

На правах рукописи

Павлюков Валерий Сергеевич

**МЕТОДЫ УЧЕТА ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ ДЛЯ ЗАДАЧИ
КОМПЛЕКСНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ
СХЕМ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ
ПО ПОТЕРЯМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

**Специальность 05.09.03. – «Электротехнические комплексы
и системы, включая их управление и регулирование»**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Работа выполнена на кафедре электрических станций, сетей и систем

Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель – кандидат технических наук,
доцент Булатов Б.Г.

Научный консультант – кандидат технических наук,
доцент Фомин Н.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Торбешков Г.М.;

кандидат технических наук,
доцент Ильин Ю.П.

Ведущая организация – ОАО Э и Э «Челябэнерго», Челябинские
городские электрические сети.

Защита диссертации состоится 24 марта 1999 года, в 12 часов,
на заседании диссертационного совета Д 053.13.07 Южно-Уральского
государственного университета по адресу:

454080, Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЮУрГУ.

Автореферат разослан « _____ » _____ 1999 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук,
профессор

 А.И. Сидоров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Для электроэнергетики России актуальной является задача снижения технологических потерь электрической энергии, связанных с ее транспортом и распределением. Общие потери в сетях составляют 10-12%, значительная часть которых приходится на питающие сети напряжением 110 кВ и выше и распределительные сети 6-35 кВ.

Наиболее эффективным и относительно малозатратным мероприятием по снижению потерь в распределительных электрических сетях является поиск и реализация оптимальных точек или мест размыкания контуров схемы. Поиск оптимальных точек размыкания путем оптимизации эксплуатационной схемы распределительной электрической сети по потерям электроэнергии без учета питающей сети приводит к снижению потерь электроэнергии только в распределительной сети. При этом потери электроэнергии в питающей сети становятся неконтролируемыми и могут даже возрастать. Для снижения суммарных потерь электроэнергии в сетях актуальной является комплексная оптимизация схемы распределительной сети с учетом питающей сети. Таким образом, питающая и распределительная сеть рассматриваются как единый электротехнический комплекс.

В теории управления электроэнергетическими системами большое число методов и алгоритмов, посвященных экономии потерь электроэнергии, разработано для обособленного применения в питающих и распределительных электрических сетях, тогда как вопросы комплексного снижения потерь в объединенных сетях исследованы в меньшей степени. Методы учета питающей сети по потерям электроэнергии для комплексной оптимизации схем распределительных сетей до сих пор еще не разработаны.

В диссертационной работе в развитие подхода непрерывного перемещения точек размыкания разработаны методы учета питающей сети, позволяющие перевести дискретную по своей природе задачу комплексной оптимизации схемы распределительной сети в область непрерывных методов нелинейного программирования и впервые решить ее путем минимизации потерь электроэнергии в электротехническом комплексе методами многомерного поиска.

Актуальность работы подтверждается так же и тем, что она выполнялась в соответствии с координационным планом межвузовской программы научно-исследовательских работ по проблеме «Разработка методов и средств экономии электроэнергии в электрических системах».

Цель работы – разработка методов, алгоритмов и программ учета питающей сети для оптимизации эксплуатационных схем распределительных электрических сетей, которые обеспечивали бы наибольшее снижение потерь

электроэнергии в сетях. Исходя из указанной цели, в работе решены следующие основные задачи:

– моделирование режима питающей сети в зависимости от положений точек размыкания контуров схемы распределительной сети;

– получение целевой функции потерь электроэнергии, ориентированной на применение многомерных непрерывных методов нелинейного программирования и учитывающей графики нагрузок сетей на заданном отрезке времени;

– алгоритмизация учета питающей сети в задаче непрерывной многомерной оптимизации точек размыкания схемы распределительной сети;

– реализация разработанных алгоритмов учета питающей сети в виде программ информационно – вычислительного комплекса распределительных электрических сетей.

Идея работы заключается в том, что повышение экономичности работы объединенных сетей энергосистем может быть достигнуто на основе комплексной оптимизации эксплуатационных схем распределительных электрических сетей по потерям электроэнергии.

Научные положения, разработанные лично соискателем, и новизна.

1. Математическая модель зависимости режима питающей сети от конфигурации схемы распределительной сети соответствует реальным условиям задачи комплексной оптимизации объединенных сетей по потерям электроэнергии в том случае, если учитывает графики нагрузок узлов этих сетей на заданном отрезке времени.

2. Методы учета питающей сети определены не столько стремлением решить дискретную задачу комплексной оптимизации точек размыкания контуров схемы распределительной сети непрерывными методами многомерного поиска, сколько актуальностью повышения эффективности работы объединенных сетей энергосистем путем наибольшего снижения в них суммарных потерь электроэнергии.

3. Особенности задачи комплексной оптимизации обуславливают необходимость применения таких методов учета питающей сети, которые обеспечивают независимую от разнородности узловых нагрузок сетей точность определения потерь электроэнергии.

Обоснованность, достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются корректным использованием методов математического моделирования, теории графов, теории управления электроэнергетическими системами, нелинейного программирования и численных методов решения систем уравнений. Адекватность математической модели зависимости режима питающей сети от положений точек размыкания контуров схемы распределительной электрической сети подтверждена экспериментальным статистическим материалом.

Значение работы. *Научное значение работы* заключается в разработке не имеющих аналогов методов и алгоритмов учета питающей сети, отвечающих требованиям оптимизационной модели с условно-непрерывным многомерным перемещением точек размыкания в контурах схемы распределительной сети и обеспечивающих в задаче комплексной многомерной оптимизации нахождение условного минимума функции суммарных потерь электроэнергии в сетях.

Практическое значение работы заключается в разработке пакета прикладных программ в составе информационно-вычислительного комплекса распределительных электрических сетей, позволяющих повысить качество, надежность и оперативность принимаемых решений при их эксплуатации.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Научные положения, выводы и рекомендации, реализованные в виде программ информационно-вычислительного комплекса ИВК РЭС-2.2 для ЕС ЭВМ, внедрены в промышленную эксплуатацию в Ижевских электрических сетях ПО Удмурткоммунэлектро и в Челябинских городских электрических сетях ПО ЭиЭ Челябинскэнерго.

Первая версия комплекса, разработанная для IBM PC, внедрена на предприятии Восьмой дистанции электроснабжения Челябинского отделения Южно-Уральской железной дороги.

Пакет прикладных программ первой версии информационно-вычислительного комплекса для IBM PC используется в учебном процессе кафедры электрических станций, сетей и систем Южно-Уральского государственного университета в дисциплинах «Информатика», «Математические задачи энергетики», «Электроэнергетические системы и сети», «АСУ и оптимизация режимов энергосистем».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на девяти региональных конференциях и семинарах, в том числе: Региональной конференции, посвященной 50-летию кафедр электрических станций, электрических систем и теоретических основ электротехники ТПИ им. С.М. Кирова (Томск, 1981 г.); Всесоюзной конференции «Пути экономии и повышения эффективности использования электроэнергии в системах электроснабжения промышленности и транспорта» (Казань, 1984 г.); Всесоюзном семинаре «Повышение эффективности работы распределительных электрических сетей» (Киев, 1984 г.); Всесоюзном семинаре «Управление развитием и функционированием систем электроснабжения» (Киев, 1986 г.); IX Всесоюзной научной конференции «Моделирование электроэнергетических систем» (Рига, 1987 г.); XI сессии Всесоюзного научного семинара «Кибернетика электрических систем» (Абакан, 1989 г.); Всесоюзной научно-технической конференции «Повышение эффективности электроснабжения на промышленных предприятиях», (Москва, 1990 г.); Всесоюзном семинаре

«Кибернетика электроэнергетических систем» (Челябинск, 1990 г.), а также на ежегодных итоговых научных конференциях ЮУрГУ (Челябинск, 1981 ..1998 г.г.).

Публикация. По результатам выполненных исследований опубликовано 21 печатная работа.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 137 страницах машинописного текста, содержит 12 рисунков, 3 таблиц, список использованной литературы из 232 наименований и приложений на 55 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, отражены научная новизна и практическая ценность результатов, обзор литературы, апробация работы, приведены данные по объему и структуре диссертации.

В первой главе проведен анализ существующих и обоснована необходимость разработки новых методов учета питающей сети, сформулированы задачи исследования, рассмотрены вопросы моделирования нагрузок сетей, проанализированы и определены методы расчета потерь электроэнергии в питающих сетях.

Анализ работ по методам учета питающей сети для задачи комплексной оптимизации эксплуатационных схем распределительных электрических сетей показал, что систематических и глубоких исследований в этом направлении не проводилось. Существующие методы учета питающей сети по потерям мощности при разнородности нагрузок узлов сетей не обеспечивают получение оптимальных решений по потерям электроэнергии. Кроме того, они ориентированы на решение задачи комплексной оптимизации сетей методом поординатного дискретного спуска, который при учете ограничений в общем случае не может гарантировать нахождения условного минимума функции потерь. Надежное достижение условного минимума функции потерь обеспечивается методами многомерного поиска. Предложенные новые методы учета питающей сети по потерям электроэнергии, впервые основанные на использовании ранее разработанного на кафедре ЭССиС ЮУрГУ оригинального подхода непрерывного перемещения точек размыкания контуров схемы распределительной сети, предназначены для решения задачи комплексной оптимизации сетей многомерными непрерывными методами нелинейного программирования.

Нагрузки узлов v ($v = \overline{1, q}$) распределительной сети предложено моделировать графиками модулей токов при номинальных напряжениях в виде про-

изведения $J_v(t) = J_v f_v(t)$, соответствующих средних значений $f_v(t)$ модулей токов за период T и функций $f_v(t)$ среднее значение каждой из которых на отрезке времени $[0, T]$ равно единице. Значения J_v предложено определять по потреблению электроэнергии в узлах сети, а функции $f_v(t)$ – воспроизводить типовыми графиками.

Разработаны два метода учета питающей сети, в каждом из которых применен один из двух предложенных альтернативных методов определения потерь электроэнергии. В первом методе определения потерь электроэнергии, основанном на использовании результатов расчета установившегося режима,

нагрузки узлов i ($i = \overline{1, n}$) питающей сети моделируются графиками мощностей $\dot{S}_i(t) = P_i(t) + jQ_i(t)$, а во втором методе по аналогии с распределительной сетью – графиками модулей токов $J_i(t) = J_i f_i(t)$

Графики мощностей предложено моделировать также в виде произведения $P_i(t) = P_i f_i^P(t)$, $Q_i(t) = Q_i f_i^Q(t)$ средних значений P_i , Q_i и функций $f_i^P(t)$, $f_i^Q(t)$, средние значения которых за период T равны единице. Значения P_i и Q_i предложено определять по данным диспетчерской ведомости, функции $f_i^P(t)$ – моделировать типовыми графиками активной мощности, а функции $f_i^Q(t)$ и $f_i(t)$ – воспроизводить по графикам $f_i^P(t)$, с учетом изменения значений коэффициентов мощности в узлах сети.

Нагрузки в узлах связи сетей зависят от конфигурации схемы распределительной сети. Мощности $P_i(t)$ и $Q_i(t)$ для первого метода определения потерь в каждом из этих узлов вычисляют по соответствующей токовой нагрузке $J_i(t)$ распределительной сети и коэффициенту мощности.

Первый метод определения потерь электроэнергии основан на использовании выражения связи функций узловых напряжений и мощностей питающей сети в виде

$$\dot{U}(t) = \mathcal{J}^{-1} \dot{S}(t), \quad (1)$$

где \mathcal{J} – матрица Якоби узловых уравнений.

Выражение (1) образовано посредством линеаризации системы нелинейных узловых уравнений в точке средних значений напряжений в узлах сети. На базе записи (1) исходные среднечасовые потери электроэнергии на фазу сети определены выражением

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_0 &= \frac{1}{T} \int_0^T \dot{U}^T(t) G \dot{U}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \dot{S}^T(t) B \dot{S}(t) dt = \\ &= \sum_{i=1}^n P_i \sum_{j=1}^n P_j b_{ij} \xi_{ij}^P + \sum_{i=1}^n Q_i \sum_{j=1}^n Q_j b_{ij} \xi_{ij}^Q, \end{aligned} \quad (2)$$

где G — матрица узловых активных проводимостей; $B = (\mathcal{J}^{-1})^T G \mathcal{J}^{-1} = [b_{ij}]$ — матрица формулы потерь; ξ_{ij}^P и ξ_{ij}^Q — множители, определяемые скалярными произведениями графиков нагрузок в узлах сети:

$$\xi_{ij}^P = \frac{1}{T} \int_0^T f_i^P(t) f_j^P(t) dt, \quad \xi_{ij}^Q = \frac{1}{T} \int_0^T f_i^Q(t) f_j^Q(t) dt. \quad (3)$$

Второй метод определения потерь электроэнергии основан на использовании известной связи токораспределения в сети с ее узловыми нагрузками

$$\dot{I}(t) = \dot{C} J(t), \quad (4)$$

где \dot{C} — матрица коэффициентов распределения узловых токов по ветвям сети. Из базе записи (4) выражение потерь электроэнергии в сети принимает вид

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_0 &= \frac{1}{T} \int_0^T \dot{I}^T(t) R_B \dot{I}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T J^T(t) R_0 J(t) dt = \\ &= \sum_{i=1}^n J_i \sum_{j=1}^n r_{ij} J_j \xi_{ij}, \end{aligned} \quad (5)$$

где R_B — диагональная матрица сопротивлений ветвей сети;

$R_0 = \text{Re} \left\{ \dot{C}^T R_B \dot{C} \right\} = [r_{ij}]$ — расчетная матрица узловых активных сопротивлений; ξ_{ij} — множители, определяемые скалярными произведениями графиков токов нагрузок в узлах сети.

Выражения (2) и (5) посредством соответствующих коэффициентов скалярных произведений позволяют оригинальным способом учитывать характер изменения узловых нагрузок во времени. При моделировании нагрузок типовыми графиками эти коэффициенты могут быть определены заранее до расчета потерь электроэнергии и использованы в выражениях (2), (5) как поправочные множители. Предложенные методы обеспечивают независимую от разнородности нагрузок узлов сети точность определения потерь электроэнергии, что является важнейшим фактором для определения правильных решений за-

дачи комплексной оптимизации объединенных сетей по потерям электроэнергии.

Во второй главе представлены два метода учета питающей сети, разработанные на определении потерь электроэнергии соответственно по выражениям (2) и (5). Методы учета основаны на рассмотрении питающей сети как составной части единого электротехнического комплекса в пространстве независимых управляемых параметров, посредством которых моделированы положения точек размыкания контуров схемы распределительной сети. В диссертационной работе в качестве таких параметров использованы контурные токи от источников тока, условно включаемых в исходные размыкания контуров схемы распределительной сети (рис. 1). Распределительная сеть с источниками контурных токов рассмотрена как условно замкнутая.

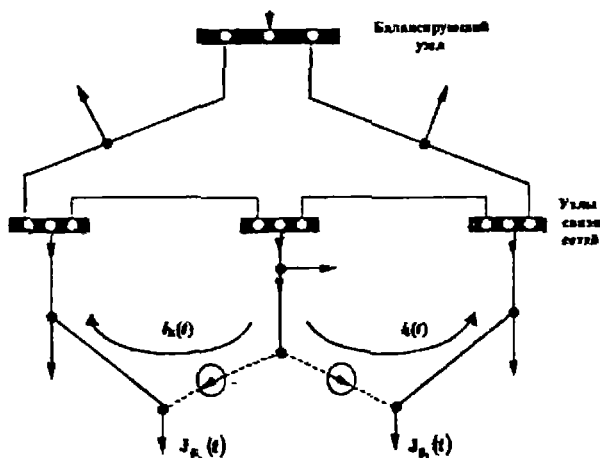


Рис. 1. Схема электрической питающей и распределительной сетей

Положения точек размыкания в контурах условно замкнутой схемы распределительной сети предложено моделировать средними значениями i_k соответствующих контурных токов

$$I_k(t) = [\bar{i}_k(t)] = [\bar{i}_k f_{p_k}(t)], \quad (6)$$

где $f_{p_k}(t)$ – график нагрузки узла p_k , через который в каждом контуре k ($k = \overline{1, m}$) распределительной сети предполагается перенос точки размыкания

на соседний участок. Среднее значение графика $f_{\beta_k}(t)$ за период T равно единице.

Параметры i_k рассмотрены как независимые непрерывные переменные в пределах от нуля до средних значений нагрузок узлов β_k , через которые в контурах k схемы распределительной сети возможны перемещения точек размыкания на соседние участки. Непрерывное изменение переменных в указанных пределах приводит к непрерывному перемещению точек токоразделов, что эквивалентно перемещению точек размыкания в их соседние положения.

Комплексная оптимизация точек размыкания основана на минимизации функции потерь электроэнергии $\mathcal{E}(i_k)$, представляемой суммой составляющих функций для питающей $\mathcal{E}_1(i_k)$ и распределительной $\mathcal{E}_2(i_k)$ электрических сетей. Минимизация функции $\mathcal{E}(i_k)$ сведена к нахождению условного оптимума в области, определяемой ограничениями по допустимым токам ветвей схемы распределительной сети.

Решение вопросов учета питающей сети рассмотрено как продолжение исследований в этом направлении на базе ранее разработанных на кафедре ЭССС ЮУрГУ методов и алгоритмов многомерной непрерывной оптимизации точек размыкания схемы распределительной сети по потерям $\mathcal{E}_2(i_k)$. Принципиальная схема разработанного алгоритма комплексной оптимизации сетей по критерию минимума функции суммарных потерь $\mathcal{E}(i_k)$ приведена на рис. 2.

Математическая модель зависимости режима питающей сети от конфигурации схемы распределительной сети образована на использовании нагрузок узлов связи сетей. Нагрузки этих узлов рассмотрены управляемыми соответствующими контурными токами распределительной сети, что позволило получить функцию потерь $\mathcal{E}_1(i_k)$, аналогичную функции $\mathcal{E}_2(i_k)$.

В общем виде нагрузки узлов i ($i = \overline{1, n}$) управляемой питающей сети определены как

$$J(i_k, t) = J_0(t) + N^T I_k(t), \quad (7)$$

где $J_0(t)$ – вектор исходных токовых нагрузок узлов питающей сети; $N = [n_{ik}]$ – вторая матрица соединений контуров схемы распределительной сети, цепи ветвей которых подключены к узлам связи сетей (рис. 1).

Связь узловых напряжений с нагрузками узлов управляемой питающей сети определена выражением

$$\dot{U}(i_k, t) = \mathcal{E}^{-1} \text{diag} \dot{u}_i(i_k) J(i_k, t), \quad (8)$$

где $\dot{u}_i(i_k)$ – средние значения напряжений в узлах сети за период T .

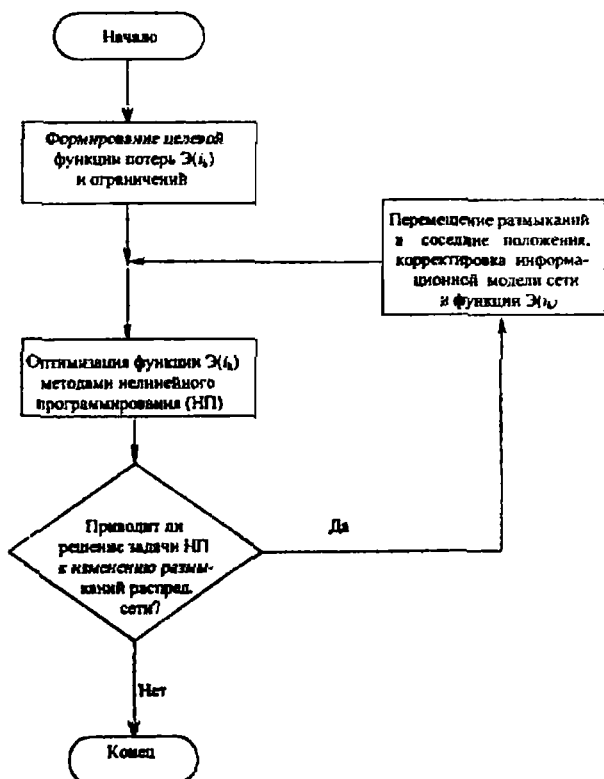


Рис 2. Схема алгоритма комплексной оптимизации сетей

Функция потерь электроэнергии для первого метода учета питающей сети имеет вид

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_1(i_k) &= \frac{1}{T} \int_0^T \dot{U}^T(i_k, t) G \dot{U}(i_k, t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T J^T(i_k, t) R_Y J(i_k, t) dt = \\ &= \mathcal{E}_0 + 2I_K^T \Delta U_{KB} + I_K^T R_K I_K, \end{aligned} \quad (9)$$

где R_Y – расчетная матрица узловых активных сопротивлений сети,

$R_Y = [r_{ij}] = \text{diag}(\dot{u}_1(i_k)) B \text{diag}(\dot{u}_1(i_k))$; \mathcal{E}_0 – исходные потери, определяемые по выражению (2); $I_K = [i_k]$ – вектор независимых непрерывных переменных; $\Delta U_{KB} = [\Delta u_{k0}]$ – вектор расчетных разностей модулей напряже

ний узлов связи сетей; $R_K = [r_{kl} \xi_{\beta_k \beta_l}]$ – квадратная матрица расчетных контурных сопротивлений питающей сети ($l = \overline{1, m}$).

Разности модулей напряжений определяют по выражению

$$\Delta U_{k0} = \sum_{i=1}^n n_{ij} \sum_{j=1}^m r_{ij} J_{0j} \xi_{\beta_k \beta_j}, \quad (10)$$

где J_{0j} – среднее значение графика тока исходной нагрузки узла j питающей сети; $\xi_{\beta_k \beta_l}$ – коэффициент скалярного произведения графиков нагрузок узла β_k распределительной сети и узла l питающей сети,

$$\xi_{\beta_k \beta_l} = \frac{1}{T} \int_0^T f_{\beta_k}(t) f_{\beta_l}(t) dt. \quad (11)$$

Элементы матрицы контурных сопротивлений $[r_{kl}] = NR_V N^T$ скорректированы множителями $\xi_{\beta_k \beta_l}$ скалярных произведений графиков модулей токов узлов β_k и β_l , через которые во взаимных контурах схемы распределительной сети возможны перемещения точек размыкания на соседние участки (рис. 1).

Выражение градиента функции потерь имеет вид

$$\nabla \mathcal{E}_1(\dot{i}_k) = \left[\frac{\partial \mathcal{E}_1(\dot{i}_k)}{\partial \dot{i}_k} \right] = 2(\Delta U_{k0} + R_K I_K). \quad (12)$$

Градиент $\nabla \mathcal{E}_1(\dot{i}_k)$ рассмотрен в виде произведения относительных приростов потерь электроэнергии $\frac{\partial \mathcal{E}_1(\dot{i}_k)}{\partial P(\dot{i}_k)}$ и частных производных $\frac{\partial P(\dot{i}_k)}{\partial \dot{i}_k}$ функций средних активных мощностей узлов управляемой питающей сети. Приросты потерь $\frac{\partial \mathcal{E}_1(\dot{i}_k)}{\partial P(\dot{i}_k)}$ предложено вычислять решением образованной системы линейных уравнений с матрицей коэффициентов Якоби и правой частью, определяемой частными производными функции потерь $\mathcal{E}_1(\dot{i}_k)$ по составляющим узловых напряжений сети.

Функция потерь электроэнергии для второго метода учета питающей сети имеет аналогичный записи (9) вид

$$\mathcal{E}_1(\dot{i}_k) = \frac{1}{T} \int_0^T \dot{i}_k^T(\dot{i}_k, t) R_V \dot{i}_k(\dot{i}_k, t) dt = \mathcal{E}_0 + 2I_K^T \Delta U_{k0} + I_K^T R_K I_K. \quad (13)$$

где \mathcal{E}_0 – исходные потери, вычисляемые по выражению (5).

Компоненты вектора $\Delta U_{\text{кв}}$ функции (13) вычисляются по выражению (10), в котором сопротивления r_{ij} — элементы матрицы R_0 . Аналогично элементы матрицы контурных сопротивлений определяют как $[r_{\text{кв}}] = NR_0N^T$.

Матрица Якоби в выражении (8) рассмотрена в точке средних значений узловых напряжений $\dot{u}_i(i_k)$, вычисляемых на шаге итеративного процесса комплексной оптимизации схемы распределительной сети. Реализация матричного выражения R_Y на шаге итеративного процесса требует проведения значительных вычислений. Матрица R_0 , определяемая схемными параметрами, не зависит от напряжений $\dot{u}_i(i_k)$ и формируется до начала комплексной оптимизации сетей.

В процессе комплексной оптимизации квадратичные функции потерь (9) и (13) учитывают графики нагрузок узлов сетей посредством множителей ξ_{p_k1} и ξ_{p_k2} . Градиенты функций потерь скорректированы этими множителями, что при разнородности нагрузок узлов сетей гарантирует получение правильных решений задачи комплексной оптимизации схемы распределительной сети по потерям электроэнергии.

Второй метод учета питающей сети позволяет эквивалентировать питающую сеть по потерям электроэнергии в виде условно-радиальной схемы замещения относительно балансирующего узла и узлов связи сетей. Эквивалент питающей сети определен матрицей расчетных контурных сопротивлений R_K , формируемой на предварительном этапе комплексной оптимизации объединенных сетей.

В третьей главе рассмотрен метод расчета средних значений узловых напряжений $\dot{U} = [\dot{u}_i(i_k)]$ управляемой питающей сети на шаге итеративного процесса комплексной оптимизации схемы распределительной электрической сети.

Метод основан на итеративном решении линеаризованной системы уравнений вида

$$[\text{diag} \{ \dot{u}_i^{(\alpha)}(i_k) \} Y] \dot{u}^{(\alpha+1)} = \dot{S}, \alpha = 0, 1, 2, \dots \quad (14)$$

где \dot{S} — вектор сопряженных комплексов средних значений мощностей в узлах сети, $\dot{S} = [\dot{S}_i(i_k)]$.

На шаге итеративного процесса для приближений напряжений $\dot{U}^{(\alpha)}$ формируется матрица коэффициентов, определяемая произведением матриц квадратных скобок выражения (14). Новые приближения напряжений $\dot{U}^{(\alpha+1)}$

вычисляются решением линеаризованной системы узловых уравнений методом Гаусса.

Разработанный метод расчета узловых напряжений прост в реализации и имеет высокую сходимость. Итеративный процесс независимо от размера системы (14) сходится с приемлемой точностью практически всегда за 2...6 итераций от начальных приближений, определяемых номинальными напряжениями.

Матрица коэффициентов системы (14), взятая с последней итерации итеративного процесса, рассмотрена как аналог матрицы Якоби. Это позволило отказаться от формирования матрицы Якоби посредством традиционного неэффективного способа частных производных, применяемого в методах Ньютона, и существенно сократить объем вычислений на реализацию матричного выражения R_{ν} для функции (9) и на определение относительных приростов потерь электроэнергии в питающей сети.

В четвертой главе представлена структура разработанного на кафедре ЭССиС ЮУрГУ информационно-вычислительного комплекса и на его базе рассмотрены вопросы реализации методов учета питающей сети.

Информационно-вычислительный комплекс разработан для двух уровней иерархии сетей. Верхний уровень – модель питающей сети, нижний – модель распределительной сети. Взаимосвязь моделей сетей осуществлена через блок обмена межсетевой информацией, который в задаче комплексной оптимизации работает в режиме формирования списка управляемых параметров в виде соответствующих контурных токов распределительной сети и получения в подпространстве этих контурных токов составляющей градиента $\nabla \mathcal{E}_1(i_k)$ потерь электроэнергии питающей сети.

Алгоритм многомерной комплексной оптимизации схемы распределительной сети (рис. 2) основан на циклическом решении задачи непрерывного перемещения точек размыкания в контурах на соседние участки. Решение этой задачи сведено к условной оптимизации функции суммарных потерь $\mathcal{E}(i_k)$ и перемещению размыкания в соседние положения.

Вопросы реализации методов учета питающей сети обусловлены большой размерностью решаемой задачи и объемом алгоритмов условной оптимизации по градиенту $\nabla \mathcal{E}(i_k)$ суммарных потерь электроэнергии в сетях.

Сокращение расхода памяти ЭВМ достигнуто за счет широкого применения способов хранения и обработки слабо заполненных матриц в упаковочной форме. Так, например, подпространство управляемых переменных для градиента $\nabla \mathcal{E}_1(i_k)$ образовано по упаковке матрицы N , которую совместно с упаковкой списка множителей ξ_{p_k} предложено корректировать при смене конфигурации схемы распределительной сети.

При выполнении ограничений по пропускной способности в центрах питания распределительной сети режимные ограничения в питающей сети не нарушаются и в алгоритмах комплексной оптимизации сетей не учитываются.

Вычислительный эксперимент по учету питающих сетей, проведенный на базе информационно-вычислительного комплекса для Челябинских и Ижевских городских электрических сетей, подтвердил эффективность разработанных методов учета. Первый метод обеспечивает наибольшее снижение потерь электроэнергии в сетях (питающей и распределительной). Второй даст меньшее снижение потерь. Расхождение оптимальных решений, получаемых применением разработанных методов, составляет по потерям электроэнергии в сетях не более 1%. Второй метод имеет меньший объем вычислений и по сравнению с первым позволяет в целом повысить быстродействие алгоритма комплексной оптимизации сетей в 2...3 раза. Первый метод рекомендовано использовать как эталонный, а второй – как рабочий метод для проведения текущих расчетов.

Оптимизация точек размыкания контуров схемы распределительной электрической сети без учета питающей сети обеспечивает снижение потерь электроэнергии в распределительных сетях на 20...25%. Многомерная оптимизация точек размыкания с учетом питающей сети приводит к снижению потерь электроэнергии в распределительных сетях на 18...20%. При этом потери электроэнергии в питающей сети уменьшаются примерно на 4%.

Личным вкладом автора в реализации информационно-вычислительного комплекса является разработка методов, алгоритмов и программ учета питающей сети по потерям электроэнергии, определения потерь электроэнергии, расчета режима напряжений питающей сети, блока обмена межсетевой информацией и ряда сервисных программ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано новое решение актуальной научно-технической задачи, заключающейся в снижении потерь электроэнергии путем учета питающей сети при комплексной оптимизации эксплуатационной схемы распределительной электрической сети и направленной на повышение эффективности работы объединенных сетей энергосистем. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования привели к следующим результатам и выводам:

1. Обоснована актуальность и необходимость решения задачи оптимизации схемы распределительной электрической сети с учетом питающей сети по потерям электроэнергии. Решение этой комплексной задачи известными методами по потерям мощности при существующей разнородности нагрузок

не обеспечивает нахождение условного минимума функции потерь электроэнергии в сетях. Для получения правильных оптимальных решений задачи функция потерь электроэнергии должна учитывать графики узловых нагрузок сетей.

2. Разработана математическая модель зависимости режима питающей сети от положений точек размыкания контуров схемы распределительной сети. Модель предполагает замыкание распределительной сети и условно - непрерывное перемещение точек размыкания распределительной сети в новые положения. Такой подход позволил свести дискретную по своей природе задачу комплексной оптимизации сетей к непрерывной многомерной задаче и впервые применить для ее решения непрерывные методы нелинейного программирования. Питающая сеть рассмотрена как управляемая система в подпространстве независимых контурных токов распределительной сети, что открыло новые возможности для проведения исследований в области комплексных снижений потерь электроэнергии в сетях.

3. Разработаны не имеющие аналогов методы учета питающей сети, предназначенные для решения задачи комплексной оптимизации объединенных сетей методами многомерного поиска и, в отличие от известных методов учета, позволяющие в условиях разнородности графиков нагрузок узлов получать решения, оптимальные по потерям электроэнергии в сетях.

4. Получены функции потерь электроэнергии, отвечающие требованиям условно-непрерывного многомерного процесса перемещения точек размыкания в контурах схемы распределительной сети и учитывающие при этом графики узловых нагрузок сетей за период T . Квадратичные формы функций потерь позволяют применить в алгоритмах комплексной оптимизации сетей известные и успешно работающие во многих оптимизационных задачах методы квадратичного программирования.

5. Разработаны алгоритмы учета питающей сети для задачи многомерной комплексной оптимизации сетей, решаемой проективными методами квадратичного программирования. В отличие от существующих алгоритмов учета питающей сети, предназначенных для комплексной оптимизации схем распределительных сетей методом покоординатного дискретного спуска, применение разработанных алгоритмов в задаче многомерной комплексной оптимизации гарантирует нахождение условного минимума функции потерь электроэнергии в сетях.

6. Разработан метод определения потерь электроэнергии, позволяющий функционально эквивалентировать замкнутую питающую сеть в виде условно-радиальной схемы замещения и на базе полученного точного эквивалента не только упростить вычисление градиента функции потерь, но и в целом облегчить учет питающей сети при рассмотрении вопросов комплексного снижения потерь электроэнергии в объединенных сетях.

7. Разработан метод определения относительных приростов потерь электроэнергии в питающей сети, позволивший впервые вычислить их решением системы линейных уравнений с матрицей коэффициентов Якоби и правой частью, определяемой частными производными функции потерь электроэнергии по узловым напряжениям сети. Метод улучшает вычислительные характеристики алгоритмов учета и имеет самостоятельное научное значение.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Павлюков В.С. Исследование процесса сходимости уравнений многополюсника при расчете установившихся режимов в электрических системах // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий: Сб. науч. тр. – Челябинск: ЧПИ, 1981. – №285. – С. 57-58.

2. Павлюков В.С. Процедура решения уравнений установившихся режимов в электрической системе методом Ньютона // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий: Сб. науч. тр. – Челябинск: ЧПИ, 1981. – №258. – С. 57-58.

3. Ушаков И.М., Павлюков В.С., Фомин Н.И. Оптимизация мест размыкания в распределительных электрических сетях по потерям энергии // Пути экономии и повышения эффективности использования электроэнергии в системах электроснабжения промышленности и транспорта: Тез. докл. Всесоюзн. конф. – Казань, 1984. – С. 163-164

4. К задаче учета питающей системы при оптимизации эксплуатационных схем электроснабжения 6-10 кВ по потерям энергии / Б.Г. Булатов, И.М. Ушаков, Н.И. Фомин, В.С. Павлюков. – Челябинск: ЧПИ, 1985. – 11 с. – Деп. в ИНФОРМЭНЕРГО, № 1725эн-Д85.

5. Фомин Н.И., Павлюков В.С. Моделирование учета питающей сети при оптимизации разрезов распределительной сети по потерям энергии // Моделирование электроэнергетических систем: Тез. докл. Всесоюзн. конф. – Рига, 1987. – С. 287-288.

6. Фомин Н.И., Павлюков В.С. Вопросы учета питающей сети в задаче оптимизации точек разрезов распределительной сети // Кибернетика электрических систем: Тез. докл. Всесоюзн. научн. семинара. – Абакан, 1989. – С. 232-233.

7. Павлюков В.С. Метод моделирования питающей сети энергосистемы по потерям электроэнергии // Кибернетика электроэнергетических систем: Тез. докл. Всесоюзн. семинара. – Челябинск, 1990. – С. 110-111.

9. Фомин Н.И., Павлюков В.С. Моделирование процессов обмена информацией в алгоритмах совместного расчета сетей энергосистемы // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий: Темат. сб. науч. тр. – Челябинск: ЧТУ, 1991. – С. 60-64.

10. Метод учета питающей сети на базе коэффициентов токораспределения для задачи оптимизации точек размыкания эксплуатационной схемы распределительной сети по потерям электроэнергии / Фомин Н.И., Павлюков В.С. – Челябинск: ЧГТУ, 1992. – 26 с. – Деп. в ИНФОРМЭНЕРГО, № 3357-зи92.

11. Фомин Н.И., Павлюков В.С., Тихонов С.А. Модель данных распределительной электрической сети // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий: Темат. сб. науч. тр. – Челябинск: ЧГТУ, 1994. – С. 21-24.

12. Учет питающей сети на базе метода относительных приростов потерь для задачи оптимизации эксплуатационной схемы распределительной электрической сети по потерям электроэнергии/Фомин Н.И., Павлюков В.С. – Челябинск: 1997. – 15 с.:ил. 1. – Деп. в ВИНТИ, №2443-В97.



Техн. редактор В.И. Кокорев

Издательство Южно - Уральского государственного
университета

ЛР № 020364 от 10.04.97. Подписано в печать 22.02.99. Формат
60*84 1/16. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1. Уч.-изд. л. 1.
Тираж 80 экз. Заказ 41/76.

УОП Издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина. 76.