

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО АГРЕГИРОВАНИЯ СЕТЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДОВ

КОСЯКОВ С.В., канд. техн. наук, ГАДАЛОВ А.Б., ФОМИНА О.В., аспиранты

Рассмотрен метод моделирования пространственной структуры систем энергоснабжения городов, который может применяться при оценке вариантов развития энергетических сетей, и алгоритм построения моделей территориального агрегирования энергетических сетей в среде геоинформационных систем.

Энергетические сети (ЭС) современных городов активно развиваются. При этом они становятся все более сложными и взаимозависимыми. Развитие технологий в области энергоснабжения и энергосбережения открывает новые возможности и альтернативные варианты в реализации систем отопления, горячего водоснабжения, повышается роль и ответственность систем электроснабжения. Это обуславливает необходимость изучения и моделирования не только отдельных частей или видов энергетических сетей города, но системы городского энергоснабжения в целом. В этих условиях принятие решений по развитию ЭС приобретает характер задач, которые относят к исследованию операций, а каждое решение должно рассматриваться как выбор оптимальной стратегии развития системы энергоснабжения в целом.

Теория планирования развития энергосистем и соответствующий аппарат математического моделирования развиваются главным образом для систем «большой» энергетики. Математические модели анализа стратегий оптимального развития ЭС приводятся, например, в работах [1, 2]. Планирование развития ЭС на территориях городов осуществляется в рамках градостроительной деятельности, и в период советской экономики проводилось в соответствии с представлениями о неограниченных возможностях использования энергетических ресурсов. Это привело к ограниченности соответствующих научных исследований [3]. К тому же процесс управления развитием городских сетей менее централизован, имеет более размытые цели и более разнообразные критерии. Все это обуславливает необходимость проведения исследований в области создания методов, позволяющих оценивать варианты мероприятий по развитию городских ЭС.

В настоящее время основной формой представления структуры ЭС являются модели на основе графов. Они хорошо приспособлены для моделирования процессов внутри сети. Задачи структурного анализа электроэнергетических сетей регионального и национального уровня, использующие показатели связности графов, рассмотрены в [4]. На этом уровне структурный анализ используется в основном для выявления проблем устойчивой работы генераторов в единой системе. Однако такие модели плохо приспособлены для анализа процессов взаимодействия ЭС с объектами внешней среды и влияния элементов разных ЭС друг на друга. В городах также необходимо учитывать ряд факторов, которые в ЭС федерального уровня не играют существенной роли. Это, например, большое количество ограничений при прокладке трасс инженерных коммуникаций, дефицит территорий, ограничения на соседство различ-

ных объектов при высокой плотности их размещения, возможности использования альтернативных способов энергоснабжения (например, для горячего водоснабжения можно использовать подачу горячей воды из сети, газовый нагрев, нагрев с помощью электронагревателей) и т.д. При решении задач развития ЭС городов с учетом указанных выше факторов целесообразно использовать картографические модели территорий, которые создаются и используются в среде геоинформационных систем (ГИС).

Развитие ГИС и геоинформатики открывает новые возможности для решения задач управления развитием ЭС на основе географических методов исследования территорий. В настоящее время практически во всех городах России существуют и в той или иной степени используются цифровые топографические планы территории города, планы кадастрового деления территории, базы данных жилого фонда, избирателей и т.д. Большинство предприятий ЭС ведут базы данных по учету оборудования и имеют нанесенные на карту города схемы сетей. Современные методы и средства интеграции этих данных в информационных системах позволяют без значительных затрат получить недоступные ранее для широкого комплексного исследования сведения о территории. При наличии соответствующих математических моделей и методов на основе этих данных могут быть выявлены пространственные закономерности, которые следует учитывать при планировании мероприятий по развитию ЭС.

В геоинформатике для представления пространственных свойств территориальных систем применяется выделение на территории географически не расчлененных районов по критерию их несхожести в некотором пространстве признаков. Методы получения таких районов в географии называются районированием и рассматриваются как классические методы географической классификации. Описание теоретических основ реализации данных методов приведено в [5]. В работах [6, 7] изложен подход, применяющий идеи районирования к анализу территориально распределенных технических систем. В основу этого подхода положено представление пространственной структуры инженерной сети в виде полигонального покрытия территории. В этих работах показано, что в задачах оптимизации размещения объектов на территории такое покрытие может интерпретироваться как территориально распределенный критерий и использоваться для сравнения вариантов состояний пространственной структуры технических систем.

В географии выделенные методами классификации районы называются операционными территориальными единицами [5]. Поскольку основным кри-

терием выделения районов в рассматриваемом случае является возможность эквивалентирования участка сети, при котором внутренние элементы нагрузки и связи «свертываются» до минимального количества, такие районы названы в [6] эквивалентирующими территориальными объектами (ЭТО). Это понятие близко по смыслу к понятию операционных территориальных единиц, но является более узким и отражает специфику рассматриваемой предметной области.

Модели, использующие в качестве элементов ЭТО, не претендуют на проведение расчетов режимов работы ЭС с инженерной точностью. Они выступают как инструмент предварительной оценки множеств перспективных решений на этапах структурного анализа и структурного синтеза сетей. В [6] предложено использовать в качестве основы для получения ЭТО существующую систему кадастрового деления территории города. Однако в некоторых случаях адекватность данных моделей может оказаться низкой из-за несоответствия пространственной структуры сети и структуры квартального деления. Поэтому методы выделения ЭТО в ГИС требуют дополнительного исследования. Данные исследования приводятся авторами на основе данных и моделей ЭС, полученных в процессе выполнения различных проектов по созданию ГИС на предприятиях и в подразделениях Администрации г. Иванова.

Суть рассматриваемого метода моделирования состоит в замене точно локализованных в пространстве источников и потребителей энергоресурса множеством площадных пространственных объектов – ЭТО, с которыми сопоставлены агрегированные свойства частей ЭС, расположенных на соответствующих участках территории. В результате такой замены реальный сложный граф сети заменяется более простым графом, в котором узлами являются районы, а дугами – агрегированные связи. Пример замены реальной сети моделью пространственной структуры приведен на рис. 1. Семантика такой модели определяется составом описывающих районы атрибутов и составом связей районов друг с другом, а адекватность – выбором способа декомпозиции территории на районы, а также методами определения значений атрибутов и параметров, характеризующих районы и связи. Задачи определения семантики и достижения требуемой адекватности являются нетривиальными и связаны друг с другом. Вследствие этого проблема выбора размера и границ районов, которые можно считать однородными, приобретает сложный характер.

Как уже отмечалось, наиболее подходящей естественной основой для декомпозиции территории является квартальное деление. Согласно определению [8] квартал (в градостроительстве) часть застроенной территории населенного пункта:

- ограниченная несколькими пересекающимися улицами;
- предполагающая целостность архитектурного замысла;
- соблюдение экономических, противопожарных и санитарно-гигиенических требований.

Таким образом, квартал может рассматриваться как элемент пространственно-планировочной структуры города, обладающий четко выраженными естественными границами и внутренней целостностью. В задачах планирования развития ЭС, в которых требуется прогнозировать на будущее величину потребления различных видов энергии на участках

территории, квартал как исторически и функционально стабильный элемент пространственной организации города может использоваться в качестве объекта для анализа динамики потребления различных видов энергии. При этом кварталы можно классифицировать и применять к полученным классам статистические модели для изучения закономерностей изменения суммарной нагрузки, строить и изучать тренды изменения нагрузки и т.д.



а)



б)

Рис. 1. Пример построения модели пространственной структуры газовой сети города: а) исходная карта с отображением сети; б) соответствующая модель

Однако попытки отображения свойств различных ЭС на сеть городских кварталов показывают, что в ряде ситуаций существующее деление территории на кварталы не может адекватно отражать структуру сети. Некоторые соседние кварталы оказываются настолько сильно связанными, что их нельзя представить как отдельные части ЭС. И наоборот, часть кварталов может иметь сложную внутреннюю структуру, которая в схеме замещения ЭС должна представляться несколькими элементами. На рис. 2 приведен фрагмент карты города, на котором видна ситуация, когда сетевые связи плохо согласуются с квартальным делением территории.

В связи с указанной проблемой возникает задача построения на базе существующего плана квартального деления и схемы сети (или нескольких сетей) нового плана деления, отражающего пространственную структуру системы энергоснабжения территории. Авторами разработан алгоритм построения покрытия территории, который позволяет в автоматическом режиме получать модель пространственной структуры ЭС на основе схемы квартального деления.



Рис. 2. Пример несоответствия структуры газовой сети города схеме квартального деления:

Целью работы алгоритма является «свертка» потребителей и трасс внутри кварталов и, при необходимости, разбиение кварталов таким образом, чтобы каждый квартал представлялся как один агрегированный потребитель, связанный с участками сети, проходящими вне квартала, агрегированными связями. Участки трасс, являющиеся дугами графа сети и проходящие полностью за пределами квартала, будем называть магистральными. Источник является обособленным узлом, который не может объединяться с другими узлами.

Алгоритм включает следующие шаги.

1. Пройти по всем кварталам и определить кварталы, исходная сеть внутри которых является листом графа, имеющим один вход. Если в квартале нет других потребителей, определить его как ЭТО, являющийся терминальным элементом модельного графа.

2. Найти листы в графе исходной сети, которые лежат в одном квартале и соединены не более чем одной дугой магистральной линии (т.е. на связывающей их трассе нет пересечения двух магистральных линий). Такие листы объединить в один лист. Если в квартале нет других потребителей, определить его как ЭТО, являющийся терминальным элементом модельного графа.

3. Совокупность оставшихся элементов исходной сети в квартале, имеющих несколько выходов из него, определить как узел модельного графа. При этом в одном квартале может быть несколько узлов.

5. Если лист и узел располагаются в одном квартале, соединены не более чем одной дугой магистральной линии (т.е. на связывающей их трассе нет пересечения двух магистральных линий), то их объединить в один узел.

6. Если два узла принадлежат одному кварталу и у каждого из выходов одного из узлов нет соединения через одну дугу магистральной линии с каждым из выходов другого узла, то такие узлы не объединять, а разбить квартал на две части, иначе – узлы объединить в один.

8. Если в полученном графе имеется несколько его вершин, лежащих в одном квартале, то последний разбить на части, количество которых должно быть равно количеству вершин, принадлежащих кварталу, таким образом, чтобы в каждой части получилось по одной вершине.

Разбиение полигонов осуществляется по границам земельных участков. При этом ищется граница минимальной длины, которая делит полигон на две части и не пересекает ни одной трассы исходной сети.

На рис. 3 приведен пример построения схемы деления территории на основе разработанного алгоритма для участка, изображенного на рис. 2.

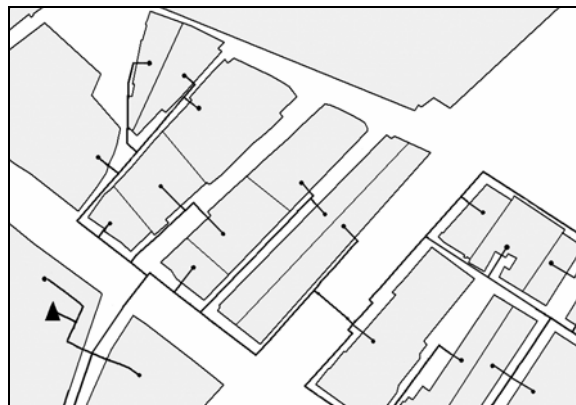


Рис. 3. Фрагмент модели пространственной структуры газовой сети города

В рассмотренном методе использованы кварталы, ограниченные «красными линиями» границ застройки, как принято в градостроительстве. На этапе анализа свойств территории в ряде случаев в качестве территориально распределенного критерия целесообразно использовать непрерывные полигональные покрытия, в которых изучаемые свойства определены в любой точке территории. В этом случае после получения модели по предложенному алгоритму можно, не изменяя полученный граф сети, «расширить» границы кварталов в тех местах, где они не примыкают друг к другу, до осевых линий улиц. В ГИС это можно сделать автоматически.

Наиболее значимыми атрибутами кварталов-ЭТО при анализе ЭС являются суммарные нагрузки и суммарные мощности источников. Под источниками в данном случае подразумеваются распределительные подстанции, обеспечивающие подачу энергоснабителя из сети более высокого уровня, например, электрические подстанции или газораспределительные подстанции. При наличии в ЭТО с номером k i источников и j потребителей его мощность определяется по формуле

$$W_k = \sum_i W_i - \sum_j W_j .$$

При $W_k = 0$ в ЭТО существует баланс поставки и потребления ресурса. При $W_k > 0$ ЭТО рассматривается как источник, а при $W_k < 0$ – как потребитель ресурса в системе, полученной в результате пространственного эквивалентирования сети. Этот результат при отображении его в виде тематической карты (отображение разным цветом величины W_k на карте квартального деления города) позволяет получить определенное представление о пространственной структуре энергетической сети. На рис. 4 приведен пример построения тематической карты наличия резервов электрической мощности в городе.

Полученный в результате работы предложенного алгоритма граф отражает в упрощенном виде общую структуру сети города. Его использование

дает дополнительные возможности для проведения анализа структуры сети. Для каждой дуги графа, соединяющей ЭТО с номерами k и g , может быть определена пропускная способность W_{kg} . Анализируя совместно величины мощностей ЭТО и пропускной способности их агрегированных связей, можно определять наличие резервов для подключения новых потребителей в кварталах, «слабые сечения» сети. Топология полученного графа позволяет оценить структурную связность, структурную избыточность, структурную компактность и другие характеристики, которые определяют степень надежности и экономичности структуры сети. Методы определения этих показателей приведены в [4].

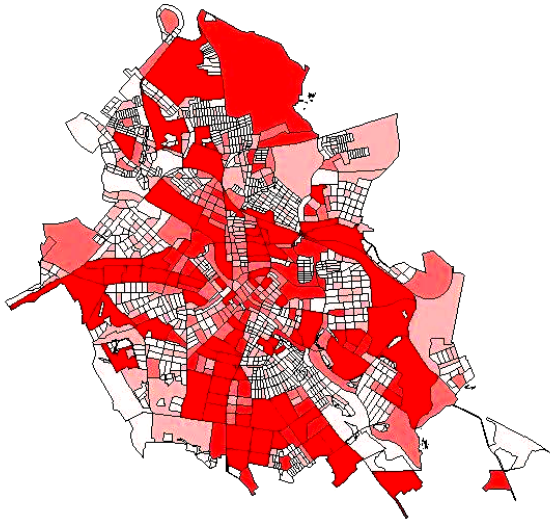


Рис. 4. Пример тематической карты пространственного распределения резервов мощности по территории города

Универсальность рассматриваемой модели относительно различных видов ЭС позволяет совместно анализировать разные сети и осуществлять информационную поддержку принятия решений по развитию инфраструктуры системы энергоснабжения города в целом. Например, можно выявить участки города, где резервы по одному виду энергоресурса отсутствуют, но имеются резервы по другому виду, что позволяет принимать обоснованные решения при размещении объектов.

Таким образом, разработанный метод является элементом технологии пространственного анализа территориально распределенных технических систем, которая разрабатывается в управлении геоинформационных технологий ИГЭУ. Он позволяет автоматически получать структурные модели городских энергетических сетей, которые далее могут применяться в процедурах анализа существующих сетей и вариантов их перспективного развития. Для применения процедур анализа на основе рассмотренных моделей используется только информация, которая имеется в градостроительной документации, что обуславливает возможность использования данных моделей широким кругом лиц, участвующих в управлении развитием городских территорий. В настоящее время разработана экспериментальная версия программного модуля в среде инструментальной ГИС Scale Objects, которая реализует предложенный метод.

Список литературы

1. **Математические** методы и вычислительные машины в энергетических системах (обзор) / Под ред. В.А. Веникова. – М.: Энергия, 1975.
2. **Дале А.В., Кришя З.П., Паэгле О.Г.** Динамические методы анализа развития сетей энергосистем. – Рига: Зинатис, 1979.
3. **Бочаров Ю.П., Фильваров Г.И.** Производство и пространственная организация городов. – М.: Стройиздат, 1987.
4. **Теория** систем для электроэнергетиков / Учеб. пособие / Под ред. Н.И. Воропай. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 2000.
5. **Основы** геоинформатики: в 2 кн. Кн. 1: Учеб. пособие для студ. вузов / Е.Г. Капралов, А.В. Кошкарёв, В.С. Тикунов и др. / Под ред. В.С. Тикунова – М.: Издательский центр «Академия», 2004.
6. **Косяков С.В.** Анализ и планирование развития территориально распределенных технических систем на основе геоинформационных технологий / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2004.
7. **Косяков С.В.** Методы решения задач планирования развития пространственной структуры городских энергетических сетей на основе ГИС-технологий // Вестник ИГЭУ. – 2003. – № 6. – С. 77–83.
8. **Глоссарий.ру:** словари по естественным наукам / Интернет: <http://encycl.yandex.ru/>