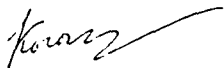


115 01

На правах рукописи

15.11.1998



НГУЕН ВЬЕТ КЬОНГ

ОЦЕНКА БАЛАНСОВОЙ НАДЕЖНОСТИ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Специальность 05.14.02 - Электрические станции
(электрическая часть), сети,
электроэнергетические системы
и управление ими

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург - 1998

Работа выполнена на кафедре "Автоматизированные электрические системы" Уральского государственного технического университета (УГТУ-УПИ), г. Екатеринбург.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор, академик АИИН РФ П.И. Бартоломей, г. Екатеринбург.

Научный консультант - кандидат технических наук, доцент В.П. Обоскалов, г. Екатеринбург.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, А.Г. Фишов, г. Новосибирск;
кандидат технических наук, В.И. Порошин, г. Екатеринбург.

Ведущая организация - АО «Уралэнергосетьпроект».


Защита диссертации состоится 21 октября 1998 г. в 15 мин на заседании специализированного совета К 063.14 в Уральском государственном техническом университете (главный учебный корпус, ауд. Э-406).

Отзыв в двух экземплярах, заверенные печатью, просим присылать по адресу: 620002, г. Екатеринбург, К-2, УГТУ-УПИ, Ученому секретарю совета, телефон 75-44-16.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УГТУ-УПИ.

Автореферат разослан "19" сентября 1998 г.

Ученый секретарь
специализированного
совета К 063.14.04,
канд. техн. наук, доцент


В.П. Обоскалов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Одной из важнейших характеристик энергетической системы является надежность ее работы. Повышение роли надежности электроснабжения потребителей определяется возрастанием роли электроэнергетики в динамично развивающейся экономике Вьетнама. В связи с созданием Единой электроэнергетической системы (ЕЭС) СРВ стала актуальной проблема анализа надежности объединения электроэнергетических систем (ОЭЭС). Большое влияние на характер развития электроэнергетики Вьетнама оказывают модели развития энергетики России. Последние глубокие структурные изменения в ЕЭС России, вызванные приватизацией основных средств производства и передачи электроэнергии и образованием федерального оптового рынка электроэнергии и мощности (ФОРЭМ), в целом изменили акценты в проблеме надежности электроэнергетических систем (ЭЭС). В частности, появились критерии, связанные с рыночными отношениями (например, договорные перетоки мощности).

В настоящее время в России разработан и внедрен в практику ряд программных комплексов по анализу надежности ЭЭС, однако в силу изменяющихся условий и требований ни один программный комплекс не удовлетворяет требованиям современной практики проектирования и эксплуатации энергосистем в полной мере. Вследствие этого не снижается актуальность адаптации старых и разработки новых математических методов, алгоритмов и программ расчета показателей надежности ЭЭС.

Одним из наименее проработанных направлений в программном обеспечении задач надежности является балансовая надежность. Это делает актуальной проблему разработки ма-

тематических методов и алгоритмов автоматизированного анализа балансовой надежности ЭЭС с использованием современных программных и вычислительных средств.

Цель работы

Целью работы является разработка эффективных математических методов оценки балансовой надежности электрических систем, математических алгоритмов вероятностного эквивалентирования и эффективного программного обеспечения для количественного анализа балансовой надежности в задачах проектирования и эксплуатации ЭЭС.

Метод выполнения работы

Теоретической основой разработанных методов и алгоритмов являются: теория вероятности и математической статистики; теория надежности технических систем и ЭЭС; теория нелинейного программирования; теория графов. При разработке программного обеспечения для персональных компьютеров использовались: теория объектно-ориентированного программирования и язык Object Pascal; система управления базами данных FOXPRO.

Объект исследований

Для проверки работоспособности и качества предлагаемых методов, алгоритмов и программы выполнен анализ балансовой надежности Единой энергетической системы Вьетнама и тестовой схемы Сибирского энергетического институт

Научная новизна диссертации

1. Разработан обобщенный на основе эквивалентных преобразований метод, позволяющий определить показатели балансовой надежности ЭЭС (математическое ожидани

дисперсия небаланса мощности, вероятность дефицитной работы ЭЭС). Данный метод позволил учесть состав генерирующих агрегатов, межсистемные связи с ограниченной пропускной способностью, а также ряд факторов, влияющих на производство и передачу электроэнергии, таких как критерии «простого спроса», «локального эгоизма», «равной надежности» или «договорного перетока».

2. Предложены и обоснованы два алгоритма: направленное и ненаправленное преобразования схем для определения показателей балансовой надежности ОЭС, имеющей радиальную схему электрических соединений. Первый алгоритм - направленное исключение - основан на исключении узлов первого ранга в направлении к расчетному узлу. Второй алгоритм основан на процедуре исключения-восстановления узлов первого ранга без учета ориентации. Первый алгоритм имеет более высокую точность, так как здесь исключены ошибки на этапе восстановления. Второй алгоритм имеет большее быстродействие.
3. Разработан и апробирован метод исключения узлов второго ранга и на его основе создан алгоритм, позволяющий определить показатели балансовой надежности ОЭС повышенной сложности.
4. Для определения показателей балансовой надежности многоконтурной ОЭС предложены метод и алгоритм хорд и показана их эффективность. Расчетная процедура метода хорд, реализованная на основе итерационного цикла, позволяет существенно снизить затраты машинного времени.
5. Для автоматизированных расчетов показателей балансовой надежности ЭЭС разработан программный комплекс

«БАЛНА», ориентированный на использование современных вычислительных средств. Данный программный комплекс может использоваться как самостоятельно, так и в составе иных программных комплексов в проектной и эксплуатационной практике.

Практическая ценность

Разработанные в диссертационной работе математические методы, алгоритмы и программы позволяют учесть ряд дополнительных факторов и более объективно принимать решения при планировании развития энергосистем; дают дополнительную информацию при планировании капитальных ремонтов основного оборудования ЭЭС или заключении договоров между ЭЭС на покупку и продажу электроэнергии; могут быть использованы в проектных и научно-исследовательских организациях при решении задач выбора резерва мощности и пропускных способностей межсистемных связей, оптимизации и планирующих мощностей, формировании требований к надежности отдельных элементов энергосистем, оптимизации затрат на повышение надежности.

Реализация результатов работы

Разработанные методы, алгоритмы и программы внедрены на кафедре АЭС УГТУ для использования в учебных целях по теме «Надежность электроэнергетических систем».

Апробация работы

Отдельные разделы диссертации докладывались на X областной учебно-методической конференции УГТУ-УПИ, Екатеринбург, 1994; на втором российском научно-техническом семинаре «Энергетика: Экология, Надежность, Безопасность», Томск, 1996; на международной научно-технической

конференции «Современные технологии экономического и безопасного производства и использования электроэнергии», Днепропетровск, 1997.

Публикации

Основное содержание диссертации отражено в 3 печатных работах.

Объем и структура работы

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка (133 наименований), содержит 24 рисунка, 18 таблиц и одно приложение. Общий объем диссертационной работы составляет 158 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена общая характеристика диссертационной работы: показана ее актуальность, сформулирована цель работы, отражена научная новизна и практическая ценность, описана структура работы.

В первой главе кратко анализируются существующие методы оценки балансовой надежности ЭЭС. Сформулированы задачи исследования и определены основные требования и допущения при решении задач определения показателей балансовой надежности ЭЭС.

Наиболее применяемыми в российской и зарубежной практике методами анализа балансовой надежности являются методы статистического моделирования и вероятностных рядов. Применение этих методов требует больших затрат машинного времени и памяти, что и ограничивает сферу использования упомянутых методов. Предлагается обобщенный метод оценки

балансовой надежности ЭЭС, основанный на вероятностном преобразовании электрических схем. Модель ЭЭС в рассматриваемой задаче представлена следующими составляющими:

1. Система генерации отдельной ЭЭС представляется в виде групп однотипных агрегатов (под однотипными понимаются агрегаты, имеющие одинаковую мощность и аварийность) с биномиальным законом распределения вероятностей их состояний, с последующим их объединением в виде вероятностных рядов. Правомочность аппроксимации вероятностных рядов некоторым непрерывным распределением (нормальное распределение, гамма-распределение и др.) в генерирующей системе приводит к появлению погрешностей и в каждом конкретном случае должна быть обоснована по критериям допустимости (критерий Фишера и др.).
2. В задачах перспективного планирования прогнозируемая нагрузка представляется случайной величиной, описываемой, как правило, нормальным распределением. В то же время, встречаются ситуации, когда требуется дать оценку надежности при детерминированно-заданной нагрузке. Отсюда используемые математические методы должны учитывать как случайный, так и детерминированный характер нагрузки.
3. Пропускная способность межсистемных связей представляется своими вероятностными рядами. Аппроксимация вероятностного ряда непрерывными распределениями нежелательна, поскольку число состояний связи, как правило, невелико (при одной линии - это два состояния: включено, отключено).
4. Результирующий небаланс мощности в каждой энергосистеме зависит от стратегии взаимопомощи в ОЭЭС. Можно делить 4 критерия взаимопомощи между энергосистемами

- Критерий «простого спроса». Наиболее явно проявляется данный критерий в ОЭС с неуправляемыми перетоками по межсистемным связям. В этом случае появление дефицита мощности в одной ЭЭС приводит к снижению частоты во всем объединении и ограничению потребителя даже в изначально избыточных ЭЭС. Это значит, что при определении результирующих параметров небаланса мощности в каждом узле учитывается не только генерирующий, но и нагрузочный характер небалансов мощностей в соседних узлах.

- Критерий «локального эгоизма». В условиях территориальной и экономической дезинтеграции определенный интерес представляет стратегия «локального эгоизма», при которой подсистема будет оказывать помощь лишь в том случае, когда она обладает необходимым для этой цели резервом мощности. Здесь на этапе определения результирующих показателей балансовой надежности соседние энергосистемы представляются в виде «эквивалентного генератора».

- Критерий «равной надежности». Наиболее рациональной в условиях единого хозяйственного механизма является стратегия, определяемая оптимальным распределением дефицита или резерва мощности в ОЭС. При равных удельных ущербах в ЭЭС решением оптимизационной задачи является равенство вероятностей бездефицитной работы всех энергосистем. Это условие может рассматриваться в качестве критерия «равной надежности».

- Критерий «договорного перетока». В рыночной экономике все больше реализуется стратегия, когда перетоки мощности и электроэнергии между энергосистемами регламентируются контрактными соглашениями. Здесь возможны две ситуации, когда энергосистема выступает в роли по-

ставщика и покупателя. В том и другом случаях договорная мощность представляется детерминированной величиной, эквивалентной либо генерации, либо нагрузке в зависимости от условий соглашений.

Оценка балансовой надежности сводится к определению функции распределения небаланса мощности в каждой ЭЭС с учетом спроса и предложения от других энергосистем объединения. Взаимовлияние соседних ЭЭС может быть реализовано в виде дополнительных генераций или нагрузок с расчетными функциями распределения. Результирующие показатели балансовой надежности (вероятность и математическое ожидание дефицита мощности, математическое ожидание недопуска электроэнергии и др.) вычисляются из конкретной реализации функции распределения. Расчет балансовой надежности сложной ОЭЭС разделяется на следующие основные этапы: построение собственных функций распределения небалансов мощности всех ЭЭС, входящих в объединение; определение степени взаимовлияния энергосистем по межсистемным связям; определение результирующих показателей надежности.

Во второй главе рассмотрены метод редуцированного эквивалентирования и алгоритмы направленного и ненаправленного преобразования ОЭЭС, имеющей радиальную схему электрических соединений.

Для каждой изолированной ЭЭС собственный небаланс мощности описывается функцией нормального распределения $F(x)$ с математическим ожиданием M и дисперсией σ^2 . В расчетах взаимопомощи со стороны других ЭЭС в радиальной схеме применяется метод исключения узлов первого ранга. При этом реальное распределение небаланса мощности искомого ЭЭС заменяется усеченным, поскольку помощь, ко

рью она может оказывать другим энергосистемам, а также суммарный поток мощности, полученный от других энергосистем, не могут быть больше суммарной пропускной способности всех смежных связей. Результирующий спрос $N_A(B)$ подсистемы В от подсистемы А, связанной с В линией с ограниченной пропускной способностью $(-PC_{AB,k}, PC_{BA,k})$ и усеченным распределением $F_{A(B)}^k(x) = F_B(x)$ при $(-PC_{AB,k} \leq x \leq PC_{BA,k})$, представляется распределением типа «взвесь» с весами p_k , определяемыми вероятностями состояний связи. Математическое ожидание и дисперсия добавки $N_A(B)$ описываются выражениями:

$$M_{A(B)} = \sum_k p_k \left\{ PC_{BA,k} F(a_k) + PC_{AB,k} [1 - F(b_k)] + \right. \\ \left. + \sigma_B^2 [f(a_k) - f(b_k)] + M_B [F(b_k) - F(a_k)] \right\};$$

$$D_{A(B)} = \sum_k p_k \left\{ PC_{BA,k}^2 F(a_k) + PC_{AB,k}^2 [1 - F(b_k)] + D_B [a_k f(a_k) - b_k f(b_k)] + \right. \\ \left. + 2M_B D_B [f(a_k) - f(b_k)] + (M_B^2 + D_B) [F(b_k) - F(a_k)] \right\} - M_{A(B)}^2,$$

где $M_B, D_B = \sigma_B^2$ - математическое ожидание и дисперсия небаланса мощности подсистемы В; $f(x)$ и $F(x)$ - плотность и интегральная функция нормального распределения;

$$a_k = -\frac{PC_{BA,k} + M_B}{\sigma_B}; \quad b_k = \frac{PC_{AB,k} - M_B}{\sigma_B}.$$

После исключения узла первого ранга В результирующие показатели небаланса мощности подсистемы А будут иметь вид

$$(M_A^*, D_A^*) = (M_A, D_A) + (M_B, D_B)_{-BA}^{AB}.$$

На уровне математического ожидания и дисперсии это означает

$$M_A^* = M_A + M_{A(B)}; \quad D_A^* = D_A + D_{A(B)}.$$

Суммарный небаланс мощности в узле А далее представляется нормальным распределением, а не комбинированным,

что вносит определенную погрешность. Однако расчеты показывают, что эта погрешность незначительна и не является основанием для отказа от относительно быстрой процедуры эквивалентирования.

Учет влияния стратегии взаимопомощи между энергосистемами при исключении узлов выполняется путем изменения левой и правой границ интервала редуцирования и соответственно коррекции добавки небаланса мощности к смежному узлу.

Для определения показателей балансовой надежности каждой ЭЭС в радиальном объединении предложен алгоритм направленного преобразования, суть которого заключается в последовательном свертывании электрической схемы к расчетному базовому узлу путем последовательного исключения всех кроме базового, узлов. Установлено, что увеличение числа узлов и связей приводит к резкому увеличению затрат машинного времени (по экспоненциальному закону). С другой стороны, доказано, что порядок исключения узлов не влияет на окончательный результат. Это приводит к идее разработки алгоритма ненаправленного исключения узлов. Данный алгоритм состоит из двух этапов:

- Преобразование исходной схемы к простейшей путем последовательного исключения из нее узлов первого ранга. При этом отсутствует предварительный выбор последнего узла.

- Последовательное восстановление в схеме ранее исключенных узлов. В процессе восстановления узлов считаются известными показатели надежности уже восстановленных узлов. Это возможно в случае, когда восстановление узлов выполняется в порядке, обратном порядку их исключения.

По сути дела, процедура восстановления ничем не отличается от процедуры исключения. При этом для определ

добавки $N_B(A)$ системы А к восстанавливаемой системе В следует изъять добавку $N_A(B)$ из результирующего небаланса мощности подсистем А, так как на данном этапе показатели балансовой надежности узла А являются результирующими, полученными с учетом всех подсистем радиально подключенных к А и исключенных раньше А и в том числе узла В.

$$M_{A,B} = M_A^* - M_{(B)}; \quad D_{A,B} = D_A^* - D_{(B)}.$$

Далее по описанной процедуре исключается узел А. Применение алгоритма ненаправленного исключения при относительно небольшой погрешности результирующих параметров позволяет существенно ускорить расчетный процесс. Алгоритм направленного эквивалентирования имеет более высокую точность, так как здесь исключены ошибки на этапе восстановления.

В третьей главе рассматривается применение метода и алгоритма исключения узлов ранга два для определения показателей балансовой надежности ОЭС повышенной сложности.

Выявлено, что закон преобразования электрических цепей в задаче определения показателей надежности в общем виде требует коррекции и прежде всего в части пропускной способности эквивалентных связей. Для исключения узлов второго ранга предложены два метода: балансового эквивалентирования и пропорционального распределения.

Метод балансового эквивалентирования основан на критерии равенства спроса и предложения. Так, например, при исключении узла С, соединенного с узлами А и В связями АС и ВС (рис. 1), воздействия подсистем А и С на подсистему В и также воздействия подсистем В и С на подсистему С в исходной и эквивалентной схемах должны быть одинаковыми. При этом шунтирующая связь между подсистемами В и А в ис-

ходной схеме может отсутствовать или присутствовать в зависимости от конкретной реализации.

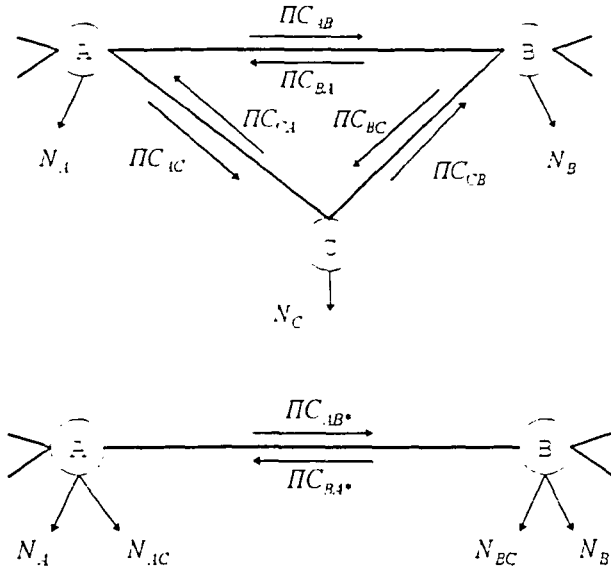


Рис. 1. Исключение узла ранга два

Воздействия подсистем А и С на подсистему В в исходной и эквивалентной схемах определяются:

$$\left((\bar{N}_A, \sigma_A)_{-ac-ab}^{ba+ca} + (\bar{N}_C, \sigma_C)_{-ca-cb}^{ac+bc} \right)_{-cb-ab}^{ba+bc} = \left((\bar{N}_A, \sigma_A) + (\bar{N}_{AC}, \sigma_{AC}) \right)_{-ab}^{ba^*} + (\bar{N}_{BC}, \sigma_{BC})$$

где верхний и нижний индексы после круглых скобок означают пределы редуцирования.

Аналогичным образом определяется равенство воздействий подсистем В и С на подсистему А в исходной и результирующей схемах:

$$\left((\bar{N}_B, \sigma_B)_{-ba-bc}^{ab+cb} + (\bar{N}_C, \sigma_C)_{-ca-cb}^{ac+bc} \right)_{-ba-ca}^{ab+ac} = \left((\bar{N}_B, \sigma_B) + (\bar{N}_{BC}, \sigma_{BC}) \right)_{-ba}^{ab^*} + (\bar{N}_{AC}, \sigma_{AC})$$

В случае без шунтирующей связи А-В система уравнений преобразуется в следующий вид:

$$\left((\bar{N}_A, \sigma_A)_{-ac}^{ca} + (\bar{N}_C, \sigma_C)_{-ca-cb}^{ac+bc} \right)_{-cb}^{bc} = \left((\bar{N}_A, \sigma_A) + (\bar{N}_{AC}, \sigma_{AC}) \right)_{-ab}^{ba^*} + (\bar{N}_{BC}, \sigma_{BC})$$

$$\left((\bar{N}_B, \sigma_B)_{-bc}^{cb} + (\bar{N}_C, \sigma_C)_{-ca-cb}^{ac+bc} \right)_{-ca}^{ac} = \left((\bar{N}_B, \sigma_B) + (\bar{N}_{BC}, \sigma_{BC}) \right)_{-ba}^{ab*} + (\bar{N}_{1C}, \sigma_{1C}) .$$

Дополнительным условием является равенство небаланса мощности N_C сумме инъекций N_{1C} , N_{2C} . Решение представленной системы уравнений относительно математических ожиданий и дисперсий инъекции и пропускных способностей эквивалентной связи может быть найдено путем применения методов нелинейного программирования. Чтобы порядок исключения узлов не влиял на окончательный результат, необходимо предварительно редуцировать небалансы мощности в системе А и В по всем остальным смежным связям.

Метод пропорционального распределения применяется в случае, когда пропускные способности межсистемных связей по двум направлениям одинаковы.

При исключении узла С, соединенного с узлами А и В связями АС и ВС, его небаланс мощности разносится между смежными узлами пропорционально пропускным способностям соответствующих связей (считается, что пропускная способность пропорциональна проводимости межсистемной связи).

Пропускная способность PC_{AB} новой связи отражает мощность системе В со стороны системы А транзитом через узел С и определяется с учетом теории транспортных потоков и электрического эквивалентирования цепей. При дальнейшем исключении узла А, связанного с узлом В через новообразованную связь АВ, необходимо учесть существование фиктивного потока мощности по связи АВ.

Если пропускная способность связей АС и ВС представляется вероятностным рядом $(p_i, PC_{AC,i}, PC_{CA,i})$ и $(p_j, PC_{BC,j}, PC_{CB,j})$, то математическое ожидание и дисперсия инъекции небаланса мощности к системам А и В и пропускная способность новой связи АВ определяются как средневзвешенные с весами, определяемыми вероятностями совместных состояний.

Для исключения узлов ранга два метод балансового эквивалентирования является более универсальным по сравнению с методом пропорционального распределения, поскольку в общем случае пропускные способности связи по двум направлениям могут быть неодинаковыми. Однако метод пропорционального распределения имеет большее быстродействие, поскольку при применении метода балансового эквивалентирования требуются большие затраты машинного времени для решения системы уравнений методами нелинейного программирования.

Разработан программный алгоритм метода оценки балансовой надежности ОЭС. Для определения показателей балансовой надежности очередного базового узла с помощью методов исключения узлов первого и второго ранга расчетная схема свертывается к базовому. Для сложных концентрированных электрических схем, не подлежащих полной свертке применяется методика приближенной оценки показателей балансовой надежности для высококонцентрированных систем. Проверочные расчеты показывают достаточно высокую эффективность последнего алгоритма.

В четвертой главе рассмотрено применение метода хорд для анализа балансовой надежности многоконтурной ОЭС. Суть метода хорд заключается в преобразовании сложной схемы соединения ОЭС в радиальную путем отключения и эквивалентирования участка хорд графа ОЭС в передаче небалансов мощности. При отключении хорд в смежные узлы вводятся инъекции небаланса мощности, равные ожидаемому потоку небаланса мощности по хорде (рис. 2).

Чтобы снизить влияние разрыва хорд на результирующие показатели балансовой надежности энергосистем, предлагается выбирать хорды из множества «слабых» связей, то есть из тех, которые имеют наименьшую пропускную способность

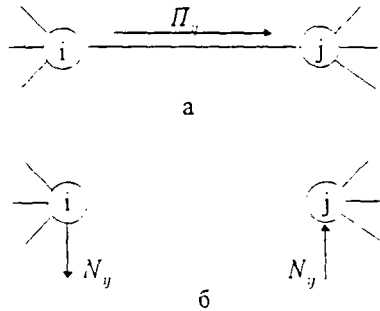


Рис 2. Схема отключения линии-хорды $i-j$

Для многих практических задач потоки мощности по хордам можно рассматривать как заданные постоянные значения. При этом априорно задаваемые потоки небаланса мощности могут оцениваться на основе опыта эксплуатации, по оценкам экспертов или решением систем уравнений установившегося режима.

Поскольку межсистемные связи играют роль выравнивания небалансов мощностей между соседними узлами, поток небаланса мощности по хорде может быть представлен в виде разницы небалансов мощности в начальном и конечном узлах хорды:

$$\bar{P}'_{ij} = \frac{1}{2}(\bar{N}_i - \bar{N}_j), \quad D'_{ij} = \frac{1}{4}(D_i + D_j).$$

Инъекции небалансов мощности в смежных узлах определяются путем редуцирования потока мощности по хорде на интервале $(-PC_{ij}, PC_{ij})$.

В результате разрыва хорд схема ОЭЭС преобразуется в радиальную. С помощью метода исключения-восстановления узлов первого ранга определяются математические ожидания и дисперсии небалансов мощности во всех узлах радиальной структуры. Поскольку полученные небалансы мощности в уз-

лах (концах) хорд не равны начальным, то значения параметров потока небаланса мощности по хорде должны быть перераспределены. С помощью итерационных процедур можно определить результирующие показатели балансовой надежности ЭЭС.

Итерационный процесс имеет колебательный характер для устранения которого вводится коэффициент демпфирования. Расчеты показывают, что метод хорд имеет хорошую сходимость (до 4-5 итераций при применении ускорения) быстрое действие при относительно небольшой погрешности. Разработан программный алгоритм метода хорд для оценки балансовой надежности многоконтурной ЭЭС.

Пятая глава посвящена разработке и апробированию программного комплекса для определения показателей балансовой надежности ЭЭС. Проведены экспериментальные проверки разработанных методов, алгоритмов и программного комплекса.

Объединение разработанных методов и алгоритмов в единый программный комплекс позволяет достаточно гибко пользоваться спецификой критериев взаимопомощи и с помощью отличающихся алгоритмов оценить балансовую надежность сложных ЭЭС. Разработанный программный комплекс «БАН» (балансовая надежность) написан на языке программирования высокого уровня Object Pascal и позволяет на современных персональных компьютерах определить показатели балансовой надежности ЭЭС.

С помощью программного комплекса выполнен анализ балансовой надежности ЭЭС Вьетнама. Результаты расчетов наглядно доказывают эффективность объединения Север, Центральной и Южной ЭЭС в Единую энергетическую систему. Расчеты также показывают необходимость вводов новых

ностей в Южной ЭЭС для нормального обеспечения развития промышленности на Юге Вьетнама.

Таблица 1

Результирующие показатели балансовой надежности ЭЭС Вьетнама в 1994 г. (до и после включения линии 500кВ)

Узел	До включения линии 500 кВ			После включения линии 500 кВ		
	МО рез., МВт	СКО рез., МВт	Ј рез.	МО рез., МВт	СКО рез., МВт	Ј рез.
Север	-1329	306	1,00000	-1321	387	0,99968
Центр	-63	254	0,59766	-659	265	0,99343
Юг	-45	157	0,61317	-715	268	0,99609

Таблица 2

Результирующие показатели балансовой надежности ЭЭС Вьетнама в 1996 г. (вариант развития 3)

Узел	Ген., МВт	МО соб., МВт	СКО соб., МВт	Ј соб.	МО рез., МВт	СКО рез., МВт	Ј рез.
Север	2805	-1177	312	0,99991	-1385	415	0,99957
Центр	1684	-416	274	0,93526	-1005	306	0,99946
Юг	204	162	143	0,12916	-1030	298	0,99973

Анализ расчетов, полученных по тестовой схеме Сибирского энергетического института, демонстрирует эффективность разработанной методики определения балансовой надежности сложных ОЭЭС. Расчеты показывают практическую равноценность метода хорд и исключения узлов второго ранга. Метод хорд дает несколько заниженные оценки параметров балансовой надежности, поэтому его рекомендуется применять при определении нижних границ при интервальных оценках. Время расчетов тестовой схемы СЭИ на современном ПК Pentium 200-ММХ при применении метода исключения узлов ранга два составляло 12 минут 53 секунды. Использование метода хорд позволило снизить расчетное время до 54 секунд. Для сопоставления результатов с известными методами и программами был выполнен расчет балансовой надежности ЭЭС при следующих условиях: 1) во всех узлах рассматриваемая нагрузка декабря увеличивается на 10 процентов; 2) при учете вероятностного характера нагрузки коэффициент K_H принят равным 4.

Сопоставительные результаты представлены в виде табл. 4.

Таблица 3
Результаты расчета тестовой схемы ЭЭИ
методом хорд и исключения узлов ранга два

№	Метод хорд				Метод исключения узлов ранга 2			
	МО, МВт	СКО, МВт	J	Q=1-J	МО, МВт	СКО, МВт	J	Q=1-J
1	-5644.6	1326.8	0.9999895	1.049E-05	-5813.9	1297.7	0.9999963	3.733E-06
2	-16223.6	4118.7	0.9999591	4.093E-05	-16945.7	3974.2	0.9999899	1.005E-05
3	-16907.5	4620.1	0.9998736	1.264E-04	-17425.5	4484.2	0.9999490	5.098E-05
4	-16246.4	4175.1	0.9999501	4.988E-05	-17004.4	3970	0.9999920	7.956E-06
5	-4640.1	1435.5	0.9993861	6.139E-04	-4740.8	1384.9	0.9996905	3.095E-04
6	-10502.9	2645.6	0.9999640	3.596E-05	-11012.5	2533	0.9999992	7.839E-07
7	-6912.1	1903.4	0.9998590	1.410E-04	-7303.9	1816.8	0.9999709	2.909E-05
8	-4041.9	1367.5	0.9984401	1.560E-03	-4169.3	1410.5	0.9984412	1.559E-03
9	-7131.6	1028.4	1.0000000	2.049E-12	-7458.9	993.7	1.0000000	3.331E-16
10	-14987.5	2548.6	1.0000000	2.050E-09	-15676.7	2423.6	1.0000000	1.269E-11
11	-7356.3	1974.3	0.9999027	9.729E-05	-7356.6	1973.8	0.9999031	9.687E-05
12	-7957.5	1277.5	1.0000000	2.357E-10	-7960.8	1273.8	1.0000000	2.066E-11
13	-3273.6	828.9	0.9999608	3.920E-05	-3273.6	828.9	0.9999608	3.920E-05

$\Delta M_{\max} = 4,85\%$, $\Delta \sigma_{\max} = 4,55\%$

Таблица 4
Результатирующие показатели балансовой надежности ЭЭС
тестовой схемы, вычисленные по разным программам

№	Программа				
	Янгтарь	Орион	Поток-3	БАЛНА	
				Хорд	Иск. узлов ранга 2
1	0,99244	0,9912	0,99905	0,992926	0,999897
2	0,99254	0,9912	0,99918	0,993155	0,999382
3	0,99253	0,9912	0,99918	0,991613	0,999138
4	0,99254	0,9912	0,99918	0,991897	0,999317
5	0,99023	0,9880	0,99826	0,990166	0,997949
6	0,99254	0,9912	0,99918	0,992955	0,999401
7	0,99248	0,9912	0,99899	0,991338	0,999707
8	0,98957	0,9874	0,99607	0,989932	0,993367
9	0,99871	0,9980	0,99890	0,998112	0,999469
10	0,99931	0,9992	0,99996	0,998720	0,999999
11	0,98868	0,9789	0,98784	0,985498	0,995769
12	0,99638	0,9980	0,99903	0,996473	0,999952
13	0,99759	0,9970	0,98147	0,998242	0,998743

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В настоящее время отсутствуют точные методы и программы оценки балансовой надежности сложных ЭЭС. Существующие методы и программы имеют ограниченную область применения, поскольку, во-первых, эти методы недостаточно полно учитывают стратегии взаимопомощи, и, во-вторых, эти программы, как правило, требуют больших затрат оперативной памяти и машинного времени.

2. Предложенная модель ЭЭС учитывает состав и характеристики генерирующих агрегатов, дискретный и вероятностный характер нагрузки, а также ограничения пропускных способностей межсистемных связей.

3. Разработанный метод, основанный на эквивалентном преобразовании электрической схемы и небалансов мощности узлов, позволяет учесть ряд дополнительных факторов, влияющих на производство и передачу электроэнергии, таких как критерии взаимопомощи между ЭЭС («простого спроса», «локального эгоизма», «равной надежности» или «договорного перетока»).

4. Предложенные математические методы и алгоритмы дают возможность оценивать балансовую надежность ОЭЭС любой сложности. Разработанный программный комплекс позволяет провести анализ балансовой надежности ЭЭС с числом узлов до 50 и числом межсистемных связей до 200.

5. Тестовые расчеты подтвердили высокую эффективность разработанных методов и алгоритмов при определении показателей балансовой надежности сложных ОЭЭС.

6. Анализ результатов расчетов показал, что разработанные в диссертационной работе расчетные процедуры не уступают по точности известным методам, а по некоторым показателям превосходят их.

7. Принципиальные положения и особенности разработанных методов и алгоритмов открывают возможности дальнейшего совершенствования программного комплекса в следующих направлениях:

- Определение величины отключенной мощности и недоотпуска электроэнергии.
- Оптимизация величины и размещения резервов и генерирующих мощностей в ОЭС.
- Оптимизация пропускных способностей межсистемных связей.
- Формирование требований к надежности отдельных элементов энергосистем.
- Оптимизация затрат на повышение надежности энергетической системы.
- Формирование тарифов на электроэнергию.
- Подготовка договоров о покупке и продаже электроэнергии и мощности на рынке электроэнергии.

8. Предложенные методы, алгоритмы и программы могут эффективно использоваться для решения задач развития Единой электроэнергетической системы Вьетнама.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. Котов О. М., Нгуен В. К., Обоскалов В. П. Метод эквивалентирования в задачах анализа надежности электроэнергетических систем // Современные технологии экономического и безопасного использования электроэнергии Днепропетровск, 1997.

2. Нгуен В. К., Обоскалов В. П. Алгоритм и метод расчета балансовой надежности электроэнергетических систем // Тр. Второго Российского научно-технического семинара «Энергетика: Экология, Надежность, Безопас-