

005060431

На правах рукописи

ШУЛЬГИН
Иван Викторович

**СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЗОК В ЗАДАЧЕ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
СИСТЕМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

30 МАЯ 2013

Красноярск – 2013

Работа выполнена на кафедре «Электрические станции и электроэнергетические системы» в ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Герасименко Алексей Алексеевич

Официальные оппоненты: **Секретарев Юрий Анатольевич**, доктор технических наук, профессор; ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет», кафедра Систем электро-снабжения предприятий, зав. кафедрой

Кунгс Ян Александрович, кандидат технических наук, профессор; ФГБОУ ВПО «Красноярский государственный аграрный университет», кафедра Системознергетики, профессор

Ведущая организация: **ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»**, г. Томск

Защита состоится 19 июня 2013 года в 13.00 на заседании диссертационного совета Д 212.099.07 при Сибирском федеральном университете по адресу:
г. Красноярск, ул. Ленина, д. 70, ауд. А-204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского федерального университета.

Автореферат разослан 17 мая 2013 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Чупак Татьяна Михайловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Решение комплекса задач расчёта, анализа и планирования режимов работы энергосистемы базируется на методах, дающих возможность оценить интегральные характеристики режима энергосистемы, к которым относят электропотребление, потери электроэнергии, диапазоны изменения напряжений в узлах и перетоков мощности в линиях, суммарный расход топлива, себестоимость энергии, выработку энергии за определенный период и др.

Определение интегральных характеристик режимов работы электрических систем является основой для решения широкого круга задач управления электрическими сетями (ЭС). Без детального расчёта прозрачной структуры потерь, диапазонов изменения режимных параметров, расчёта фактических и допустимых небалансов электроэнергии невозможно решение задач развития и оптимизации режимов, выбор обоснованного перечня приоритетных мероприятий по снижению потерь электроэнергии и т. п.

Достоверное определение основной интегральной характеристики – потерь электроэнергии в ЭС – имеет самостоятельное значение при решении задач как эксплуатации, так и проектирования. При этом необходимо оценивать диапазоны возможных изменений напряжений в отдельных узлах и сравнивать их с допустимыми. Однако, непосредственное определение интегральных характеристик ЭС затруднено случайным и частично неопределённым характером исходной информации о нагрузках распределительных электрических сетей.

В работе рассматриваются распределительные электрические сети, к которым относятся сети напряжением 6–110 кВ и в ряде случаев 220 кВ. Распределительные сети составляют наиболее массовую и разветвлённую часть электрических сетей и концентрируют в себе около 78% общей величины технических потерь электроэнергии, в том числе сети 110–220 кВ – 28%, сети 35 кВ – 16% и сети 0,38–10 кВ – 34%.

Существенный вклад в исследование и разработку методов, алгоритмов расчёта, оценки потерь электроэнергии в системах её распределения внесли научные и проектные коллективы под руководством известных ученых: Д. А. Арзамасцева, П. И. Бартоломея, А. С. Бердина, О. Н. Войтова, В. Э. Воротницкого, Ю. С. Железко, В. Н. Казанцева, Ю. Г. Кононова, В. Г. Курбацкого, А. В. Липеса, В. З. Манусова, А. В. Паздерина, В. Г. Пекелиса, Г. Е. Поспелова, А. А. Потребича, Н. М. Сыча, Д. Л. Файбисовича, М. И. Фурсанова и др. Среди иностранных учёных: Holger Schau, Jiang Hui-lan, A. L. Shekman, R. Taleski, Yang Xiutai, Zhizhong Guo и др.

К настоящему времени разработано и продолжает развиваться значительное количество методов, алгоритмов и программ расчёта и нормирования потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях, однако, вопрос и поныне остается актуальным и недостаточно изученным. Это связано, в частности, и с тем, что отсутствует полная и достоверная информация о нагрузках электрических сетей всех ступеней напряжения. Несмотря на значительные достижения проблема совершенствования разработанных и создания новых методов и алгоритмов, предложение эффективных подходов моделирования электрических нагрузок и определения интегральных характеристик в системах распределения электрической энергии остаётся актуальной.

Методы расчёта и прогнозирования электрических нагрузок развивались работами: Д. А. Арзамасцева, С. Д. Волобринского, В. И. Гордеева, Н. А. Денисенко,

И. В. Жежеленко, Г. М. Каялова, Б. И. Кудрина, Э. Г. Куренного, И. И. Надтоки, В. Ф. Тимченко, Ю. А. Фокина и др.

Дальнейшее улучшение эффективности расчётов может быть достигнуто в результате анализа и оценки свойств и возможностей вероятностно-статистических и детерминированных методов, максимального обобщения (сжатия) исходной статистической информации об электрических нагрузках и разработки методики позволяющей объединить положительные стороны известных методов и в определённой мере – компенсировать их недостатки. Методологической основой такого объединения является более полное использование стохастических и детерминированных основ как при моделировании электрических нагрузок в системах распределения электроэнергии, так и при построении новых методов и вычислительных алгоритмов.

В данной работе предпринята попытка учёта многорежимности, основанная на статистическом моделировании графиков нагрузок, и определения интегральных характеристик распределительных электрических сетей 6–110(220) кВ.

Объект исследования – распределительные электрические сети напряжением 6–110(220) кВ.

Предмет исследования – методы моделирования электрических нагрузок и методы расчёта интегральных характеристик режимов ЭС.

Цель исследования – совершенствование методов расчёта нагрузочных потерь электроэнергии, диапазонов и диаграмм изменения реактивной мощности и напряжений в узлах электроэнергетических систем на основе статистического моделирования электрических нагрузок, развития и сочетания стохастического и детерминированного методов учёта многорежимности и влияния атмосферных факторов.

Задачи исследования:

1. Анализ стохастических и детерминированных методов расчёта интегральных характеристик с целью дальнейшего исследования и совершенствования их алгоритмов.
2. Разработка алгоритма статистического моделирования матрицы корреляционных моментов (МКМ) мощностей, графиков электрических нагрузок ЭС и диаграмм модулей и фаз напряжений.
3. Разработка методики стохастического расчёта нагрузочных потерь электроэнергии, диапазонов изменения напряжений в узлах и реактивной мощности источников на основе факторного статистического моделирования многорежимности с учётом информационной обеспеченности распределительных сетей.
4. Усовершенствование детерминированного алгоритма расчёта потерь электроэнергии в распределительных сетях с помощью учёта схемно-режимных и атмосферных факторов.
5. Разработка и реализация алгоритма расчёта интегральных характеристик ЭС на основе статистического моделирования электрических нагрузок.

Основная идея диссертации – совершенствование стохастических методов определения интегральных характеристик режимов работы распределительных электрических сетей на основе статистической модели электрических нагрузок и учёт влияния атмосферных факторов при определении потерь электроэнергии.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использовались методы теории вероятностей и математической статистики (факторный, корреля-

ционный и регрессионный анализ); численные методы решения систем линейных и нелинейных уравнений; теория эксперимента; метод статистических испытаний; пакеты прикладных программ (MATLAB и FORTRAN).

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Алгоритмы моделирования факторной статистической модели МКМ, ортогональных графиков нагрузок, графиков электрических нагрузок мощностей и диаграмм модулей и фаз напряжений узлов ЭС, учитывающие в сжатой форме многорежимность работы электрических сетей.

2. Расчётные выражения, предложенные для определения нагрузочных потерь электроэнергии, диапазонов изменения напряжений в узлах ЭС и реактивной мощности источников на основе статистической модели нагрузок.

3. Два алгоритма, учитывающие дополнительное нагревание проводов ВЛ за счёт влияния схемно-режимных и атмосферных факторов на основе дифференциального уравнения теплопроводности и на основе уравнения теплового баланса при расчёте потерь электроэнергии.

4. Методика, алгоритм и программа определения технических потерь электроэнергии, диаграмм и диапазонов изменения напряжений в узлах ЭС и реактивной мощности источников на основе модифицированной стохастической модели анализа установившихся режимов ЭС.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Разработан алгоритм получения статистической модели графиков электрических нагрузок и МКМ мощностей для решения задачи определения интегральных характеристик, краткосрочного прогнозирования и оптимизации режимов ЭС на основе анализа статистической выборки графиков мощностей энергосистемы.

2. Предложен комбинированный подход к определению нагрузочных потерь электроэнергии в виде основной и дисперсионной составляющих на основе стохастического и детерминированного методов, при котором в зависимости от состава исходных данных дисперсионную составляющую потерь электроэнергии можно вычислять, сочетая различные выражения потерь, с определенным весом.

Значение для теории. Результаты, полученные в диссертационной работе, вносят вклад в развитие методов математического моделирования в электроэнергетике, методов стохастического учёта множества установившихся режимов электроэнергетических систем, в расчётные исследования по транспорту электроэнергии переменным током и в развитие методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике.

Значение для практики заключается в создании методов и алгоритмов, позволяющих надёжно определить интегральные характеристики режимов работы распределительных сетей в условиях недостатка исходной информации. Разработанные алгоритмы, методика и программа могут быть использованы в сетевых компаниях и проектных организациях для эффективной оценки балансов электроэнергии, расчёта установившихся режимов, решения задач краткосрочного прогнозирования нагрузок и оптимизации режимов работы ЭС, выявление очагов значительных потерь, планирование мероприятий по снижению потерь, что в итоге позволяет повысить эффективность управления распределительными сетями.

Достоверность полученных результатов. Проверка достоверности полученных результатов определялась сравнительным анализом с эталонными значе-

ниями, которые рассчитаны по данным статистических испытаний с использованием полного объёма исходной информации по режиму сети применительно к ряду тестовых и реальных электрических схем, а также за счёт сопоставления с результатами, полученными с помощью лицензированных программных продуктов.

Использование результатов диссертации. Результаты диссертационной работы использовались:

- в учебном процессе (для ведения курсового и дипломного проектирования, практических занятий по дисциплине «Электроэнергетические системы и сети»);
- при выполнении хозяйственного договора (заказчик филиал ВЭС ОАО «Красноярскэнерго»): Расчёт и анализ режимов работы сетей 10/0,4 кВ ВЭС ОАО «Красноярскэнерго» по потерям мощности, напряжения и электроэнергии. Исп. темы – И. В. Шульгин. - № ГР 01.2.007 08814. Инв. № 119/05-2. Красноярск, 2006;
- при создании программы SETI расчёта установившихся режимов и интегральных характеристик ЭС на основе статистической модели нагрузок для произвольных интервалов времени, принятой в опытную эксплуатацию в ООО «СФУ – Энергоаудит», в ООО ПКФ «Энергоресурс–Сервис» и в филиал ОАО «СО ЕЭС» Красноярское РДУ, что подтверждается актами внедрения.

Личный вклад автора. Автору принадлежат формализация поставленных задач, разработка математических моделей, обобщение, анализ результатов, программная реализация алгоритмов. Научные и практические результаты диссертации, положения, выносимые на защиту, разработаны и получены автором. Разработка и реализация общей научной идеи выполнена при участии научного руководителя.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и региональных конференциях: Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: Молодежь и наука: начало XXI века (г. Красноярск 2006, 2007); Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии» (г. Тольятти, 2007); Международная научно-практическая конференция «Энергосистема: управление, конкуренция, образование» (г. Екатеринбург 2008); Международная научно-техническая конференция студентов, магистрантов, аспирантов «Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов» (г. Тольятти 2009); IV Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика в современном мире» (г. Чита 2009); Первый Всероссийский молодежный конкурс наукоемких инновационных идей и проектов «Энергетика будущего» (г. Томск 2012); Ежегодный конкурс студенческих проектов «Энергия развития 2012», организованной ОАО «РусГидро» (г. Москва, 2012).

Публикации. Основные результаты исследований по данной теме опубликованы в 13 печатных работах, из которых: 6 статей в научных журналах по списку ВАК, 1 статья в сборнике научных трудов, 6 статей по материалам конференций.

Общая характеристика диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех основных разделов, заключения, списка использованных источников из 116 наименований и 5 приложений. Материал изложен на 179 страницах основного текста и на 60 страницах приложений. В работе приведены 9 рисунков и 21 таблица.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы моделирования электрических нагрузок, расчёта и анализа интегральных характеристик режимов электроэнергетических систем, подчёркнута значимость решения данной задачи в системах распределения электроэнергии с учётом многорежимности. Сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и основные результаты, выносимые на защиту. Приведены сведения о внедрении и практической ценности выполненной работы.

В первом разделе рассматривается анализ интегральных характеристик и методов их расчёта. Описан вероятностный характер изменения электрических нагрузок. Приведена общая характеристика распределительных электрических сетей России, отмечены основные особенности при расчёте интегральных характеристик в этих сетях. Рассмотрена укрупнённая структура и характеристика потерь электроэнергии в разных странах. Проанализирована имеющаяся исходная информация о схемах и нагрузках сетей различных классов напряжения. Выполнен анализ исторического развития статистических методов получения и использования интегральных характеристик режимов электрических систем на основе статистического представления МКМ и графиков электрических нагрузок. Представлена характеристика метода главных компонент, рассмотрены свойства собственных чисел и собственных векторов МКМ на различных примерах в системе MATLAB. Обоснована актуальность и перспективность применения статистических методов для решения задач оперативно-диспетчерского управления, краткосрочного прогнозирования и ретроспективного анализа развития ЭС за некоторый период времени. Выполнен анализ детерминированных и вероятностно-статистических методов расчёта потерь электроэнергии.

Изменение нагрузок узлов электрической сети в общем случае является стохастическим процессом, которому присущи определенные закономерности. Для решения задач определения интегральных характеристик, краткосрочного прогнозирования и оптимизации режимов ЭС представляется наиболее объективным их статистическое моделирование. Статистические методы сокращения объёмов информации («сжатия» информации), в частности, основаны на идеях и принципах факторного анализа.

Центральной проблемой при определении нагрузочных потерь электроэнергии является учёт многорежимности на заданном интервале времени T . Для всей схемы ЭС, имеющей m продольных элементов, нагрузочные потери электроэнергии определяются точным суммированием (интегрированием) потерь мощности во всех режимах расчётного периода T (сутки, неделя, месяц и др.) по выражению

$$\Delta W_{\text{наг}} = 3 \sum_{j=1}^m R_j \int_0^T I_j^2(t) dt = \sum_{j=1}^m \int_0^T \Delta P_j(t) dt \approx \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^d \Delta P_{jl} \Delta t_l, \quad (1)$$

где d – число интервалов постоянства (осреднения) графиков электрических нагрузок $d = T/\Delta t$ длительностью Δt ; ΔP_j – потери мощности на участке j расчётной схемы электрической сети, вычисленные в момент времени t для определенного установившегося режима (УР), и для участка сети ΔP_{ij} могут быть определены в виде

$$\Delta P_{ij} = [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j)] g_{ij}. \quad (2)$$

Однако, непосредственное определение потерь электроэнергии чрезмерно трудоёмко и затруднено случайным и частично неопределённым характером исходной информации о нагрузках ЭС, особенно в сетях низких напряжений.

В разомкнутых сетях 6, 10 кВ преимущественно доступна информация о некоторых параметрах режима головных участков (пропуски энергии, максимальные и минимальные значения токовых нагрузок, потреблённая электроэнергия на некоторых подстанциях); в сетях 35–150 (220) кВ, работающих как в разомкнутом, так и в замкнутом режимах известны средние нагрузки, а также частично или полностью графики нагрузок в узлах, фиксируемые автоматизированными информационно-измерительными системами коммерческого учёта электроэнергии с заданным интервалом осреднения или являющиеся данными сезонных замеров.

Из детерминированных подходов к расчёту потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях 6–110(220) кВ для дальнейшего исследования выбран и обоснован метод среднеквадратичного тока при наличии графика нагрузки, в качестве которого рассматривается его статистическая модель. Из вероятностно-статистических выбран метод главных компонент (метод компонентного анализа), базирующийся на идеях и принципах факторного анализа. Этот метод ориентирован на использование режимной информации от современных автоматизированных систем и отличается от других статистических методов более экономным и удобным для последующего решения оптимизационных задач способом представления информации.

Методы, базирующиеся на идеях теории вероятностей и математической статистики, позволяют определить интегральные параметры ЭС без проведения большого числа электрических расчётов всей совокупности режимов ЭС.

При статистическом анализе режимов систем используются сведения о дисперсиях нагрузок $\sigma^2 P_i, \sigma^2 Q_i$, а также сведения о взаимных корреляционных моментах $k(P_i P_j), k(P_i Q_j), k(Q_i Q_j)$, характеризующих степень статистической связи между случайными значениями нагрузок различных узлов, представленных отклонениями мощностей от своих математических ожиданий. Дисперсии и корреляционные моменты нагрузок составляют блочную МКМ $\mathbf{K}(\mathbf{P}, \mathbf{Q})$ следующего вида

$$\mathbf{K}(\mathbf{P}, \mathbf{Q}) = \begin{bmatrix} \left[\begin{array}{cccc} \sigma^2 P_1 & k(P_1 P_2) & \dots & k(P_1 P_n) \\ k(P_2 P_1) & \sigma^2 P_2 & \dots & k(P_2 P_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k(P_n P_1) & k(P_n P_2) & \dots & \sigma^2 P_n \end{array} \right] & \left[\begin{array}{cccc} k(P_1 Q_1) & k(P_1 Q_2) & \dots & k(P_1 Q_n) \\ k(P_2 Q_1) & k(P_2 Q_2) & \dots & k(P_2 Q_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k(P_n Q_1) & k(P_n Q_2) & \dots & k(P_n Q_n) \end{array} \right] \\ \left[\begin{array}{cccc} k(Q_1 P_1) & k(Q_1 P_2) & \dots & k(Q_1 P_n) \\ k(Q_2 P_1) & k(Q_2 P_2) & \dots & k(Q_2 P_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k(Q_n P_1) & k(Q_n P_2) & \dots & k(Q_n P_n) \end{array} \right] & \left[\begin{array}{cccc} \sigma^2 Q_1 & k(Q_1 Q_2) & \dots & k(Q_1 Q_n) \\ k(Q_2 Q_1) & \sigma^2 Q_2 & \dots & k(Q_2 Q_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k(Q_n Q_1) & k(Q_n Q_2) & \dots & \sigma^2 Q_n \end{array} \right] \end{bmatrix}, \quad (3)$$

Для симметричной МКМ квадратная невырожденная матрица линейного оператора имеет не более $2n$ различных действительных собственных значений, при действии которых формируется система линейно-независимых собственных векторов. Ортогональное преобразование МКМ выполнено в программной

среде MATLAB с контролем обусловленности матрицы оператора в процессе преобразования.

Моделирование МКМ мощностей узлов ЭС методом главных компонент базируется на ряде свойств собственных чисел λ и собственных векторов v матриц, и заключается в разложении МКМ мощностей размерности $2n \times 2n$ на $2n$ собственных чисел и векторов, из которых первые M собственных чисел ($M \ll 2n$) с высокой точностью отражают дисперсии исходных графиков нагрузок

$$K = [\bar{v}_1 \ \bar{v}_2 \ \dots \ \bar{v}_M] \times \lambda \times [\bar{v}_1 \ \bar{v}_2 \ \dots \ \bar{v}_M]^T, \quad (4)$$

или в развернутом виде

$$K = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{21} & \dots & v_{M1} \\ v_{12} & v_{22} & \dots & v_{M2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{12n} & v_{22n} & \dots & v_{M2n} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_M \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_{11} & v_{21} & \dots & v_{M1} \\ v_{12} & v_{22} & \dots & v_{M2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{12n} & v_{22n} & \dots & v_{M2n} \end{bmatrix}^T,$$

где t – индекс транспонирования матрицы; $2n$ – количество узлов распределительной сети с известными графиками n -активной и n -реактивной мощности рассматриваемой выборки нагрузок; λ – матрица собственных чисел МКМ мощностей.

По этому методу собственные значения выделяются в порядке убывания их величины, что становится существенным, если для описания данных должно быть использовано лишь незначительное число компонент. Векторы попарно ортогональны, и компоненты, полученные по ним, некоррелированы. Хотя несколько компонент могут выделить большую часть суммарной дисперсии переменных, однако для точности воспроизведения корреляций между переменными требуются все компоненты. Метод позволяет выявить общие и наиболее устойчивые закономерности изменения мощностей нагрузочных и генераторных узлов ЭС.

Моделирование электрических нагрузок на основе факторного анализа позволяет:

- отыскать скрытые закономерности, которые определяются множеством внутренних и внешних причин изменения нагрузок;
- осуществить сжатие информации путём описания всех графиков при помощи общих факторов или главных компонент, число которых значительно меньше количества исходных графиков;
- выявить и изучить статистическую связь графиков нагрузок с главными факторами;
- прогнозировать случайную составляющую графиков на основе уравнения регрессии, построенного с использованием факторного отображения;
- упростить способы определения интегральных характеристик и эффективно выполнять оптимизацию ЭС.

Во втором разделе предлагается модифицированная стохастическая модель установившегося режима электрической сети произвольной конфигурации на основе статистического моделирования МКМ для определения интегральных характеристик в распределительных сетях 6–110(220) кВ. Выполнены расчёты ортогональных графиков нагрузок (ОГН) для различных выборок исходных графиков активных и реактивных мощностей на суточном и месячном интервалах времени. Обоснована статистическая устойчивость ОГН. Сформулированы алгоритмы моделирования МКМ, графиков электрических нагрузок и интегральных характеристик

ЭС. Обоснована целесообразность применения предлагаемого стохастического метода определения нагрузочных потерь электроэнергии.

Каждому из найденных собственных векторов МКМ соответствует свой ОГН, являющийся линейной комбинацией $2n$ выборки исходных графиков нагрузок узлов P_i, Q_i , центрированных математическими ожиданиями MP_i, MQ_i

$$\Gamma_{2n} = [\Delta\bar{P}_1 \ \Delta\bar{P}_2 \dots \Delta\bar{P}_n \ \Delta\bar{Q}_1 \ \Delta\bar{Q}_2 \dots \Delta\bar{Q}_n] \times \mathbf{v}_{2n} = [\bar{\Gamma}_1 \ \bar{\Gamma}_2 \dots \bar{\Gamma}_{2n}], \quad (5)$$

где \mathbf{v}_{2n} – матрица собственных векторов МКМ выборки исходных активных и реактивных мощностей узлов представительной выборки ЭС, размерностью $2n \times 2n$;

$\Delta\bar{P}_1 (\Delta\bar{Q}_1)$ – вектор центрированных величин активной (реактивной) мощности (отклонения от своих математических ожиданий), соответствующий графику активной (реактивной) мощности за определенный период T в узле 1

$$\Delta\bar{P}_1 = \begin{bmatrix} \Delta p_{11} \\ \Delta p_{12} \\ \dots \\ \Delta p_{1d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} - MP_1 \\ P_{12} - MP_1 \\ \dots \\ P_{1d} - MP_1 \end{bmatrix}, \quad \Delta\bar{Q}_1 = \begin{bmatrix} \Delta q_{11} \\ \Delta q_{12} \\ \dots \\ \Delta q_{1d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} - MQ_1 \\ Q_{12} - MQ_1 \\ \dots \\ Q_{1d} - MQ_1 \end{bmatrix}.$$

Полученные ОГН можно рассматривать как новые независимые центрированные случайные величины с нулевым математическим ожиданием. ОГН обладают свойством ортогональности

$$\bar{\Gamma}_i \times \bar{\Gamma}_j = 0, \quad i \neq j; \quad \bar{\Gamma}_i \times \bar{\Gamma}_i = 1, \quad i = j,$$

т. е. корреляционные моменты $k(\Gamma_i \Gamma_j)$, $k(\Gamma_j \Gamma_i)$ этих величин равны нулю. Новые случайные величины представляют собой удобную систему координат для точного и приближенного моделирования исходных случайных величин P_i, Q_i . Обосновано использование части из них $2 \leq M \leq 5$

$$\Gamma_k = [\bar{\Gamma}_1 \ \bar{\Gamma}_2 \dots \bar{\Gamma}_M] \ll \Gamma_{2n}, \quad M \ll 2n, \quad (6)$$

соответствующих наибольшим собственным числам λ_k МКМ мощностей, для моделирования изменений нагрузок на произвольном временном интервале T

$$S \approx \bar{\mathbf{e}} \times [MP_1 \ MP_2 \dots MP_n \ MQ_1 \ MQ_2 \dots MQ_n] + \Gamma_k \times [\mathbf{v}_k]^T = [\bar{P}_1 \ \bar{P}_2 \dots \bar{P}_n \ \bar{Q}_1 \ \bar{Q}_2 \dots \bar{Q}_n], \quad (7)$$

где $\Gamma_k \times [\mathbf{v}_k]^T = [\Delta\bar{P}_1 \ \Delta\bar{P}_2 \dots \Delta\bar{P}_n \ \Delta\bar{Q}_1 \ \Delta\bar{Q}_2 \dots \Delta\bar{Q}_n]$ – матрица центрированных величин активной и реактивной мощности, соответствующих графикам активных и реактивных мощностей за определенный период T ; $\bar{\mathbf{e}}$ – вектор-столбец, состоящий из единиц, размерностью d ; $[\mathbf{v}_k]^T$ – транспонированная матрица первых k собственных векторов $\bar{\mathbf{v}}_k$, соответствующих первым максимальным собственным числам λ_k МКМ мощностей $\mathbf{K}(P, Q)$ (3); MP_i, MQ_i – математическое ожидание активной и реактивной нагрузок в узле i на рассматриваемом интервале T ; \bar{P}_i, \bar{Q}_i – вектор изменения активной и реактивной мощности нагрузки узла i за определенный период T .

Критерием достаточного количества факторов, определяющих поведение анализируемой совокупности случайных величин, является оценка общего вклада в дисперсию последовательности главных компонент $\bar{\Gamma}_1, \bar{\Gamma}_2, \dots, \bar{\Gamma}_M$. Общий процент вклада β в дисперсию при фиксированном M вычисляется по выражению

$$\beta = \frac{\sum_{k=1}^M \lambda_k}{\sum_{i=1}^{2n} \lambda_i} \cdot 100\% ; \quad 75 \leq \beta \leq 95\% , \quad (8)$$

где $\sum_{i=1}^{2n} \lambda_i$ – сумма собственных чисел МКМ исходных случайных величин.

Параметр β является критерием точности моделирования МКМ и исходных графиков активных и реактивных мощностей узлов ЭС, достаточной для выполнения расчётов интегральных характеристик и оптимизации режимов ЭС.

Моделирование на основе выражения (7) ориентировано на использование режимной информации от современных автоматизированных систем. Выполненные расчёты для различных выборок суточных и месячных графиков электрических нагрузок подтвердили наличие статистической устойчивости факторной статистической модели нагрузок. Вклад первой главной компоненты в общую (суммарную) дисперсию нагрузок составил более 50%, при этом также подтвердился доминирующий вклад первых трёх компонент.

Величины \bar{U} и \bar{S} связаны между собой нелинейной системой уравнений узловых напряжений (УУН), записанной в форме баланса мощностей для математических ожиданий узлов активной и реактивной составляющих мощности

$$\begin{aligned} \omega_{P_i} &= -Y_{ii} MV_i^2 \cos \psi_{ii} + MV_i \cdot \sum_{j=1}^{n+1} Y_{ij} MV_j \cos(\psi_{ij} + M\delta_j - M\delta_i) - MP_i \approx 0; \\ \omega_{Q_i} &= Y_{ii} MV_i^2 \sin \psi_{ii} - MV_i \cdot \sum_{j=1}^{n+1} Y_{ij} MV_j \sin(\psi_{ij} + M\delta_j - M\delta_i) - MQ_i \approx 0, \end{aligned} \quad (9)$$

где $i=1,2,\dots,n$ – число узлов в схеме ЭС; $M\delta_i, M\delta_j, MV_i, MV_j$ – математические ожидания фазовых углов и модулей напряжений в узлах i и j соответственно; MP_i, MQ_i – математические ожидания активной и реактивной мощности в узлах; Y_{ii}, Y_{ij} – модули собственной и взаимной проводимости соответственно; ψ_{ii}, ψ_{ij} – углы, соответствующих векторов проводимостей.

Если УУН (9) записать приближенно, используя разложение в ряд Тейлора в окрестности математических ожиданий мощностей, то приходим к следующему выражению

$$[\Delta \bar{\delta}_1 \Delta \bar{\delta}_2 \dots \Delta \bar{\delta}_n \quad \Delta \bar{V}_1 \Delta \bar{V}_2 \dots \Delta \bar{V}_n]^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial \omega_P}{\partial \delta} & \frac{\partial \omega_P}{\partial V} \\ \frac{\partial \omega_Q}{\partial \delta} & \frac{\partial \omega_Q}{\partial V} \end{bmatrix}^{-1} \times [\Delta \bar{P}_1 \Delta \bar{P}_2 \dots \Delta \bar{P}_n \quad \Delta \bar{Q}_1 \Delta \bar{Q}_2 \dots \Delta \bar{Q}_n]^T. \quad (10)$$

Аналогично (7) можно моделировать исходные изменения фаз и модулей напряжений на любом рассматриваемом временном интервале T :

$$U \approx \bar{e} \times [M\delta_1 M\delta_2 \dots M\delta_n \quad MV_1 MV_2 \dots MV_n] + \Gamma_k \times [\gamma_k]^T = [\bar{\delta}_1 \bar{\delta}_2 \dots \bar{\delta}_n \quad \bar{V}_1 \bar{V}_2 \dots \bar{V}_n], \quad (11)$$

где $\Gamma_k \times [\gamma_k]^T = [\Delta \bar{\delta}_1 \Delta \bar{\delta}_2 \dots \Delta \bar{\delta}_n \quad \Delta \bar{V}_1 \Delta \bar{V}_2 \dots \Delta \bar{V}_n]$ – матрица центрированных величин фаз и модулей напряжений за определенный период T ; $[\gamma_k]^T$ – транспонированная

матрица моделирующих коэффициентов гамма (12), соответствующая первым максимальным собственным числам λ_k МКМ мощностей $\mathbf{K}(\mathbf{P}, \mathbf{Q})$.

Моделирующие коэффициенты гамма γ_k на основе линеаризованных в точке MP_i, MQ_i уравнений установившегося режима (10) определяются в виде

$$\begin{bmatrix} \gamma'_{11} & \gamma'_{21} \dots \gamma'_{M1} \\ \gamma'_{12} & \gamma'_{22} \dots \gamma'_{M2} \\ \dots & \dots \\ \gamma'_{1n} & \gamma'_{2n} \dots \gamma'_{Mn} \\ \dots & \dots \\ \gamma''_{11} & \gamma''_{21} \dots \gamma''_{M1} \\ \gamma''_{12} & \gamma''_{22} \dots \gamma''_{M2} \\ \dots & \dots \\ \gamma''_{1n} & \gamma''_{2n} \dots \gamma''_{Mn} \end{bmatrix} = [\mathbf{J}]^{-1} \times \begin{bmatrix} v'_{11} & v'_{21} \dots v'_{M1} \\ v'_{12} & v'_{22} \dots v'_{M2} \\ \dots & \dots \\ v'_{1n} & v'_{2n} \dots v'_{Mn} \\ \dots & \dots \\ v''_{11} & v''_{21} \dots v''_{M1} \\ v''_{12} & v''_{22} \dots v''_{M2} \\ \dots & \dots \\ v''_{1n} & v''_{2n} \dots v''_{Mn} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где γ', γ'' – коэффициенты, модулирующие отклонения фаз и модулей напряжений от средних значений; \mathbf{J} – матрица Якоби для режима средних нагрузок.

Нагрузочные потери электроэнергии представляются в виде суммы основной составляющей, определяемой для режима средних нагрузок, и дисперсионной составляющей, обусловленной отклонениями режима электропотребления от среднего, за рассматриваемый расчётный период

$$\Delta W = [\Delta P(M\delta, MV) + \sigma(\Delta P)]T, \quad (13)$$

где $\Delta P(M\delta, MV)$ – потери активной мощности для режима, соответствующего математическим ожиданиям векторов фазовых углов $M\delta$ и модулей MV напряжений.

Пуём разложения выражения (2) в ряд Тейлора в малых окрестностях математических ожиданий параметров δ и V , можно получить приближённое выражение для дисперсионной составляющей потерь мощности

$$\sigma(\Delta P_{ij}) = \frac{1}{2} k(\delta_i \delta_j) \frac{\partial^2 \Delta P}{\partial \delta_i \partial \delta_j} + k(\delta_i V_j) \frac{\partial^2 \Delta P}{\partial \delta_i \partial V_j} + \frac{1}{2} k(V_i V_j) \frac{\partial^2 \Delta P}{\partial V_i \partial V_j}, \quad (14)$$

где $k(\delta_i \delta_j)$, $k(\delta_i V_j)$, $k(V_i V_j)$ – корреляционные моменты, составляющие МКМ напряжений, вычисленные в точке, соответствующей математическим ожиданиям фаз $M\delta$ и модулей MV напряжений:

$$k(\delta_i \delta_j) = \sum_{k=1}^M \lambda_k \gamma'_{ki} \gamma'_{kj}, \quad k(\delta_i V_j) = \sum_{k=1}^M \lambda_k \gamma'_{ki} \gamma''_{kj}, \quad k(V_i V_j) = \sum_{k=1}^M \lambda_k \gamma''_{ki} \gamma''_{kj},$$

$$\sigma^2(\delta_i) = \sum_{k=1}^M \lambda_k (\gamma'_{ki})^2, \quad \sigma^2(V_i) = \sum_{k=1}^M \lambda_k (\gamma''_{ki})^2; \quad i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j. \quad (15)$$

$\frac{\partial^2 \Delta P}{\partial \delta_i \partial \delta_j}$, $\frac{\partial^2 \Delta P}{\partial \delta_i \partial V_j}$, $\frac{\partial^2 \Delta P}{\partial V_i \partial V_j}$ – вторые производные выражения потерь мощности по соответствующим переменным, вычисленные в точке, соответствующей математическим ожиданиям нагрузок.

Аналогичные выражения (15) для элементов МКМ мощностей можно определить в виде:

$$k(P_i P_j) = \sum_{k=1}^M \lambda_k v'_{ki} v'_{kj}, \quad k(P_i Q_j) = \sum_{k=1}^M \lambda_k v'_{ki} v''_{kj}, \quad k(Q_i Q_j) = \sum_{k=1}^M \lambda_k v''_{ki} v''_{kj},$$

$$\sigma^2(P_i) = \sum_{k=1}^M \lambda_k (v'_{ki})^2, \quad \sigma^2(Q_i) = \sum_{k=1}^M \lambda_k (v''_{ki})^2; \quad i, j = 1, 2 \dots n, \quad i \neq j. \quad (16)$$

В результате разложения выражения (2) в ряд Тейлора получено также другое выражение для дисперсионной составляющей потерь мощности

$$\sigma(\Delta P_{ij}) = \left[\sigma^2(V_i - V_j) + MV_i MV_j \sigma^2(\delta_i - \delta_j) \right] g_{ij}, \quad (17)$$

где $\sigma^2(\delta_i - \delta_j)$, $\sigma^2(V_i - V_j)$ – дисперсии разности фаз и модулей напряжений:

$$\sigma^2(\delta_i - \delta_j) = \sigma^2 \delta_i - 2k(\delta_i \delta_j) + \sigma^2 \delta_j = \sum_{k=1}^M (\gamma'_{ki} - \gamma'_{kj})^2 \lambda_k;$$

$$\sigma^2(V_i - V_j) = \sigma^2 V_i - 2k(V_i V_j) + \sigma^2 V_j = \sum_{k=1}^M (\gamma''_{ki} - \gamma''_{kj})^2 \lambda_k. \quad (18)$$

Дисперсионную составляющую потерь активной мощности, определенную через квадрат коэффициента формы, можно представить в виде

$$\sigma(\Delta P_{ij}) = \Delta P_{ij} (M\delta, MV) \cdot (k_{\Phi}^2 - 1), \quad (19)$$

где $k_{\Phi}^2 = \frac{I_{\text{скв}}^2}{I_{\text{сп}}^2} = \frac{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^d P_i^2 \Delta t_i}{P_{\text{сп}}^2}$ – квадрат коэффициента формы, о. е.

В зависимости от состава исходных данных и требуемой точности расчёта дисперсионную составляющую потерь можно определять по выражениям (14), (17) и (19), сочетая их определённым весом.

Проверка модели (14) и (17) на 13-ти схемах распределительных сетей при широкой вариации нагрузок (42 суточных типовых графиков нагрузок, 6 месячных графиков) с помощью метода статистических испытаний показала хорошую точность рассмотренного метода (средняя погрешность определения потерь электроэнергии не превышает 3%). Наиболее простой является траектория расчёта потерь, базирующаяся на выражении (17) и не требующая вычисления вторых производных.

Особенности применения факторного представления мощностей в задаче определения интегральных характеристик:

- высокий вклад первых максимальных главных компонент (ОГН, собственных чисел, собственных векторов и коэффициентов гамма) в общую дисперсию нагрузок, модели конкретных графиков нагрузок позволяют ограничиться учётом нескольких $2 \leq M \leq 5$ без существенной потери точности моделирования;

- устойчивость статистической модели для различных совокупностей энергетических объектов открывает возможность использования дополнительной информации для оценки статистических характеристик мощностей узлов ЭС (совмещенные графики);

- относительное постоянство собственных векторов и гамма коэффициентов факторного отображения во времени позволяет применить к задаче определения интегральных характеристик режима модель, построенную для характерного дня,

сезона, что соответствует технологическим особенностям обработки информации о параметрах системы в энергосистемах.

Потери холостого хода трансформаторов определяются в виде

$$\Delta W_{\text{хт}} = \sum_{i=1}^{n_t} G_i^T V_{3i}^2 T, \quad (20)$$

где G_i^T – активная поперечная проводимость i -го трансформатора; n_t – число трансформаторов в сети; V_{3i} – расчётное напряжение на входе трансформатора, определенное для режима средних нагрузок с эквивалентным напряжением V_{36} балансирующего узла

$$V_{36} = \sqrt{kV_{6\text{max}}^2 + (1-k)V_{6\text{min}}^2}, \quad (21)$$

где k – коэффициент, принимаемый равным 0,9 для сетей 6–10 кВ и 0,8 для сетей 35–110 кВ.

В соответствии с неравенствами Чебышева можно оценить расчётные диапазоны изменения анализируемых параметров режима, которые определяются в виде:

$$\begin{aligned} V_i^{\min \text{ p.}} &= MV_i - k_{\beta}^{\min} \sigma V_i, & V_i^{\max \text{ p.}} &= MV_i + k_{\beta}^{\max} \sigma V_i; \\ Q_i^{\min \text{ p.}} &= MQ_i - k_{\beta}^{\min} \sigma Q_i, & Q_i^{\max \text{ p.}} &= MQ_i + k_{\beta}^{\max} \sigma Q_i, \end{aligned} \quad (22)$$

где $\sigma Q_i = \sqrt{\sigma^2(Q_i)} = \sqrt{\sum_{k=1}^M \lambda_k (\nu_{ki}^*)^2}$, $\sigma V_i = \sqrt{\sigma^2(V_i)} = \sqrt{\sum_{k=1}^M \lambda_k (\gamma_{ki}^*)^2}$ – стандартные отклонения режимных параметров.

В предположении нормального распределения случайных величин V_i и Q_i с учётом асимметрии (скошенности) значения коэффициентов k_{β} при уровне достоверности 90% можно принять в пределах: $k_{\beta}^{\min} = 1,45 - 1,55$, $k_{\beta}^{\max} = 1,55 - 1,65$.

Совокупность нелинейной системы уравнений (9), факторного преобразования (7) и соотношений (13)–(22) составляет *модифицированную стохастическую модель установившихся режимов ЭС*. Алгоритм не требует проведения поинтервальных (обычно почасовых) расчётов УР, необходимых для решения оптимизационных задач, а сводится к расчёту одного УР ЭС для математических ожиданий электрических нагрузок и позволяет получить интегральные характеристики с достаточной для практических целей точностью и достоверностью. Это резко сокращает объёмы используемой режимной информации, упрощает методы определения интегральных характеристик ЭС и трудоёмкость учёта многорежимности в сравнении с непосредственными d расчётами УР (1) по интервалам осреднения графиков электрических нагрузок. Данная модель также используется в алгоритмах расчёта оптимального значения компенсируемой реактивной мощности в узлах сети.

Алгоритм определения интегральных характеристик режимов ЭС с помощью модифицированной стохастической модели УР ЭС в виде реализации двух стохастических траекторий представлен на рис. 1.

В третьем разделе исследовано влияние схемно-режимных и атмосферных факторов, влияющих на величину потерь электроэнергии в ЭС. С учётом различных актинометрических данных проанализировано влияние солнечного излучения в дневное летнее время на температуру проводов ВЛ. Приведены два алгоритма определения температуры и погонного активного сопротивления ВЛ с учётом тем-

пературы воздуха, скорости ветра и солнечного излучения на основе уравнения теплового баланса. Также предлагается расчёт температуры на поверхности провода ВЛ на основе дифференциального уравнения теплопроводности. Исследовано влияние внутримесячного изменения температуры проводов ВЛ и электропотребления на погрешность расчёта нагрузочных потерь электроэнергии в ВЛ. Выполнен анализ влияния загрузки и структуры распределительных сетей на точность расчёта нагрузочных потерь электроэнергии.

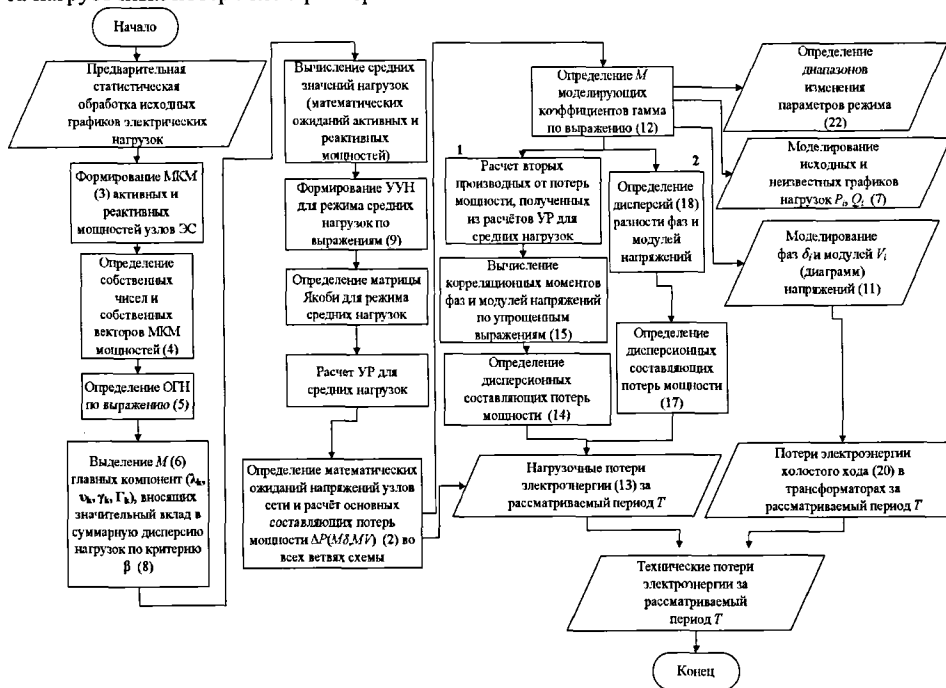


Рис. 1 – Алгоритм стохастического определения интегральных характеристик режимов ЭС

Учёт внутримесячных (среднесуточных) изменений температуры проводов и посуточного электропотребления даёт значение потерь электроэнергии в ВЛ распределительных ЭС 6, 10 кВ примерно на 7,0–8,0% больше, чем из расчётов по среднемесячной температуре и месячному электропотреблению. Минимизирована ошибка расчёта нагрузочных потерь электроэнергии в ВЛ до значения, близкого к нулевому, за счёт введения в значения потерь электроэнергии динамических поправок в зависимости от загрузки и структуры схемы; интервал оценки потерь в пределах от $-0,51\%$ до $-0,09\%$ с достоверностью 0,95 с наибольшим рассеянием от $-2,5\%$ до $1,5\%$ ($\sigma^2 = 3,16$).

Одним из направлений повышения точности расчёта переменных потерь электроэнергии в ВЛ является определение фактической температуры и активного

сопротивления проводов с учётом протекающего по линиям рабочего тока, температуры окружающего воздуха, скорости ветра и солнечного излучения.

При прохождении электрического тока по проводам ВЛ происходит выделение джоулевой теплоты, данный процесс относится к задачам теплопроводности при наличии внутренних источников теплоты. На основе анализа дифференциальных уравнений теплопроводности в цилиндрической системе координат, температура на поверхности провода ВЛ с учётом атмосферных факторов (температура воздуха, скорость ветра) определяется в виде

$$t_2 = C_3 + C_4 \ln \left(\frac{d_1}{2} \right) - \frac{q_v \left(\frac{d_1}{2} \right)^2}{4\lambda_2}, \quad (23)$$

где d_0, d_1 – диаметр стальной и алюминиевой части соответственно, м; λ_2 – коэффициент теплопроводности алюминия, принимаемый равным 200 Вт/(м·°С); $q_v = I^2 R / V$ – мощность внутренних источников теплоты, Вт/м³; V – объём алюминиевой части провода ВЛ, м³; C_3, C_4 – постоянные величины:

$$C_4 = \frac{q_v d_0^2}{8\lambda_2}, \quad C_3 = t_b - \frac{C_4 \lambda_2}{\alpha \left(\frac{d_1}{2} \right)} - C_4 \ln \left(\frac{d_1}{2} \right) + \frac{q_v d_1}{4\alpha} + \frac{q_v \left(\frac{d_1^2}{4} \right)}{4\lambda_2},$$

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С) $\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{d_1}$; λ_a – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°С); t_b – температура окружающей среды, °С; $Nu = 0,25 Re^{0,60} Pr^{0,38}$ – число Нуссельта; $Re = \frac{v d_{np}}{\nu_b}$ – число Рейнольдса, характеризующее вынужденную конвекцию; Pr – число Прандтля, характеризующее молекулярные свойства охлаждающей среды; v – скорость ветра, м/с; d_{np} – диаметр провода ВЛ, м; ν_b – кинематический коэффициент вязкости воздуха, м²/с.

Результаты расчёта температуры на поверхности провода ВЛ (23) совпадают с результатами расчёта температуры, полученных на основании уравнения теплового баланса

$$I^2 R_{20} [1 + \alpha (t_n - 20)] + (W_p) = w \cdot F \cdot (t_n - t_b), \quad (24)$$

где R_{20} – сопротивление провода сечением F , см², при $t_n = 20$ °С; w – коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием и конвекцией; α – температурный коэффициент электрического сопротивления, равный 0,00403 Ом/мм²·°С; W_p – поглощаемое проводом тепло от действия солнечного излучения на длине 1 м, Вт/см,

$$W_p = 100 \cdot b \cdot Q_p \cdot d,$$

где b – коэффициент поглощения (для витых окисленных проводов равен 0,60); Q_p – количество тепла, обусловленное излучением, Вт/см²; d – диаметр провода, см.

С помощью уравнения теплового баланса (24) было проанализировано действие солнечного излучения на активное сопротивление проводов ВЛ в дневное летнее время. Выяснилось, что активное сопротивление изменяется в пределах 5%, потери электроэнергии – в пределах 2%. Результаты расчёта зависят от исходных

актинометрических данных. Из-за сложности получения исходных данных о продолжительности погодных условий и небольшого влияния солнечного излучения на изменение потерь электроэнергии в ВЛ, более детально учитывать влияние солнечного излучения нет необходимости.

В четвертом разделе приведена программная реализация стохастического определения интегральных характеристик режимов ЭС. Представлен метод и алгоритм расчёта установившегося режима ЭС. Выполнен анализ взаимосвязи потерь активной мощности с параметрами УР. Приведено описание блок-схемы и особенности работы программы SETI. В качестве примера для расчёта интегральных характеристик режимов ЭС с помощью программы SETI рассмотрено электросетевое хозяйство ЗАО «Прииск Удерецкий» (схема 14 узлов, 13 ветвей).

Получение МКМ мощностей и напряжений с помощью предварительной статистической обработки графиков нагрузок, выделение главных компонент и получение ОГН, расчёт УР ЭС и определение интегральных характеристик режимов ЭС, в том числе, технических потерь электроэнергии, диапазонов изменения реактивной мощности и напряжений узлов ЭС, а также моделирование неизвестных графиков нагрузок, диаграмм фаз и модулей напряжений в узлах ЭС (без расчёта множества УР) на произвольном временном интервале T реализованы в программе SETI, написанной на языке FORTRAN. Блок-схема программы SETI приведена на рис. 2.

Алгоритм расчёта параметров УР и интегральных характеристик ЭС состоит из трёх основных частей:

- 1) ввод, обработка, вывод исходных данных и формирование уравнений УР охватывается блоками 1–4;
- 2) решение уравнений, описывающих режим, и непосредственный расчёт и вывод параметров установившегося состояния ЭС характеризуется блоками 5–14;
- 3) расчёт и вывод интегральных характеристик ЭС, переход к новой схеме или завершение расчётов, отражены в блоках 15–21.

Оценка точности полученных расчётных интегральных характеристик по рассмотренным алгоритмам выполнялась методом статистических испытаний на 13-ти схемах распределительных сетей. В качестве эталонных приняты интегральные характеристики, полученные путём непосредственного суммирования результатов d -расчётов УР для трёх выборок суточных графиков электропотребления: 36 элементарных (рабочих и выходных), 18 реальных и 42 типовых графиков нагрузок для различных отраслей промышленности. Также использовалась выборка из 30 месячных графиков активной мощности ряда ЛЭП подстанций 110–220 кВ.

При использовании пяти наибольших главных компонент (ОГН, собственных чисел, собственных векторов) средняя погрешность моделирования типовых составляющих суточных графиков нагрузки составляет 3,97% с диапазоном от 0,15% до 7,37%.

Средняя погрешность расчёта нагрузочных потерь электроэнергии в сравнении с эталонными потерями для суток составляет (–1,54%), для месяца (–2,98%), средняя погрешность определения наибольших значений напряжений составляет 1,32%, наименьших значений V_{\min} 1,13%.

Проверка программы SETI подтвердила правильность заложенных в алгоритмы принципов, работоспособность и приемлемую для практического анализа форму представления результатов.

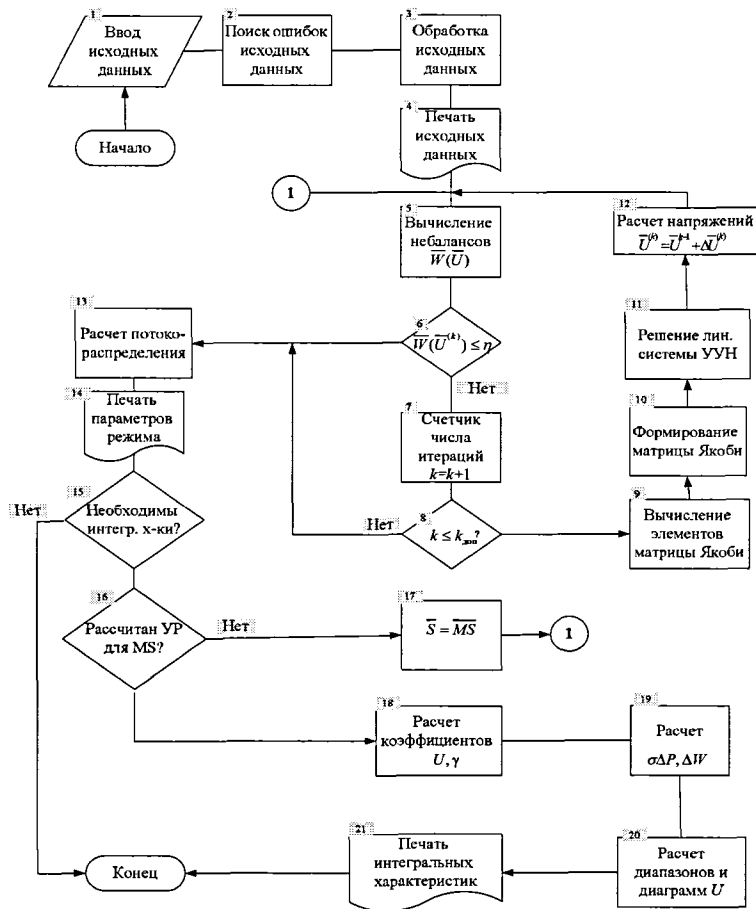


Рис. 2. – Блок схема программы SETI

Основные результаты и выводы по диссертации

1. Предложен комбинированный подход к расчёту нагрузочных потерь электроэнергии в виде определения основной и дисперсионной составляющих потерь. Как основная, так и дисперсионная составляющая могут определяться на основе детерминированного и стохастического подходов. Детерминированный подход базируется на системе головного учёта, стохастический – на полном или частичном восстановлении графиков электрических нагрузок посредством статистической модели нагрузок. Комбинирование таких подходов осуществляется в зависимости от состава исходных данных и требуемой точности расчёта по полученным выражениям.

2. Разработана модифицированная стохастическая модель установившихся режимов систем распределения электрической энергии, положенная в основу мето-

дики и алгоритмов расчёта интегральных характеристик. Данная модель создает основу для компактного (сжатого) учёта многорежимности и позволяет определять интегральные характеристики в распределительных электрических сетях произвольной конфигурации с достаточной для практических целей точностью. Она также используется в алгоритмах оптимальной компенсации реактивной мощности.

3. Разработаны три алгоритма определения (уточнения) температуры и активного сопротивления проводов ВЛ с учётом атмосферных факторов. Первые два алгоритма учитывают влияние температуры воздуха, скорости ветра и солнечного излучения, третий алгоритм на основе дифференциального уравнения теплопроводности влияние солнечного излучения не учитывает. Сравнительные результаты определения температуры проводов ВЛ практически совпадают (отличие в $\pm 0,5^\circ\text{C}$). Определена предельная граница влияния солнечного излучения: активное сопротивление ВЛ в среднем увеличивается до 5%, потери электроэнергии – до 2%, результаты расчёта зависят от исходных актинометрических данных. В итоге, это позволяет более точно оценивать величину технических потерь электроэнергии в ВЛ.

4. Предложен способ минимизации ошибки расчёта нагрузочных потерь электроэнергии. В зависимости от загрузки и структуры схемы можно вводить в расчётные значения потерь электроэнергии для ВЛ поправки в виде $\Delta W_i^P / (1 + \delta / 100)$, статистически обоснованные на уровне 1,07.

5. На основе проведённых исследований создана программа SETI расчёта и анализа установившихся режимов ЭС, моделирования графиков нагрузок узлов ЭС, расчёта технических потерь электроэнергии, диаграмм и диапазонов изменения реактивной мощности источников и напряжений узлов рассматриваемой сети на произвольном (характерном) временном интервале, которая прошла апробацию в трёх организациях и активно используется для решения ряда задач эксплуатации и развития электрических сетей.

Публикации по диссертации

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях по перечню ВАК:

1. Герасименко А. А., Тимофеев Г. С., Шульгин И. В. Учёт схемно-структурных и режимно-атмосферных факторов при расчете потерь электроэнергии по данным головного учета/ Вестник КрасГАУ, выпуск 3, Красноярск 2008, С. 287–293.
2. Герасименко А. А., Нешатаев В. Б., Шульгин И. В. Оптимальная компенсация реактивных нагрузок в системах распределения электрической энергии / Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. 2008. № 11–12/1. С. 81–88.
3. Герасименко А. А., Нешатаев В. Б., Шульгин И. В. Расчёт потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях на основе вероятностно-статистического моделирования нагрузок / Известия ВУЗов. Электромеханика. 2011. № 1. С. 71–77.
4. I. V. Shulgin, A. A. Gerasimenko, Zhou Su Quan, Stochastic Simulation of Covariance Matrix and Power Load Curves in Electric Distribution Networks//Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, #1, vol. 5, February 2012, pp.39–56. (<http://journal.sfu-kras.ru/series/technologies/2012/1>) (<http://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/2882>).

5. **I. V. Shulgin**, A. A. Gerasimenko, Su Quan Zhou, Modified Stochastic Estimation of Load Dependent Energy Losses in Electric Distribution Networks/ International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 43, Issue 1, December 2012, pp. 325–332 (JEPE1673, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061512000890).

6. Герасименко А. А., **Шульгин И. В.** Стохастический метод расчета нагрузочных потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях/ Электрические станции, 2013. – № 4. – С. 44–59.

Научные работы, опубликованные в других изданиях:

7. **Shulgin I. V.**, Butrin E. V. Losses of Electrical Power Systems/ Молодежь и наука: начало XXI века: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 ч. Ч. 3. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – С. 281–283.

8. **Shulgin I. V.** Problem of Energy Losses Reduction/ Молодежь и наука: начало XXI века: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 4 ч. Ч. 3. – Красноярск: Сибирский федеральный университет; Политехнический институт, 2007. – С. 189–190.

9. Герасименко А. А., Тихонович А. В., **Шульгин И. В.** Комбинированный подход к определению потерь электроэнергии в распределительных сетях/ Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: Труды II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием 16–18 мая. Ч. 1. – Тольятти: ТГУ, 2007. – С. 80–84.

10. Герасименко А. А., Тимофеев Г. С., **Шульгин И. В.** Комплексный учёт режимно-атмосферных факторов в расчёте активного сопротивления и потерь электроэнергии в ЛЭП/ Оптимизация режимов работы электротехнических систем: межвуз. сб. науч. тр./ отв. ред. А. Н. Пахомов. – Красноярск: Сиб. федер. университет, 2008. – С. 232–245.

11. Герасименко А. А., **Шульгин И. В.** Уточнение технических потерь электроэнергии в воздушных линиях распределительных сетей/ Сборник докладов III международной научно-практической конференции: Энергосистема: управление, конкуренция, образование, в 2 т. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. Т. 2. С. 191–196.

12. Герасименко А. А., Нешатаев В. Б., **Шульгин И. В.** Вероятностно-статистическое определение потерь электроэнергии в задаче оптимальной компенсации реактивной мощности в распределительных сетях/ Энергетика в современном мире: материалы конференции/ IV Всероссийская научно-практическая конференция. Сборник материалов конференции. Ч. 1. Чита 2009. ЧитГУ – С. 214–221.

13. Нешатаев В. Б., **Шульгин И. В.** Статистическое моделирование электрических нагрузок в задаче анализа и оптимизации режимов систем распределения электрической энергии по реактивной мощности/ Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов: сборник трудов Международной научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов 10-12 ноября 2009 г. – Тольятти: ТГУ, 2009. – С. 125–127.

Подписано в печать 14.05.2013. Печать плоская
Формат 60x84/16 Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,2

Тираж 120 экз. Заказ № 1915

Отпечатано полиграфическим центром
Библиотечно-издательского комплекса
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а,
тел.: +7(391) 206-26-49, 206-26-67
E-mail: print_sfu@mail.ru