

ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ ГРАФОВЫХ СТРУКТУР В ГИС И САПР

С.А. Жихарев, А.В. Скворцов

1. Введение

Основной целью современных геоинформационных систем (ГИС) и систем автоматизированного проектирования (САПР) является построение и анализ графических объектов, их взаимосвязей в пространстве и во времени. Одним из механизмов выявления и анализа таких связей служит аппарат теории графов, рассматривающий структуры (графы), состоящие из элементов двух типов – вершин и ребер между вершинами. В работе рассматривается вопрос построения таких структур (графов) на основе данных, используемых в ГИС и САПР, и их применения для решения графовых задач.

Для решения транспортных, геоинформационных задач, задач имитационного моделирования графовые структуры часто являются незаменимым инструментом. В статье описывается процесс построения графов на основе графической и атрибутивной информации, использования полученных структур, приводятся примеры из универсальной графической информационной системы ГрафИн [1].

2. Построение графовых структур

Традиционно процесс построения графовых структур по картам или схемам разбивается на несколько этапов.

Этап 1. Описание задачи. Выполнение этого этапа обычно возлагается на проектировщика задачи. Он должен определить основные элементы задачи, для каждого из элементов определить условие его вхождения в граф, набор данных для каждого элемента, которые существенны для решения конкретной графовой задачи. Здесь же от него требуется описать алгоритм решения задачи (достаточной на данном этапе может считаться форма представления алгоритма в виде блок-схемы, записи на каком-либо специализированном алгоритмическом языке или в любой другой удобной форме).

Этап 2. Подготовка задачи специалистом. Специалист по программному обеспечению разрабатывает на предоставляемом ГИС или САПР внутреннем языке программу на основе алгоритмической формы решения задачи. Результатом этого этапа должно быть внедрение программы в структуру ГИС или САПР.

Этап 3. Настройка задачи пользователем. На этом этапе пользователь должен определить соответствие между элементами карты (схемы) и элементами графовой задачи. Установление соответствия требуется как между самим

элементами задачи и элементами карты (схемы), так и между их наборами данных.

Этап 4. «Снятие» графа с карты (схемы). По установленному соответствию генерируется представление карты (схемы) в виде графа. В общем случае это может быть мультиграф, т.е. такой граф, в котором между некоторыми из вершин существует более одного ребра. При этом некоторые ребра могут иметь арность более двух.

Этап 5. Предобработка данных. Специфика решаемой задачи может предусматривать большое разнообразие вариантов входных данных. Во многих случаях алгоритмы решения задач можно значительно упростить, если подавать им на вход некоторые обобщённые данные. Поэтому на данном этапе может выполняться преобразование данных, связанных с вершинами и рёбрами в обобщённый формат, а также изменение структуры сети, например удаление рёбер, соединяющих одинаковые вершины, либо замена рёбер с арностью больше двух на другую структуру в соответствии с некоторой схемой замещения.

Этап 6. Решение задачи. Будучи выраженной только в терминах обобщённых вершин и ребер, построенная графовая модель готова к решению на ней задачи. Поэтому теперь можно запустить на исполнение главный алгоритм решения поставленной задачи.

Этап 7. Выдача результатов. Результаты решения, как правило, представляются в двух формах: текстовой, содержащей полный отчёт о выполненных расчётах, а также в графической, когда на исходной карте (схеме) выделяются необходимые объекты и генерируются текстовые надписи с результатами расчётов.

Рассмотрим эти этапы так, как они реализованы авторами в системе ГрафИн.

3. Описание задачи

Описание задачи является ключевым этапом в процессе работы с графами. От исполнителя этого этапа здесь требуется наличие навыков системного анализа, а также глубокое знание предметной области. От того, насколько лаконично будет описана задача, зависит удобство и простота дальнейшей ее настройки пользователем. От того, насколько функционально полным будет множество элементов задачи, зависит ее применимость к разнообразным картам и схемам.

В системе ГрафИн каждую графовую задачу необходимо условно разбить на элементы (ранее упоминавшиеся как элементы задачи) и непосредственно алгоритмическую часть, оперирующую этими элементами. Примерами элементов могут служить линия трубопровода, тепловая камера, подпорно-насосные

станции (ПНС) в задаче имитационного моделирования теплосети; трансформаторы, проводники, нагрузки в электрических расчетах; абстрактные вершины и ребра в классических оптимизационных задачах, таких как задача поиска компонент связности, задача построения минимального остова и др.

С каждым элементом задачи должна быть связана роль, какую предстоит играть этому элементу в графе – быть его вершиной или ребром. В редких случаях один элемент задачи может становиться как вершиной, так и ребром графа, что, как правило, зависит от текущих характеристик уже конкретного элемента карты (схемы) после настройки графовой задачи пользователем.

Часто бывает необходимым сохранить внутри вершины или ребра графа некоторую дополнительную топологию, характеризующую элемент задачи. Например, после преобразования элемента задачи «транзистора с тремя контактами» в вершину графа требуется уметь определять, каким именно из своих контактов эта вершина соединена с другими вершинами. Для этого предлагается следующий подход.

Каждый элемент задачи разбивается на геометрическую и описательную части. Всю геометрию, которую нужно сохранять внутри вершины или ребра графа после преобразования элемента задачи в элемент графа, следует оформить в виде первой составляющей. Вторая – это множество данных, требующихся при решении. Приведем в качестве примера трансформатор. Обычно трансформатор – это вершина графа, которая соединяется с другими вершинами по некоторым своим выводам (по-другому – контактам). Для избежания по-

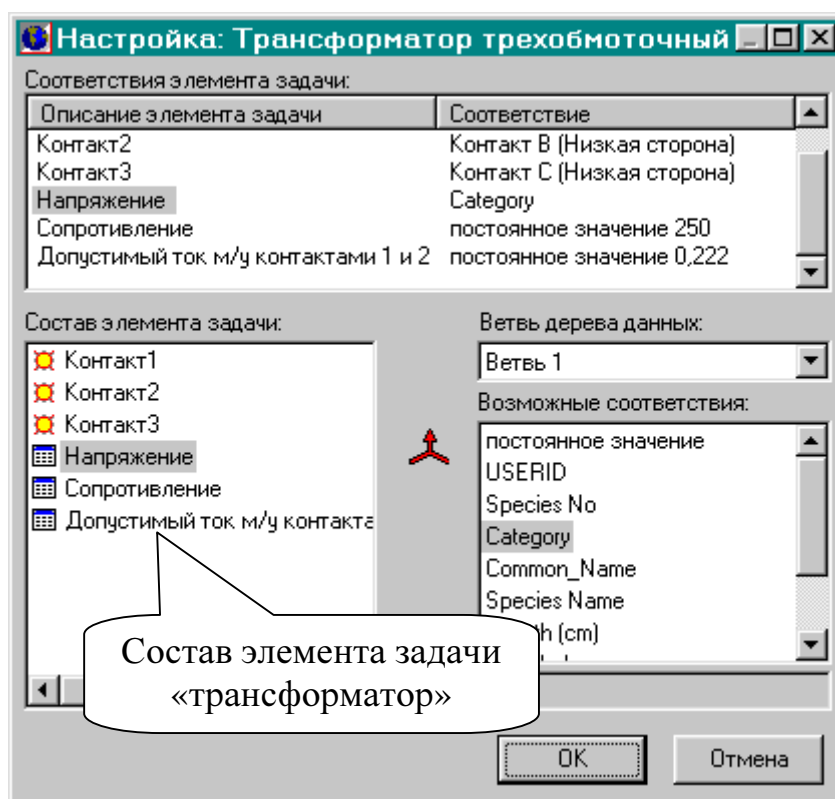


Рис. 1. Состав элемента задачи.

тери связи трансформатора с контактами последние оформляются в виде геометрической составляющей элемента задачи. Описанием для трансформатора могут быть его физические параметры, марка, тип, любые другие характеристики (рис. 1).

Формально контакт элемента задачи (этим термином далее будем называть каждую из геометрических составляющих элемента задачи) становится вершиной графа. Система ГрафИн предусматривает возможность задания специализированной функции, определенной на множестве контактов элемента задачи, которая будет определять, какие из контактов должны объединиться между собой. Эта функция будет вызываться системой для каждого конкретного элемента схемы (карты) в момент «снятия» графа. Дополнительными параметрами, кроме номеров контактов, будут конкретные значения данных этого элемента задачи, взятые с карты. На основании входных параметров внутри функции должен сделаться вывод о необходимости объединения пары контактов. Разделение элемента задачи на геометрическую и описательную части и использование специализированной функции для объединения контактов позволяют в совокупности полноценно выразить элементы практически каждой графовой задачи в терминах теории графов.

Приведем примеры описания некоторых, наиболее интересных, на взгляд авторов, элементов задач.

«Общая шина». Элемент играет роль вершины графа. Он описывается состоящим из одного контакта. Функция объединения всегда выдает «истину». При настройке пользователем (более детально см. раздел «Настройка пользователем») можно будет установить соответствие между этим единственным контактом элемента задачи и элементом карты, например некоторой полилинией. Это приведет к тому, что все другие элементы карты, геометрически соединенные с элементом «общая шина», соединятся между собой в одной вершине.

«Соединительная линия». Элемент играет роль вершины в графе. Имеет два контакта. Функция объединения всегда выдает «истину». После настройки некоторого элемента карты на «соединительную линию» все вершины графа, «выходящие» на один из контактов «соединительной линии», сольются с объединенными через второй контакт другими вершинами.

«Трехконтактный элемент с выключателем между 1-м и 2-м контактами». Элемент играет роль вершины в графе. Функция объединения анализирует положение регулятора – это одно из значений описательной части элемента – и на основании этого для контактов 1 и 2 выдается либо «истина», либо «ложь». После настройки пользователем те вершины графа, которые будут соответствовать контакту 1 и контакту 2, могут быть объединены или нет. Контакт 3 – всегда отдельная вершина.

Описанием алгоритмической части задачи на этом этапе может быть схема решения задачи на сформированном графе. Исполнитель должен иметь

практический опыт решения подобных задач, уметь выделять исключительные случаи, владеть основами структурного и логического мышления. Правильно составленная план-схема является основой для правильной и быстрой работы графовой задачи и эффективного расходования времени специалиста-программиста.

4. Подготовка задачи специалистом

Как показывает анализ существующих систем САПР и ГИС, лишь немногие из них имеют полнофункциональные средства расширения, позволяющие решать разнообразные задачи.

В настоящее время одним из наиболее удобных для всех пользователей (в том числе и тех, кто собирается составить программу, решающую графовую задачу) способом внедрения собственных наработок в любую существующую программу может быть написание таких программ на любом универсальном языке, поддерживающем ActiveX-управление (например, Visual Basic, Delphi, C++), используя ActiveX-интерфейс, предоставляемый главной программой.

Универсальная графическая информационная система ГрафИн имеет обширный ActiveX-интерфейс, позволяющий разрабатывать свои алгоритмы практически на любом внешнем языке, а также с помощью среды VBA (Visual Basic for Applications), фирмы Microsoft, поддерживаемой системой ГрафИн.

Графовая структура, «снятая» с карты (схемы), реализуется в виде ActiveX-интерфейса. В его структуру заложена возможность определения, какие исходные элементы карты (схемы) составляют каждую вершину или ребро графа, значение описательной части для каждого элемента, а также возможность навигации по графу. На основании такой информации возможно составление полноценных алгоритмов решения практически любых задач.

5. Настройка задачи пользователем

На входе этого этапа уже имеется подготовленная графовая задача. Она описана в терминах элементов задачи и алгоритмической части, оперирующей этими элементами. Для того, чтобы начался процесс реальных расчетов, необходимо установить соответствие между элементами задачи и элементами карты, точнее типами элементов карты. Такая работа возлагается обычно на пользователя системы, так как не требует каких-то особых знаний и умений.

Сделаем небольшое отступление. Система ГрафИн работает с проектами, каждый из которых – это некоторая совокупность карт, собранных вместе на основании выбранного пользователем критерия. В свою очередь, карта состоит из отдельных независимых слоев. Обычно в слои выделяют семантически общую информацию. Например, удобно разделение схем теплосетей на слои «Оперативная схема», «Линии трубопровода», «Подпорно-насосные станции» и

т.п. Каждый слой состоит из элементов определённых типов, которые отрисовываются сходным образом и имеют одинаковые наборы атрибутов и геометрических характеристик.

Внутри каждого слоя все элементы разбиты на группы по типам. Элементы одной группы отрисовываются одинаково, имеют один и тот же набор атрибутов и геометрических характеристик.

Установка соответствия ведётся именно между множеством типов элементов слоя и множеством элементов задачи. На рис. 2 приведен пример одной из настроек. Пользователю предоставляется возможность просмотреть все слои данной карты проекта и для каждого элемента задачи выбрать те типы элементов слоя, которые должны будут стать этим элементом. Так, элементом задачи «трансформатор» являются типы элементов в слое «ТР_0 (Трансформаторы)» «Трансформатор трехобмоточный» и «Трансформатор с расщепленной обмоткой»; «Выключателю двухконтактному» в задаче соответствует «Выключатель» слоя «ТР_0 (Оперативная схема п/ст)».

Далее, для каждого выбранного соответствия, например «Трансформатор» графовой задачи – «Трансформатор трехобмоточный» слоя «ТР_0 (Трансформаторы)», нужно определить, что будет являться описательной частью, а что геометрической. Система ГрафИн анализирует графическую часть элемента слоя «ТР_0 (Трансформаторы): Трансформатор трехобмоточный», выделяет там три контакта и позволяет настроить соответствие между множествами

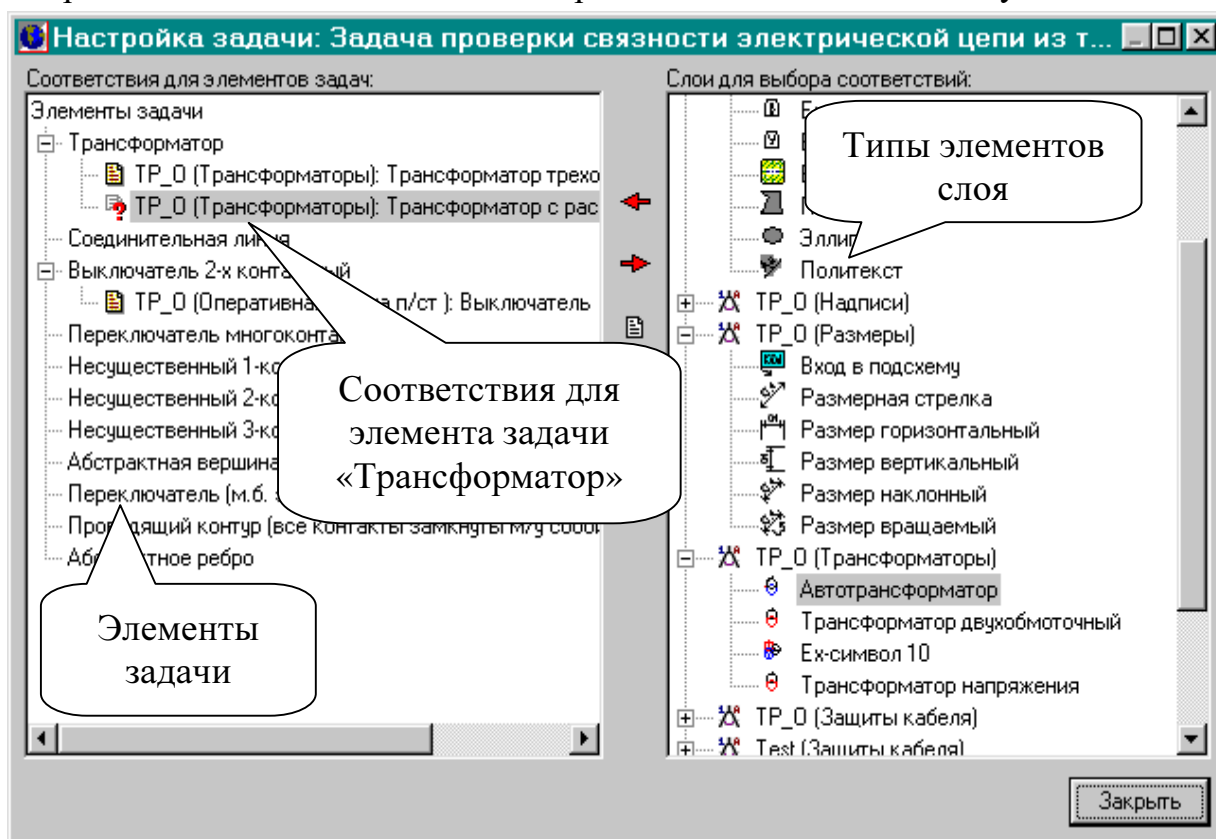


Рис. 2. Настройка соответствия задачи.

троек контактов элемента задачи и контактов трансформатора в слое.

Особым случаем является настройка соответствия для одноконтakтного элемента задачи. Здесь дополнительно разрешается связать единственный контакт элемента задачи либо целиком с элементом слоя, либо с каждым узлом/контактом элемента слоя (различие между узлами и контактами элемента слоя заключается в том, что контактов у элемента слоя всегда постоянное количество, а узлов – переменное; например, у полилинии 2 контакта – первая и последняя вершины, узлом же является каждая вершина полилинии). В первом случае при снятии графа с карты/схемы весь элемент становится вершиной или ребром графа, и для определения инцидентных вершин/ребер высчитывается расстояние до всего элемента, а не до какой-нибудь его части. Во втором случае каждый контакт/узел элемента слоя станет определенным элементом графа (рис. 3).

Аналогичен и процесс настройки соответствия для описательной части. ГрафИн позволяет связать каждую составляющую описательной части с атрибутом элемента слоя или с некоторым константным значением. Возможно задание значений-подстановок, т.е. тех значений для некоторых атрибутов элемента слоя, которые будут заменяться на другие (см. рис. 1).

6. «Снятие» графа с карты (схемы)

После настройки графовой задачи пользователем она готова к работе и ее можно запустить на исполнение из соответствующего пункта меню.

Процесс снятия графа с карты будет зависеть от задаваемой вначале величины погрешности. Она определяет размер окрестности в единицах карты,

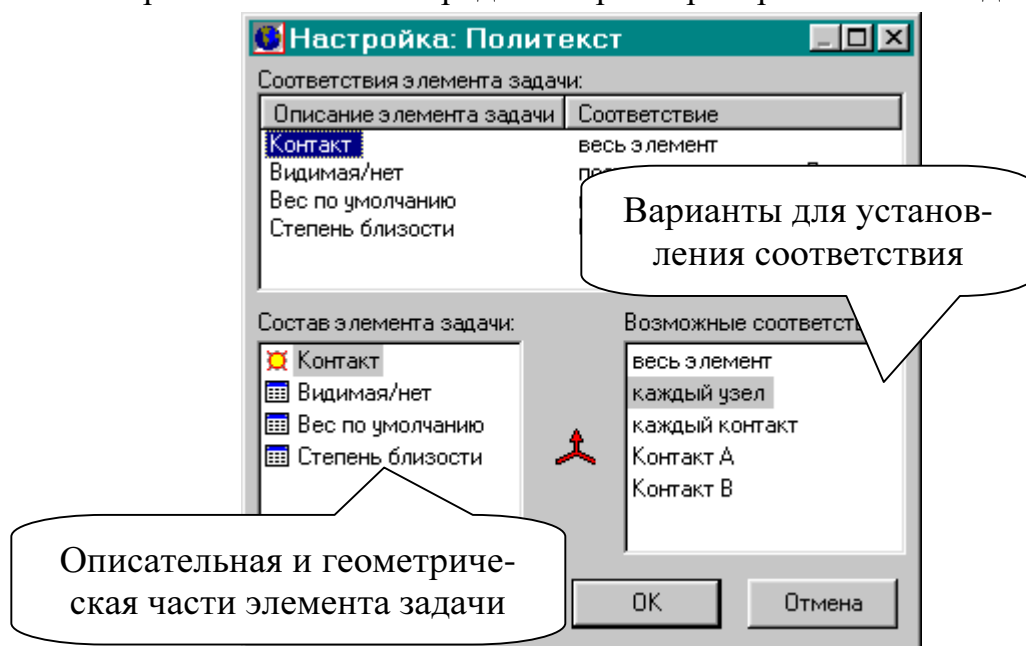


Рис. 3. Настройка геометрической и описательной части «трансформатора трехобмоточного».

внутри которой все точки и части линий считаются совпадающими. Необходимость задания этой величины объясняется неизбежными погрешностями соединения между собой контактов и узлов разных элементов при вводе. Вспомогательным средством может быть автоматическая «подтяжка» одних элементов к другим, предоставляемая ГрафИн'ом.

После завершения процесса снятия имеется возможность вызвать так называемый «Инспектор графа» – специальное окно, позволяющее увидеть снятую структуру графа, «подсветить» на карте одну или более вершин или ребер.

В следующих разделах приведены примеры применения разработанной технологии построения графовых структур в системе ГрафИн.

7. Классические задачи теории графов

Модуль решения классических задач теории графов оперирует с графическими данными следующих типов:

- *Линии* обозначают ориентированные или неориентированные рёбра графа. Концы линий представляют вершины графа. Для взвешенных графов можно указать имя атрибута с весами.
- Точечные *символы*, представляющие вершины графа.
- Различные *метки*, ассоциированные с вершинами графа или его рёбрами и предназначенные для их описания в выходном отчёте после расчётов.
- Различные *полочки*, ассоциированные с вершинами графа или его рёбрами и предназначенные для вывода результатов расчётов.

После настройки данной графовой задачи для работы в некоторой карте можно через меню запустить на выполнение следующие расчёты:

1. *Построение минимального остова*. Необходимо из заданного графа выделить максимальное по мощности связанное подмножество ребер, обладающее наименьшей суммарной стоимостью. В результирующем множестве не должно быть циклов. Остов можно трактовать как кратчайшую незамкнутую сеть дорог, связывающую между собой исходные пункты, причём развилки дорог могут находиться только в исходных пунктах.

Задача может решаться в двух вариантах: при непосредственном задании структуры графа либо при задании только множества исходных пунктов. Второй случай сводится к первому путём построения графа со множеством ребер триангуляции Делоне, имеющими веса, равные евклидову расстоянию между исходными пунктами. Тогда удастся

решить задачу за линейное в среднем время, в отличие от квадратичного при первом варианте.

Задача решается алгоритмом Крускала. Он предусматривает формирование списка всех рёбер графа, упорядоченного по возрастанию длин рёбер, инициализацию остова одним наименьшим ребром и дальнейшее итеративное добавление рёбер в порядке их размещения в упорядоченном массиве [2].

2. *Построение маршрута коммивояжера.* По заданному полному графу необходимо построить замкнутый маршрут, проходящий по всем вершинам по одному разу и обладающий минимальной стоимостью.

Как и в задаче минимального остова, задача коммивояжера может решаться в графовой постановке и в геометрической. В последнем случае осуществляется переход к полному графу, составленному из исходных вершин и всех возможных ребер между ними с заданным евклидовым расстоянием. При таких весах удается обеспечить гарантированное качество получающегося решения, отличающееся от оптимального не более чем в 1,5-2 раза в зависимости от примененного алгоритма.

Выбор способа решения задачи определяется количеством вершин графа, а также задаваемым пользователем желаемым качеством решения. При числе вершин не более 20-30 используется точный алгоритм, реализующий классический метод ветвей и границ [3]. Среди приближённых алгоритмов можно выбрать: 1) алгоритм Кристофидеса, в котором маршрут коммивояжера строится на основе эйлера цикла, составленного из рёбер минимального остова и паросочетания на вершинах нечётной степени; 2) алгоритма дерева, в котором в качестве эйлера цикла берётся удвоенное множество рёбер минимального остова; 3) алгоритма на основе решения задачи о назначениях, при этом решается классическая задача о назначениях в двудольном графе, полученном из исходного удвоением множества вершин.

3. *Расчёт потоков в сетях.* По заданному ориентированному графу с выделенными вершинами «исток» и «сток» и заданными пропускными способностями на рёбрах, необходимо вычислить максимальную пропускную способность всей сети и потокораспределение в максимальном случае.

Данная задача решается алгоритмом пометок Форда-Фалкерсона [4].

4. *Расчёт кратчайших путей.* По заданному взвешенному ориентированному графу, начальной и конечной точке необходимо найти кратчайший маршрут между ними. Задача решается алгоритмом Дейкстры [4].

После выполнения алгоритмов пользователю выдаётся отчёт о проведённых расчётах в текстовом виде. Кроме того, часть расчётной информации выдаётся на полочки, ассоциированные с ребрами и вершинами графа.

На рис. 4 приведён пример построения маршрута коммивояжера для геометрического варианта постановки задачи в системе ГрафИн. Тёмными линиями выделен полученный маршрут, светлыми – рёбра промежуточной триангуляции Делоне и паросочетания.

8. Система расчётов токов короткого замыкания

Система предназначена для расчёта режимов трёхфазных и двухфазных коротких замыканий (КЗ) в электрических сетях 0,22-35 кВ с учётом подпитки от двигательной нагрузки, расчёта остаточных напряжений, а также для эквива-

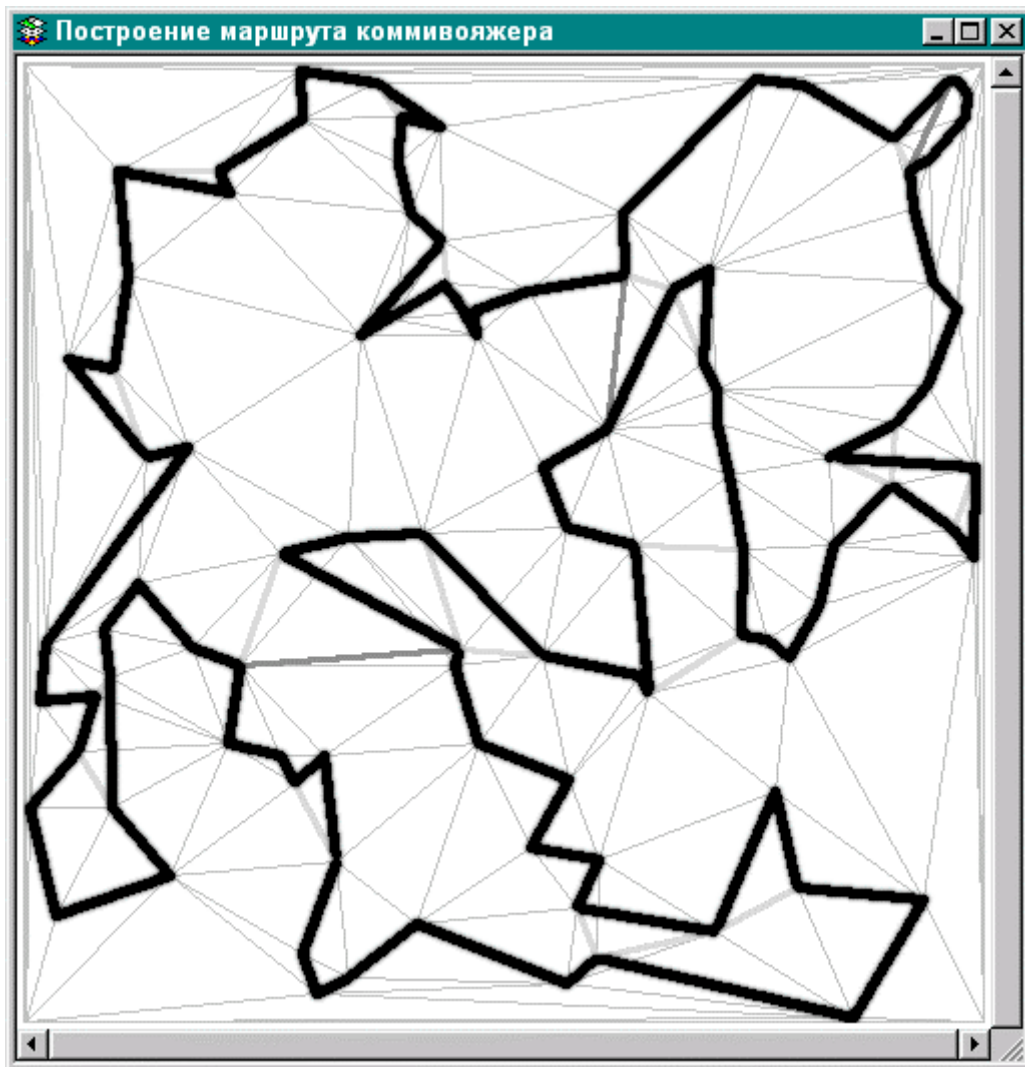


Рис. 4. Построение маршрута коммивояжера.

лентирования электрических схем, работающих в режиме коротких замыканий. Изображение графической схемы строится в системе ГрафИн с использованием следующего набора примитивов:

- *линий*, изображающих воздушные ЛЭП (с продольным или поперечным сопротивлением в схеме замещения);
- символов *трансформаторов* двухобмоточных, трёхобмоточных, с расщеплённой обмоткой и автотрансформаторов;
- символов обобщённых *источников питания* (электрических систем) двух типов;
- символов *генераторов* и *электродвигателей* шести типов;
- символов *реакторов* трёх типов;
- символов обобщённых *нагрузок*;
- символов *конденсаторных батарей* трёх типов;
- символов электрических *расцепителей* (*выключателей*) шести видов;
- *линий*, изображающих электрические *шины*. Между любыми двумя точками шины электрическое сопротивление считается равным нулю;
- *соединительных линий*, обозначающих полный электрический контакт двух соединяемых точек схемы;
- горизонтальных и вертикальных *меток* вершин графа электрической сети. Метки используются при выдаче текстового отчёта для именованния рассчитанных элементов электрической сети;
- горизонтальных, вертикальных и наклонных *полочек* для выдачи результатов электрических расчётов, например распределения токов по рёбрам графа схемы или остаточных напряжений в узлах.

После расчёта режимов КЗ на полочки, расположенные на соответствующих рёбрах и вершинах графа, выводятся рассчитанные токи и остаточные напряжения в узлах для режимов трёхфазного и двухфазного короткого замыкания.

Алгоритм расчёта режимов КЗ при подаче команды на выполнение вначале проверяет корректность нарисованной схемы, снимает схему с карты и проверяет топологическую правильность подключений. Если схема скоммутирована правильно и пользователь корректно указал вершину графа для начала расчётов, то система начинает проверять правильность описания параметров электрической схемы в базе данных и загружает данные в оперативную память.

Затем все электрические параметры элементов схемы эквивалентизируются в некий однообразный набор параметров, т.е. схема замещается специальными универсальными элементами. Такой универсальный набор включает в себя:

- комплексное сопротивление ветви схемы, представленное в виде активного и реактивного сопротивлений R и X ;

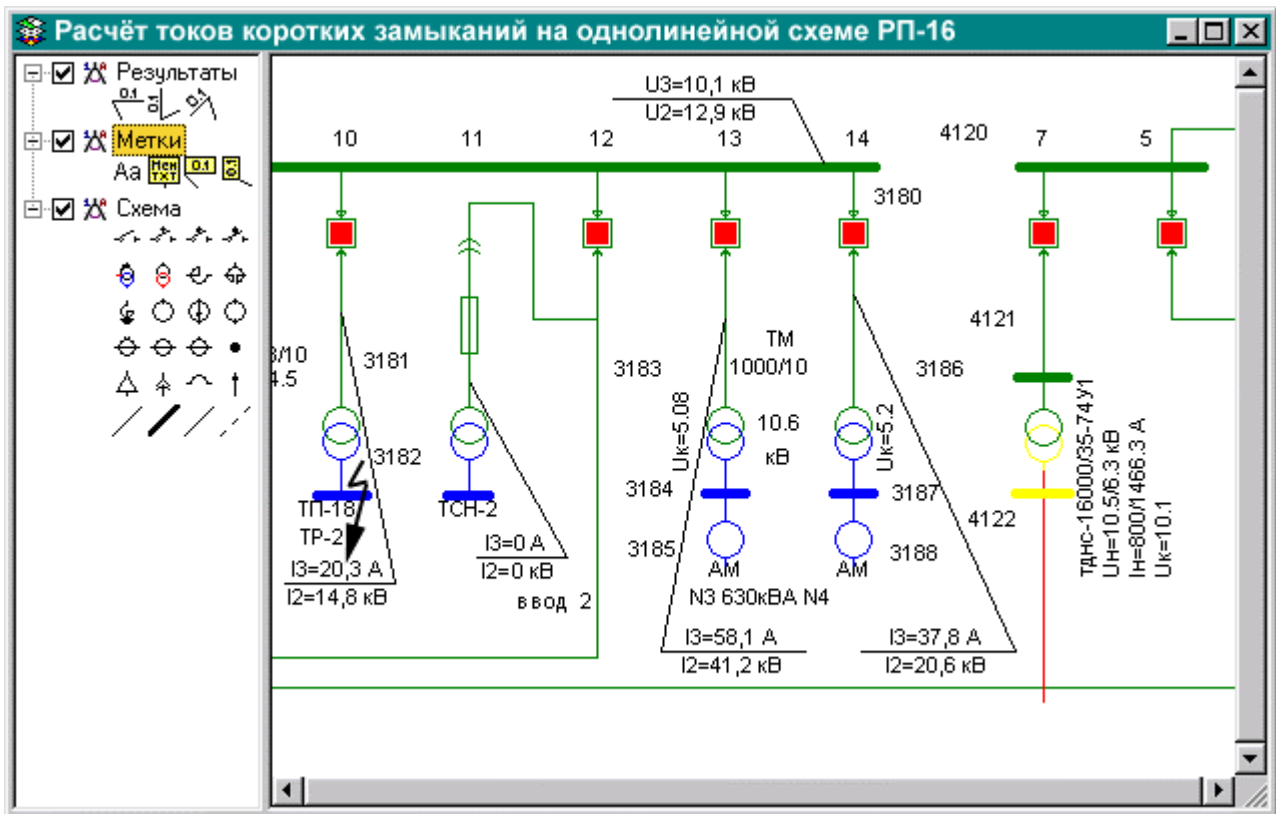


Рис. 5. Расчёт токов коротких замыканий.

- коэффициент трансформации ветви. Для всех элементов, кроме трансформаторов, этот элемент равен единице;
- ЭДС ветви. Эта величина может характеризовать любой источник энергии (генератор, электродвигатель).

Во внутреннем расчётном представлении все элементы электрической схемы обозначаются в виде рёбер графа. Причём, если по смыслу схемы элемент является точечным объектом, например сосредоточенная нагрузка, то такой элемент представляется ребром, у которого один из концов не соединяется ни с какими другими рёбрами. Это приём общепринят для упрощения алгоритмов расчёта.

Некоторые элементы электрической сети представляются в виде символов, имеющих 3 электрических контакта. После снятия графа такие элементы представляются в виде рёбер с арностью 3, соединяющих, соответственно, 3 вершины. После этого модуль эквивалентирования схемы заменяет такие рёбра на 3 обычных в соответствии с некоторой схемой замещения, например в виде звезды с новыми тремя рёбрами и вершиной в середине либо в виде треугольника.

На рис. 5 приведён пример результатов расчёта в системе ГрафИн.

9. Система выбора и проверки сечений проводов воздушных распределительных сетей 0,22-0,35 кВ

Система выбора и проверки сечений проводов воздушных ЛЭП предназначена для выбора сечений проводов воздушных распределительных сетей (вновь проектируемых) и для проверки существующих (реконструируемых) сетей по допустимым потерям напряжения с учётом динамики роста нагрузки [5].

Система напряжения может быть 1+0, 2+0, 3+0 либо смешанной. В системе проектирования возможен учёт прогнозируемой динамики роста нагрузки, учёт как сосредоточенной, так и распределённой нагрузки (например, электропитание дачных участков). Программа учитывает условия по механической прочности при пересечении рек, трубопроводов, трамвайных и железнодорожных линий.

Выбор сечений проводов производится с помощью одного из трёх методов: минимума расчётных затрат, минимума потерь энергии или минимума расхода проводникового материала.

Изображение графической схемы строится в системе ГрафИн с использованием следующего набора примитивов:

- *линий*, изображающих воздушные ЛЭП, магистрали и ответвления;
- символов обобщённого *источника питания* (электрической системы);
- символов обобщённых *нагрузок*;
- символов электрических *расцепителей (выключателей)* четырёх видов;
- горизонтальных и вертикальных *меток* вершин графа электрической сети. Метки используются при выдаче текстового отчёта для именования рассчитанных элементов электрической сети;
- горизонтальных, вертикальных и наклонных *полочек* для выдачи рассчитанных сечений проводов по ветвям и потерям напряжения по нагрузкам сети.

На рис. 6 приведён пример расчёта сечений в системе ГрафИн.



Рис. 6. Выбор сечений проводов воздушных распределительных сетей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скворцов А.В. Система ГраФИн // Наст. книга, с. 181-192.
2. Препарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия: Введение / Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 480 с.
3. Рейнгольд Э., Нивергельд Ю., Део. Н. Комбинаторные алгоритмы. Теория и практика / Пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 478 с.
4. Пападимитриу Х., Стайглиц К. Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность / Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 512 с.
5. Готман В.И., Скворцов А.В. Система проектирования воздушных распределительных сетей 0,22-35 кВ // Энергетика: экология, надёжность, безопасность, Томск, 1996, с. 60-61.