



**Тарасенко Виктор Викторович**

**ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗВИТИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ  
ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ С РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции  
и электроэнергетические системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) на кафедре «Электрические станции, сети и системы».

Научный руководитель – кандидат технических наук, профессор  
**Гольдштейн Михаил Ефимович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Обоскалов Владислав Петрович,**  
ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», каф. АЭС, профессор;

кандидат технических наук, профессор  
**Ильин Юрий Петрович,**  
ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная  
Агроинженерная академия», каф.  
«Электроснабжения сельского хозяйства»,  
заведующий кафедрой.

Ведущая организация – ОАО «МРСК Урала» филиал «Челябэнерго».

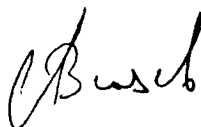
Защита состоится 19 декабря 2012 г., в 14 часов 15 минут, на заседании диссертационного совета Д 212.285.03 при ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. Э-406.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.285.03 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, УрФУ (факс (343) 359-16-15, urfu.aes.@gmail.com ).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УрФУ.

Автореферат разослан «\_\_\_» ноября 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 212.285.03  
к.т.н., доцент



**Зюзев А.М.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Рост производства электроэнергии во многих странах обеспечивается распределённой генерацией (РГ) – малыми источниками, подключаемыми к распределительным электрическим сетям. Эта тенденция проявляется и в России, где малая энергетика, благодаря широкой доступности газа и дизельного топлива, имеет существенный потенциал для роста. В США к 2010 году планировалось довести долю распределённой генерации во вновь вводимых мощностях до 20%, в ЕС до 18%, в России сейчас на долю распределённых источников приходится 17 ГВт установленной мощности электростанций.

Распространение РГ требует решения задач её размещения с обоснованием мощности, возможных площадок, мест подключения, режимов работы в зависимости от существующих схем сети, мощности и характера потребления. Эти оптимизационные задачи должны решаться не только с позиций минимума затрат на ввод и эксплуатацию генерирующего комплекса, но и учитывать развитие распределительных сетей, к которым подключается РГ, затраты на эксплуатацию, возможное снижение потерь.

В большой энергетике такие задачи решаются известными методами непрерывного программирования, что требует принятия ряда упрощений при формировании математической модели, приводящих для малой энергетике к существенным погрешностям при поиске оптимальных решений. Применение направленного перебора вариантов, реализованного с помощью генетического алгоритма (ГА), позволяет снизить погрешность по сравнению с применением традиционных непрерывных методов оптимизации за счёт отказа от необходимости вводить упрощения при описании целевой функции и возможности поиска её глобального минимума.

Известны работы в области построения и оптимизации электрических сетей, в том числе с РГ, выполненные Н.И. Воропаем, П.И. Бартоломеем, А.В. Паздериним, А.М. Клер, Б.Г. Санеевым, Б.И. Макоклюевым, Н.В. Савиной, И.Н. Колосок, В.П. Обоскаловым, А.Г. Фишовым, и др. Ими разработаны принципы построения сетей с РГ, обозначены основные проблемы их функционирования. Ведутся работы по созданию математических моделей

источников РГ. Известные модели планирования развития недостаточно учитывают характер потребления, не рассматривают возможность одновременной выработки тепла и продажи электроэнергии в сеть. Капитальные и эксплуатационные затраты учитываются лишь в виде удельных показателей и не разбиты на составляющие, что ухудшает точность самой математической модели. В настоящее время комплексного подхода к решению задач оптимизации размещения распределённых генераторов и выбора их числа и мощности с учётом режимов работы, эксплуатации систем энергоснабжения с РГ при максимальном учёте влияющих факторов ещё не выработано. Поэтому актуальна разработка математической модели, а затем и методик, реализующих такой подход.

**Объектом исследования** являются распределительные сети с установками малой РГ. Проверка результатов проведена в системе энергоснабжения студгородка ЮУрГУ. Все исследования проводились на основе газопоршневых когенераторов, однако предложенные алгоритмы применимы и для сетей с другими источниками РГ.

**Цель работы** заключается в создании оптимизационной модели и алгоритмов решения задач определения числа, типа и мест размещения установок РГ в распределительной сети и выбора состава работающего оборудования в различных эксплуатационных ситуациях.

#### **Научная новизна**

1. Показана эффективность применения генетического алгоритма (ГА) для решения задач оптимизации в системах с РГ.
2. Показано, что ГА применим для решения как задач проектирования, так и задач эксплуатации систем с РГ.
3. Разработана комплексная математическая оптимизационная модель выбора структуры системы с РГ, с детализацией целевой функции в зависимости от проектной или эксплуатационной направленности задачи.
4. Разработана технология адаптации программного обеспечения, реализующего ГА, для решения задач оптимизации систем с РГ.
5. Разработаны алгоритмы оптимального участия РГ на рынке электрической мощности.

6. Решена задача выбора состава генерирующего оборудования в распределительных сетях с РГ с учётом теплотребления.

**Основные положения**, выносимые на защиту:

- Комплексная оптимизационная математическая модель системы с РГ, позволяющая решать проектные и эксплуатационные задачи оптимизации систем с РГ.
- Технология адаптации программного обеспечения, реализующего ГА для решения задач оптимизации систем с РГ.
- Алгоритмы оптимального участия РГ на рынке электрической мощности.
- Решение задачи выбора состава генерирующего оборудования в распределительных сетях с РГ.

**Практическая значимость** заключается в применении эффективных алгоритмов управления развитием и эксплуатацией систем с РГ, что приводит к улучшению их технико-экономических показателей, снижению потерь электроэнергии, более эффективному использованию оборудования и топлива при планировании суточных графиков загрузки оборудования.

**Практическая реализация.** Результаты работы использованы в инновационно-образовательной программе «Энерго- и ресурсосберегающие технологии» при реализации национального проекта «Образование» и в приоритетном направлении развития «Энергосбережение в социальной сфере» в рамках программы развития ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (национального исследовательского университета).

Полученные результаты в области математического моделирования и оптимизации режимов сетей с РГ при помощи ГА использованы при выборе площадок строительства двух малых теплоэлектростанций в сети ЮУрГУ, определении их оптимальных режимов работы и технико-экономических параметров, а также в учебном процессе в курсе «Автоматизированные системы управления электростанций» и «Оптимизация в электроэнергетических системах».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, в том числе 2 в реферируемых изданиях ВАК.

**Личный вклад:** Создана математическая модель сети с РГ, приспособленная к решению задач методом ГА. Найден эффективный метод решения оптимизационных задач для подобных сетей. Выработаны алгоритмы

программной реализации решения различных оптимизационных задач: выбора числа, мощности и мест подключения генераторов; оптимизации режимов работы генераторов в системе энергоснабжения с РГ; определения минимального тарифа на продажу электрической энергии.

#### **Обоснованность научных положений, рекомендаций и выводов.**

Представление параметров математической модели основано на исследовании характеристик оборудования ведущих отечественных и зарубежных производителей. Работоспособность ГА проверена на тестовой сети путём сопоставления результата с найденным по методу полного перебора. Исследования в диссертационной работе проведены на действующей системе энергоснабжения ЮУрГУ с достоверными данными по её характеристикам.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 139 наименований и 11 приложений. Работа изложена на 154 страницах машинописного текста, который поясняется 40 рисунками и 18 таблицами.

Автор глубоко признателен профессору кафедры ЭССиС ЮУрГУ Б.Г. Булатову за научную и методическую помощь, оказанную в процессе работы над диссертацией.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность решения задач оптимизации для сетей с малой РГ, сформулированы цель и задачи исследований.

**В первой главе** выполнен анализ технических характеристик основных источников малой распределённой генерации. В России наибольшее распространение получают газопоршневые и газотурбинные когенерационные технологии. Оба способа выработки энергии имеют как достоинства, так и недостатки и выбор в пользу той или иной технологии обуславливается конкретными условиями.

Опыт других стран показал, что при вводе РГ приходится решать специфические для малой РГ задачи. К ним относятся и задачи оптимального размещения генераторов с обоснованием числа и типа блоков. А так как в России ещё только начальный этап применения распределённой генерации, то есть возможность комплексно решать задачи размещения и эксплуатации. При

планировании ввода РГ решается оптимизационная задача выбора типа и числа распределённых генераторов, а также мест их подключения к распределительной сети. Критерием оценки эффективности инвестиционного проекта в современных экономических условиях является, как правило, максимум чистого дисконтированного дохода. Однако, учитывая небольшие сроки сооружения малых электростанций, в исследовательских расчётах дисконтированием капитальных затрат можно пренебречь. Решающее влияние на оптимальное решение оказывают прогнозы изменения тарифов на топливо и энергию в период срока эксплуатации установок малой генерации, точность таких прогнозов мала, что позволяет принять примерное равенство темпов роста цен на топливо, электро- и теплоэнергию коэффициенту дисконтирования. С учётом принятых допущений в качестве критерия оптимизации при решении такой задачи используется минимум затрат на ввод в работу и последующую эксплуатацию комплекса РГ, то есть годовые приведённые затраты. Когда малые электростанции уже имеются в сети, возникает задача оптимального планирования режима их работы так, чтобы общие затраты на эксплуатацию всего комплекса, в том числе и на эксплуатацию распределительной сети, были минимальными. При продаже вырабатываемой электроэнергии во внешнюю сеть в ряде случаев возникает необходимость определения минимального тарифа на продаваемую электроэнергию, ниже которого такая продажа становится невыгодной.

Решение этих задач имеет ряд специфических особенностей, одной из которых является целочисленность (номинальная мощность блоков может выбираться только в соответствии с модельным рядом производимого оборудования). Ещё одной особенностью является большая размерность задачи, так как при поиске минимума целевой функции придётся перебирать множество комбинаций числа, мощности, точек подключения, сечений питающих кабелей и др. Сама целевая функция в такого рода задачах может иметь несколько локальных минимумов, что затрудняет применение традиционных методов оптимизации.

Учитывая особенности решаемых задач, для оптимизации принят метод ГА. Этот метод позволяет учитывать дискретность и целочисленность переменных,

хорошо работает с задачами большой размерности и не чувствителен к локальным экстремумам.

Во второй главе рассмотрены целевые функции (ЦФ) решаемых задач. Для задачи выбора числа, мощности и мест подключения распределённых генераторов в качестве ЦФ принимаются годовые приведённые затраты:

$$Z = p \cdot \sum_{i=1}^n K_i + \sum_{i=1}^m C_i, \quad (1)$$

где  $p$  – нормативный коэффициент сравнительной эффективности капитальных вложений в энергетике, о.е;  $K_i$  и  $C_i$  –  $i$ -я статья капитальных и эксплуатационных затрат соответственно;  $n$  и  $m$  – соответственно количество составляющих капитальных и эксплуатационных затрат.

В работе рассматриваются равнонадёжные варианты, необходимая надёжность которых обеспечивается резервированием от внешней сети, либо резервными блоками. Затраты на резервирование учитываются в капитальных затратах.

Годовые приведённые затраты приняты в качестве критерия оптимизации в целях упрощения модели. Этого критерия достаточно, чтобы продемонстрировать работоспособность разработанной модели, а простота формулы приведённых затрат позволяет облегчить процесс анализа адекватности работы модели. В практических расчётах следует применять современные критерии оценки, например чистый дисконтированный доход.

В эксплуатационной задаче, когда нужно определить режим использования уже имеющегося оборудования, в качестве ЦФ принимается сумма всех эксплуатационных затрат за определённый период:

$$\text{ЦФ} = \sum_{i=1}^m C_i. \quad (2)$$

Для быстрого получения прибыли в качестве ЦФ следует принять срок окупаемости  $T$ . Окупиться должна разность между затратами на строительство станций РГ и затратами без такого строительства (на усиление сети) за счёт экономии на эксплуатационных затратах:



$$T = \frac{\sum_{i=1}^n K_i - \sum_{i=1}^n K_{i\text{БРГ}}}{\sum_{i=1}^m C_{i\text{БРГ}} - \sum_{i=1}^m C_i}, \quad (3)$$

где  $K_{i\text{БРГ}}$  и  $C_{i\text{БРГ}}$  –  $i$ -я статья капитальных и эксплуатационных затрат без РГ соответственно, тыс.руб.

Определение минимального тарифа на продаваемую во внешнюю сеть электроэнергию проводится с ограничением на эксплуатационные затраты, которые должны быть не более затрат при автономной работе.

Составляющие капитальных затрат можно представить аналитически. Например, анализ стоимости когенератора в зависимости от его номинальной мощности для шести различных производителей выявил её линейную зависимость. Поэтому затраты на приобретение когенератора  $K_{1\text{ед}}$ , можно выразить функцией:

$$K_{1\text{ед}} = a_1 + a_2 \cdot P_r, \quad (4)$$

где  $P_r$  – номинальная мощность когенератора, кВт;  $a_1, a_2$  – коэффициенты линейной аппроксимации.

Аналогично выражаются затраты на приобретение другого оборудования, на монтажные работы, транспортные расходы, проектные работы, присоединение к сети.

Эксплуатационные затраты и ограничения выражаются по тому же принципу. В отдельных случаях аппроксимирующая функция имеет нелинейный вид. Например, сечение кабелей должно удовлетворять длительно допустимому току, это ограничение представляется квадратичной функцией:

$$a_3 + a_4 \cdot \frac{I_i}{m_i} + a_5 \cdot \left(\frac{I_i}{m_i}\right)^2 \leq S_i, \quad (5)$$

где  $m_i$  – количество параллельных кабелей присоединения генератора к  $i$ -му узлу, шт;  $I_i$  – рабочий ток кабеля в  $i$ -м узле, А;  $S_i$  – сечение кабеля присоединения к  $i$ -му узлу;  $a_3, a_4, a_5$  – коэффициенты квадратичной аппроксимации зависимости сечения кабеля от его длительно допустимого тока.

В некоторых случаях, например при выражении затрат на покупаемую от внешней сети тепловую энергию, функция может изменяться ступенчато в зависимости от соотношения потребляемой и генерируемой тепловой мощности (излишки тепла сбрасываются в атмосферу). Для учёта этого фактора в модель вводится логический блок, обнуляющий тариф на покупку тепла от сети  $\beta_{\text{теп}}$  в случае превышения выработки тепла над нагрузкой.

$$\beta_{\text{теп}ij} = \text{iff}(Q_{\text{н}ij} > n_{ij} \cdot Q_{\text{г}i}, \beta_{\text{теп}}, 0) \quad (6)$$

При применении для оптимизации метода ГА проводится его адаптация к сети с РГ. Процесс оптимизации с помощью ГА имеет много общего с процессами эволюции и естественного отбора, происходящими в природе (рис. 1). Все изменения во время эволюции происходят в хромосомах, в качестве которых при решении наших задач принимаются рассматриваемые параметры математической модели: мощности блоков и их количество в заданный промежуток времени, которые выбираются из представленного ряда случайным образом. В природе заданное количество хромосом определяет особь. В сети с РГ роль особи выполняет определённый возможный состав оборудования с оценкой приспособленности в виде ЦФ. Каждая хромосома состоит из генов. В решаемой задаче хромосомы – это десятичные числа, представленные в двоичном коде, биты двоичного кода в ГА рассматриваются как гены.

Сначала каждая текущая особь проходит проверку на соответствие ограничениям задачи и в случае несоответствия вместо неё генерируется другая. Далее из популяции выбираются особи, имеющие наименьшее значение ЦФ, они скрещиваются и производят потомков. У более приспособленных особей шансов на скрещивание больше. При скрещивании происходит обмен генами, и порождаются новые особи. Наследственная передача информации позволяет генетическому алгоритму сосредотачиваться на наиболее оптимальном решении. Некоторые особи мутируют, при этом случайным образом один из генов меняется на противоположный. Это позволяет алгоритму выбираться из локальных оптимумов. Одновременно в процессе эволюции участвует несколько особей, образующих популяцию.

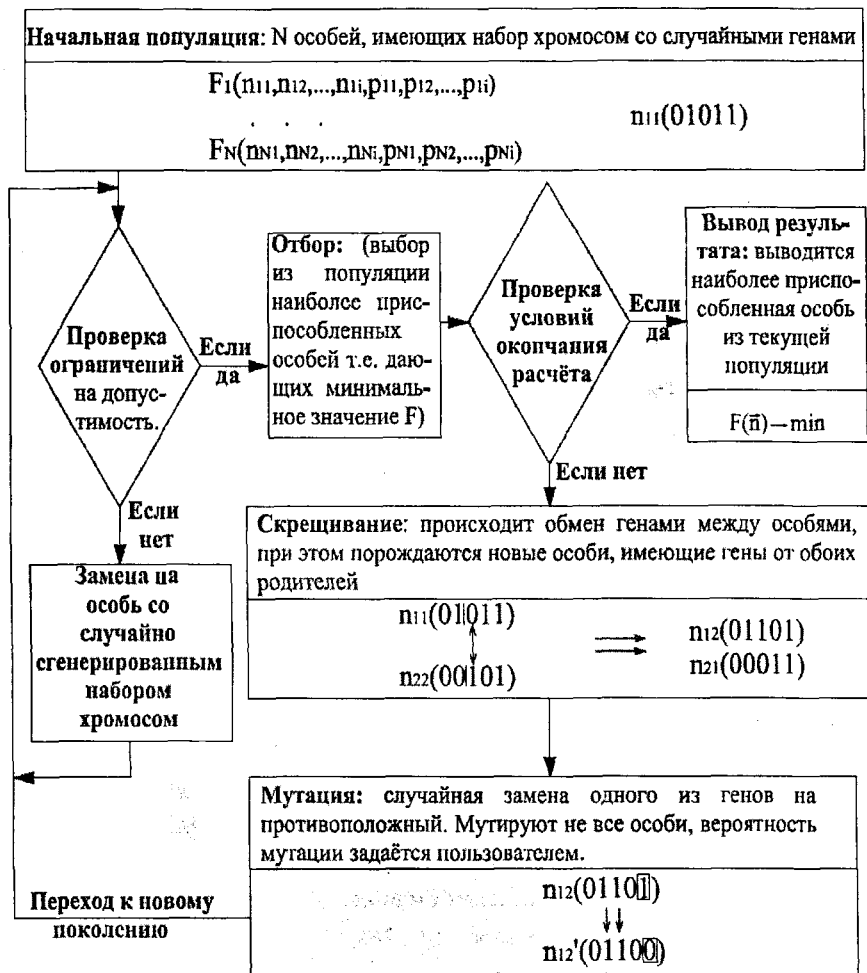


Рис. 1. Схема работы генетического алгоритма

Для расчётов применялась специализированная программа Easy NP 2.0, способная производить оптимизацию методом ГА. Проверка корректности работы программы проведена на простейшей распределительной сети (рис. 2). Рассматривалось максимальное количество блоков в узле  $n_{\max} = 3$ , модельный ряд оборудования представлялся 6-ю блоками различной мощности, общее число комбинаций в задаче 8 млн. В качестве ЦФ приняты годовые приведённые затраты. Расчёт оптимального числа и мощности

блоков производился двумя способами: методом ГА (в программе Easy NP 2.0) и полным перебором всех возможных вариантов (в пакете Mathcad 15). Полученные результаты сведены в таблицу 1, где  $K_i$  –  $i$ -я статья капитальных затрат, а  $C_i$  –  $i$ -я статья эксплуатационных затрат.

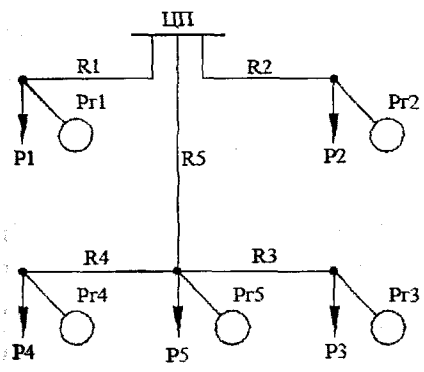


Рис. 2. Схема распределительной сети с возможными площадками для установки РГ

Результат показал полное соответствие значений, полученных при расчёте методом ГА, результатам, найденным прямым перебором всех вариантов, при гораздо меньшем времени.

ГА находит околооптимальное решение путём последовательного улучшения текущего результата. Для окончания расчёта в ГА возможны различные критерии останова (КО), один из которых: достижение заданного числа прошедших поколений, в течение которых значение ЦФ не улучшилось (неудавшихся поколений). Чтобы выяс-

нить при каком значении КО генетический алгоритм достигает достаточно точного результата за минимальное время, были проанализированы результаты применения различных его значений при оптимизации схемы энергоснабжения студгородка ЮУрГУ (табл. 2). Длительным расчётом было найдено минимальное значение ЦФ для заданных условий равное 53 744 тыс.руб. При достижении генетическим алгоритмом этого значения ЦФ перестаёт улучшаться.

Таблица 1

Результаты оптимизации числа, мощности и состава блоков в простейшей сети

| Номер узла                                | Число блоков | Мощность блоков | Приведённые затраты и их состав, тыс. руб. |                                             | Время расчёта, с |          |
|-------------------------------------------|--------------|-----------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------|----------|
|                                           |              |                 |                                            |                                             | Метод перебора   | Метод ГА |
| 1                                         | 1            | 600             | $K_1=84682$                                | $C_1=104$                                   | 2942             | 3        |
| 2                                         | 3            | 1000            | $K_2=17477$                                | $C_3=23108$                                 |                  |          |
| 3                                         | 0            | 0               | $K_4=13521$                                | $C_4=2674$                                  |                  |          |
| 4                                         | 0            | 0               | $K_5=3327$                                 | $C_6=1915$                                  |                  |          |
| 5                                         | 0            | 0               |                                            | $C_7=860$<br>$C_{10}=2286$<br>$C_{11}=4604$ |                  |          |
| Годовые приведённые затраты $Z = 53\,402$ |              |                 |                                            |                                             |                  |          |

В проведённых экспериментах в качестве КО применялось заданное число неудавшихся поколений. Это число варьировалось от 1000 до 30 000. Для каждого значения эксперимент повторялся 10 раз, чтобы можно было говорить о среднестатистической тенденции. Результаты сведены в таблицу 2, где приведено среднее значение ЦФ по 10 повторениям ( $ЦФ_{\text{сред}}$ ), среднее время расчёта по 10 повторениям ( $T_{\text{сред}}$ ), максимальное значение ЦФ, полученное за 10 повторов ( $ЦФ_{\text{max}}$ ), максимальное время расчёта ( $T_{\text{max}}$ ), среднее соответствие результата эталонному ( $СР_{\text{сред}}$ ), минимальное соответствие результата эталонному за 10 повторов ( $СР_{\text{min}}$ ).

Таблица 2

Исследование значения ЦФ и времени расчёта в зависимости от числа неудавшихся поколений.

| КО, неуд. поколения | $ЦФ_{\text{сред}}$ | $T_{\text{сред}}$ , мин | $ЦФ_{\text{max}}$ | $T_{\text{max}}$ , мин | $СР_{\text{сред}}$ , % | $СР_{\text{min}}$ , % |
|---------------------|--------------------|-------------------------|-------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| 1000                | 55060              | 45                      | 56964             | 59                     | 97,61                  | 94,35                 |
| 5000                | 53752              | 165                     | 53770             | 193                    | 99,99                  | 99,95                 |
| 10000               | 53745              | 329                     | 53748             | 412                    | 99,99                  | 99,99                 |
| 15000               | 53744              | 389                     | 53748             | 460                    | 100                    | 99,99                 |
| 20000               | 53744              | 410                     | 53748             | 520                    | 100                    | 99,99                 |
| 25000               | 53744              | 537                     | 53744             | 640                    | 100                    | 100                   |
| 30000               | 53744              | 654                     | 53746             | 727                    | 100                    | 99,99                 |

В ходе проведения экспериментов выявлено, что достаточная для исследовательских расчётов точность достигается тогда, когда в течение 20 000 поколений ЦФ не улучшается, поскольку популяция достигла абсолютного минимума и ведёт своё существование в его окрестностях (рис. 3).

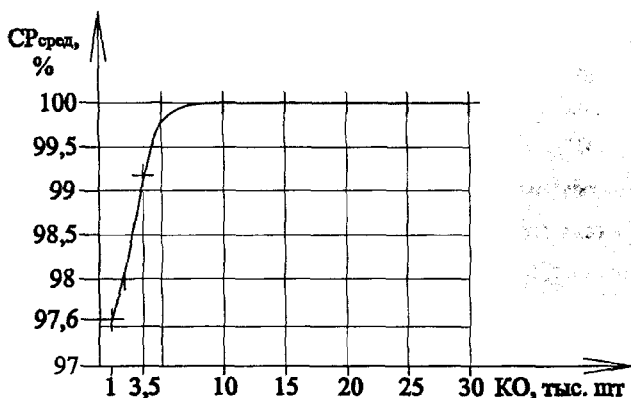


Рис. 3. Зависимость точности соответствия результата эталонному

Эффективность работы ГА во многом зависит от его настроек. В каждом конкретном случае их нужно подбирать индивидуально. Чтобы подобрать настройки ГА для решения задач оптимизации состава оборудования в сетях с РГ, были проведены серии экспериментальных расчётов, аналогичные описанным выше. Изменялись следующие параметры: вероятность мутации (ВМ), размер популяции (РП), количество потомков (КП) и др. Для каждого значения определённой настройки расчёты проводились десять раз, и вывод об эффективности принятого значения настроек делался по среднему значению времени расчёта. По результатам эксперимента удалось выявить зависимость среднего времени расчёта от ВМ (рис. 4) и от РП (рис. 5). Изменение других настроек не выявило устойчивой закономерности.

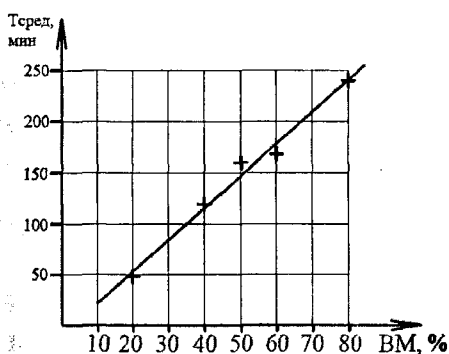


Рис. 4. Зависимость среднего времени расчёта от ВМ

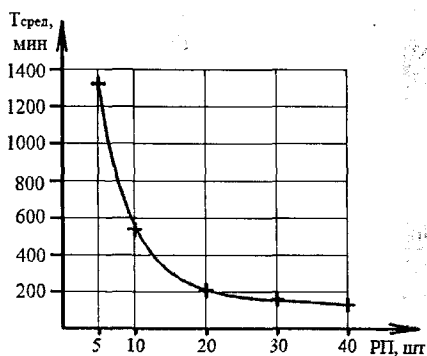


Рис. 5. Зависимость среднего времени расчёта от РП

Оптимизация настроек показала, что наиболее эффективно в задачах оптимизации малой РГ генетический алгоритм работает при следующих настройках: вероятность мутации – 20%, размер популяции – 30, количество потомков – 10. КО, полученный ранее, после проведения дополнительных исследований принят равным 5 000 неудавшихся поколений.

В третьей главе разработанная математическая модель тестируется на сети электроснабжения студгородка ЮУрГУ (рис. 6).

Производится выбор оптимальных точек подключения генераторов, выбор числа и мощности блоков на малых электростанциях. Рассматриваются два варианта развития сети электроснабжения ЮУрГУ, по которым планируется обеспечивать будущий рост нагрузок за счёт строительства одной малой

электростанции или двух (в случае дополнительного увеличения нагрузки в южной части университета). На рис. 7 показаны возможные площадки размещения электростанций с вариантами их подключения к подстанциям.

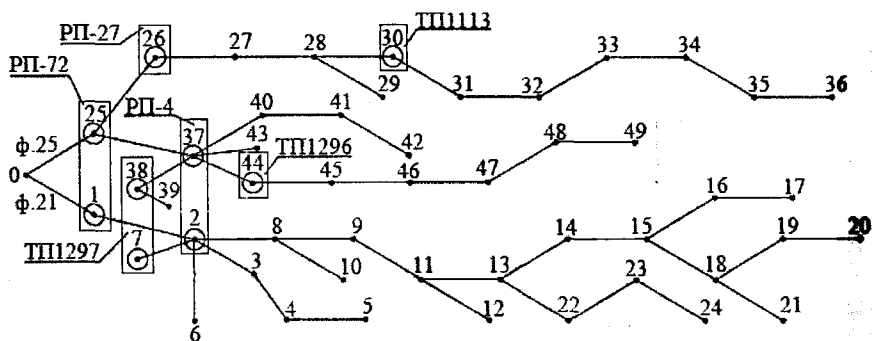


Рис. 6. Расчётная схема сети электроснабжения ЮУрГУ

При выборе оптимальной схемы развития системы электроснабжения ЮУрГУ исследовалось влияние изменения стоимости энергоресурсов на рекомендуемую оптимальную мощность распределённых станций. Так с помощью разработанной модели удалось получить рекомендуемые мощности оборудования и его состав при различных тарифах на покупаемую от внешней сети электроэнергию.

При разных нормативных сроках окупаемости, за которые сравнивается экономическая эффективность вариантов, получается разная оптимальная мощность станций. При увеличении этого срока мощность растёт, но до некоторых пределов, обусловленных как существующими ограничениями, так и отсутствием необходимости чрезмерного увеличения собственной генерации без возможности выдачи излишков электроэнергии в сеть. Производится оптимизация по критерию минимума срока окупаемости, полученное его значение позволяет задать нижнюю границу при поиске оптимального нормативного срока окупаемости. Для ЮУрГУ при нормативном сроке окупаемости 6,5 лет целесообразно строить станцию мощностью 2380 кВт. Минимально возможный срок окупаемости 0,5 года возможен при строительстве станции мощностью 1000 кВт.

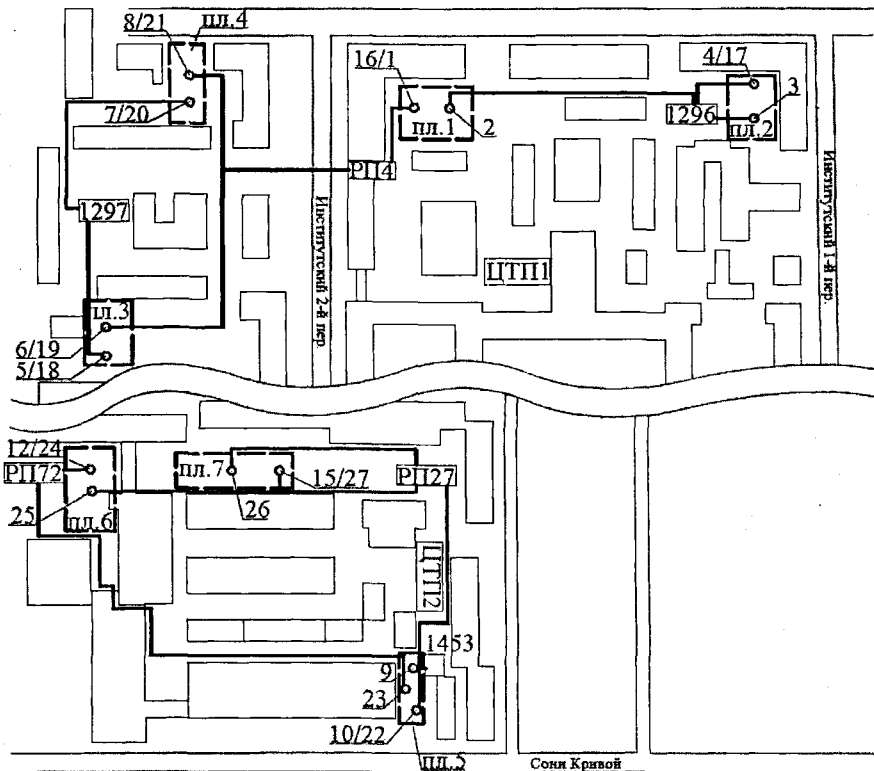


Рис. 7. План студгородка ЮУрГУ с возможными вариантами размещения РГ и трассами КЛ подключения генераторов.

Дополнительно тестирование модели производилось при возможности продажи излишков электроэнергии в сеть. Результаты показали, что возможность продажи излишков электроэнергии во внешнюю сеть позволяет выровнять график работы генерирующего оборудования и при достаточно высоком тарифе на продаваемую в сеть электроэнергию достичь круглосуточной работы всех блоков на полную мощность. Увеличение стоимости покупаемой от внешней сети электроэнергии приводит к целесообразности увеличения собственной генерации, увеличение тарифов на газ эту целесообразность уменьшает. Увеличение тарифа на продаваемую



электроэнергию приводит к росту собственной генерации до пределов пропускной способности линий и трансформаторов.

Оптимизация по критерию минимального тарифа на продаваемую электроэнергию позволяет определить его величину, которая обычно ниже себестоимости производства кВт·часа. Это связано с попутной выработкой тепловой энергии, которая остаётся у потребителя.

После решения проектной задачи производится оптимизация режимов работы сети с РГ с учётом расходных характеристик блоков и их загрузки, что позволяет достичь дополнительной экономии на эксплуатационных затратах.

**В четвёртой главе** представлены алгоритмы программной реализации решения локальных оптимизационных задач на основе разработанной обобщённой оптимизационной модели. Все алгоритмы строятся на основании единой обобщённой математической модели, которая аналитически описывает сеть с РГ. Алгоритмы решения различных «локальных» оптимизационных задач целесообразно составлять на базе алгоритма обобщённой модели. Структурная схема возможного построения программы показана на рис. 8. Здесь:  $P_{Gi}$  – мощность генераторов в  $i$ -м узле схемы;  $n_{Gi}$  – количество генераторов в  $i$ -м узле схемы;  $n_{ri}$  – количество резервных генераторов в  $i$ -м узле схемы;  $h_{\text{выд}}$  – тариф на выдаваемую в сеть электроэнергию;  $F1$  – годовые приведённые затраты,  $F2$  – эксплуатационные затраты,  $F3$  – срок окупаемости,  $F4$  – тариф на выдачу электроэнергии в сеть,  $G1$  – ограничения по балансу мощности в системе,  $G2$  – ограничения по пропускной способности трансформаторов,  $G3$  – ограничения по пропускной способности линий,  $G4$  – ограничения по максимальной мощности резервных блоков;  $G5$  – ограничение: эксплуатационные затраты с выдачей не выше, чем эксплуатационные без выдачи электроэнергии в сеть.

В качестве метода оптимизации используется ГА. Обобщённая модель содержит избыточные функции. Переход к решению локальных задач производится блокированием выполнения «лишних» для данной задачи операций. Например, при решении задачи оптимизации режима работы РГ учёт капитальных затрат не требуется, и поэтому все операции, связанные с этим расчётом, исключаются.

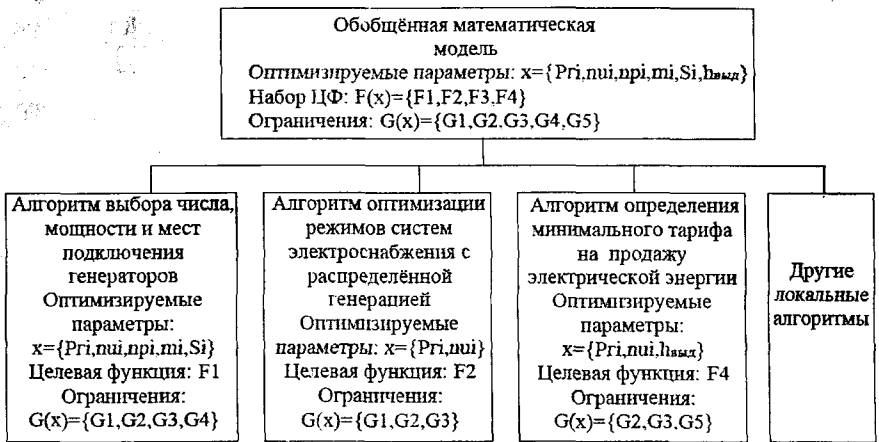


Рис. 8. Возможная структурная схема программы оптимизации сетей с РГ

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получена математическая модель сети с РГ, которая позволяет производить оптимизацию выбора числа, мощности и точек подключения распределённых генераторов, а также решать ряд эксплуатационных задач. В качестве метода оптимизации применён направленный перебор на основе ГА.

1. В энергетике расширяется применение малой распределённой генерации, что требует решения ряда задач, в том числе и задач оптимального её размещения и эксплуатации. Учитывая особенности таких задач создана оптимизационная математическая модель сети с РГ, где в качестве метода оптимизации применен генетический алгоритм.
2. Проведённые исследования показали, что применение ГА для решения оптимизационных задач в сетях с РГ позволяет получить решение с требуемой точностью за меньшее, по сравнению с методом перебора, время. Для решаемых задач предложены оптимальные настройки и обоснован критерий останова.
3. Тестирование математической модели проведено при решении различных задач проектирования и эксплуатации сети электроснабжения студгородка

ЮУрГУ – типичной сети с РГ. Полученные результаты показали корректную реакцию математической модели на задаваемые изменения влияющих факторов, что подтверждает целесообразность применения предложенной модели для решения проектных и эксплуатационных задач по выбору состава и режима работы оборудования сети с РГ.

4. В зависимости от целей решаемых задач при вводе малой генерации, в качестве целевой функции при оптимизации системы с РГ принимаются годовые приведённые затраты, эксплуатационные затраты за определённый период времени, срок окупаемости, тариф на продажу электроэнергии и др. При этом система с РГ описывается комплексной математической моделью и эта модель лишь адаптируется под решение разных задач.
5. На базе комплексной математической модели сети с РГ сформированы алгоритмы её адаптации для решения следующих локальных задач:
  - оптимизации числа, мощности и мест размещения РГ;
  - оптимизации режимов работы сети с РГ;
  - выбора минимального тарифа на продажу электрической энергии.

Аналогично могут быть разработаны и алгоритмы для решения других локальных задач. Например, для составления диспетчерского графика загрузки оборудования при изменяющихся тарифах на энергоресурсы, а также на выдаваемую в сеть электроэнергию. Локальные модели при решении этих задач формируются адаптацией комплексной модели путём введения или блокирования выполнения отдельных операций алгоритма.

Полученную математическую модель в комбинации с выбранным методом оптимизации можно рекомендовать для применения при разработке методик проектирования и эксплуатации систем с РГ, а также при создании программных средств решения проектных и эксплуатационных задач для оптимизации сетей с РГ.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. Тарасенко, В.В. Генетический алгоритм выбора распределённой генерации / В.В. Тарасенко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2010. – Вып. 13. – №14(190). – С. 15–19.
2. Тарасенко, В.В. Определение возможных путей развития системы электроснабжения студгородка ЮУрГУ на основе генетического алгоритма / В.В. Тарасенко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2010. – Вып. 14 – № 32(208). – С. 16–19.

### Публикации в других изданиях

3. Гольдштейн, М.Е. Преимущества распределённой генерации и проблемы на пути её распространения / М.Е. Гольдштейн, Б.Г. Булатов, В.В. Тарасенко // Ресурсосбережение и возобновляемые источники энергии: сборник докладов I Международной научно-практической конференции. – Улан-Удэ: Изд-во ИрГТУ, 2008. – С. 37–40.
4. Тарасенко, В.В. О применении метода перебора при поиске оптимального числа и мощностей источников электроэнергии в сети с распределённой генерацией / В.В. Тарасенко // Научная конференция «Научный поиск»: сб. докладов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – С. 262–265.
5. Булатов, Б.Г. Математическая модель выбора мощности и распределения малой когенерации / Б.Г. Булатов, М.Е. Гольдштейн, В.В. Тарасенко // III Международная научно-техническая конференция «Энергосистема: управление, конкуренция, образование»: сб. докладов. – Екатеринбург: Редакционно-издательский отдел УрФУ, 2008 – С. 339–341.
6. Булатов, Б.Г. Оптимизация построения сети с распределённой генерацией / Б.Г. Булатов, М.Е. Гольдштейн, В.В. Тарасенко // Международная конференция «Электроэнергетика и Автоматизация в металлургии и машиностроении»: сб. докладов. – Магнитогорск: АНО «Персонал», 2008. – С. 192–193.
7. Тарасенко, В.В. К формированию целевой функции для модели выбора распределённой генерации / В.В. Тарасенко // Научная конференция

- «Наука ЮУрГУ»: сб. науч. тр. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – Т. 2. – С. 239–241.
8. Тарасенко, В.В. Оптимизационная модель сети с распределённой генерацией / В.В. Тарасенко // Международная научно-практическая конференция «Современные техника и технологии»: сб. науч. тр. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – Т. 1. – С. 101–103.
9. Тарасенко, В.В. Принципы математического описания технико-экономических показателей распределённой генерации / В.В. Тарасенко // Международная научно-техническая конференция студентов, магистрантов, аспирантов: сб. науч. тр. – Тольятти: ТГУ, 2009. – С. 179–180.
10. Тарасенко, В.В. Задача выбора состава работающего оборудования в сетях с распределённой генерацией / В.В. Тарасенко // Научная конференция «Научный поиск»: сб. докладов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – Т. 2. – С. 194–197.
11. Булатов, Б.Г. Выбор схемы развития системы энергоснабжения студгородка ЮУрГУ на основе генетического алгоритма / Б.Г. Булатов, В.В. Тарасенко // Всероссийская научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи»: сб. науч. докладов. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2010. – Т. 2. – С. 176–179.