + +j32,5304	14,6591 + +j30,3036	11,2776 + +j25,6560
8	5,9103 + +j11,8898	6,3663 + +j13,6370	5,8197 + +j13,2662	8,6883 + +j18,1103	7,8380 + +j16,4111	8,8499 + +j17,8381	14,6591 + +j30,3036	17,8489 + +j36,9740	11,7794 + +j27,3387
9	5,6488 + +j11,6722	6,3834 + +j13,7038	6,0544 + +j13,5836	9,2119 + +j18,7595	7,8062 + +j16,4132	8,2495 + +j17,2848	11,2776 + +j25,6560	11,7794 + +j27,3387	13,8114 + +j30,9680

Таблица 3.3

Исходный установившийся режим
двадцатидвухузловой электрической системы (см. рисунок)

Номер узла	P , МВт	Q , Мвар	U' , кВ	U'' , кВ
БУ	0	–	235,00	0,0
1	0,0	0,0	0,0	0,0
2	114,00	41,78	114,3493	–13,9696
3	–42,30	30,70	110,6700	–18,3945
4	–20,90	39,70	113,5684	–15,6343
5	27,70	1,40	114,7063	–11,6961
6	0,0	20,00	10,4030	–0,7519
7	–86,00	–57,80	116,1933	–13,9409
8	–95,00	–55,00	110,5482	–18,4135
9	–75,80	–51,40	112,5704	–15,3394
10	–174,00	–87,00	110,1314	–20,3099
11	–59,00	–55,30	218,5381	–15,6075
12	–22,20	–13,50	114,0213	–12,4941
13	–42,80	–26,00	107,4785	–21,1233
14	–75,00	–45,00	110,6180	18,8616
15	–40,00	–20,00	223,2552	–13,0307
16	–26,00	–18,00	114,4111	–15,1841
17	–46,60	–32,30	113,5823	–15,3158
18	–50,00	0,00	219,4751	–18,7777
19	–7,40	–5,20	114,5932	–11,9221
20	–200,00	0,0	232,7551	–4,8854
21	0,00	0,00	0,0	0,0

Величины изменений (как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения нагрузки) указаны в соответствующих графах представленных таблиц. С целью оценки точности предлагаемого метода все расчеты выполнялись по двум программам: по основной программе расчета установившегося режима точным методом и по программе коррекции методом чувствительности.

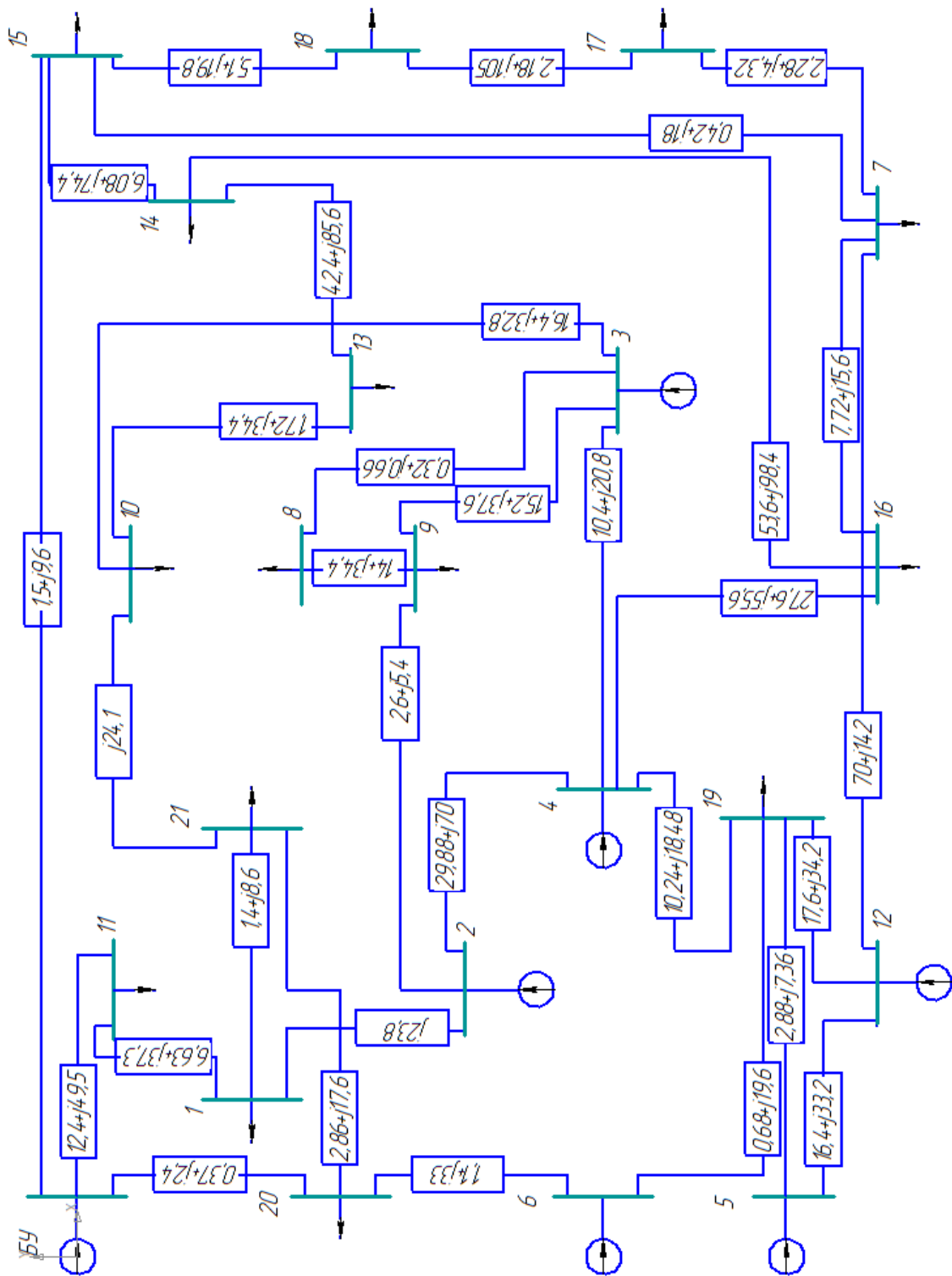


Схема двадцативузловой электрической системы

Таблица 3.4

Результаты коррекции установившегося режима
 четырехузловой электрической системы (см. рис. 2.1)

ΔP_3	Номер узла	Точный метод			Метод чувствительности			Погрешность	
		$\mathbf{I} = \mathbf{I}' + j\mathbf{I}''$, кА	U , кВ	Ψ , рад	$\mathbf{I} = \mathbf{I}' + j\mathbf{I}''$, кА	U , кВ	Ψ , рад	U , кВ	Ψ , рад
$\Delta P_3 = 21,58$ мег (5 %)	БУ	–	220,00	0,0000	–	220,00	0,00	0,0	0,0
	1	$0,7373 - j0,344$	221,6303	0,0271	$0,7373 - j0,34397$	221,6416	0,0271	0,0113	0,0
	2	$0,9229 - j0,4323$	222,1162	0,0256	$0,9285 - j0,4322$	222,1273	0,0257	0,0111	0,001
	3	$-1,9562 + j1,1228$	205,4685	-0,0366	$-1,95563 + j1,12159$	205,565	-0,0362	0,0965	0,0004
$\Delta P_3 = 43,17$ мег (10 %)	БУ	–	220,00	0,0000	–	220,00	0,00	0,0	0,0
	1	$0,737 - j0,3384$	222,3554	0,0332	$0,73692 - j0,33819$	222,3994	0,0334	0,0002	0,044
	2	$0,9226 - j0,425$	222,847	0,0319	$0,92247 - j0,42473$	222,8905	0,0322	0,0003	0,0435
	3	$-1,8516 + j1,0976$	206,4768	-0,0280	$-1,84956 + j1,09282$	206,8813	-0,0266	0,0014	0,4045
$\Delta P_3 = 64,74$ мег (15 %)	БУ	–	220,00	0,0000	–	220,00	0,00	0,0	0,0
	1	$0,7367 - j0,3328$	223,0563	0,0393	$0,73654 - j0,33242$	223,1532	0,0397	0,0969	0,0004
	2	$0,9223 - j0,4128$	223,5536	0,0383	$0,9221 - j0,41726$	223,649	0,0387	0,0954	0,0004
	3	$-1,7481 + j1,0746$	207,4551	-0,0195	$-1,74354 + j1,06406$	208,4146	-0,0162	0,9595	0,0033
$\Delta P_3 = 86,34$ мег (20 %)	БУ	–	220,00	0,0000	–	220,00	0,00	0,0	0,0
	1	$0,7365 - j0,3274$	223,7347	0,0454	$0,73616 - j0,32664$	223,9035	0,046	0,0488	0,0006
	2	$0,9921 - j0,4108$	224,2373	0,0446	$0,92172 - j0,40979$	224,4032	0,0453	0,1658	0,0007
	3	$-1,6456 + j1,0539$	208,4055	-0,011	$-1,63747 + j1,03528$	210,2114	-0,0052	1,8059	0,0058

Продолжение табл. 3.4

ΔP_3	Номер узла	Точный метод			Метод чувствительности			Погрешность	
		$\mathbf{I} = \mathbf{I}' + j\mathbf{I}''$, кА	U , кВ	Ψ , рад	$\mathbf{I} = \mathbf{I}' + j\mathbf{I}''$, кА	U , кВ	Ψ , рад	U , кВ	Ψ , рад
$\Delta P_3 = 107,92$ мег (25 %)	БУ	–	220,00	0,0000	–	220,00	0,00	0,0	0,0
	1	$0,7363 - j0,322$	224,3909	0,0514	$0,73578 - j0,32087$	224,6493	0,0524	0,2584	0,001
	2	$0,9219 - j0,4038$	224,8985	0,0508	$0,92134 - j0,40232$	225,1523	0,0519	0,2538	0,0011
	3	$-1,5439 + j1,0352$	209,3286	-0,0027	$-1,53145 + j1,00653$	212,3265	0,0066	2,0979	2,9952
$\Delta P_3 = 215,84$ мег (50 %)	БУ	–	220,00	0,0000	–	220,00	0,00	0,0	0,0
	1	$0,7358 - j0,296$	227,3683	0,0811	$0,73387 - j0,29199$	228,3105	0,085	0,9422	0,0039
	2	$0,9217 - j0,3702$	227,8979	0,0817	$0,91946 - j0,36497$	228,8186	0,0858	0,9207	0,0041
	3	$-1,0484 + j0,9714$	213,5731	0,0381	$-1,00126 + j0,8627$	230,9556	0,0742	7,3825	0,0361
$\Delta P_3 = 86,34$ мег (-20 %)	БУ	–	220,00	0,0000	–	220,00	0,00	0,0	0,0
	1	$0,7396 - j0,3737$	217,6075	-0,0042	$0,73921 - j0,37285$	217,8067	-0,0035	0,1992	0,0007
	2	$0,9252 - j0,4707$	218,0588	-0,007	$0,92474 - j0,46954$	218,2561	-0,0062	0,1973	0,0008
	3	$-2,4949 + j1,2862$	198,9331	-0,0812	$-2,48582 + j1,26542$	201,1879	-0,0761	0,9254	0,0051
$\Delta P_3 = 107,92$ мег (-25 %)	БУ	–	220,00	0,0000	–	220,00	0,00	0,0	0,0
	1	$0,7402 - j0,38$	216,7134	-0,0107	$0,73959 - j0,37862$	217,0318	-0,0095	0,3184	0,0012
	2	$0,9259 - j0,4789$	217,1568	-0,0137	$0,92515 - j0,47701$	217,4724	-0,0124	0,3156	0,0013
	3	$-2,6062 + j1,3279$	198,7139	-0,0905	$-2,59184 + j1,29418$	200,6108	-0,0826	1,8969	0,0079
$\Delta P_3 = 215,84$ мег (-50 %)	БУ	–	220,00	0,0000	–	220,00	0,00	0,0	0,0
	1	$0,7446 - j0,4139$	211,6855	-0,0437	$0,7415 - j0,4075$	213,1276	-0,0389	1,4421	0,0048
	2	$0,9306 - j0,5227$	212,0815	-0,0482	$0,927 - j0,51436$	213,5162	-0,0429	1,4347	0,0053
	3	$-3,185 + j1,5826$	191,9126	-0,1394	$-3,12203 + j1,43801$	198,5711	-0,1099	6,6585	0,0295

ΔQ									
$\Delta Q = 10,79$ (+5 %)	БУ	–	220,00	0,0000	–	220,00	0,00	0,0	0,0
	1	0,7347 – j0,3497	221,6309	0,0194	0,73464 – j0,34966	221,6379	0,0194	0,007	0,0
	2	0,9193 – j0,4395	222,1343	0,0177	0,91932 – j0,4395	222,1414	0,0177	0,0071	0,0
	3	–2,0521 + j1,0951	205,4628	–0,0467	–2,05187 + j1,0948	205,4909	–0,0467	0,0281	0,00
$\Delta Q = 21,58$ (+10 %)	БУ	–	220,00	0,0000	–	220,00	0,00	0,0	0,0
	1	0,7317 – j0,3496	222,3725	0,0179	0,73159 – j0,34957	222,3997	0,0179	0,0272	0,0
	2	0,9155 – j0,4394	222,8993	0,0162	0,91542 – j0,43934	222,9276	0,0162	0,0283	0,0
	3	–2,0429 + j1,0404	206,4833	–0,0482	–2,0421 + j1,03924	206,5944	–0,0479	0,1111	0,0003
$\Delta Q = 32,38$ (+15 %)	БУ	–	220,00	0,0000	–	220,00	0,00	0,0	0,0
	1	0,7288 – j0,3495	223,1062	0,0164	0,72854 – j0,34948	223,167	0,0164	0,0608	0,0
	2	0,9118 – j0,4392	223,6563	0,0147	0,91151 – j0,43917	223,7197	0,0147	0,0634	0,0
	3	–2,034 + j0,9863	207,4929	–0,0496	–2,03231 + j0,98364	207,7417	–0,0489	0,2488	0,0007
$\Delta Q = 43,7$ (+20 %)	БУ	–	220,00	0,0000	–	220,00	0,00	0,0	0,0
	1	0,7259 – j0,3494	223,831	0,015	0,7255 – j0,34939	223,9383	0,0148	0,1073	0,0002
	2	0,9081 – j0,4391	224,4042	0,0133	0,9076 – j0,43901	224,5159	0,0131	0,1117	0,0002
	3	–2,0255 + j0,9328	208,4901	–0,0511	–2,02254 + j0,92808	208,9298	–0,0497	0,4397	0,0004
$\Delta Q = 53,96$ (+25 %)	БУ	–	220,00	0,0000	–	220,00	0,00	0,0	0,0
	1	0,7231 – j0,3494	224,5479	0,0135	0,72245 – j0,3493	224,7145	0,0133	0,1666	0,0002
	2	0,9045 – j0,439	225,1439	0,0118	0,9037 – j0,43884	225,3176	0,0116	0,1737	0,0002
	3	–2,0174 + j0,8799	209,4761	–0,0525	–2,01276 + j0,87253	210,1588	–0,0503	0,6827	0,0022
$\Delta Q = -10,79$ (–5 %)	БУ	–	220,00	0,0000	–	220,00	0,00	0,0	0,0
	1	0,7408 – j0,3498	220,1212	0,0224	0,74073 – j0,34983	220,1282	0,0224	0,007	0,0
	2	0,9272 – j0,4399	220,5768	0,0207	0,92713 – j0,43983	220,5841	0,0207	0,0073	0,0
	3	–2,0716 + j1,2062	203,3843	–0,0438	–2,07142 + j1,20591	203,4125	–0,0438	0,0282	0,0

Окончание табл. 3.4

ΔQ	Номер узла	Точный метод			Метод чувствительности			Погрешность	
		$\mathbf{I} = \mathbf{I}' + j\mathbf{I}''$, кА	U , кВ	Ψ , рад	$\mathbf{I} = \mathbf{I}' + j\mathbf{I}''$, кА	U , кВ	Ψ , рад	U , кВ	Ψ , рад
$\Delta Q = -21,58$ (-10 %)	БУ	–	220,00	0,0000	–	220,00	0,00	0,0	0,0
	1	0,7439 – j0,3499	219,3525	0,0239	0,74377 – j0,34992	219,3804	0,0239	0,0279	0,0
	2	0,9312 – j0,44	219,7838	0,0222	0,93104 – j0,43999	219,8128	0,0222	0,029	0,0
	3	–2,082 + j1,2627	202,3255	–0,0423	–2,0812 + j1,26146	202,4372	–0,0421	0,1117	0,0002
$\Delta Q = -32,38$ (-15 %)	БУ	–	220,00	0,0000	–	220,00	0,00	0,0	0,0
	1	0,7421 – j0,35	218,5732	0,0255	0,7482 – j0,35001	218,6364	0,0254	0,0632	0,0001
	2	0,9353 – j0,4402	218,9801	0,0237	0,93495 – j0,44016	219,0459	0,0236	0,0658	0,0001
	3	–2,0928 + j1,32	201,252	–0,0409	–2,09098 + j1,31702	201,5033	–0,0403	0,2513	0,0006
$\Delta Q = -43,17$ (-20 %)	БУ	–	220,00	0,0000	–	220,00	0,00	0,0	0,0
	1	0,7503 – j0,3501	217,7844	0,027	0,74987 – j0,3501	217,8978	0,0268	0,1134	0,0002
	2	0,9394 – j0,4404	218,1665	0,0253	0,93885 – j0,44032	218,2843	0,0251	0,1178	0,0002
	3	–2,104 + j1,3778	200,1651	–0,0394	–2,10076 + j1,37263	200,6115	–0,0383	0,4464	0,0011
$\Delta Q = -53,96$ (-25 %)	БУ	–	220,00	0,0000	–	220,00	0,00	0,0	0,0
	1	0,7536 – j0,3503	216,9851	0,0286	0,75291 – j0,35019	217,1635	0,0283	0,1784	0,0003
	2	0,9437 – j0,4406	217,3422	0,0268	0,94276 – j0,44049	217,5277	0,0266	0,1855	0,0002
	3	–2,1157 + j1,4364	199,0635	–0,0378	–2,11053 + j1,42818	199,7603	–0,0363	0,6968	0,0015
$\Delta Q = -107,92$ (-50 %)	БУ	–	220,00	0,0000	–	220,00	0,00	0,0	0,0
	1	0,7713 – j0,3509	212,3135	0,0367	0,76815 – j0,35063	213,5583	0,0354	0,7448	0,0013
	2	0,9663 – j0,4417	213,0406	0,0349	0,96229 – j0,44131	213,8147	0,0337	0,7741	0,0012
	3	–2,1816 + j1,7413	193,3088	–0,301	–2,15942 + j1,70601	196,075	–0,0251	2,7662	0,005

Таблица 3.5

Результаты коррекции установившегося режима
десятиузловой электрической системы (см. рис. 2.2)

ΔP_3	Номер узла	Точный метод коррекции			Коррекция по методу чувствительности			Погрешность	
		$I = I' + jI''$, кА	U , кВ	Ψ , рад	$I = I' + jI''$, кА	U , кВ	Ψ , рад	U , кВ	Ψ , рад
$\Delta P_3 = 3 (5\%)$	БУ	–	220,00	0	–	220,00	0,0	0,0	0,0
	1	$-0,5162 + j0,2529$	210,2026	$-0,0289$	$-0,51622 + j0,25288$	210,2028	$-0,0289$	0,0002	0,0
	2	$0,4868 - j0,4364$	215,1802	$-0,0134$	$0,48679 - j0,43645$	215,1803	$-0,0134$	0,0001	0,0
	3	$-0,2659 + j0,1387$	211,9915	$-0,0249$	$-0,26550 + j0,13872$	212,001	$-0,0249$	0,0095	0,0
	4	$-0,4899 + j0,2602$	208,8323	$-0,0323$	$-0,48987 + j0,26015$	208,8325	$-0,0323$	0,0002	0,0
	5	$0,4051 + j0,3374$	210,1983	$-0,0021$	$0,40507 + j0,33742$	210,1985	$-0,0021$	0,0002	0,0
	6	$-0,4718 + j0,247$	208,2835	$-0,0347$	$-0,47181 + j0,24701$	208,2838	$-0,0348$	0,0003	0,0001
	7	$0,2528 - j0,6464$	215,0868	$-0,0408$	$0,25278 - j0,64641$	215,087	$-0,0408$	0,0002	0,0
	8	$-0,4352 + j0,235$	210,7251	$-0,0486$	$-0,43517 + j0,23497$	210,7253	$-0,0486$	0,0002	0,0
	9	$0,3772 + j0,0183$	212,3888	$-0,024$	$0,37721 + j0,01826$	212,3891	$-0,024$	0,0003	0,0
$\Delta P_3 = 6 (10\%)$	БУ	–	220,00	0,0	–	220,00	0,0	0,0	0,0
	1	$-0,5162 + j0,2525$	210,2701	$-0,0282$	$-0,51621 + j0,25248$	210,2706	$-0,0283$	0,0005	0,0001
	2	$0,487 - j0,4358$	215,2704	$-0,0125$	$0,48697 - j0,43584$	215,271	$-0,0126$	0,0006	0,0001
	3	$-0,2514 + j0,138$	212,0997	$-0,0238$	$-0,25135 + j0,13798$	212,1397	$-0,0237$	0,04	$-0,0001$
	4	$-0,4899 + j0,2596$	208,93	$-0,0314$	$-0,48988 + j0,25958$	208,9305	$-0,0313$	0,0005	$-0,0001$
	5	$0,4046 + j0,3376$	210,2897	$-0,0013$	$0,40461 + j0,33762$	210,2903	$-0,0012$	0,0006	$-0,0001$
	6	$-0,4718 + j0,2465$	208,3688	$-0,0339$	$-0,47182 + j0,24653$	208,3695	$-0,034$	0,0007	0,0001
	7	$0,2533 - j0,6459$	215,175	$-0,0399$	$0,25324 - j0,64593$	215,1754	$-0,04$	0,0004	0,0001
	8	$-0,4352 + j0,2345$	210,8159	$-0,0477$	$-0,43519 + j0,23448$	210,8166	$-0,0477$	0,0007	0,0
	9	$0,377 + j0,0186$	212,4823	212,4823	$0,37703 + j0,01858$	212,483	$-0,0231$	0,0007	0,0

Продолжение табл. 3.5

ΔP_3	Номер узла	Точный метод коррекции			Коррекция по методу чувствительности			Погрешность	
		$I = I' + jI''$, кА	U , кВ	Ψ , рад	$I = I' + jI''$, кА	U , кВ	Ψ , рад	U , кВ	Ψ , рад
$\Delta P_3 = 9$ (15%)	БУ	–	220,00	0,0	–	220,00	0,0	0,0	0,0
	1	$-0,5162 + j0,2521$	210,3373	-0,0276	$-0,51619 + j0,25208$	210,3384	-0,0276	0,0011	0,0
	2	$0,4872 - j0,4352$	215,3604	-0,0116	$0,48714 - j0,43253$	215,3616	-0,0117	0,0012	0,0001
	3	$-0,2373 + j0,1374$	212,2075	-0,0228	$-0,2372 + j0,13724$	212,3037	-0,0224	0,0962	-0,0004
	4	$-0,4899 + j0,259$	209,0274	-0,0305	$-0,48989 + j0,259$	209,0286	-0,0304	0,0012	-0,0001
	5	$0,4042 + j0,3378$	210,3808	-0,0004	$0,40415 + j0,33781$	210,3821	-0,0004	0,0013	0,0
	6	$-0,4718 + j0,246$	208,4536	-0,0331	$-0,47182 + j0,24604$	208,455	-0,0332	0,0014	0,0001
	7	$0,2537 - j0,6454$	215,2627	-0,039	$0,2537 - j0,64544$	215,2638	-0,0391	0,0011	0,0001
	8	$-0,4352 + j0,234$	210,9065	-0,0468	$-0,43521 + j0,234$	210,9078	-0,0468	0,0013	0,0
	9	$0,3769 + j0,0189$	212,5755	-0,0223	0,37685	212,5767	-0,0222	0,0012	-0,0001
$\Delta P_3 = 12,00$ (20%)	БУ	–	220,00	0,0	–	220,00	0,0	0,0	0,0
	1	$-0,5162 + j0,2517$	210,4041	-0,027	$-0,51618 + j0,25168$	210,4062	-0,027	0,0021	0,0
	2	$0,4873 - j0,4346$	215,4499	-0,0108	$0,48732 - j0,43463$	215,452	-0,0108	0,0021	0,0
	3	$-0,2232 + j0,1367$	212,3148	-0,0217	$-0,22306 + j0,1365$	212,4976	-0,0211	0,1828	0,0006
	4	$-0,4899 + j0,2585$	209,1244	-0,0295	$-0,4899 + j0,25842$	209,1266	-0,0295	0,0022	0,0
	5	$0,4037 + j0,388$	210,4715	0,0004	$0,40368 + j0,33801$	210,4739	0,0005	0,0024	-0,0001
	6	$-0,4718 + j0,2455$	208,5381	-0,0323	$-0,47183 + j0,24555$	208,5405	-0,0323	0,0024	0,0
	7	$0,2542 - j0,645$	215,3501	-0,0382	$0,25416 - j0,64496$	215,3521	-0,0382	0,002	0,0
	8	$-0,4352 + j0,2335$	210,9967	-0,0459	$-0,43523 + j0,23351$	210,999	-0,0459	0,0023	0,0
	9	$0,3767 + j0,0192$	212,6683	-0,0214	$0,37667 + j0,01924$	212,6705	-0,0213	0,0022	-0,0001

$\Delta P_3 = 15$ (25 %)	БУ	–	220,00	0,0	–	220,00	0,0	0,0	0,0
	1	$-0,5162 + j0,2513$	210,4708	-0,0264	$-0,51617 + j0,25128$	210,474	-0,0032	0,0032	0,0
	2	$0,4875 - j0,434$	215,5391	-0,0099	$0,48749 - j0,43402$	215,5424	-0,0099	0,0033	0,0
	3	$-0,2091 + j0,1361$	212,4218	-0,0206	$-0,20891 + j0,13576$	212,7268	-0,0197	0,305	-0,0009
	4	$-0,4899 + j0,2579$	209,221	-0,0286	$-0,48992 + j0,25784$	209,2245	-0,0285	0,0035	-0,0001
	5	$0,4033 + j0,3382$	210,5618	0,0013	$0,40322 + j0,3382$	210,5655	0,0013	0,0037	0,0
	6	$-0,4719 + j0,2451$	208,6222	-0,0315	$-0,47184 + j0,24507$	208,6259	-0,0315	0,0037	0,0
	7	$0,2546 - j0,6445$	215,4372	-0,0373	$0,25462 - j0,64447$	215,4403	-0,0373	0,0031	0,0
	8	$-0,4353 + j0,233$	211,0866	-0,045	$-0,43525 + j0,23302$	211,09	-0,0451	0,0034	0,0001
	9	$0,3765 + j0,0196$	212,7607	-0,0205	$0,37648 + j0,01956$	212,7641	-0,0205	-0,0034	0,0
$\Delta P_3 = 30$ (50 %)	БУ	–	220,00	0,0	–	220,00	0,0	0,0	0,0
	1	$-0,5161 + j0,2493$	210,7795	-0,0233	$-0,51612 + j0,24928$	210,8122	-0,0233	0,0327	0,0
	2	$0,4884 - j0,431$	215,9802	-0,0056	$0,48836 - j0,43098$	215,993	-0,0056	0,0128	0,0
	3	$-0,1389 + j0,1336$	212,9512	-0,0152	$-0,13818 + j0,13205$	214,7069	-0,0118	1,7577	-0,0034
	4	$-0,49 + j0,255$	209,6987	-0,024	$-0,48998 + j0,25495$	209,7125	-0,0238	0,0138	-0,0002
	5	$0,401 + j0,3392$	211,0086	0,0055	$0,40091 + j0,33918$	211,0226	0,0056	0,014	0,0001
	6	$-0,4719 + j0,2427$	209,038	-0,0274	$-0,47188 + j0,24264$	209,0518	-0,0274	0,0138	0,0
	7	$0,2569 - j0,6421$	215,8674	-0,033	$0,25691 - j0,64204$	215,8799	-0,033	0,0125	0,0
	8	$-0,4354 + j0,2306$	211,5306	-0,0306	$-0,43535 + j0,23058$	211,5439	-0,0406	0,0133	0,0
	9	$0,3756 + j0,0212$	213,2174	-0,0161	$0,37557 + j0,0212$	213,2309	-0,016	0,0135	-0,0001

Продолжение табл. 3.5

ΔP	Номер узла	Точный метод коррекции			Коррекция по методу чувствительности			Погрешность	
		$I = I' + jI''$, кА	U , кВ	Ψ , рад	$I = I' + jI''$, кА	U , кВ	Ψ , рад	U , кВ	Ψ , рад
0,7 $\Delta P = -3$ (-5%)	БУ	–	220,00	0,0	–	220,00	0,0	0,0	0,0
	1	$-0,5162 + j0,2537$	210,0668	$-0,0301$	$-0,51624 + j0,25368$	210,0669	$-0,0301$	0,0001	0,0
	2	$0,4865 - j0,4376$	214,9987	$-0,0151$	$0,48644 - j0,43766$	214,9988	$-0,0152$	0,0001	0,0001
	3	$-0,2938 + j0,1402$	211,7741	$-0,0271$	$-0,29379 + j0,14021$	211,7826	$-0,027$	0,0085	$-0,0001$
	4	$-0,4898 + j0,2613$	208,6357	$-0,0342$	$-0,48984 + j0,26131$	208,6359	$-0,0341$	0,0002	$-0,0001$
	5	$0,406 + j0,337$	210,0143	$-0,0038$	$0,4069 + j0,33703$	210,0146	$-0,0037$	0,0003	$-0,0001$
	6	$-0,4718 + j0,248$	208,1121	$-0,0364$	$-0,47179 + j0,23799$	208,1124	$-0,0364$	0,0003	0,0
	7	$0,2519 - j0,6474$	214,9096	$-0,0425$	$0,25186 - j0,64739$	214,9098	$-0,0426$	0,0002	0,0001
	8	$-0,4351 + j0,2359$	210,5422	$-0,0503$	$-0,43513 + j0,23595$	210,5424	$-0,0504$	0,0002	0,0001
	9	$0,3776 + j0,0176$	212,2009	$-0,0258$	$0,37758 + j0,0176$	212,2011	$-0,0258$	0,0002	0,0
$\Delta P = -6$ (-10%)	БУ	–	220,00	0,0	–	220,00	0,0	0,0	0,0
	1	$-0,5163 + j0,2541$	209,9983	$-0,0307$	$-0,51625 + j0,25408$	209,9989	$-0,0307$	0,0006	0,0
	2	$0,4863 - j0,4383$	214,9074	$-0,016$	$0,48627 - j0,43827$	214,9079	0,016	0,0005	0,0
	3	$-0,308 + j0,141$	211,6645	$-0,0281$	$-0,30794 + j0,14095$	211,6971	$-0,028$	0,0026	0,0001
	4	$-0,4898 + j0,2619$	208,5369	$-0,0351$	$-0,48983 + j0,26189$	208,5375	$-0,0351$	0,0006	0,0
	5	$0,4065 + j0,3368$	209,9218	$-0,0046$	$0,40646 + j0,33683$	209,9225	$-0,0046$	0,0007	0,0
	6	$-0,4718 + j0,2485$	208,0259	$-0,0372$	$-0,47179 + j0,24847$	208,0266	$-0,0372$	0,0007	0,0
	7	$0,2514 - j0,6479$	214,8205	$-0,0434$	$0,25141 - j0,64787$	214,821	$-0,0434$	0,0005	0,0
	8	$-0,4351 + j0,2364$	210,4503	$-0,0512$	$-0,43511 + j0,23644$	210,4508	$-0,0513$	0,0005	0,0001
	9	$0,3778 + j0,0173$	212,1062	$-0,0267$	$0,3776 + j0,01728$	212,1069	$-0,0267$	0,0007	0,0

14

$\Delta P = -9$ (-15 %)	БУ	–	220,00	0,0	–	220,00	0,0	0,0	0,0
	1	$-0,5163 + j0,2545$	209,9296	-0,0313	$-0,51626 + j0,25448$	209,9309	-0,0313	0,0013	0,0
	2	$0,4861 - j0,4389$	214,8157	-0,0169	$0,48609 - j0,43888$	214,8169	-0,0169	0,0012	0,0
	3	$-0,3221 + j0,1418$	211,555	-0,0292	$-0,32208 + j0,14169$	211,6241	-0,0289	0,0691	-0,0003
	4	$-0,4898 + j0,2625$	208,4377	-0,036	$-0,48982 + j0,26247$	208,439	-0,036	0,0013	0,0
	5	$0,4069 + j0,3366$	209,829	-0,0055	$0,40693 + j0,33664$	209,8303	-0,0054	0,0013	0,0001
	6	$-0,4718 + j0,2489$	207,9393	-0,038	$-0,47178 + j0,24869$	207,9407	-0,038	0,0014	0,0
	7	$0,251 - j0,6484$	214,731	-0,0443	$0,25095 - j0,64836$	214,7322	-0,0443	0,0012	0,0
	8	$-0,4351 + j0,2369$	210,3579	-0,0521	$-0,43509 + j0,23692$	210,3592	-0,0522	0,0013	0,0001
	9	$0,3779 + j0,0169$	212,0113	-0,0276	$0,37795 + j0,01695$	212,0128	-0,0276	0,0015	0,0
$\Delta P = -12$ (-20 %)	БУ	–	220,00	0,0	–	220,00	0,0	0,0	0,0
	1	$-0,5163 + j0,2549$	209,8608	-0,0319	$-0,51627 + j0,25488$	209,8629	-0,032	0,0021	0,0001
	2	$0,4859 - j0,4395$	214,7237	-0,0177	$0,48592 - j0,43949$	214,7258	-0,0178	0,0021	0,0001
	3	$-0,3363 + j0,1427$	211,4449	-0,0303	$-0,33623 + j0,14243$	211,5618	-0,0298	0,1169	0,0004
	4	$-0,4898 + j0,2631$	208,3381	-0,037	$-0,48981 + j0,26305$	208,3404	-0,0369	0,0023	-0,0001
	5	$0,4074 + j0,3364$	209,7357	-0,0063	$0,40739 + j0,33664$	209,7381	-0,0063	0,0024	0,0
	6	$-0,4718 + j0,2494$	207,8524	-0,0388	$-0,47177 + j0,24944$	207,8547	-0,0389	0,0023	0,0001
	7	$0,2505 - j0,6488$	214,6412	-0,0451	$0,25049 - j0,64884$	214,6433	-0,0452	0,0021	0,0001
	8	$-0,4351 + j0,2374$	210,2652	-0,053	$-0,43507 + j0,23741$	210,2675	-0,053	0,0023	0,0
	9	$0,3781 + j0,0166$	211,9162	-0,0285	$0,37813 + j0,01662$	211,9184	-0,0284	0,0022	-0,0001

Продолжение табл. 3.5

ΔP	Номер узла	Точный метод коррекции			Коррекция по методу чувствительности			Погрешность	
		$I = I' + jI''$, кА	U , кВ	Ψ , рад	$I = I' + jI''$, кА	U , кВ	Ψ , рад	U , кВ	Ψ , рад
$\Delta P = -15$ (-25 %)	БУ	–	220,00	0,0	–	220,00	0,0	0,0	0,0
	1	$-0,5163 + j0,2553$	209,7915	-0,0326	$-0,51628 + j0,25528$	209,7947	-0,0326	0,0032	0,0
	2	$0,4858 - j0,4401$	214,6313	-0,0186	$0,48574 - j0,44009$	214,6347	-0,0186	0,0034	0,0
	3	$-0,3506 + j0,1436$	211,3346	-0,0314	$-0,35038 + j0,14317$	211,5084	-0,0306	0,1738	-0,0008
	4	$-0,4898 + j0,2637$	208,2381	-0,0379	$-0,4898 + j0,26363$	208,2418	-0,0378	0,0037	-0,0001
	5	$0,4079 + j0,3362$	209,6422	-0,0072	$0,40785 + j0,33625$	209,6458	-0,0071	0,0036	-0,0001
	6	$-0,4718 + j0,2499$	207,7651	-0,0396	$-0,47176 + j0,24993$	207,7688	-0,0397	0,0037	0,0001
	7	$0,2501 - j0,6493$	214,5509	-0,046	$0,25003 - j0,64933$	214,5543	-0,046	0,0034	0,00
	8	$-0,4351 + j0,2379$	210,1721	-0,0539	$-0,43505 + j0,2379$	210,1756	-0,0539	0,0036	0,0
	9	$0,3783 + j0,0163$	211,8205	-0,0294	$0,37831 + j0,0163$	211,824	-0,0293	0,0035	0,0001
$\Delta P = -30$ (-50 %)	БУ	–	220,00	0,0	–	220,00	0,0	0,0	0,0
	1	$-0,5164 + j0,2573$	209,4407	-0,0357	$-0,51634 + j0,25728$	209,4538	-0,0356	0,0131	-0,0001
	2	$0,4849 - j0,4432$	214,1642	-0,023	$0,48487 - j0,44313$	214,1776	-0,023	0,0134	0,0
	3	$-0,4218 + j0,1485$	210,7763	-0,0368	$-0,42111 + j0,14688$	211,3357	-0,034	0,5612	-0,0028
	4	$-0,4897 + j0,2666$	207,7326	-0,0426	$-0,48974 + j0,26652$	207,7471	-0,0425	0,0145	-0,0001
	5	$0,4102 + j0,3352$	209,1687	-0,0114	$0,41017 + j0,33527$	209,1834	-0,0113	0,0147	-0,0001
	6	$-0,4718 + j0,2524$	207,3233	-0,0437	$-0,47173 + j0,25236$	207,3377	-0,0437	0,0144	0,0
	7	$0,2477 - j0,6518$	214,0947	-0,0504	$0,24773 - j0,65176$	214,1079	-0,0504	0,0132	0,0
	8	$-0,435 + j0,2404$	209,7013	-0,0584	$-0,43496 + j0,24034$	209,7153	-0,0583	0,014	-0,0001
	9	$0,3793 + j0,0146$	211,3367	-0,0338	$0,37923 + j0,01466$	211,3509	-0,0337	0,0142	-0,0001

ε_L

ΔQ_3	БУ	–	220,00	0,0	–	220,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta Q_3 = 1,4 (5\%)$	1	$-0,516 + j0,2532$	210,2008	-0,0296	$-0,51604 + j0,25326$	210,2009	-0,0296	0,0001	0,0
	2	$0,4864 - j0,4369$	215,1803	-0,0144	$0,48633 - j0,43696$	215,1804	-0,0145	0,0001	0,0001
	3	$-0,2796 + j0,1328$	211,9949	-0,0262	$-0,27964 + j0,13284$	211,997	-0,0262	0,0021	0,0
	4	$-0,4896 + j0,2607$	208,8323	-0,0334	$-0,48958 + j0,2607$	208,8324	-0,0334	0,0001	0,0
	5	$0,4054 + j0,337$	210,1982	-0,0031	$0,40542 + j0,337$	210,1983	-0,0031	0,0001	0,0
	6	$-0,4716 + j0,2474$	208,2845	-0,0357	$-0,47157 + j0,24746$	208,2847	-0,0357	0,0002	0,0
	7	$0,2522 - j0,6467$	215,0873	-0,0418	$0,25212 - j0,64667$	215,0875	-0,0419	0,0002	0,0001
	8	$-0,4349 + j0,2354$	210,7257	-0,0496	$-0,43493 + j0,23542$	210,7258	-0,0496	0,0001	0,0
	9	$0,8772 + j0,0179$	212,3883	-0,0251	$0,37723 + j0,01786$	212,3883	-0,0251	0,0	0,0
ΔQ	БУ	–	220,00	0,0	–	220,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta Q = 4,2 (15\%)$	1	$-0,5157 + j0,2532$	210,3326	-0,0298	$-0,51565 + j0,25322$	210,3332	-0,0298	0,0006	0,0
	2	$0,4858 - j0,4367$	215,3614	-0,0148	$0,48577 - j0,43676$	215,3622	-0,0148	0,0008	0,0
	3	$-0,2796 + j0,1196$	212,2187	-0,0266	$-0,27963 + j0,1196$	212,236	-0,0265	0,0173	-0,0001
	4	$-0,489 + j0,2606$	209,0282	-0,0338	$-0,48903 + j0,26062$	209,0291	-0,0337	0,0009	-0,0001
	5	$0,4052 + j0,3365$	210,3813	-0,0035	$0,40519 + j0,33656$	210,3822	-0,0035	0,0009	0,0
	6	$-0,4711 + j0,2474$	208,4572	-0,036	$-0,47111 + j0,24739$	208,458	-0,036	0,0008	0,0
	7	$0,2518 - j0,6462$	215,2649	-0,0421	$0,25172 - j0,64621$	215,2657	-0,0422	0,0008	0,0001
	8	$-0,4345 + j0,2353$	210,9091	-0,0499	$-0,43448 + j0,23534$	210,91	-0,0499	0,0009	0,0
	9	$0,3769 + j0,0177$	212,5743	-0,0254	$0,37691 + j0,01771$	212,5751	-0,0254	0,0008	0,0

Продолжение табл. 3.5

ΔQ	Номер узла	Точный метод коррекции			Коррекция по методу чувствительности			Погрешность	
		$I = I' + jI''$, кА	U , кВ	Ψ , рад	$I = I' + jI''$, кА	U , кВ	Ψ , рад	U , кВ	Ψ , рад
$\Delta Q = 5,6$ (20%)	БУ	–	220,00	0,0	–	220,0	0,0	0,0	0,0
	1	$-0,5155 + j0,2532$	210,3984	$-0,0299$	$-0,51546 + j0,2532$	210,3994	$-0,03$	0,001	0,0001
	2	$0,4855 - j0,4366$	215,4518	$-0,015$	$0,48548 - j0,43667$	215,4532	$-0,015$	0,0014	0,0
	3	$-0,2797 + j0,113$	212,3306	$-0,0268$	$-0,27963 + j0,11298$	212,3607	$-0,0267$	0,0301	$-0,0001$
	4	$-0,4887 + j0,2606$	209,1259	$-0,0339$	$-0,48876 + j0,26058$	209,1276	$-0,0339$	0,0017	0,0
	5	$0,4051 + j0,3363$	210,4727	$-0,0037$	$0,40508 + j0,33633$	210,4742	$-0,0036$	0,0015	$-0,0001$
	6	$-0,4709 + j0,2473$	208,5434	$-0,0361$	$-0,47087 + j0,24736$	208,5449	$-0,0362$	0,0015	0,0001
	7	$0,2515 - j0,646$	215,3635	$-0,0423$	$0,25152 - j0,64598$	215,3549	$-0,0423$	0,0014	0,0
	8	$-0,4343 + j0,2353$	211,0006	$-0,05$	$-0,43426 + j0,2353$	211,0021	$-0,0501$	0,0015	0,0001
	9	$0,3767 + j0,0176$	212,6672	$-0,0256$	$0,37675 + j0,01764$	212,6686	$-0,0256$	0,0014	0,0
$\Delta Q = 7,0$ (25%)	БУ	–	220,00	0,0	–	220,0	0,0	0,0	0,0
	1	$-0,5153 + j0,2532$	210,4641	$-0,03$	$-0,51527 + j0,25318$	210,4656	$-0,0301$	0,0015	0,0001
	2	$0,4852 - j0,4365$	215,542	$-0,0151$	$0,4852 - j0,43657$	215,5443	$-0,0152$	0,0023	0,0001
	3	$-0,2797 + j0,1064$	212,442	$-0,027$	$-0,27962 + j0,10635$	212,4883	$-0,0268$	0,0465	$-0,0002$
	4	$-0,4885 + j0,2606$	209,2236	$-0,0341$	$-0,48848 + j0,26054$	209,2262	$-0,0341$	0,0026	0,0
	5	$0,405 + j0,3361$	210,5639	$-0,0039$	$0,40497 + j0,33611$	210,5662	$-0,0038$	0,0023	$-0,0001$
	6	$-0,470 + j0,2473$	208,6294	$-0,0363$	$-0,47064 + j0,24732$	208,6317	$-0,0363$	0,0023	0,0
	7	$0,2513 - j0,6457$	215,442	$-0,0424$	$0,25131 - j0,64575$	215,4442	$-0,0425$	0,0022	0,0001
	8	$-0,434 + j0,2352$	211,0919	$-0,0502$	$-0,43403 + j0,23526$	211,0944	$-0,0502$	0,0025	0,0
	9	$0,3766 + j0,0176$	212,7598	$-0,0258$	$0,37658 + j0,01756$	212,7622	$-0,0258$	0,0034	0,0

5L

$\Delta Q = 14 (50\%)$	БУ	–	220,00	0,0	–	220,0	0,0	0,0	0,0
	1	$-0,5143 + j0,2531$	210,7914	-0,0306	$-0,51431 + j0,25307$	210,7974	-0,0306	0,006	0,0
	2	$0,4838 - j0,4361$	215,9917	-0,016	$0,48378 - j0,43608$	216,0006	-0,0161	0,0089	0,0001
	3	$-0,2797 + j0,0736$	212,9981	-0,028	$-0,2796 + j0,07324$	213,1658	-0,027	0,1677	-0,001
	4	$-0,4871 + j0,2604$	209,7101	-0,035	$-0,4871 + j0,26035$	209,7203	-0,0349	0,0102	-0,0001
	5	$0,4044 + j0,335$	211,0186	-0,0048	$0,4044 + j0,33499$	211,0278	-0,0048	0,0092	0,0
	6	$-0,4695 + j0,2471$	209,0582	-0,037	$-0,46948 + j0,24715$	209,0669	-0,037	0,0087	0,0
	7	$0,2504 - j0,6446$	215,8829	-0,0432	$0,25031 - j0,6446$	215,8918	-0,0432	0,0089	0,0
	8	$-0,4329 + j0,2351$	211,5473	-0,0509	$-0,43291 + j0,23507$	211,5568	-0,051	0,0095	0,0001
	9	$0,3758 + j0,0172$	213,2218	-0,0266	$0,37577 + j0,01719$	213,2311	-0,0266	0,0093	0,0
$\Delta Q = -1,4 (-5\%)$	БУ	–	220,00	0,0	–	220,0	0,0	0,0	0,0
	1	$-0,5164 + j0,2533$	210,0687	-0,0294	$-0,51642 + j0,2533$	210,0688	-0,0294	0,0001	0,0
	2	$0,4869 - j0,4371$	214,9988	-0,0141	$0,4869 - j0,43715$	214,9989	-0,0141	0,0001	0,0
	3	$-0,2797 + j0,1461$	211,7705	-0,0258	$-0,27965 + j0,14609$	211,7726	-0,0258	0,0021	0,0
	4	$-0,4901 + j0,2608$	208,636	-0,0331	$-0,49013 + j0,26077$	208,6361	-0,033	0,0001	-0,0001
	5	$0,4057 + j0,3374$	210,0147	-0,0028	$0,40565 + j0,33745$	210,0149	-0,0027	0,0002	-0,0001
	6	$-0,472 + j0,2475$	208,1115	-0,0354	$-0,47203 + j0,24753$	208,1116	-0,0355	0,0001	0,0001
	7	$0,2526 - j0,6471$	214,9093	-0,0415	$0,25252 - j0,64713$	214,9094	-0,0415	0,0001	0,0001
	8	$-0,4354 + j0,2355$	210,5419	-0,0493	$-0,43538 + j0,2355$	210,5421	-0,0494	0,0002	0,0002
	9	$0,3776 + j0,018$	212,2018	-0,0247	$0,37756 + j0,018$	212,202	-0,0247	0,0002	0,0002

Окончание табл. 3.5

ΔQ	Номер узла	Точный метод коррекции			Коррекция по методу чувствительности			Погрешность	
		$I = I' + jI''$, кА	U , кВ	Ψ , рад	$I = I' + jI''$, кА	U , кВ	Ψ , рад	U , кВ	Ψ , рад
$\Delta Q = -4,2 (-15\%)$	БУ	–	220,00	0,0	–	220,0	0,0	0,0	0,0
	1	$-0,5168 + j0,2533$	209,9363	$-0,0291$	$-0,5168 + j0,25334$	209,9368	$-0,0292$	0,0005	0,0001
	2	$0,4875 - j0,4373$	214,8169	$-0,0137$	$0,48747 - j0,43735$	214,8177	$-0,0138$	0,0008	0,0001
	3	$-0,2797 + j0,1594$	211,5459	$-0,0254$	$-0,27966 + j0,15933$	211,5636	$-0,0253$	0,0177	$-0,0001$
	4	$-0,4907 + j0,2609$	208,4391	$-0,0327$	$-0,49068 + j0,26085$	208,4401	$-0,0327$	0,001	0,0
	5	$0,4059 + j0,3379$	209,8306	$-0,0024$	$0,40588 + j0,33789$	209,8316	$-0,0023$	0,001	$-0,0001$
	6	$-0,4725 + j0,2476$	207,9379	$-0,0351$	$-0,4725 + j0,2476$	207,9388	$-0,0352$	0,0009	0,0001
	7	$0,253 - j0,6476$	214,7309	$-0,0412$	$0,25293 - j0,64759$	214,7318	$-0,0412$	0,0009	0,0
	8	$-0,4358 + j0,2356$	210,3576	$-0,049$	$-0,43483 + j0,23558$	210,3586	$-0,0491$	0,001	0,0001
	9	$0,3779 + j0,0181$	212,0147	$-0,0244$	$0,37789 + j0,01815$	212,0158	$-0,0244$	0,0011	0,0
$\Delta Q = -5,6 (-20\%)$	БУ	–	220,00	0,0	–	220,0	0,0	0,0	0,0
	1	$-0,517 + j0,2533$	209,8698	$-0,029$	$-0,51699 + j0,25336$	209,8708	$-0,029$	0,001	0,0
	2	$0,4878 - j0,4374$	214,7257	$-0,0135$	$0,48775 - j0,43744$	214,7272	$-0,0136$	0,0015	0,0001
	3	$-0,2797 + j0,166$	211,4332	$-0,0252$	$-0,27966 + j0,16595$	211,4649	$-0,0251$	0,0317	$-0,0001$
	4	$-0,4909 + j0,2609$	208,3405	$-0,0326$	$-0,49096 + j0,26089$	208,3422	$-0,0325$	0,0017	$-0,0001$
	5	$0,406 + j0,3381$	209,7385	$-0,0022$	$0,40599 + j0,33812$	209,7401	$-0,0022$	0,0016	0,0
	6	$-0,4727 + j0,2476$	207,851	$-0,035$	$-0,47273 + j0,24764$	207,8582	$-0,035$	0,0015	0,0
	7	$0,2532 - j0,6478$	214,6416	$-0,041$	$0,25313 - j0,64782$	214,643	$-0,0411$	0,0014	0,0001
	8	$-0,4361 + j0,2556$	210,2653	$-0,0489$	$-0,43605 + j0,23562$	210,2669	$-0,0489$	0,0016	0,0
	9	$0,3781 + j0,0182$	211,9212	$-0,0242$	$0,37805 + j0,01822$	211,9229	$-0,0242$	0,0017	0,0

LL

$\Delta Q = -7,0 (-25 \%)$	БУ	–	220,00	0,0	–	220,0	0,0	0,0	0,0
	1	$-0,5172 + j0,2534$	209,8033	-0,0289	$-0,51718 + j0,25338$	209,805	-0,0289	0,0017	0,0
	2	$0,4881 - j0,4375$	214,6345	-0,0134	$0,48804 - j0,43754$	214,6367	-0,0134	0,0022	0,0
	3	$-0,2797 + j0,1727$	211,3203	-0,025	$-0,27967 + j0,17258$	211,3701	-0,0248	0,0498	-0,0002
	4	$-0,4912 + j0,261$	208,2418	-0,0324	$-0,49123 + j0,26093$	208,2444	-0,0323	0,0026	-0,0001
	5	$0,4061 + j0,3383$	209,6464	-0,002	$0,40611 + j0,33834$	209,6486	-0,002	0,0022	0,0
	6	$-0,473 + j0,2477$	207,7641	-0,0348	$-0,47296 + j0,24767$	207,7663	-0,0349	0,0022	0,0001
	7	$0,2534 - j0,648$	214,5521	-0,0409	$0,25333 - j0,64805$	214,5543	-0,0409	0,0022	0,0
	8	$-0,4363 + j0,2356$	210,1729	-0,0487	$-0,43628 + j0,23566$	210,1754	-0,0488	0,0025	0,0001
	9	$0,3782 + j0,0183$	211,8275	-0,024	$0,37821 + j0,0183$	211,8299	-0,024	0,0024	0,0
$\Delta Q = -14,0 (-50 \%)$	БУ	–	220,00	0,0	–	220,0	0,0	0,0	0,0
	1	$-0,5182 + j0,2535$	209,4698	-0,0283	$-0,51814 + j0,25348$	209,4761	-0,0284	0,0063	0,0001
	2	$0,4895 - j0,438$	214,1766	-0,0125	$0,48945 - j0,43803$	214,1856	-0,0125	0,009	0,0
	3	$-0,2798 + j0,206$	210,7543	-0,0239	$-0,27969 + j0,20569$	210,9546	-0,0234	0,2003	-0,0005
	4	$-0,4926 + j0,2611$	207,7464	-0,0315	$-0,49261 + j0,26112$	207,7567	-0,0315	0,0103	0,0
	5	$0,4067 + j0,3395$	209,1831	-0,0011	$0,40668 + j0,33946$	209,1926	-0,001	0,0095	-0,0001
	6	$-0,4742 + j0,2478$	207,3272	-0,0341	$-0,47412 + j0,24785$	207,3362	-0,0342	0,009	0,0001
	7	$0,2544 - j0,6492$	214,1030	-0,0401	$0,25434 - j0,6492$	214,1119	-0,0402	0,0089	0,0001
	8	$-0,4374 + j0,2358$	209,709	-0,048	$-0,4374 + j0,23585$	209,7186	-0,048	0,0096	0,0
	9	$0,379 + j0,0187$	211,357	-0,0232	$0,37902 + j0,01866$	211,3665	-0,0232	0,0095	0,0

Таблица 3.6

Результаты коррекции установившегося режима
двадцатидвухузловой электрической системы (см. рисунок)

ΔP , МВт	Но- мер узла	P , МВт	Q , Мвар	Точный метод		Метод чувствительности	
				U' , кВ	U'' , кВ	U' , кВ	U'' , кВ
-10	БУ	–	–	235,00	0,0000	235,00	0,0000
	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	2	114,00	41,70	114,5132	-13,6913	114,5172	-13,7003
	3	-42,30	30,70	110,8752	-18,0635	110,8796	-18,0651
	4	-20,90	39,70	113,7029	-15,3897	113,7104	-15,3901
	5	27,70	1,40	114,7862	-11,5102	114,7461	-11,5213
	6	0,0	20,00	10,4083	-0,7433	10,4152	-0,7243
	7	-86,00	-57,80	116,2370	-13,8304	116,2307	-13,8413
	8	-95,00	-55,00	110,7532	-18,0837	110,7413	-18,0937
	9	-75,80	-51,40	112,7466	-15,0514	112,7618	-15,0721
	10	-164,00	-87,00	110,4727	-19,7516	110,4901	-19,7717
	11	-59,00	-55,30	218,7270	-15,3723	218,7312	-15,3814
	12	-22,20	-13,50	114,0991	-12,3166	114,0994	-12,3201
	13	-42,80	-26,00	107,7673	-20,6715	107,7722	-20,6900
	14	-75,00	-45,00	110,7387	-18,6377	110,7401	-18,6477
	15	-40,00	-20,00	223,3068	-12,9324	223,3111	-12,9424
	16	-26,00	-18,00	114,4815	-15,0357	114,4841	-15,0351
	17	-46,60	-32,30	113,6208	-15,2208	113,6418	-15,2411
	18	-50,00	0,0	219,5345	-18,6674	219,5372	-18,6729
	19	-7,40	-5,20	114,6743	-11,7346	114,6813	-11,7419
	20	-200,00	0,0	232,7989	-4,8207	232,8001	-4,8312
21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
-87	БУ	–	–	235,00	0,0000	235,00	0,0000
	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	2	114,00	41,70	115,6342	-11,5544	115,6971	-11,5942
	3	-42,30	30,70	112,2832	-15,5189	113,3422	-15,7489
	4	-20,90	39,70	114,6155	-13,5170	114,6172	-13,6074
	5	27,70	1,40	115,3136	-10,0955	116,0234	-10,1251
	6	0,0	20,00	10,4431	-0,6519	10,4824	-0,7224
	7	-86,00	-57,80	116,5117	-12,9955	116,5813	-12,9955
	8	-95,00	-55,00	112,1603	-15,5485	112,2278	-15,6485
	9	-75,80	-51,40	113,9544	-12,8367	113,9942	-12,8994
	10	-87,00	-87,00	112,8210	-15,4422	113,0120	-15,4991
	11	-59,00	-55,30	220,0480	-13,0497	220,1983	-13,1492
	12	-22,20	-13,50	114,6116	-10,9663	114,7213	-10,9696
	13	-42,80	-26,00	109,7518	-17,1875	110,0213	-17,1999
	14	-75,00	-45,00	111,5455	-16,9278	111,7423	-17,0211
	15	-40,00	-20,00	223,6500	-12,1852	223,7890	-12,2162
	16	-26,00	-18,00	114,9453	-13,9082	115,0211	-13,9624
	17	-46,60	-32,30	113,8660	-14,5051	113,9713	-14,7123
	18	-50,00	0,0	219,9296	-17,8310	219,9724	-18,0120
	19	-7,40	-5,20	115,2096	-10,3075	115,3421	-10,9127
	20	-200,00	0,0	233,1029	-4,3210	233,1622	-4,7110
21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

Анализ табл. 3.4, 3.5, 3.6, а также других результатов, полученных при исследовании электрических систем, состоящих из 22, 46, 100 и большего числа узлов, показал, что предложенный метод коррекции дает расхождение относительно классического по составляющим узловых комплексных токов в среднем на величину 0,001 и 0,002 соответственно, а по составляющим узловых комплексных напряжений на величину 0,6 и 0,001 соответственно.

Разумеется, такая точность полностью удовлетворяет требованиям, и предложенный метод коррекции может быть использован для решения практических задач.

С целью определения диапазона изменения режимных параметров, для которого точность предлагаемого метода остается допустимой, независимые параметры возмущения изменились в пределах 50 %.

Обобщение результатов, приведенных в таблицах, а также других результатов исследований, позволяет заключить следующее: при таких значительных изменениях варьируемых параметров погрешность коррекции относительно точного метода достигает трех и более процентов, в то время как при изменениях до 25 % погрешность не превышает 1 %.

Другой аспект исследований заключается в сравнении точности Y -программы коррекции установившегося режима с Z -программой. Результаты предшествующих исследований показали, что использование Z -формы записи уравнений состояния приводит к сокращению числа итераций по сравнению с Y -формой при расчете установившегося режима по методу Ньютона – Рафсона.

Очевидно, что в данном случае при Z -форме записи уравнений состояния результат каждой итерации ближе к окончательному решению. В то же время для осуществления коррекции, линейная модель которой описывается выражением (2.3.18), необходимо один раз выполнить обращение матрицы Якоби.

Указанные соображения, подтвержденные результатами расчетов, показали, что коррекция установившегося режима, основанная на

Z-форме записи уравнений состояния, приводит к получению более точных результатов.

Для подтверждения вышесказанного рассмотрим чувствительность установившегося режима десятиузловой электрической системы к изменению реактивной мощности узла 1 на 15 Мвар. Результаты коррекции точным методом, а также методом чувствительности в Y- и Z-формах приведены в табл. 3.7.

Как видно из табл. 3.5 наибольшая погрешность коррекции по модулю напряжения для исследуемой схемы при Z-форме записи уравнений состояния составляет 0,0152 кВ, в то время как при Y-форме – 0,125 кВ. При этом в рассмотренном режиме имеет место довольно значительное (30 %) изменение мощности нагрузочного узла.

Таблица 3.7

Результаты коррекции установившегося режима
десятиузловой электрической системы

Номер узла	Точный метод		Метод чувствительности в Y-форме		Метод чувствительности в Z-форме	
	U, кВ	Ψ, рад	U, кВ	Ψ, рад	U, кВ	Ψ, рад
0						
1	211,2175	-0,0318	211,2338	-0,0317	211,2327	-0,0317
2	215,2283	-0,0162	215,9360	-0,0162	215,9344	-0,0162
3	212,5636	-0,0272	212,5721	-0,0271	212,5685	-0,0272
4	209,5575	-0,0347	209,5691	-0,0347	209,5634	-0,0347
5	211,0360	-0,0050	211,0481	-0,0050	211,0431	-0,0052
6	209,1781	-0,0378	209,1915	-0,0378	209,1852	-0,0378
7	216,0163	-0,0444	216,0291	-0,0444	216,0222	-0,0445
8	210,9518	-0,0487	211,0103	-0,0486	210,9605	-0,0488
9	213,9195	-0,0263	213,1445	-0,0261	213,0308	-0,0264

Таким образом, применение Z-алгоритма в анализе чувствительности приводит к увеличению точности расчетов, что немало важно при решении задач диспетчерского управления режимами и связанных с ними оптимизационных задач.

3.5. Выводы и рекомендации

1. Разработана общая методика расчета и коррекции режимных параметров электрических систем при Z -форме записи уравнений состояния.

2. Время полной коррекции установившегося режима электрической системы по предложенному методу эквивалентно времени лишь одной итерации по классическому анализу.

3. Сохраняя практически те же, что и в Y -модели характеристики по времени счета, Z -модель коррекции режима обеспечивает более точные результаты расчетов.

4. Преимущество в точности расчетов предлагаемой Z -модели позволяет расширить диапазон изменений независимых параметров управления или возмущения, для которого обеспечивается допустимая погрешность результатов коррекции.

5. Если V -алгоритм коррекции режима обеспечивает необходимую точность лишь при отклонениях независимых параметров на 15 – 20 %, то Z -алгоритм позволяет получить те же результаты при изменениях параметров управления в среднем до 25 %.

6. Разработан вычислительный алгоритм метода и на его основе составлена программа к цифровым вычислительным машинам, позволяющая решать практические задачи для электроэнергетических систем.

4. КОРРЕКЦИЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ (Y – Z)-ФОРМЕ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ

В отличие от описанных выше Y- и Z-форм уравнений установившихся режимов электрических систем в настоящее время широко развиваются и гибридные, или смешанные типы уравнений установившихся режимов. По сути, гибридные уравнения установившихся режимов электрических систем основаны на сочетании Y- и Z-форм уравнений, что обеспечивает преимущества при решении практических задач.

4.1. Уравнения установившихся режимов электрических систем при (Y – Z)-форме записи состояния сети

Для получения математической модели воспользуемся матричным уравнением (2.2.1) $\dot{I} = Y \cdot \dot{U}$, в котором \dot{I} – столбцевая матрица комплексных токов независимых узлов; Y – неособенная квадратная матрица узловых комплексных проводимостей независимых узлов относительно базисного узла; \dot{U} – столбцевая матрица комплексных узловых напряжений относительно напряжения базисного узла.

Для дальнейших рассуждений необходимо выбрать следующую систему индексов: $m(n) = 0, 1, 2, \dots, \Gamma$ (нулевой индекс соответствует базисному узлу) для стационарных узлов; $K(l) = \Gamma + 1, \Gamma + 2, \dots, \Gamma + N = N$ для нагрузочных узлов. В соответствии с принятой системой индексов векторное уравнение (2.2.1) представим в блочно-матричной форме:

$$\begin{bmatrix} I_m \\ I_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{mn} & Y_{mk} \\ Y_{ln} & Y_{lk} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{n0} \\ U_{k0} \end{bmatrix}. \quad (4.1.1)$$

В развернутой форме данное уравнение можно записать в виде двух матричных уравнений:

$$\dot{I}_m = Y_{mn} \dot{U}_{n0} + Y_{mk} \dot{U}_{k0}; \quad (4.1.2)$$

$$\dot{I}_l = Y_{ln} \dot{U}_{n0} + Y_{lk} \dot{U}_{k0}. \quad (4.1.3)$$

Из уравнения (4.1.3) определим

$$\dot{U}_{k0} = Y_{lk}^{-1} \dot{I}_l - Y_{lk}^{-1} Y_{ln} \dot{U}_{n0} \quad (4.1.4)$$

и, подставив это выражение в (4.1.2), получим

$$\dot{I}_m = (Y_{mn} - Y_{mk} Y_{lk}^{-1} Y_{ln}) \dot{U}_{n0} + Y_{mk} \dot{I}_l. \quad (4.1.5)$$

Объединяя уравнения (4.1.4) и (4.1.5), можно построить блочно-матричное уравнение следующего вида:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_m \\ \dot{U}_{k0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{mn} - Y_{mk} & Y_{lk}^{-1} Y_{ln} \\ -Y_{lk}^{-1} & Y_{ln} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_{n0} \\ \dot{I}_l \end{bmatrix}. \quad (4.1.6)$$

Полученное уравнение называется системным, или гибридным уравнением состояния электрической системы. Чтобы представить матричное уравнение (4.1.6) в более компактной форме, введем следующие обозначения:

$$Y_{m,n} = Y_{mn} - Y_{mk} Y_{lk}^{-1} Y_{ln}; \quad (4.1.7)$$

$$A_{m,l} = Y_{mk} Y_{lk}^{-1}; \quad (4.1.8)$$

$$C_{k,n} = -Y_{lk}^{-1} \cdot Y_{ln}; \quad (4.1.9)$$

$$Z_{k,l} = Y_{lk}^{-1}. \quad (4.1.10)$$

С учетом принятых обозначений получим

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_m \\ \dot{U}_{k0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{m,n} & A_{m,l} \\ C_{k,n} & Z_{k,l} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_{n0} \\ \dot{I}_l \end{bmatrix}. \quad (4.1.11)$$

Очевидно, элементы подматриц $A_{m,l}$ и $C_{k,n}$ являются безразмерными величинами. Перейдем к алгебраической форме записи матричного уравнения (4.1.11):

$$\dot{I}_m = \sum_{n=1}^{\Gamma} Y_{m,n} \dot{U}_{n0} + \sum_{l=\Gamma+1}^N A_{m,l} \dot{I}_l; \quad (4.1.12)$$

$$\dot{U}_{k0} = \sum_{n=1}^{\Gamma} C_{k,n} \dot{U}_{n0} + \sum_{l=\Gamma+1}^N Z_{k,l} \dot{I}_l. \quad (4.1.13)$$

Учитывая, что $\dot{U}_{k0} = \dot{U}_n - \dot{U}_0$ и $\dot{U}_{k0} = \dot{U}_k - \dot{U}_0$, представим уравнения (4.1.12) и (4.1.13) в следующем виде:

$$\dot{I}_m = \dot{I}_{Bm} + \sum Y_{m,n} \dot{U}_n + \sum A_{m,l} \dot{I}_l; \quad (4.1.14)$$

$$\dot{U}_k = \dot{U}_{Bk} + \sum C_{k,n} \dot{U}_n + \sum Z_{k,l} \dot{I}_l, \quad (4.1.15)$$

где

$$\dot{I}_{\text{Б}m} = - \sum Y_{m,n} \dot{U}_0; \quad (4.1.16)$$

$$\dot{U}_{\text{Б}k} = (1 - \sum \dot{C}_{k,n}) \dot{U}_0. \quad (4.1.17)$$

Умножая уравнения (4.1.16) и (4.1.17) на \hat{U}_m и \hat{I}_k соответственно и учитывая, что

$$\hat{U}_m I_m = \dot{P}_m - jQ_m; \quad (4.1.18)$$

$$\dot{U}_k \hat{I}_k = P_k + jQ_k, \quad (4.1.19)$$

получим выражения для узловых комплексных мощностей:

$$P_m - jQ_m = \dot{I}_{\text{Б}m} \hat{U}_m + \sum_{n=1}^{\Gamma} Y_{m,n} \dot{U}_n \hat{U}_m + \sum_{l=\Gamma+1}^N \dot{A}_{m,l} \dot{I}_l \hat{U}_m; \quad (4.1.20)$$

$$P_k + jQ_k = \dot{U}_{\text{Б}k} \hat{I}_k + \sum_{n=1}^{\Gamma} \dot{C}_{k,n} \dot{U}_n \hat{I}_k + \sum_{l=\Gamma+1}^N Z_{k,l} \dot{I}_l \hat{I}_k. \quad (4.1.21)$$

Разлагая (4.1.20) и (4.1.21) на составляющие, находим выражения для узловых активных и реактивных мощностей:

$$\left. \begin{aligned} P_m &= P_{\text{Б}m} + \sum_{n=1}^{\Gamma} [g_{m,n}(U'_m U'_n + U''_m U''_n) + b_{m,n}(U''_m U''_n - U'_m U'_n)]; \\ Q_m &= Q_{\text{Б}m} + \sum_{n=1}^{\Gamma} [g_{m,n}(U''_m U''_n - U'_m U'_n) - b_{m,n}(U'_m U'_n + U''_m U''_n)]; \end{aligned} \right\} \quad (4.1.22)$$

$$\left. \begin{aligned} P_k &= P_{\text{Б}k} + \sum_{l=\Gamma+1}^N [R_{k,l}(I'_k I'_l + I''_k I''_l) + x_{k,l}(I''_k I''_l - I'_k I'_l)]; \\ Q_k &= Q_{\text{Б}k} + \sum_{l=\Gamma+1}^N [R_{k,l}(I''_k I''_l - I'_k I'_l) - x_{k,l}(I'_k I'_l + I''_k I''_l)]. \end{aligned} \right\} \quad (4.1.23)$$

В системе уравнений (4.1.22) U' , U'' являются составляющими соответствующих узловых напряжений, а в системе уравнений (4.1.23) I' , I'' – составляющие соответствующих узловых токов.

Здесь величины P_{Bm} , Q_{Bm} , P_{Bk} , Q_{Bk} определяются как

$$\left. \begin{aligned} P_{Bm} &= P_{Bm}^* + \sum_{l=\Gamma+1}^N [a'_{k,l}(U'_m I'_l + U''_m I''_l) + a''_{m,l}(U''_m I'_l - U'_m I''_l)]; \\ Q_{Bm} &= Q_{Bm}^* + \sum_{l=\Gamma+1}^N [a'_{m,l}(U'_m I'_l - U'_m I_l) - a''_{m,l}(U'_m I'_l + U''_m I''_l)]; \end{aligned} \right\} \quad (4.1.24)$$

$$\left. \begin{aligned} P_{Bk} &= P_{Bk}^* + \sum_{n=1}^{\Gamma} [C'_{k,n}(I'_k U'_n - I''_k U''_n) + C''_{k,n}(I''_k U'_n - I'_k U''_n)]; \\ Q_{Bk} &= Q_{Bk}^* + \sum_{n=1}^{\Gamma} [C'_{k,n}(I_k U'_n - I'_k U_n) - C''_{k,n}(I'_k U'_n - I''_k U''_n)]; \end{aligned} \right\} \quad (4.1.25)$$

где, в свою очередь, приняты следующие обозначения:

$$a'_{m,l} = R_{\varepsilon}(\dot{A}_{m,l}); \quad a''_{m,l} = I_m(\dot{A}_{m,l}); \quad (4.1.26)$$

$$C'_{k,n} = R_{\varepsilon}(\dot{C}_{k,n}); \quad C''_{k,n} = I_m(\dot{C}_{k,n}). \quad (4.1.27)$$

Что касается величин P_{Bm}^* , Q_{Bm}^* , P_{Bk}^* , Q_{Bk}^* , то они определяются следующим образом:

$$P_{Bm}^* = - \sum_{n=1}^{\Gamma} (g_{m,n} U'_m + b_{m,n} U''_m) U_o; \quad (4.1.28)$$

$$Q_{Bm}^* = \sum_{n=1}^{\Gamma} (g_{m,n} U''_m - b_{m,n}) U'_m U_o; \quad (4.1.29)$$

$$P_{Bk}^* = I'_k U_o - \sum_{n=1}^{\Gamma} (C'_{k,n} I'_k + C''_{k,n} I''_k) U_o; \quad (4.1.30)$$

$$Q_{Bk}^* = I''_k U_o + \sum_{n=1}^{\Gamma} (C'_{k,n} I''_k - C''_{k,n} I'_k) U_o. \quad (4.1.31)$$

Представим системы уравнений (4.1.24) и (4.1.23) в виде следующих неявных функций:

$$\left. \begin{aligned} P_m &= P_{Bm} + f_{pm}(U'_n, U''_n); \\ Q_m &= Q_{Bm} + f_{qm}(U'_n, U''_n); \end{aligned} \right\} \quad (4.1.32)$$

$$\left. \begin{aligned} P_k &= P_{Bk} + f_{pk}(I'_l, I''_l); \\ Q_k &= Q_{Bk} + f_{qk}(I'_l, I''_l); \end{aligned} \right\} \quad (4.1.33)$$

Здесь функции f_{pm} , f_{pk} имеют размерности активных мощностей, а f_{qm} , f_{qk} – реактивных мощностей и определяются по нижеприведенным выражениям:

$$\begin{cases} f_{pm} = \sum [g_{m,n}(U'_m U'_n + U''_m U''_n) + b_{m,n}(U''_m U''_n - U'_m U'_n)]; \\ f_{qm} = \sum [g_{m,n}(U''_m U''_n - U'_m U'_n) - b_{m,n}(U'_m U'_n + U''_m U''_n)], \end{cases} \quad (4.1.34)$$

$$\begin{cases} f_{pk} = \sum_{l=\Gamma+1}^N [R_{k,l}(I'_k I'_l + I''_k I''_l) + x_{k,l}(I''_k I''_l - I'_k I'_l)], \\ f_{qk} = \sum_{l=\Gamma+1}^N [R_{k,l}(I''_k I''_l - I'_k I'_l) - x_{k,l}(I'_k I'_l + I''_k I''_l)]. \end{cases} \quad (4.1.35)$$

Далее представим (4.1.32) и (4.1.33) в виде

$$\begin{cases} F_{pm} = P_m - [P_{Bm} + f_{pm}(U'_n, U''_n)] = 0 \\ F_{qm} = Q_m - [Q_{Bm} + f_{qm}(U'_n, U''_n)] = 0 \end{cases} \quad (4.1.36)$$

$$\begin{cases} F_{pk} = P_k - [P_{Bk} + f_{pk}(I'_l, I''_l)] = 0 \\ F_{qk} = Q_k - [Q_{Bk} + f_{qk}(I'_l, I''_l)] = 0 \end{cases} \quad (4.1.37)$$

И еще более компактно

$$F_{Y(Z)} = (P, Q, U'_n, U''_n) = \begin{cases} F_{pm}(P, U'_n, U''_n) = 0, \\ F_{qm}(Q, U'_n, U''_n) = 0. \end{cases} \quad (4.1.38)$$

$$F_{Z(Y)} = (P, Q, I'_l, I''_l) = \begin{cases} F_{pk}(P, I'_l, I''_l) = 0, \\ F_{qk}(Q, I'_l, I''_l) = 0. \end{cases} \quad (4.1.39)$$

Здесь (4.1.38) представляет собой $Y(Z)$ – блочное нелинейное векторное уравнение, а (4.1.39) – $Z(Y)$ – блочное нелинейное векторное уравнение установившегося режима $(Y - Z)$ -математической модели. Таким образом, при смешанной $(Y - Z)$ -форме записи состояния сети имеем две системы нелинейных уравнений, которые необходимо решить для получения параметров установившегося режима исследуемой электрической системы. Причем в системе (4.1.36) искомыми переменными будут U'_n и U''_n , а в системе (4.1.37) – I'_l и I''_l .

Состав уравнений из систем (4.1.36) и (4.1.37) зависит от характера заданной исходной информации относительно узлов электрической системы. Так, например, если относительно всех независимых стационарных узлов заданы активные и реактивные мощности, т. е. если они являются узлами типа $P - Q$, то векторные уравнения (4.1.38) представляются как совокупность нелинейных узловых активных и реактивных мощностей.

В случае, когда независимые стационарные узлы считаются узлами типа $P - U$, векторные уравнения (4.1.38) можно представить состоящими только из нелинейных алгебраических уравнений активных мощностей или из совокупности нелинейных алгебраических уравнений активных мощностей и напряжений.

В любом случае два блока систем уравнений (4.1.38) и (4.1.39) решаются отдельно методом Ньютона – Рафсона. При этом взаимосвязь между параметрами $Y(Z)$ - и $Z(Y)$ -блоков, как видно из (4.1.22) и (4.1.23), осуществляется посредством выражений (4.1.24) и (4.1.25).

4.2. Решение системы нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима

Нашей следующей целью будет не собственно расчет установившегося режима, а разработка методов его коррекции, поэтому остановимся подробно на решении систем нелинейных алгебраических уравнений, поскольку это необходимо для получения алгоритма чувствительности.

Используя понятие векторов X , V , W , относительно (4.1.38) и (4.1.39) можно получить следующую классификацию переменных:

$$X = \left[\begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} P_o \\ Q_o \end{array} \right\} \text{ для базисного или балансирующего узла;} \\ \left. \begin{array}{l} U' \\ U'' \end{array} \right\} \text{ для стационарных узлов как типа } P - Q, \text{ так и типа } P - U; \\ \left. \begin{array}{l} I' \\ I'' \end{array} \right\} \text{ для нагрузочных узлов типа } P - Q. \end{array} \right] \quad (4.2.1)$$

$$V = \begin{bmatrix} \left. \begin{matrix} U_o \\ \Psi_o \end{matrix} \right\} \text{ для базисного или балансирующего} \\ \text{узла, т. е. узла типа } U - \Psi; \\ \left. \begin{matrix} P \\ Q \end{matrix} \right\} \text{ для стационарных узлов типа } P - Q; \\ \left. \begin{matrix} P \\ U \end{matrix} \right\} \text{ для стационарных узлов типа } P - U. \end{bmatrix} \quad (4.2.2)$$

Что касается вектора независимых неуправляемых переменных W , то он включает в себя заданные активные и реактивные мощности нагрузочных узлов, как и в (2.4.3) и (3.3.3).

Применяя указанную классификацию переменных, векторные уравнения (4.1.38) и (4.1.39) можно соответственно представить как

$$F_C(X, V, W) = 0; \quad (4.2.3)$$

$$F_H(X, V, W) = 0. \quad (4.2.4)$$

Полученные уравнения представляют собой нелинейные векторные уравнения состояния электрической системы в $(Y - Z)$ -форме. Используя выражение (2.3.12), полученное на основании применения метода Ньютона – Рафсона, запишем рекуррентное выражение для определения численных значений элементов искомого вектора X системы уравнений (4.2.3)

$$X^{k+1} = X^k - \left[\frac{dF_C}{dX} \Big|_{X^k} \right]^{-1} F_C(X^k, V^0, W^0). \quad (4.2.5)$$

Здесь также $\frac{dF_C}{dX}$ является квадратной матрицей Якоби, порядок которой определяется числом независимых стационарных узлов. Если это число равно Γ , то порядок матрицы будет 2Γ .

Принимая во внимание (4.2.1), а также принятую выше индексацию стационарных узлов, рекуррентное выражение (4.2.5) запишем следующим образом:

$$\begin{bmatrix} U'_m \\ U''_m \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} U'_m \\ U''_m \end{bmatrix}^k - \begin{bmatrix} \frac{dF_{pm}}{dU'_n} & \frac{dF_{pm}}{dU''_n} \\ \frac{dF_{qm}}{dU'_n} & \frac{dF_{qm}}{dU''_n} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} F_{pm} \\ F_{qm} \end{bmatrix}, \quad (4.2.6)$$

а в развернутом виде

$$\begin{bmatrix} U'_1 \\ U'_2 \\ \vdots \\ U'_\Gamma \\ U''_1 \\ U''_2 \\ \vdots \\ U''_\Gamma \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} U'_1 \\ U'_2 \\ \vdots \\ U'_\Gamma \\ U''_1 \\ U''_2 \\ \vdots \\ U''_\Gamma \end{bmatrix}^k - \begin{bmatrix} \frac{dF_{p1}}{dU'_1} \frac{dF_{p1}}{dU'_2} \cdot \frac{dF_{p1}}{dU'_\Gamma} \frac{dF_{p1}}{dU''_1} \frac{dF_{p1}}{dU''_2} \cdot \frac{dF_{p1}}{dU''_\Gamma} \\ \frac{dF_{p2}}{dU'_1} \frac{dF_{p2}}{dU'_2} \cdot \frac{dF_{p2}}{dU'_\Gamma} \frac{dF_{p2}}{dU''_1} \frac{dF_{p2}}{dU''_2} \cdot \frac{dF_{p2}}{dU''_\Gamma} \\ \dots \\ \frac{dF_{p\Gamma}}{dU'_1} \frac{dF_{p\Gamma}}{dU'_2} \cdot \frac{dF_{p\Gamma}}{dU'_\Gamma} \frac{dF_{p\Gamma}}{dU''_1} \frac{dF_{p\Gamma}}{dU''_2} \cdot \frac{dF_{p\Gamma}}{dU''_\Gamma} \\ \frac{dF_{q1}}{dU'_1} \frac{dF_{q1}}{dU'_2} \cdot \frac{dF_{q1}}{dU'_\Gamma} \frac{dF_{q1}}{dU''_1} \frac{dF_{q1}}{dU''_2} \cdot \frac{dF_{q1}}{dU''_\Gamma} \\ \frac{dF_{q2}}{dU'_1} \frac{dF_{q2}}{dU'_2} \cdot \frac{dF_{q2}}{dU'_\Gamma} \frac{dF_{q2}}{dU''_1} \frac{dF_{q2}}{dU''_2} \cdot \frac{dF_{q2}}{dU''_\Gamma} \\ \dots \\ \frac{dF_{q\Gamma}}{dU'_1} \frac{dF_{q\Gamma}}{dU'_2} \cdot \frac{dF_{q\Gamma}}{dU'_\Gamma} \frac{dF_{q\Gamma}}{dU''_1} \frac{dF_{q\Gamma}}{dU''_2} \cdot \frac{dF_{q\Gamma}}{dU''_\Gamma} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} F_{p1} \\ F_{p2} \\ \vdots \\ F_{p\Gamma} \\ F_{q1} \\ F_{q2} \\ \vdots \\ F_{q\Gamma} \end{bmatrix} \quad (4.2.7)$$

Частные производные, входящие в рекуррентное выражение (4.2.6), определяются с помощью нижеприведенных выражений. При одинаковых индексах, когда $m = n$:

$$\frac{dF_{pm}}{dU'_m} = - \left[I'_{\text{Бк}} + \sum_{n=1}^{\Gamma} H_{m,n} + (g_{m,m} U'_m + b_{m,m} U''_m) \right]; \quad (4.2.8)$$

$$\frac{dF_{pm}}{dU''_m} = - \left[I''_{\text{Бк}} + \sum_{n=1}^{\Gamma} K_{m,n} + (g_{m,m} U'_m - b_{m,m} U''_m) \right]; \quad (4.2.9)$$

$$\frac{dF_{qm}}{dU''_m} = - \left[I''_{\text{Бк}} - \sum_{n=1}^{\Gamma} K_{m,n} + (g_{m,m} U''_m - b_{m,m} U'_m) \right]; \quad (4.2.10)$$

$$\frac{dF_{qm}}{dU'_m} = - \left[I'_{\text{Бк}} - \sum_{n=1}^{\Gamma} H_{m,n} - (g_{m,m} U'_m - b_{m,m} U''_m) \right], \quad (4.2.11)$$

где

$$H_{m,n} = g_{m,n} U'_n - b_{m,n} U''_n; \quad (4.2.12)$$

$$K_{m,n} = g_{m,n} U''_n + b_{m,n} U'_n. \quad (4.2.13)$$

В свою очередь,

$$I'_{\text{Бк}} = - \sum_{n=1}^{\Gamma} g_{m,n} U_o + \sum_{K=\Gamma+1}^N (a'_{mk} I'_k - a_{mk} I''_k); \quad (4.2.14)$$

$$I''_{\text{Бк}} = - \sum_{n=1}^{\Gamma} b_{m,n} U_o + \sum_{K=\Gamma+1}^N (a'_{mk} I''_k + a_{mk} I'_k). \quad (4.2.15)$$

При разных индексах, т. е. когда $m \neq n$

$$\frac{dF_{pm}}{dU'_n} = -(g_{m,n}U'_m + b_{m,n}U''_m); \quad (4.2.16)$$

$$\frac{dF_{pm}}{dU''_n} = -(g_{m,n}U''_m - b_{m,n}U'_m); \quad (4.2.17)$$

$$\frac{dF_{qm}}{dU'_n} = -(g_{m,n}U''_m - b_{m,n}U'_m); \quad (4.2.18)$$

$$\frac{dF_{qm}}{dU''_n} = -(-g_{m,n}U'_m - b_{m,n}U''_m). \quad (4.2.19)$$

Затем $\frac{dF_{pm}}{dU'_n} = -\frac{dF_{qm}}{dU''_n}; \quad \frac{dF_{qm}}{dU'_n} = \frac{dF_{pm}}{dU''_n}.$

Благодаря вводу обозначений

$$H'_{mnk} = I'_{Бк} + \sum H_{mn}; \quad K'_{mnk} = I''_{Бк} + \sum K_{mn}, \quad (4.2.20)$$

выражения для частных производных при $m = n$ принимают более компактный вид

$$\frac{dF_{pm}}{dU'_m} = -H'_{mnk} - (g_{mm}U'_m + b_{m,m}U''_m); \quad (4.2.21)$$

$$\frac{dF_{pm}}{dU''_m} = -K'_{mnk} - (g_{mm}U''_m) - b_{m,m}U'_m); \quad (4.2.22)$$

$$\frac{dF_{qm}}{dU'_m} = K'_{mnk} - (g_{mm}U''_m) - b_{m,m}U'_m); \quad (4.2.23)$$

$$\frac{dF_{qm}}{dU''_m} = -H'_{mnk} + (g_{mm}U'_m + b_{m,m}U''_m). \quad (4.2.24)$$

При этом выражения для определения активных и реактивных мощностей можно переписать в следующем виде:

$$\begin{cases} P_m = U'_m H'_{mnk} + U''_m K'_{mnk}; \\ Q_m = U'_m K'_{mnk} - U''_m H'_{mnk}, \end{cases} \quad (4.2.25)$$

а также иначе

$$P_m = -(g_{mm}U_m^2 + \frac{dF_{pm}}{dU'_m} U'_m + \frac{dF_{pm}}{dU''_m} U''_m); \quad (4.2.26)$$

$$Q_m = (b_{mm}U_m^2 - \frac{dF_{qm}}{dU'_m} U'_m - \frac{dF_{qm}}{dU''_m} U''_m). \quad (4.2.27)$$

Функции F_{pm}, F_{qm} будут

$$F_{pm} = P_m - (U'_m H'_{mnk} + U''_m K'_{mnk}); \quad (4.2.28)$$

$$F_{qm} = Q_m - (U'_m K'_{mnk} - U''_m H'_{mnk}). \quad (4.2.29)$$

Или в другой форме

$$F_{pm} = P_m - (-g_{mm} U_m^2 - \frac{dF_{pm}}{dU'_m} U'_m - \frac{dF_{pm}}{dU''_m} U''_m); \quad (4.2.30)$$

$$F_{qm} = Q_m - (b_{mm} U_m^2 - \frac{dF_{qm}}{dU'_m} U'_m - \frac{dF_{qm}}{dU''_m} U''_m). \quad (4.2.31)$$

Теперь рассмотрим решение нелинейного векторного уравнения (4.2.4). Проводя соответствующие преобразования, можно написать рекуррентное выражение, вытекающее из метода Ньютона – Рафсона:

$$X^{k+1} = X^k - \left[\frac{dF_H}{dX} \Big|_{X^k} \right]^{-1} F_H(X^k, V^0, W^0), \quad (4.2.32)$$

где $\frac{dF_H}{dX}$ – квадратная матрица Якоби, порядок которой определяется числом нагруженных узлов.

При числе нагруженных узлов, равном N , порядок матрицы Якоби будет $2N$. С учетом вышеприведенной классификации переменных, а также принятой системы индексов выражение (4.2.32) можно записать в переменных состояния

$$\begin{bmatrix} I'_k \\ I''_k \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} I'_k \\ I''_k \end{bmatrix}^k - \begin{bmatrix} \frac{dF_{pk}}{dI'_l} & \frac{dF_{pk}}{dI''_l} \\ \frac{dF_{qk}}{dI'_l} & \frac{dF_{qk}}{dI''_l} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} F_{pk} \\ F_{qk} \end{bmatrix}, \quad (4.2.33)$$

а в развернутом виде

$$\begin{bmatrix} I'_{\Gamma+1} \\ I'_{\Gamma+2} \\ \dots \\ I'_N \\ I''_{\Gamma+1} \\ I''_{\Gamma+2} \\ \dots \\ I''_N \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} I'_{\Gamma+1} \\ I'_{\Gamma+2} \\ \dots \\ I'_N \\ I''_{\Gamma+1} \\ I''_{\Gamma+2} \\ \dots \\ I''_N \end{bmatrix}^k - \begin{bmatrix} \frac{dF_{p,\Gamma+1}}{dI'_{\Gamma+1}} & \frac{dF_{p,\Gamma+1}}{dI'_{\Gamma+2}} & \frac{dF_{p,\Gamma+1}}{dI'_N} & \frac{dF_{p,\Gamma+1}}{dI''_{\Gamma+1}} & \frac{dF_{p,\Gamma+1}}{dI''_{\Gamma+2}} & \frac{dF_{p,\Gamma+1}}{dI''_N} \\ \frac{dF_{p,\Gamma+2}}{dI'_{\Gamma+1}} & \frac{dF_{p,\Gamma+2}}{dI'_{\Gamma+2}} & \frac{dF_{p,\Gamma+2}}{dI'_N} & \frac{dF_{p,\Gamma+2}}{dI''_{\Gamma+1}} & \frac{dF_{p,\Gamma+2}}{dI''_{\Gamma+2}} & \frac{dF_{p,\Gamma+2}}{dI''_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{dF_{p,N}}{dI'_{\Gamma+1}} & \frac{dF_{p,N}}{dI'_{\Gamma+2}} & \frac{dF_{p,N}}{dI'_N} & \frac{dF_{p,N}}{dI''_{\Gamma+1}} & \frac{dF_{p,N}}{dI''_{\Gamma+2}} & \frac{dF_{p,N}}{dI''_N} \\ \frac{dF_{q,\Gamma+1}}{dI'_{\Gamma+1}} & \frac{dF_{q,\Gamma+1}}{dI'_{\Gamma+2}} & \frac{dF_{q,\Gamma+1}}{dI'_N} & \frac{dF_{q,\Gamma+1}}{dI''_{\Gamma+1}} & \frac{dF_{q,\Gamma+1}}{dI''_{\Gamma+2}} & \frac{dF_{q,\Gamma+1}}{dI''_N} \\ \frac{dF_{q,\Gamma+2}}{dI'_{\Gamma+1}} & \frac{dF_{q,\Gamma+2}}{dI'_{\Gamma+2}} & \frac{dF_{q,\Gamma+2}}{dI'_N} & \frac{dF_{q,\Gamma+2}}{dI''_{\Gamma+1}} & \frac{dF_{q,\Gamma+2}}{dI''_{\Gamma+2}} & \frac{dF_{q,\Gamma+2}}{dI''_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{dF_{q,N}}{dI'_{\Gamma+1}} & \frac{dF_{q,N}}{dI'_{\Gamma+2}} & \frac{dF_{q,N}}{dI'_N} & \frac{dF_{q,N}}{dI''_{\Gamma+1}} & \frac{dF_{q,N}}{dI''_{\Gamma+2}} & \frac{dF_{q,N}}{dI''_N} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} F_{p,\Gamma+1} \\ F_{p,\Gamma+2} \\ \dots \\ F_{p,N} \\ F_{q,\Gamma+1} \\ F_{q,\Gamma+2} \\ \dots \\ F_{q,N} \end{bmatrix} \quad (4.2.34)$$

Таким образом, при смешанной $(Y - Z)$ -форме представления уравнений состояния для расчета параметров части электрической системы, содержащей только стационарные узлы, используется выражение (4.2.6), а для электрической системы, содержащей только нагру-

зочные узлы, – выражения (4.2.33). При этом, если в рекуррентном выражении (4.2.6) искомыми переменными будут составляющие узловых комплексных напряжений станций, то в рекуррентном выражении (4.2.33) – составляющие узловых комплексных токов нагрузок.

Частные производные матрицы Якоби, входящей в рекуррентное выражение (4.2.33), определяются по нижеприведенным выражениям.

При индексах, когда $K = l$:

$$\frac{dF_{pk}}{dI'_k} = - \left[U'_{Bk} + \sum_{l=r+1}^N D_{k,l} + (R_{kk}I'_k + X_{kk}I''_k) \right]; \quad (4.2.35)$$

$$\frac{dF_{pk}}{dI''_k} = - \left[U''_{Bk} + \sum_{l=r+1}^N E_{k,l} + (R_{kk}I''_k - X_{kk}I'_k) \right]; \quad (4.2.36)$$

$$\frac{dF_{qk}}{dI'_k} = - \left[U''_{Bk} + \sum_{l=r+1}^N E_{k,l} - (R_{kk}I''_k + X_{kk}I'_k) \right]; \quad (4.2.37)$$

$$\frac{dF_{qk}}{dI''_k} = - \left[U'_{Bk} + \sum_{l=r+1}^N D_{k,l} + (R_{kk}I'_k + X_{kk}I''_k) \right]; \quad (4.2.38)$$

где

$$D_{k,l} = R_{k,l}I'_l - X_{k,l}I''_l; \quad (4.2.39)$$

$$E_{k,l} = R_{k,l}I''_l + X_{k,l}I'_l. \quad (4.2.40)$$

С другой стороны,

$$U'_{Bk} = \left(1 - \sum_{n=1}^{\Gamma} C'_{k,n} \right) U_o + \sum_{n=1}^{\Gamma} (C'_{k,n}U'_n - C''_{k,n}U''_n); \quad (4.2.41)$$

$$U''_{Bk} = - \sum_{n=1}^{\Gamma} C''_{k,n}U_o + \sum_{n=1}^{\Gamma} (C'_{k,n}U''_n + C''_{k,n}U'_n). \quad (4.2.42)$$

При разных индексах, когда $K \neq l$:

$$\frac{dF_{pk}}{dI'_l} = -(R_{k,l}I'_k + X_{k,l}I''_k); \quad (4.2.43)$$

$$\frac{dF_{pk}}{dI''_l} = -(R_{k,l}I''_k - X_{k,l}I'_k); \quad (4.2.44)$$

$$\frac{dF_{qk}}{dI'_l} = -(R_{k,l}I''_k + X_{k,l}I'_k); \quad (4.2.45)$$

$$\frac{dF_{qk}}{dI''_l} = -(R_{k,l}I'_k + X_{k,l}I''_k). \quad (4.2.46)$$

Из приведенных выражений нетрудно заметить, что

$$\frac{dF_{pk}}{dI'_l} = \frac{dF_{qk}}{dI''_l}; \quad \frac{dF_{pk}}{dI''_l} = -\frac{dF_{qk}}{dI'_l}. \quad (4.2.47)$$

Если ввести обозначения

$$D'_{kln} = U_{\text{БК}} + \sum_{l=\Gamma+1}^N D_{kl}; \quad E'_{kln} = U_{\text{БК}} + \sum_{l=\Gamma+1}^N E_{kl}; \quad (4.2.48)$$

то частные производные при $l = k$ можно представить в следующем виде:

$$\frac{dF_{pk}}{dI'_k} = -D'_{kln} - (R_{kk}I'_k + X_{kk}I''_k); \quad (4.2.49)$$

$$\frac{dF_{pk}}{dI''_k} = -E'_{kln} - (R_{kk}I''_k - X_{kk}I'_k); \quad (4.2.50)$$

$$\frac{dF_{qk}}{dI'_k} = -E'_{kln} + (R_{kk}I''_k - X_{kk}I'_k); \quad (4.2.51)$$

$$\frac{dF_{qk}}{dI''_k} = D'_{kln} - (R_{kk}I'_k + X_{kk}I''_k). \quad (4.2.52)$$

4.3. Смешанные уравнения установившегося режима при наличии стационарных узлов типа $P - U$ и соответствующие выражения чувствительности

Рассмотрим случай, когда для входящих в схему исследуемой электрической системы стационарных узлов считаются заданными активная мощность и модуль напряжения. Тогда из системы уравнений (4.1.38), описывающей состояние части электрической схемы, содержащей только стационарные узлы, можно исключить уравнения для реактивных мощностей, а система уравнений (4.1.39) останется без изменений. Однако при этом необходимо пользоваться соотношением

$$U_m^2 = (U'_m)^2 + (U''_m)^2, \quad (4.3.1)$$

составленным для стационарных узлов.

Таким образом, система уравнений, отражающих состояние электрической системы при данной постановке задачи, будет:

$$F_{pm} = P_m - [P_{\text{БК}} + f_{pm}(U'_n, U''_n)] = 0; \quad (4.3.2)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{pk} &= P_k - [P_{\text{БК}} + f_{pk}(I'_l, I''_l)] = 0 \\ F_{qk} &= Q_k - [Q_{\text{БК}} + f_{qk}(I'_l, I''_l)] = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.3.3)$$

разумеется, с учетом (4.3.1).

Рекуррентное выражение (4.2.6) при этом упрощается и принимает вид

$$[U'_m]^{k+1} = [U'_m]^k - \left[\frac{dF_{pm}}{dU'_n} \right]^{-1} \cdot [F_{pm}]. \quad (4.3.4)$$

Причем для решения задачи необходимо одновременно воспользоваться выражением (4.3.1).

Однако можно непосредственно рассмотреть совместное решение нелинейных алгебраических выражений:

$$\left. \begin{aligned} F_{pm} &= P_m - [P_{Бm} + f_{pm}(U'_n, U''_n)] = 0; \\ F_{um} &= U_m^2 - (U'_m)^2 - (U''_m)^2 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.3.5)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{pk} &= P_k - [P_{Бk} + f_{pk}(I'_l, I''_l)] = 0; \\ F_{qk} &= Q_k - [Q_{Бk} + f_{qk}(I'_l, I''_l)] = 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.3.6)$$

Рекуррентное выражение, вытекающее из метода Ньютона – Рафсона, для системы уравнений (4.3.5) примет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} U'_m \\ U''_m \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} U'_m \\ U''_m \end{bmatrix}^k - \begin{bmatrix} \frac{dF_{pm}}{dU'_n} & \frac{dF_{pm}}{dU''_n} \\ \frac{dF_{qm}}{dU'_n} & \frac{dF_{qm}}{dU''_n} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} F_{pm} \\ F_{qm} \end{bmatrix}, \quad (4.3.7)$$

что в развернутой форме представлено как

$$\begin{bmatrix} U'_1 \\ U'_2 \\ \dots \\ U'_\Gamma \\ U''_1 \\ U''_2 \\ \dots \\ U''_\Gamma \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} U'_1 \\ U'_2 \\ \dots \\ U'_\Gamma \\ U''_1 \\ U''_2 \\ \dots \\ U''_\Gamma \end{bmatrix}^k - \begin{bmatrix} \frac{dF_{p1}}{dU'_1} \frac{dF_{p1}}{dU'_2} \frac{dF_{p1}}{dU'_\varepsilon} \frac{dF_{p1}}{dU''_1} \frac{dF_{p1}}{dU''_2} \frac{dF_{p1}}{dU''_\varepsilon} \\ \frac{dF_{p2}}{dU'_1} \frac{dF_{p2}}{dU'_2} \frac{dF_{p2}}{dU'_\varepsilon} \frac{dF_{p2}}{dU''_1} \frac{dF_{p2}}{dU''_2} \frac{dF_{p2}}{dU''_\varepsilon} \\ \dots \\ \frac{dF_{p\varepsilon}}{dU'_1} \frac{dF_{p\varepsilon}}{dU'_2} \frac{dF_{p\varepsilon}}{dU'_\varepsilon} \frac{dF_{p\varepsilon}}{dU''_1} \frac{dF_{p\varepsilon}}{dU''_2} \frac{dF_{p\varepsilon}}{dU''_\varepsilon} \\ \frac{dF_{u1}}{dU'_1} \frac{dF_{u1}}{dU'_2} \frac{dF_{u1}}{dU'_\varepsilon} \frac{dF_{u1}}{dU''_1} \frac{dF_{u1}}{dU''_2} \frac{dF_{u1}}{dU''_\varepsilon} \\ \frac{dF_{u2}}{dU'_1} \frac{dF_{u2}}{dU'_2} \frac{dF_{u2}}{dU'_\varepsilon} \frac{dF_{u2}}{dU''_1} \frac{dF_{u2}}{dU''_2} \frac{dF_{u2}}{dU''_\varepsilon} \\ \dots \\ \frac{dF_{u\varepsilon}}{dU'_1} \frac{dF_{u\varepsilon}}{dU'_2} \frac{dF_{u\varepsilon}}{dU'_\varepsilon} \frac{dF_{u\varepsilon}}{dU''_1} \frac{dF_{u\varepsilon}}{dU''_2} \frac{dF_{u\varepsilon}}{dU''_\varepsilon} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} F_{p1} \\ F_{p2} \\ \dots \\ F_{p\varepsilon} \\ F_{u1} \\ F_{u2} \\ \dots \\ F_{u\varepsilon} \end{bmatrix} \quad (4.3.8)$$

Элементы двух верхних блоков $\frac{dF_{pm}}{dU'_n}$ и $\frac{dF_{pm}}{dU''_n}$ матрицы Якоби определяются формулами (4.2.8), (4.2.9) для одинаковых индексов и (4.2.16) и (4.2.17) – для различных индексов. Частные производные $\frac{dF_{Um}}{dU'_n}$ и $\frac{dF_{Um}}{dU''_n}$ находятся непосредственно из второго уравнения системы (4.3.5)

$$\frac{dF_{Um}}{dU'_m} = -2U'_m; \quad (4.3.9)$$

$$\frac{dF_{Um}}{dU''_m} = -2U''_m; \quad (4.3.9a)$$

$$\frac{dF_{Um}}{dU'_n} = 0; \quad (4.3.10)$$

$$\frac{dF_{Um}}{dU''_n} = 0. \quad (4.3.11)$$

Рекуррентное выражение для системы уравнений (4.3.6) получено из выражения (4.2.33).

Перейдем к получению выражений чувствительности, позволяющих скорректировать известный установившийся режим электрической системы. Рассмотрим общий случай, когда на состояние электрической системы влияют изменения параметров группы управления V и группы W . При смешанной ($Y - Z$)-форме уравнение установившегося режима состояний электрической системы описывается двумя подсистемами алгебраических уравнений вида (4.1.38) и (4.1.39), а в неявной форме

$$\begin{cases} F_{p,Y(Z)}(X_{Y(Z)}, V, W) = 0, \\ F_{q,Y(Z)}(X_{Y(Z)}, V, W) = 0, \end{cases} \quad (4.3.12)$$

$$\begin{cases} F_{p,Z(Y)}(X_{Z(Y)}, V, W) = 0, \\ F_{q,Z(Y)}(X_{Z(Y)}, V, W) = 0. \end{cases} \quad (4.3.13)$$

Рассмотрим сначала подсистему (4.3.12), которую запишем

$$F_{Y(Z)}(X_{Y(Z)}, V, W) = 0. \quad (4.3.14)$$

Предположим произошло изменение параметров вектора состояния ΔX , вызванное изменением ΔV управляемых параметров и изменением ΔW неуправляемых параметров. Тогда подсистема уравнений (4.3.14) примет следующий вид:

$$F_{Y(Z)}(X_{Y(Z)}^p + \Delta X_{Y(Z)}, V^o + \Delta V, W^o + \Delta W) = 0, \quad (4.3.15)$$

где $X_{Y(Z)}^p$ – подвектор переменных состояний, соответствующих станционным узлам в заданном исходном режиме с заданными и общими для обеих подсистем параметрами векторов V^o и W^o .

Для получения линейной модели коррекции параметров подсистемы (4.3.15) систему уравнений разложим в ряд Тейлора. Пренебрегая нелинейными членами разложения, будем иметь

$$F_{Y(Z)}(X_{Y(Z)}^p, V^o, W^o) + \left| \frac{dF_{Y(Z)}}{dX_{Y(Z)}} \right|_{X, V, W} \Delta X_{Y(Z)} + \left| \frac{dF_{Y(Z)}}{dV} \right|_{X, V, W} \Delta V + \left| \frac{dF_{Y(Z)}}{dW} \right|_{X, V, W} \Delta W + \dots = 0. \quad (4.3.16)$$

Учитывая, что $F_{Y(Z)}(X_{Y(Z)}^p, V^o, W^o) = 0$ и решая уравнение (4.3.16) относительно ΔX , получим

$$\Delta X_{Y(Z)} = - \left| \frac{dF_{Y(Z)}}{dX_{Y(Z)}} \right|_{X^p} \frac{dF_{Y(Z)}}{dV} \Delta V - \left| \frac{dF_{Y(Z)}}{dX_{Y(Z)}} \right|_{X^p} \frac{dF_{Y(Z)}}{dW} \Delta W. \quad (4.3.17)$$

И окончательно с учетом (2.3.19) вектор параметров нового режима

$$X_{Y(Z)}^H = X_{Y(Z)}^p - \left(\left| \frac{dF_{Y(Z)}}{dX_{Y(Z)}} \right|_{X^p} \right)^{-1} \frac{dF_{Y(Z)}}{dV} \Delta V - \left(\left| \frac{dF_{Y(Z)}}{dX_{Y(Z)}} \right|_{X^p} \right)^{-1} \frac{dF_{Y(Z)}}{dW} \Delta W. \quad (4.3.18)$$

Рассмотрим случай, когда уравнения установившегося режима составлены для системы, содержащей независимые стационарные узлы только типа $P - Q$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} U'_m \\ U''_m \end{bmatrix}^H &= \begin{bmatrix} U'_m \\ U''_m \end{bmatrix}^P - \begin{bmatrix} \frac{dF_{pm}}{dU'_n} & \frac{dF_{pm}}{dU''_n} \\ \frac{dF_{qm}}{dU'_n} & \frac{dF_{qm}}{dU''_n} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dF_{pm}}{dP_c} & \frac{dF_{pm}}{dQ_c} \\ \frac{dF_{qm}}{dP_c} & \frac{dF_{qm}}{dQ_c} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_c \\ \Delta Q_c \end{bmatrix} - \\ &- \begin{bmatrix} \frac{dF_{pm}}{dU'_n} & \frac{dF_{pm}}{dU''_n} \\ \frac{dF_{qm}}{dU'_n} & \frac{dF_{qm}}{dU''_n} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dF_{pm}}{dP_H} & \frac{dF_{pm}}{dQ_H} \\ \frac{dF_{qm}}{dP_H} & \frac{dF_{qm}}{dQ_H} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_H \\ \Delta Q_H \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (4.3.19)$$

где $C = 1, 2, \dots, M$ и $H = 1, 2, \dots, L$ – индексы параметров управления и возмущения соответственно.

$$\frac{dF_{Y(Z)}}{dW} = \begin{bmatrix} \frac{dF_{pm}}{dI'_H} & \frac{dF_{pm}}{dI''_H} \\ \frac{dF_{qm}}{dI'_H} & \frac{dF_{qm}}{dI''_H} \end{bmatrix}. \quad (4.3.21)$$

При этом выражение для коррекции режима $Y(Z)$ -подсистемы при $\Delta V = 0$ можно записать следующим образом:

$$\begin{bmatrix} U'_m \\ U''_m \end{bmatrix}^H = \begin{bmatrix} U'_m \\ U''_m \end{bmatrix}^P - \begin{bmatrix} \frac{dF_{pm}}{dU'_n} & \frac{dF_{pm}}{dU''_n} \\ \frac{dF_{qm}}{dU'_n} & \frac{dF_{qm}}{dU''_n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dF_{pm}}{dI'_n} & \frac{dF_{pm}}{dI''_n} \\ \frac{dF_{qm}}{dI'_n} & \frac{dF_{qm}}{dI''_n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dI'_H}{dP_H} \cdot \Delta P_H \\ \frac{dI''_H}{dQ_H} \cdot \Delta Q_H \end{bmatrix}. \quad (4.3.22)$$

Теперь обратимся к подсистеме, воспроизводящей $Z(Y)$ – блок модели (4.3.13), которую запишем как

$$F_{Y(Z)}(X_{Y(Z)}, V, W) = 0. \quad (4.3.23)$$

Учитывая произошедшие в электрической системе изменения параметров, вектор-подсистему (4.3.23) перепишем так:

$$F_{Z(Y)}(X_{Z(Y)}^P + \Delta X_{Z(Y)}, V^0 + \Delta V, W^0 + \Delta W) = 0, \quad (4.3.24)$$

где $X_{Z(Y)}^P$ – подвектор переменных состояния нагрузочных узлов.

Выполняя действия, связанные с линеаризацией подсистемы нелинейных уравнений (4.3.24), получим выражения для коррекции $Z(Y)$ -подсистемы

$$X_{Z(Y)}^H = X_{Z(Y)}^P - \left(\frac{dF_{Z(Y)}}{dX} \Big|_{X^P} \right)^{-1} \cdot \frac{dF_{Z(Y)}}{dV} \cdot \Delta V - \left(\frac{dF_{Z(Y)}}{dX} \Big|_{X^P} \right)^{-1} \cdot \frac{dF_{Z(Y)}}{dW} \cdot \Delta W. \quad (4.3.25)$$

Подставляя в (4.3.25) реальные параметры согласно выбранной ранее классификации переменных, получим следующее:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I'_K \\ I''_K \end{bmatrix}^H &= \begin{bmatrix} I'_K \\ I''_K \end{bmatrix}^P - \begin{bmatrix} \frac{dF_{pk}}{dI'_l} & \frac{dF_{pk}}{dI''_l} \\ \frac{dF_{qk}}{dI'_l} & \frac{dF_{qk}}{dI''_l} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dF_{pk}}{dP_c} & \frac{dF_{pk}}{dQ_c} \\ \frac{dF_{qk}}{dP_c} & \frac{dF_{qk}}{dQ_c} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_c \\ \Delta Q_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{dF_{pk}}{dI'_l} & \frac{dF_{pk}}{dI''_l} \\ \frac{dF_{qk}}{dI'_l} & \frac{dF_{qk}}{dI''_l} \end{bmatrix}^{-1} \times \\ &\times \begin{bmatrix} \frac{dF_{pk}}{dP_H} & \frac{dF_{pk}}{dQ_H} \\ \frac{dF_{qk}}{dP_H} & \frac{dF_{qk}}{dQ_H} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_H \\ \Delta Q_H \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4.3.26)$$

Элементы матрицы Якоби определяются по выражениям (4.2.35) – (4.2.38) и (4.3.34) – (4.3.37). Что касается элементов матрицы $\frac{dF_Z(Y)}{dV}$, то так как в выражениях связи $Z(Y)$ -подсистемы (4.1.25) отсутствуют активные и реактивные составляющие мощностей стационарных узлов, то чувствительность может быть установлена таким образом:

$$\begin{bmatrix} I'_k \\ I''_k \end{bmatrix}^H = \begin{bmatrix} I'_k \\ I''_k \end{bmatrix}^P - \begin{bmatrix} \frac{dF_{PK}}{dI'_l} & \frac{dF_{PK}}{dI''_l} \\ \frac{dF_{qK}}{dI'_l} & \frac{dF_{qK}}{dI''_l} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dF_{PK}}{dU'_c} & \frac{dF_{PK}}{dU''_c} \\ \frac{dF_{qK}}{dU'_c} & \frac{dF_{qK}}{dU''_c} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dU'_c}{dP_c} \cdot \Delta P_c \\ \frac{dU''_c}{dQ_c} \cdot \Delta Q_c \end{bmatrix}. \quad (4.3.27)$$

При этом, имея аналитические выражения функций F_{pm} , F_{qm} и F_{PK} , F_{qK} , нетрудно получить формулы для определения составляющих матриц $\frac{dF_Y(Z)}{dW}$ (4.3.21) и $\frac{dF_Z(Y)}{dV}$ (4.3.27).

Для $\frac{dF_Y(Z)}{dW}$ при $H = l$

$$\frac{dF_{pm}}{dI'_H} = a'_{mH} U'_m + a''_{mH} U''_m; \quad (4.3.28)$$

$$\frac{dF_{pm}}{dI''_H} = a'_{mH} U''_m - a''_{mH} U'_m; \quad (4.3.29)$$

$$\frac{dF_{qm}}{dI'_H} = a'_{mH} U''_m - a''_{mH} U'_m; \quad (4.3.30)$$

$$\frac{dF_{qm}}{dI''_H} = -a'_{mH} U'_m - a''_{mH} U''_m; \quad (4.3.31)$$

$$\frac{dI'_H}{dP_H} = \frac{U'_H}{U'^2_H + U''^2_H}; \quad (4.3.32)$$

$$\frac{dI''_H}{dQ_H} = -\frac{U'_H}{U'^2_H + U''^2_H}. \quad (4.3.33)$$

Для $\frac{dF_Z(Y)}{dV}$ при $c = n$

$$\frac{dF_{PK}}{dU'_c} = C'_{Kc} I'_K + C''_{Kc} I''_K; \quad (4.3.34)$$

$$\frac{dF_{PK}}{dU''_c} = C'_{Kc} I''_K - C''_{Kc} I'_K; \quad (4.3.35)$$

$$\frac{dF_{qk}}{dU'_c} = -C'_{Kc} I'_K + C''_{Kc} I''_K; \quad (4.3.36)$$

$$\frac{dF_{qk}}{dU''_c} = C'_{Kc} I''_K + C''_{Kc} I'_K; \quad (4.3.37)$$

$$\frac{dU'_c}{dP_c} = \frac{I'_c}{I'^2_c + I''^2_c}; \quad (4.3.38)$$

$$\frac{dU''_c}{dQ_c} = -\frac{I'_c}{I'^2_c + I''^2_c}. \quad (4.3.39)$$

Рассмотрим случай, когда $Y - Z$ уравнения установившегося режима составлены для системы, содержащей независимые стационарные узлы только типа $P - U$ (4.3.5), (4.3.6). Тогда выражение для коррекции параметров $Y(Z)$ -подсистемы

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} U'_m \\ U''_m \end{bmatrix}^H &= \begin{bmatrix} U'_m \\ U''_m \end{bmatrix}^P - \begin{bmatrix} \frac{dF_{pm}}{dU'_n} & \frac{dF_{pm}}{dU''_n} \\ \frac{dF_{um}}{dU'_n} & \frac{dF_{um}}{dU''_n} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dF_{pm}}{dP_c} & \frac{dF_{pm}}{dQ_c} \\ \frac{dF_{um}}{dP_c} & \frac{dF_{um}}{dQ_c} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_c \\ \Delta Q_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{dF_{pm}}{dU'_n} & \frac{dF_{pm}}{dU''_n} \\ \frac{dF_{um}}{dU'_n} & \frac{dF_{um}}{dU''_n} \end{bmatrix}^{-1} \times \\ &\times \begin{bmatrix} \frac{dF_{pm}}{dP_H} & \frac{dF_{pm}}{dQ_H} \\ \frac{dF_{um}}{dP_H} & \frac{dF_{um}}{dQ_H} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_H \\ \Delta Q_H \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (4.3.40)$$

в то время как коррекция параметров $Z(Y)$ -подсистемы будет осуществляться с помощью выражения (4.3.26).

Здесь элементы матрицы Якоби определяются так же, как и в рекуррентном выражении (4.3.7). После определения составляющих комплексных напряжений $Y(Z)$ -подсистемы и последующего определения составляющих комплексных токов $Z(Y)$ -подсистемы можно, пользуясь уравнениями

$$\begin{cases} I'_m = (P_m U'_m + Q_m U''_m) / U_m^2, \\ I''_m = (P_m U'_m - Q_m U''_m) / U_m^2, \end{cases} \quad (4.3.41)$$

$$\begin{cases} U'_K = (P_K I'_K - Q_K I''_K) / I_K^2, \\ U''_K = (P_K I'_K + Q_K I''_K) / I_K^2, \end{cases} \quad (4.3.42)$$

получить соответствующие значения токов $Y(Z)$ -подсистемы и напряжений $Z(Y)$ -подсистемы.

4.4. Коррекция установившегося режима при наличии в системе стационарных узлов типов $P - U$ и $P - Q$

С практической точки зрения наиболее распространенной можно считать задачу со смешанной формой задания информации в стационарных узлах. При этом стационарные узлы типа $P - Q$ введем в состав нагрузочных узлов, которые всегда являются узлами типа $P - Q$. В результате получим электрическую систему, состоящую из стационарных узлов типа $P - U$ и узлов типа $P - Q$ (в состав которых входят как стационарные, так и нагрузочные узлы).

Поскольку для узлов типа $P - U$ заданы активная мощность и модуль напряжения и необходимо определить реактивную мощность и аргумент комплексного напряжения, то удобнее при переходе от комплексных переменных к действительным пользоваться показательной формой записи комплексных напряжений, в соответствии с чем принимаем

$$\begin{cases} \hat{U}_m = U_m \exp(-j\psi_m) \\ \hat{U}_n = U_n \exp(-j\psi_n) \end{cases}, \quad (4.4.1)$$

где U_m, U_n – модули комплексных напряжений стационарных узлов типа $P - U$, а ψ_m и ψ_n – соответствующие им аргументы.

Если учесть (4.4.1) в системе уравнений (4.1.20), можно установить следующие выражения для активных и реактивных мощностей узлов с индексом $m(n)$, формирующих $Y(Z)$ -подсистему уравнений установившегося режима:

$$P_m = P_{Bm} + \sum_{n=1}^{\Gamma} U_m [g_{mn} \cos(\psi_m - \psi_n) + b_{mn} \sin(\psi_m - \psi_n)] U_n; \quad (4.4.2)$$

$$Q_m = Q_{Bm} + \sum_{n=1}^{\Gamma} U_m [g_{mn} \sin(\psi_m - \psi_n) + b_{mn} \cos(\psi_m - \psi_n)] U_n. \quad (4.4.3)$$

Активные и реактивные мощности узлов с индексом $k(l)$, входящие в $Z(Y)$ -подсистему, определяют выражениями (4.1.23). Величины P_{Bm}, Q_{Bm} , входящие в формулы (4.4.2) и (4.4.3), соответственно находят:

$$P_{Bm} = P_{Bm}^* + \sum (H_{ml} \cos \Psi_m + K_{ml} \sin \Psi_m) U_m; \quad (4.4.4)$$

$$Q_{Bm} = Q_{Bm}^* + \sum (H_{ml} \sin \Psi_m - K_{ml} \cos \Psi_m) U_m, \quad (4.4.5)$$

где
$$P_{Бm}^* = -\sum(g_{mn} \cos \Psi_m + b_{mn} \sin \Psi_m)U_o U_m; \quad (4.4.6)$$

$$Q_{Бm}^* = -\sum(g_{mn} \sin \Psi_m - b_{mn} \cos \Psi_m)U_o U_m. \quad (4.4.7)$$

В свою очередь,

$$H_{ml} = a'_{ml}I'_l - a''_{ml}I''_l; \quad (4.4.8)$$

$$K_{ml} = a'_{ml}I''_l + a''_{ml}I'_l. \quad (4.4.9)$$

С другой стороны, величины $P_{БК}$ и $Q_{БК}$, входящие в (4.1.23), определяются

$$P_{БК} = P_{БК}^* + \sum(N_{Кn} \cos \Psi_n + L_{Кn} \sin \Psi_n)U_n; \quad (4.4.10)$$

$$Q_{БК} = Q_{БК}^* + \sum(N_{Кn} \sin \Psi_n - L_{Кn} \cos \Psi_n)U_n, \quad (4.4.11)$$

где
$$\begin{cases} N_{Кn} = C'_{Кn}I'_K + C''_{Кn}I''_K \\ L_{Кn} = C'_{Кn}I''_K - C''_{Кn}I'_K, \end{cases} \quad (4.4.12)$$

а величины $P_{БК}^*$ и $Q_{БК}^*$, входящие в формулы (4.4.10) и (4.4.11), рассчитывают соответственно с помощью уже полученных выражений (4.1.30) и (4.1.31).

Итак, можно заметить, что если в $Y(Z)$ -подсистеме зависимыми переменными будут $U_{m(n)}$ и $\Psi_{m(n)}$, то в $Z(Y)$ -подсистеме $I'_{k(l)}$ и $I''_{k(l)}$. В соответствии с этим запишем $Y(Z)$ и $Z(Y)$ -подсистемы в следующем виде:

$$\begin{cases} F_{pm} = P_m - P_{Бm} + f_{pm}(U_n, \Psi_n) = 0 \\ F_{qm} = Q_m - Q_{Бm} + f_{qm}(U_n, \Psi_n) = 0, \end{cases} \quad (4.4.13)$$

$$\begin{cases} F_{pk} = P_k - P_{БК} + f_{pk}(I'_l, I''_l) = 0 \\ F_{qk} = Q_k - Q_{БК} + f_{qk}(I'_l, I''_l) = 0. \end{cases} \quad (4.4.14)$$

Как уже было сказано, для стационарных узлов типа $P - U$ искомыми будут реактивная мощность и аргумент комплексного напряжения. Определив численные значения аргументов комплексных напряжений, можно легко установить также численные значения реактивных мощностей этих же стационарных узлов. Однако для определения численных значений аргументов комплексных напряжений стационарных узлов достаточно пользоваться в (4.4.13) только уравнением активных мощностей.

Таким образом, выражение для коррекции параметров подсистемы можно представить

$$[\psi_m]^H = [\psi_m]^P - [\Delta\psi_m], \quad (4.4.15)$$

где при $\Delta V = 0$ величины приращений аргументов комплексных напряжений, соответствующие заданным изменениям мощностей нагрузочных узлов, определяются как

$$[\Delta\psi_m] = \left[\frac{dF_{pm}}{d\psi_m} \right]^{-1} - \left[\frac{dF_{pm}}{dP_H} \quad \frac{dF_{pm}}{dQ_H} \right]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_H \\ \Delta Q_H \end{bmatrix}. \quad (4.4.16)$$

А в развернутом виде

$$\begin{bmatrix} \Delta\psi_1 \\ \Delta\psi_2 \\ \vdots \\ \Delta\psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dF_{p1}}{d\psi_1} & \frac{dF_{p1}}{d\psi_2} & \dots & \frac{dF_{p1}}{d\psi_r} \\ \frac{dF_{p2}}{d\psi_1} & \frac{dF_{p2}}{d\psi_2} & \dots & \frac{dF_{p2}}{d\psi_r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dF_{pr}}{d\psi_1} & \frac{dF_{pr}}{d\psi_2} & \dots & \frac{dF_{pr}}{d\psi_r} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dF_{p1}}{dP_1} & \dots & \frac{dF_{p1}}{dP_L} & \frac{dF_{p1}}{dQ_1} & \dots & \frac{dF_{p1}}{dQ_L} \\ \frac{dF_{p2}}{dP_1} & \dots & \frac{dF_{p2}}{dP_L} & \frac{dF_{p2}}{dQ_1} & \dots & \frac{dF_{p2}}{dQ_L} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dF_{pr}}{dP_1} & \dots & \frac{dF_{pr}}{dP_L} & \frac{dF_{pr}}{dQ_1} & \dots & \frac{dF_{pr}}{dQ_L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_H \\ \vdots \\ \Delta P_L \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_L \end{bmatrix}. \quad (4.4.17)$$

Что касается коррекции параметров $Z(Y)$ -подсистемы, то она может осуществляться с помощью выражения (4.3.26) при $\Delta P_c = 0$ и $\Delta Q_c = 0$. При этом частные производные, входящие в матрицу Якоби выражения (4.4.16), можно определить:

– при одинаковых индексах, $n = m$

$$\frac{\partial F_{pm}}{\partial \psi_n} = -\{P_{Bm(k)} - U_m \sum [g_{mn} \sin(\psi_m - \psi_n) - b_{mn} \cos(\psi_m - \psi_n)] U_n\}; \quad (4.4.18)$$

– при различных индексах, $n \neq m$

$$\frac{\partial F_{pm}}{\partial \psi_n} = -U_m [g_{mn} \sin(\psi_m - \psi_n) - b_{mn} \cos(\psi_m - \psi_n)] U_n. \quad (4.4.19)$$

При этом $P_{Bm(k)} = P'_{Bm(k)} + P''_{Bm}$,

где
$$P'_{Bm(k)} = \sum_{n=1}^r (g_{mn} \sin \psi_m - b_{mn} \cos \psi_m) U_0 U_n; \quad (4.4.20)$$

$$P''_{Bm} = - \sum_{n=1}^r (H_{ml} \sin \psi_m - k_{ml} \cos \psi_m) U_m. \quad (4.4.21)$$

Из полученных формул можно заметить, что для определения элементов матрицы Якоби выражения (4.4.16) необходимо установить лишь два типа частных производных, что не составляет больших затруднений. Однако элементы матрицы Якоби выражения (4.3.26) в данном случае будут определяться:

– при одинаковых индексах, $l = k$

$$\frac{\partial F_{pk}}{\partial I_k''} = -[U'_{\text{Бк}} + \sum_{l=\Gamma+1}^N D_{kl} + (R_{kk}I'_k - X_{kk}I''_k)]; \quad (4.4.22)$$

$$\frac{\partial F_{pk}}{\partial I_k''} = -U''_{\text{Бк}} + \sum_{l=\Gamma+1}^N N_{kl} + (R_{kk}I''_k - X_{kk}I'_k); \quad (4.4.23)$$

$$\frac{\partial F_{qk}}{\partial I'_k} = -U''_{\text{Бк}} + \sum_{l=\Gamma+1}^N N_{kl} - (R_{kk}I''_k - X_{kk}I'_k); \quad (4.4.24)$$

$$\frac{\partial F_{qk}}{\partial I_k''} = -U''_{\text{Бк}} - \sum_{l=\Gamma+1}^N D_{kl} + (R_{kk}I'_k - X_{kk}I''_k), \quad (4.4.25)$$

где

$$D_{kl} = R_{kl}I'_l - X_{kl}I''_l; \quad (4.4.26)$$

$$N_{kl} = R_{kl}I''_l - X_{kl}I'_l; \quad (4.4.27)$$

$$U'_{\text{бк}} = \left(1 - \sum_{n=1}^{\Gamma} C'_{kn}\right) U_0 + \sum_{n=1}^{\Gamma} (C'_{kn} \cos \varphi_n - C''_{kn} \sin \varphi_n) U_n; \quad (4.4.28)$$

$$U''_{\text{бк}} = -\sum_{n=1}^{\Gamma} C''_{kn} U_0 + \sum_{n=1}^{\Gamma} (C_{kn} \sin \varphi_n + C''_{kn} \cos \varphi_n) U_n; \quad (4.4.29)$$

– при различных индексах, $l \neq k$

$$\frac{\partial F_{pk}}{\partial I'_l} = -(R_{kl}I'_k + X_{kl}I''_k); \quad (4.4.30)$$

$$\frac{\partial F_{pk}}{\partial I_l''} = -(R_{kl}I''_k - X_{kl}I'_k); \quad (4.4.31)$$

$$\frac{\partial F_{qk}}{\partial I'_l} = -(-R_{kl}I''_k + X_{kl}I'_k); \quad (4.4.32)$$

$$\frac{\partial F_{qk}}{\partial I_l''} = -(R_{kl}I'_k + X_{kl}I''_k). \quad (4.4.33)$$

4.5. Численный пример коррекции режима электрической системы, основанной на использовании $(Y - Z)$ -формы записи уравнений состояния

В предыдущем материале были приведены вычислительные эксперименты коррекции установившегося режима при Y - и Z -формах записи уравнений состояния электроэнергетической системы. На основании предложенного метода разработан вычислительный алгоритм, составлена программа для ЭВМ и проведены аналогичные исследования для подтверждения правомерности $(Y - Z)$ -подхода при коррекции установившегося режима. Для этого рассмотрена следующая постановка задачи: при известных параметрах базового режима и заданных изменениях мощностей в отдельных нагрузочных узлах определить режимные параметры нового установившегося режима.

С целью проведения необходимых количественных и качественных исследований рассчитаны режимы для 4, 10, 22, 46, 100 и более узлов. Результаты расчетов для 4 и 10-узловых систем (см. рис. 1.1 и рис. 2.1) приведены в табл. 4.1 и 4.2 соответственно. Анализ этих результатов подтверждает правомерность использования $(Y - Z)$ -матрицы пассивных параметров при коррекции установившегося режима электроэнергетической системы и позволяет прийти к следующему заключению.

Полученная математическая модель и соответствующий вычислительный алгоритм сочетают преимущества отдельных форм записи уравнений состояния, кроме того, обеспечивают чисто вычислительные преимущества по времени счета и объему занимаемой памяти ЭВМ, поскольку вместо коррекции параметров $2N$ уравнений установившегося режима корректируются параметры двух подсистем уравнений $Y(Z)$ и $Z(Y)$ с общим числом $2N$, при этом обращение одной матрицы Якоби высокого порядка заменяется обращением двух матриц более низких порядков. Дальнейшее совершенствование метода, вытекающее из показательной формы записи комплексных напряжений, позволяет вдвое уменьшить порядок матрицы $Y(Z)$ -подсистемы уравнений режима, что, облегчая её обращение, также способствует уменьшению необходимой памяти и времени счета. В отношении точности полученных результатов предлагаемый метод проявляет себя с наилучшей стороны, когда порядок подматрицы Z значительно больше порядка подматрицы Y , что и имеет место на практике.

Таблица 4.1

Результаты коррекции установившегося режима электрической системы

ΔP_3	Номер узла	Точный метод			Метод чувствительности			Погрешность	
		$I = I' + jI''$, кА	U , кВ	Ψ , рад	$I = I' + jI''$, кА	U , кВ	Ψ , рад	U , кВ	Ψ , рад
$\Delta P_3 = 21,58$ (5 %)	БУ	–	220,00	0,0000	–	220,00	0,00	0,0	0,0
	1	$0,7373 - j0,344$	221,6303	0,0271	$0,7375 - j0,4310$	221,6423	0,0271	0,012	0,0
	2	$0,9229 - j0,4323$	222,1162	0,0256	$0,92283 - j0,43219$	222,1263	0,0257	0,0101	0,0001
	3	$-1,9562 + j1,228$	205,4685	-0,0366	$0,95565 - j1,1216$	205,562	-0,0364	0,0935	0,0002
$\Delta P_3 = 43,17$ (10 %)	БУ	–	220,00	0,0000	–	220,00	0,00	0,0	0,0
	1	$0,737 - j0,3384$	222,3554	0,0332	$0,73682 - j0,4248$	222,3893	0,0334	0,0399	0,0002
	2	$0,9226 - j0,425$	222,847	0,0319	$0,9225 - j0,4248$	222,8306	0,0321	0,0336	0,0002
	3	$-1,8516 + j1,0976$	206,4768	-0,028	$-1,85079 - j1,05088$	206,6855	-0,0268	0,2087	0,0012
$\Delta P_3 = 64,75$ (20 %)	БУ	–	220,00	0,0000	–	220,00	0,00	0,0	0,0
	1	$0,7367 - j0,3328$	223,0563	0,0393	$0,73644 - j0,3317$	223,1431	0,0396	0,0868	0,0003
	2	$0,9223 - j0,4128$	223,5536	0,0383	$0,922172 - j0,4047$	223,47487	0,0386	0,0851	0,0003
	3	$-1,7481 + j1,0746$	207,4551	-0,0195	$-1,74386 + j1,0704$	207,9196	-0,0163	0,4645	0,0032
$\Delta P_3 = 86,34$ (20 %)	БУ	–	220,00	0,0000	–	220,00	0,00	0,0	0,0
	1	$0,7365 - j0,3274$	223,7347	0,04554	$0,73621 - j0,32579$	223,903	0,046	0,1683	0,0006
	2	$0,9221 - j0,4108$	224,2373	0,0446	$0,922084 - j0,4067$	224,4883	0,045	0,251	0,0004
	3	$-1,6456 + j1,0539$	208,4055	-0,011	$-1,637887 + j1,0438$	209,4242	-0,005	1,0187	0,006

Таблица 4.2

Результаты коррекции установившегося режима десятиузловой электрической системы (по (Y – Z)-методу)

ΔQ	Номер узла	Точный метод			Метод чувствительности			Погрешность	
		$I = I' + jI''$, кА	U , кВ	Ψ , рад	$I = I' + jI''$, кА	U , кВ	Ψ , рад	U , кВ	Ψ , рад
$\Delta Q = -2,8 (-10\%)$	БУ	–	220,00	0,0	–	220,00	0,0	0,0	0,0
	1	$-0,5166 + j0,2533$	210,0025	-0,0292	$-0,51661 + j0,25332$	210,0028	-0,0293	0,0003	0,0001
	2	$0,04872 - j0,4372$	214,9079	-0,0139	$0,48719 - j0,43725$	214,9082	-0,0139	0,0003	0,0
	3	$-0,2797 + j0,1527$	211,6583	-0,0256	$-0,27965 + j0,15271$	211,6661	-0,0256	0,0008	0,0
	4	$-0,4904 + j0,2608$	208,5376	-0,0329	$-0,49048 + j0,26081$	208,5381	-0,0329	0,0005	0,0
	5	$0,4058 + j0,2475$	209,9227	-0,0026	$0,40576 + j0,33767$	209,9232	-0,0025	0,0005	-0,0001
	6	$-0,4723 + j0,2475$	208,0248	-0,0353	$-0,47227 + j0,24757$	208,0251	-0,0353	0,0003	0,0
	7	$0,2528 - j0,6473$	214,8202	-0,0414	$0,25273 - j0,64736$	214,8206	-0,0414	0,0004	0,0
	8	$-0,4356 + j0,2355$	210,4498	-0,0492	$-0,4356 + j0,23554$	210,4503	-0,0492	0,0005	0,0
	9	$0,3777 + j0,0181$	212,1084	-0,0246	$0,37772 + j0,01808$	212,1088	-0,0246	0,0004	0,0
$\Delta Q = 2,8 (10\%)$	БУ	–	220,00	0,0	–	220,00	0,0	0,0	0,0
	1	$-0,5159 + 0,2532$	210,2667	-0,0297	$-0,51584 + 0,25324$	210,2671	-0,029	0,0004	0,0
	2	$0,4861 - 0,4368$	215,2709	-0,0146	$0,48605 - 0,43686$	215,2713	-0,0147	0,0004	0,0001
	3	$-0,2796 + 0,1262$	212,107	-0,0264	$-0,27963 + 0,12622$	212,1147	-0,0264	0,0077	0,0
	4	$-0,4893 + 0,2607$	208,9303	-0,0336	$-0,48931 + 0,26066$	208,9308	-0,0335	0,0005	0,0001
	5	$0,4053 + 0,3368$	210,2898	-0,0033	$0,40531 + 0,33678$	210,2902	-0,0033	0,0004	0,0
	6	$-0,4713 + 0,2474$	208,3709	-0,0358	$-0,47134 + 0,24743$	208,9714	-0,0359	0,0005	0,0001
	7	$0,252 - 0,6464$	215,1761	-0,042	$0,25192 - 0,64644$	215,1765	-0,042	0,0004	0,0
	8	$-0,4347 + 0,2354$	210,8175	-0,0498	$-0,43471 + 0,23538$	210,8178	-0,0498	0,0003	0,0
	9	$0,3771 + 0,0178$	212,4813	-0,0253	$0,37707 + 0,01778$	212,4817	-0,0252	0,0004	-0,0001

4.6. Выводы и рекомендации

1. Разработана общая методика расчета и коррекции режимных параметров электрических систем при $(Y - Z)$ -форме записи уравнений состояния.

2. Предложенный метод коррекции установившегося режима обеспечивает вычислительные преимущества по времени счета и объему занимаемой памяти относительно Y -метода и Z -метода.

3. Разработан вычислительный алгоритм метода и на его основе составлена программа (для ЭВМ) к цифровым вычислительным машинам, позволяющая решать ряд практических задач.

4. Предложенный метод рекомендован к использованию при проектном и перспективном планировании, а также может применяться при исследовании и коррекции режимов электрических систем.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Дать определение энергетической системы, электрической системы и их элементов.
2. Назвать основные типы электростанций. Что является наиболее характерным для них?
3. Каковы основные технологические особенности энергосистем?
4. В чем преимущества объединения электростанций в энергосистему?
5. Какова цель расчета установившегося режима?
6. Какие параметры режима определяются в процессе его расчета?
7. Каков обычно характер комплексной нагрузки в узлах электрической сети?
8. Каковы условия повышения напряжения в конце электропередачи?
9. Что такое продольная и поперечная составляющие падения напряжения?
10. Что такое потеря напряжения? Чем она отличается от падения напряжения?
11. Какое напряжение рекомендуется выбирать в качестве начального для итерационного расчета?
12. Система электроснабжения – это...
13. Чем характеризуется установившийся режим?
14. Возмущение режима – это...
15. Переходный процесс – это...
16. Какой режим электроэнергетической системы называется нормальным?
17. Аварийный режим работы ЭЭС.
18. Послеаварийный режим работы ЭЭС.
19. Что понимают под нарушением устойчивости электроэнергетической системы?
20. Каковы причины и последствия системных аварий?
21. При расчёте установившихся режимов первоочередной задачей является...

22. Какие математические модели надо построить для решения систем нелинейных алгебраических уравнений?
23. Какие модели можно отнести к Y -математическим моделям?
24. Что понимают под Z -математическими моделями?
25. Что такое $Y - Z$ гибридные математические модели?
26. Какие методы применяются при решении систем нелинейных алгебраических уравнений в Y -форме?
27. Какие методы применяются при решении систем нелинейных алгебраических уравнений в Z -форме?
28. Какие методы применяются при решении систем нелинейных алгебраических уравнений в $(Y - Z)$ -форме?
29. Для решения систем нелинейных алгебраических уравнений в Y - и Z -формах возникает матрица...
30. Как выбираются независимые и зависимые режимные параметры ЭЭС?
31. Какими режимными параметрами характеризуется узел электрической системы?
32. Узел типа $U - \Psi_U$. Какие параметры заданы и какие необходимо определить?
33. Узел типа $P - U$. Какие параметры заданы и какие необходимо определить?
34. Узел типа $P - Q$. Какие параметры заданы и какие необходимо определить?
35. Почему метод Ньютона – Рафсона признан лучшим для решения систем нелинейных алгебраических уравнений установившихся режимов электрических систем?
36. Чем характеризуется порядок квадратной матрицы Якоби?
37. За сколько итераций можно решить соответствующие нелинейные алгебраические уравнения установившихся режимов электрических систем методом Ньютона – Рафсона при Y -форме?
38. Можно ли обращать матрицу, если она является квадратной особенной и чему равняется детерминант матрицы?
39. Уравнение установившихся режимов в Z -форме получается непосредственно из...

40. Метод простой итерации для решения уравнений установившегося режима при Z -форме.
41. Метод Ньютона – Рафсона для решения уравнений установившегося режима при Z -форме.
42. Какие режимные параметры необходимо определить при $(Y - Z)$ -форме уравнений для стационарных узлов типа $P - U$?
43. Какие режимные параметры необходимо определить при $(Y - Z)$ -форме уравнений для стационарных узлов типа $P - Q$?
44. Какое численное значение устанавливается после итерации для узлов типа $P - U$?
45. Какое численное значение устанавливается после итерации для узлов типа $P - Q$?
46. Итерационный процесс считается завершённым, если обеспечиваются условия...
47. За сколько итераций можно обеспечить решение системы нелинейных алгебраических уравнений по методу Ньютона – Рафсона?
48. Как представляются нагрузки отдельных подсистем при стыковке для определения режима исходной системы?
49. Когда возникает необходимость в коррекции режимов электрической системы?
50. Какими способами может быть выполнена задача коррекции при изменении пассивных параметров схемы электрической системы?
51. Какими способами может быть выполнена задача коррекции при изменении активных параметров отдельных узлов схемы электрической системы?
52. Как используется современная теория чувствительности для коррекции режимов электрических систем при изменении их параметров?
53. Теорема Теледжена для коррекции режимов электрических систем при изменении пассивных параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современная электроэнергетическая система рассматривается как непрерывно развивающаяся большая и сложная система, состоящая из взаимосвязанных и взаимоуправляемых подсистем и занимающая огромное пространство. Для такой системы необходимо уметь не только рассчитывать ее поведение при заданных фиксированных параметрах, но рассчитывать и оценивать те изменения в параметрах, которые осуществляются с помощью управляющих устройств. В современной прикладной науке проблема расчёта установившегося режима ЭЭС была и остаётся актуальной. Это связано с тем, что расчёт установившегося режима ЭЭС служит началом множества исследований.

Одним из решающих моментов при рассмотрении проблемы определения установившегося режима ЭЭС считается обеспечение инженерной наглядности для восприятия физических процессов, происходящих как в данном объединении, так и в отдельных его звеньях. Решение проблемы установившегося режима большой и сложной ЭЭС с математической точки зрения сводится к решению систем нелинейных алгебраических уравнений высокого порядка и представляет серьезный интерес также в современной прикладной математике. Для составления нелинейных алгебраических уравнений высокого порядка электроэнергетическая система представляется в виде радиально связанных подсистем (диакоптическая система), и соответствующие системы нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима реализуются методом минимизации. Диакоптические математические модели позволяют организовать итерационный процесс. Осуществляя один шаг или одну итерацию для каждой подсистемы, которая радиально связана с другими подсистемами, получаем один шаг или одну итерацию для полной электроэнергетической системы.

Построение Z -обобщённой диакоптической математической модели представляется в виде совокупности соответствующих подматриц отдельных подсистем и позволяет построить диакоптические ($Y - Z$)-математические модели. На основании $Y - Z$ диакоптических математических моделей можно построить также обобщённую математическую модель сложной и большой электроэнергетической системы, когда стационарные узлы могут быть типа $P - Q$.

Диакоптические математические модели обеспечивают высокую наглядность для восприятия физических процессов, происходящих в сложной и большой электроэнергетической системе, что позволяет осуществлять количественное и качественное исследование любого характера. В настоящее время исследование различных режимных вопросов большой и сложной электроэнергетической системы должно основываться на рациональном сочетании диакоптики и современной вычислительной техники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Адонц, Г. Т.* Метод расчета установившегося режима электроэнергетической системы / Г. Т. Адонц // *Электричество*. – 1972. – № 5. – С. 1 – 6.

2. *Он же.* Расчет установившегося режима многополюсника, представляемого матрицей узловых сопротивлений / Г. Т. Адонц // *Известия АН СССР. Энергетика и транспорт*. – 1974. – № 1. – С. 137 – 141.

3. *Амирикян, Р. А.* Коррекция установившегося режима электроэнергетической системы с управляемыми элементами / Р. А. Амирикян, И. И. Шарабханян // *Известия АН Армянской ССР. Серия технических наук*. – 1982. – № 2. – С. 21 – 26.

4. *Арутюнян, А. А.* Исследования, связанные с использованием гибридной ($Y - Z$)-матрицы в расчетах установившегося режима электрических систем / А. А. Арутюнян // *Известия АН Армянской ССР. Серия технических наук*. – 1979. – № 1. – С. 24 – 32.

5. *Арзамацев, Д. А.* Расчет и анализ установившегося режима больших электрических систем / Д. А. Арзамацев, П. И. Бартомолей, Л. В. Липес // *Известия вузов СССР. Энергетика*. – 1975. – № 1. – С. 60 – 71.

6. *Бартомолей, П. И.* Разработка и применение эффективных методов расчета и коррекции установившегося режима больших электрических систем : дис. ... д-ра техн. наук / Бартомолей П. И. – Новосибирск, 1986. – 47 с.

7. *Веников, В. А.* Вопросы применения теории чувствительности к анализу режимов работы энергетических систем / В. А. Веников, Б. И. Головицын, М. С. Лисеев // *Известия АН СССР. Энергетика и транспорт*. – 1969. – № 5. – С. 26 – 33.

8. *Они же.* Вопросы управления режимами электроэнергетических систем / В. А. Веников, Б. И. Головицын, М. С. Лисеев // *Электричество*. – 1972. – № 10. – С. 1 – 3.

9. *Веников, В. А.* Некоторые алгоритмические проблемы управления нормальными режимами энергетических систем / В. А. Веников, В. Г. Журавлев // *Электричество*. – 1971. – № 8. – С. 7 – 14.

10. *Гераскин, О. Т.* Метод расчета матриц обобщенных параметров для электрических систем сверхсложной конфигурации / О. Т. Гераскин, А. Ю. Бяков, Л. П. Бякова // *Известия АН СССР. Энергетика и транспорт*. – 1974. – № 5. – С. 74 – 82.

11. *Они же.* Анализ уравнений больших электроэнергетических систем / О. Т. Гераскин, А. Ю. Бяков, Л. П. Бякова // *Известия АН СССР. Энергетика и транспорт*. – 1976. – № 7. – С. 3 – 7.

12. *Гераскин, О. Т.* Обобщенные параметры электрических систем / О. Т. Гераскин. – М. : Энергия. – 1974. – 112 с.

13. *Гераскин, О. Т.* Метод расчета установившихся режимов больших электроэнергетических систем / О. Т. Гераскин, А. Ю. Бяков, Л. П. Бякова // *Известия АН СССР. Энергетика и транспорт*. – 1977. – № 2. – С. 14 – 21.

14. *Гераскин, О. Т.* Определение обобщенных параметров больших энергосистем методом диакоптики / О. Т. Гераскин, В. А. Григорьев // *Электричество*. – 1981. – № 11. – С. 10 – 14.

15. *Гераскин, О. Т.* Диакоптика и разреженность в задаче расчета установившихся режимов больших электроэнергетических систем / О. Т. Гераскин // *Известия вузов СССР. Энергетика*. – 1982. – № 1. – С. 7 – 12.

16. *Гераскин, О. Т.* Оптимизация режимов электроэнергетических систем методом Ньютона 2-го порядка / О. Т. Гераскин, Т. Г. Селенкова // *Известия вузов СССР. Энергетика*. – 1984. – № 3. – С. 9 – 15.

17. *Горушкин, В. И.* Корректировка матриц параметров электрической системы при коммутации / В. И. Горушкин, В. Ф. Пивоваров // *Электричество*. – 1979. – № 7. – С. 11 – 15.

18. *Демидович, Б. П.* Основы вычислительной математики / Б. П. Демидович, И. А. Марон. – 2-е изд., испр. – М. : Изд-во физ.-мат. лит., 1963. – 660 с.

19. Дунаева, Н. П. Применение вычислительных методов высокого порядка для расчета установившихся режимов электрических систем / Н. П. Дунаева, А. М. Конторович. – Л. : Изд-во Ленингр. политехн. ин-та, 1979. – 20 с.

20. Жуков, Л. А. Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем / Л. А. Жуков, И. П. Стратан. – М. : Энергия, 1979. – 41 с.

21. Крумм, Л. А. Обобщение метода Ньютона при управлении энергетическими системами / Л. А. Крумм // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1976. – № 3. – С. 3 – 20.

22. Латышева, Т. С. Расчет установившихся режимов электрической сети при заданных мощностях в узлах / Т. С. Латышева // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1970. – № 1. – С. 157 – 161.

23. Махнитко, А. Е. Метод расчета установившегося режима энергосистемы по отдельным подсистемам / А. Е. Махнитко // Электричество. – 1977. – № 4. – С. 26 – 30.

24. Мельников, Н. А. Метод определения режима работы сложной электрической системы / Н. А. Мельников // Известия вузов СССР. Энергетика. – 1961. – № 8. – С. 9 – 13.

25. Он же. Метод расчета рабочих режимов электрических сетей нескольких номинальных напряжений / Н. А. Мельников // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1965. – № 6. – С. 73 – 77.

26. Петров, В. В. Расчет коррекции установившегося режима энергосистемы. Научные и прикладные проблемы энергетики / В. В. Петров, Р. И. Белоусова. – Вып. 4. – Минск : Вышэйш. шк., 1977. – С. 102 – 105.

27. Синанова, И. Г. Об одном методе уточнения параметров установившегося режима электрической системы / И. Г. Синанова // Известия АН Армянской ССР. Серия технических наук. – 1987. – № 3. – С. 78 – 85.

28. *Хачатрян, В. С.* К вопросу об определении собственных и взаимных сопротивлений энергосистемы относительного базисного узла при изменении конфигурации сети / В. С. Хачатрян // *Электричество*. – 1964. – № 4. – С. 27 – 30.

29. *Хачатрян, В. С.* Диакоптика и задача определения обобщенных параметров больших энергосистем / В. С. Хачатрян, О. А. Суханов // *Электричество*. – 1973. – № 4. – С. 1 – 10.

30. *Хачатрян В. С.* Определение установившихся режимов больших энергосистем методом подсистем / В. С. Хачатрян // *Электричество*. – 1974. – № 5. – С. 75 – 78.

31. *Он же.* Определение установившихся режимов больших электроэнергетических систем с применением метода Ньютона – Рафсона / В. С. Хачатрян // *Известия АН СССР. Энергетика и транспорт*. – 1974. – № 4. – С. 36 – 43.

32. *Хачатрян, В. С.* Метод декомпозиции и коррекции матрицы обобщенных параметров электрических систем / В. С. Хачатрян, В. С. Сафарян // *Электричество*. – 1980. – № 12. – С. 18 – 22.

33. *Хачатрян, В. С.* Определение чувствительности электрической системы к изменению ее режимных параметров / В. С. Хачатрян, И. Г. Синанова // *Известия вузов СССР. Энергетика*. – 1980. – № 1. – С. 9 – 18.

34. *Гераскин, О. Т.* Основные матричные уравнения установившихся режимов больших электроэнергетических систем / О. Т. Гераскин, Т. Г. Селенкова // *Известия вузов СССР. Энергетика*. – 1995. – № 5, 6. – С. 7 – 13.

35. Расчет установившегося режима электроэнергетической системы методом декомпозиции с применением матрицы Гессе / В. С. Хачатрян [и др.] // *Известия НАН РА и ГИУА. Серия технических наук*. – 2000. – № 3. – С. 334 – 339.

36. *Бадалян, Н. П.* Новый метод определения обобщенных параметров установившегося режима электротехнической системы / Н. П. Бадалян, К. В. Хачатрян // *Сборник докладов II Международной энергетической конференции*. – М. : Интехэко, 2001. – С. 400 – 408.

37. *Хачатрян, В. С.* Расчет установившегося режима большой электроэнергетической системы методом диакоптики / В. С. Хачатрян, Н. П. Бадалян // *Электричество*. – 2003. – № 6. – С. 13 – 17.

38. *Они же.* Решение гибридных уравнений установившегося режима электроэнергетической системы / В. С. Хачатрян, Н. П. Бадалян // *Электричество*. – 2003. – № 11. – С. 11 – 16.

39. *Бадалян, Н. П.* Решение гибридных уравнений установившегося режима электроэнергетической системы методом второго порядка при $P - Q$ типе станционных узлов / Н. П. Бадалян // *Вестник МАНЭБ*. – 2003. – № 4. – С. 80 – 84.

40. *Он же.* Новый метод обращения Y -матрицы узловых комплексных проводимостей электроэнергетической системы / Н. П. Бадалян // *Вестник МАНЭБ*. – 2003. – № 7. – С. 70 – 72.

Учебное издание

БАДАЛЯН Норайр Петикович

АНАЛИЗ И РАСЧЕТ МЕТОДОВ КОРРЕКЦИИ
УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Учебное пособие

Редактор А. П. Володина

Технический редактор С. Ш. Абдуллаева

Корректор В. С. Теверовский

Компьютерная верстка Л. В. Макаровой

Выпускающий редактор А. А. Амирсейидова

Подписано в печать 14.12.17.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 6,98. Тираж 90 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.