

ПРИМЕНЕНИЕ S -ГИПЕРСЕТЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПРЕДПРИЯТИЯ

М. В. Конин, Э. Ю. Лепнер, Г. В. Попков*

Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, Россия

* Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия

УДК 004.42

Исследована возможность применения теории S -гиперсетей для решения ряда прикладных задач проектирования и визуализации инженерных сетей. Предложена архитектура программного обеспечения для автоматизированного проектирования инженерных сооружений, рассмотрен алгоритм генерации первичной сети. Изучена модель, позволяющая эффективно хранить и оперировать с данными, имеющими иерархическую сетевую структуру.

Ключевые слова: граф, гиперсеть, математическое моделирование, программное обеспечение, проектирование.

In this article we consider the application of S -hypernets theory in the scope of the design and visualization of cabling systems. The architecture of the software for the automatic design of cabling systems is presented. Also the algorithm of primary network generation is given. In addition the data model which allows the effective storage and management of network data is considered.

Key words: graph, hypernetwork, software, engineering.

Введение. В данной работе рассматривается возможность применения теории S -гиперсетей для решения ряда прикладных задач проектирования и визуализации инженерных линейных сооружений.

Определение. Под инженерными линейными сооружениями понимаются все виды коммуникаций строительных объектов, например электросеть, структурированные кабельные сети, вентиляция, охранная и противопожарная сигнализации.

На реализацию линейных сооружений оказывает влияние постоянное увеличение числа ограничений на прокладку сетей (наличие других сетей, местные факторы). План сети в основном зависит от опыта и интуиции проектировщика, а его ошибка может привести к полной потере функциональности сети. Стоимость прокладки сетей формируется на стадии проектирования.

В современных условиях требуется использование новых технологий и автоматизированных решений следующих проблем:

1. Повышение качества проекта инженерной сети, зависящего от опыта и интуиции проектировщика.
2. Поиск и устранение ошибок в проектах инженерных сетей.
3. Учет ограничений при построении сетей.
4. Снижение затрат времени на проектирование и перепроектирование.

5. Автоматизация работ, выполняющихся вручную.

6. Улучшение качества паспортизации сетей.

Перечислим основные проблемы существующего программного обеспечения:

1. Малофункциональный и сложный интерфейс.

2. Большое количество операций, производимых вручную.

3. Отсутствие проверок на ошибки проектировщиков.

4. Высокая трудоемкость проектирования.

5. Отсутствие специальных (алгоритмических) методов для учета ограничений на прокладку электросетевых объектов и структурированных кабельных сетей (СКС).

6. Отсутствие анализа стоимости проектируемой инженерной сети.

В качестве математической модели для задач проектирования коммуникаций нередко используются графы. Теория графов позволяет находить оптимальные структуры сетей с точки зрения конкретных параметров. Известны методы решения задач оптимального размещения оборудования, минимизации стоимости сети и т. д. [1, 2]. Однако в теории графов невозможно определить связь логической и физической структур сети. Рассмотрим проблему проектирования СКС. В этом случае важной задачей является минимизация капитальных затрат на трассировку сети. Иными словами, необходимо найти оптимальное сочетание длин кабелей, лотков и стоимости соответствующих работ при монтаже сети. Эффективным математическим инструментом, используемым при решении этой задачи, является теория гиперсетей. Более подробно применение теории гиперсетей при проектировании СКС обсуждается в [3]. Следует отметить, что данный аппарат может использоваться только для какой-либо одной инженерной сети, на практике же все инженерные сети взаимосвязаны. Для учета взаимосвязей различных сетей предлагается использовать S -гиперсеть [4].

1. Понятие S -гиперсети. Приведем формальное определение S -гиперсети. Пусть заданы множество графов (гиперграфов) $G_0 = (X^0, V)$, $G_1 = (X^1, U^1)$, ..., $G_l = (X^l, U^l)$ и корневое дерево $T_0 = (Z, R)$, где $Z = z_0, z_1, \dots, z_k$; $R = r_1, \dots, r_k$, определяющее вложение графов G_j в G_i ($i < j$) аналогично вложениям, определяемым в гиперсетях, за исключением того, что вершины x_k^i и x_l^j графов G_i и G_j не тождественны, а инцидентны. Очевидно, что одной и той же вершине x_k^i может быть инцидентно несколько вершин $X_k^j = \{x_{k_1}^{j_1}, x_{k_2}^{j_2}, \dots, x_{k_l}^{j_l}\}$ из l графов $\{G_{j_s}\}$, $s = 1, \dots, l$. На множестве вершин X_k^j определяется $L^j = (X_k^j, E)$. Вершины $x_{k_j}^{j_i}$ и $x_{k_s}^{j_s}$ смежны в L^j , если соответствующие графы G_{j_i} и G_{j_s} в вершине x_k^i имеют некоторую системообразующую связь $l(x^{j_i}, x^{j_s})$. В противном случае эти вершины не связаны. Так же как в гиперсетях, ребру $u_l^j \in G_j$ в графе G_i сопоставляется цепь или некоторая связанная часть между соответствующими вершинами в G_i . Известно, что системообразующие связи, вообще говоря, могут иметь разную природу и, как правило, существенно зависят от времени. В некоторых случаях, например в системах инженерных сетей различного типа (электросети, сигнальные и телеметрические сети, компьютерные и телефонные сети и др.), такими связями в мультиузлах являются коробка, лотки и другие коммуникационные системы. В этом случае имеет смысл рассматривать объединение всех вторичных сетей.

Определенную таким образом S -гиперсеть с помощью приведенных ниже матриц можно задать с точностью до изоморфизма и даже с точностью до нумерации вершин и ребер.

Графы G_i , $i = 1, \dots, k$ задаются своими матрицами инцидентности $\{M^i = (c_n^k)\}$. Вложения графов определяются системой матриц инцидентностей $\{M_j^i(a_t^l), N_j^i(b_p^d)\}$, где в матрице $M_j^i a_t^l = 1$, если вершина $x_l \in G^i$ инцидентна вершине $x_t \in G^j$ ($i < j$), и $a_t^l = 0$ в противном случае.

Для матрицы инциденций ребра $N_j^i(b_p^d)$ имеем $b_p^d = 1$, если ребро u_p , принадлежащее вторичной сети G^i , инцидентно ветви u_d , принадлежащей первичной сети G_j , в противном случае $b_p^d = 0$. Представление S -гиперсети заканчивается системой матриц смежности $\tilde{M}_z^i = (s_f^r)$.

Пусть вершине $x_z^i \in G^i$ инцидентны вершины $\{X_l^{jp} \in G^{jp}\}$, тогда матрицы смежности $\tilde{M}_z^i(s_f^r)$ определяют смежность этих вершин в x_z^i . Следовательно, S -гиперсеть $SHN = (G_0, G_1, \dots, G_k)$ однозначно задается следующей системой матриц:

1. $M^i(c_{p_i}^l)$ — матрица инциденций графов G^i , $i = 0, \dots, k$; $l^i = 1, \dots, n^i$; $p^i = 1, \dots, m^i$, где $k + 1$ — число графов в SHN ; n^i — число вершин в графе G^i ; m^i — число ребер в графе G^i .
2. $\{M_j^i(a_{t_j}^{l_i}), N_j^i(b_{p_j}^{d_i})\}$ — матрицы инциденций, определяющие вложение графов G^i в граф G_j где $i, j = 0, \dots, k$ ($i < j$); $l_i = 1, \dots, n_i$; $t_j = 1, \dots, n_j$; $d_i = 1, \dots, m_i$; $p_j = 1, \dots, m_j$.
3. $\tilde{M}_{z_i}^i(s_{f_d}^r)$ — матрицы смежностей вершин графов вторичных сетей в первичной сети, где $i = 0, \dots, k$; $z_i = 1, \dots, n_i$; $f, d = 1, \dots, n$; т. е. $s_{f_d}^r = 1$, если вершины f и d графов $\{G_j\}$ инцидентны вершине z_i и смежны в этой вершине. В противном случае $s_{f_d}^r = 0$.

2. Моделирование инженерных сетей предприятия. Обычно внутренняя инженерная инфраструктура предприятия имеет следующие компоненты:

1. Проводные сети.
2. Системы передачи жидкостей.
3. Газовые сети и системы.
4. Системы пожаротушения.

Каждая из перечисленных систем также является сложной структурой и испытывает влияние остальных подсистем.

Приведем описание S -гиперсети инженерных сетей предприятия (ИСП).

0. Граф ситуационных трасс инженерных сетей (Н).

1. Граф канализации кабельных сетей (ККС).

1.1. Граф ситуационных трасс электрических сетей (ЭС).

1.1.1. Граф низковольтной электропроводки (НЭ).

1.1.2. Графы стандартной электропроводки (СЭ_к): освещение, электропитание.

1.1.3. Граф высоковольтной электропроводки (ВЭ).

1.2. Граф ситуационных трасс линий связи (ЛС).

1.2.1. Графы трасс вещания (ТВ_к): телевидение, радио, наблюдения, оповещение и др.

1.2.2. Графы трасс сетей передачи данных (ПД_к): СПД, Интернет, телеметрия и др.

1.2.3. Графы телефонной связи (ТС_к): городские и местные сети, сети специального

вызова.

1.3. Граф ситуационных трасс сигнальных сетей (СТСС).

1.3.1. Граф охранной сигнализации (ОС).

1.3.2. Граф противопожарной сигнализации (ПС).

1.3.3. Графы сигнальных сетей различного назначения (СРН_к): оповещение, вызов

и т. д.

2. Граф ситуационных трасс канализации для жидкостных сетей (СТЖС).

2.1. Графы систем отопления (СО_к): антифриз, вода и др.

2.2. Граф трубопроводов холодной воды (ХВ).

2.3. Граф трубопроводов горячей воды (ГВ).

2.4. Граф трубопроводов сточных вод (СВ).

3. Граф ситуационных трасс газовых сетей (СТГС).

3.1. Графы воздушных сетей (ВС).

- 3.1.1. Граф систем вентиляции (СВ).
- 3.1.2. Граф систем отопления (СО).
- 3.1.3. Граф систем кондиционирования (СК).
- 3.2. Граф газовых сетей (ГС).
- 3.2.1. Граф бытовой газовой сети (БГС).
- 3.2.2. Граф газового отопления (ГО).
- 3.2.3. Граф подачи газа для специальных нужд (СН).
- 4. Графы систем пожаротушения (ПТ).
- 4.1. Граф газовой противопожарной сети (ПС_к): углекислый и (или) инертный газ.
- 4.2. Граф водяного пожаротушения (ВП_к): спрингерные, струйные и др.
- 4.3. Граф порошкового пожаротушения (ППТ).
- 4.4. Графы “Электрического пожаротушения” (ЭП).

Последняя группа сетей выделена отдельно, так как физические принципы пожаротушения имеют различную природу.

Инженерную инфраструктуру здания можно описать с помощью *S*-гиперсети следующего вида: ИСП = Н {ККС [ЭС (НЭ, СЭ_к, ВЭ), СТЛС (ТВ_к, ПД_к, ТС_к), СТСС (ОС, ПС, СРН_к)], СТЖС [СО_к, ХВ, ГВ, СВ], СТГС [ВС (СВ, СО, СК), ГС (БГС, ГО, СН)], ПТ (ПС_к, ВП_к, ППТ, ЭП)}.

3. Автоматизация проектирования инженерной инфраструктуры (кабельных систем). При проектировании проводных сетей (ПС) одним из наиболее трудоемких процессов является трассировка кабелей. Этот процесс осложняется большим количеством типов кабелей и ограничений, накладываемых на сеть. При моделировании инженерной системы с помощью *S*-гиперсети задача трассировки кабелей сводится к поиску оптимального вложения вторичной сети в первичную.

Основными этапами проектирования кабельных систем являются следующие:

1. Выделение на чертеже комнат для установки оборудования.
2. Расстановка оборудования.
3. Генерация первичной сети (возможные пути прокладки кабелей).
4. Оптимальное вложение кабелей в каналы.

3.1. *Задача поиска сети кабельной канализации.* Проблема построения ПС включает три этапа: 1) построение сети кабельной канализации; 2) построение сети кабельных линий; 3) построение распределительной сети внутри зданий. На втором этапе необходимо предусмотреть как развитие сетей, так и их реконструкцию. Для этой цели на магистральных и распределительных сетях предусматривается наличие распределительных шкафов (РШ), сетевых узлов (муфт), а также горизонтальных связей между соседними РШ для увеличения гибкости данной сети. В дальнейшем эти задачи могут решаться самостоятельно, причем в задаче поиска сети кабельной канализации обязательно учитываются структуры вторичных сетей.

Приведем алгоритм А1 построения кабельной канализации.

Шаг 1. На графе ситуационных трасс существующая кабельная канализация, способная пропустить необходимое число кабельных линий, будет оцениваться нулевой ценой. В случае необходимости реконструкции или докладки асбестоцементных труб по участкам существующей канализации стоимость этого участка определяется согласно расценкам на данный вид работ.

Далее последовательно добавляются новые участки кабельной канализации.

Шаг 2. Определяется кратчайшее расстояние в графе ситуационных трасс согласно структурам вторичных сетей и весам ребер этого графа. После реализации всех ребер будет найдена некоторая структура кабельной канализации.

Следует отметить, что при реализации каждого ребра вторичной сети нужно знать удельную стоимость соответствующего кабеля, для того чтобы определить вес ветви графа ситуационных трасс, который будет складываться из двух составляющих: $v(y_{ij}) = l(y_{ij})\delta(a_{ij}, z_l) + l(y_{ij})\delta(l_{ij}^I, \omega_k)$ (l, δ, ω — элементы оборудования сети кабельной канализации), если на участке y_{ij} отсутствует кабельная канализация, и $v(y_{ij}) = l(y_{ij})\delta(l_{ij}^I, \omega_k)$, если кабельная канализация на данном участке имеется и по ней можно пропустить необходимые кабельные линии.

Шаг 3. В каждой ветви $y_i \in Y$ графа ситуационных трасс NO вычисляется число $S(y)$ ребер графов вторичных сетей, проходящих в данной ветви $y_i \in Y$. Если $S(y_{ij}) \geq P_\rho$ (P_ρ — параметр алгоритма для ρ -й итерации), то на ветви y_{ij} организуется участок кабельной канализации, стоимость (вес) которого (для следующих итераций) будет уменьшена на величину, равную стоимости строительства кабельной канализации на этом участке.

Шаг 4. Процедуры 2, 3 повторяются до тех пор, пока для всех кабельных линий не будет заведена кабельная канализация.

3.2. *Построение первичной сети.* Задача построения первичной сети включает:

- определение типа, числа и мест расположения РШ, муфт, оптических кроссов;
- определение типа, емкости и трасс кабельных линий;
- определение горизонтальных связей между РШ для повышения живучести и гибкости сети, в частности для удовлетворения связей по другим вторичным сетям.

При этом должны быть выполнены следующие ограничения:

- длина кабельной линии (определенного типа) от станции до абонента должна удовлетворять нормам по затуханию на участке абонентской линии;
- емкость кабельных линий должна быть дискретной и на отдельных участках составлять не менее 2–10% общей емкости;
- тип кабельных линий должен соответствовать нормам для использования на городских абонентских сетях.

Пусть заданы структуры и емкости соответствующих линий для всех вторичных сетей, а также соответствующие нормы по затуханию.

Приведем алгоритм А2 определения мест расположения сетевых узлов, РШ и границ шкафных районов.

Шаг 1. Для каждой линии связи вторичной сети в графе кабельной канализации найдем кратчайший ориентированный путь между узлами связи и потребителями.

Шаг 2. Для каждого пучка каналов (x_p, x_j) вторичной сети между узлом связи x_p и кабельным вводом в здание x_j , идущим по трассе кабельной канализации, каждой вершине этой трассы будем ставить в соответствие число n_j , равное соответствующей емкости для услуг связи в здании x_j . После выполнения данной процедуры для всех пучков каналов получим для каждой вершины x_j вектор $x_j \langle n_i^1, n_i^2, \dots, n_i^{k_j} \rangle$, определяющий прохождение соответствующих пучков емкости n_i через вершину x_j .

Множеству векторов $x_j \langle n_i^1, n_i^2, \dots, n_i^{k_j} \rangle$ поставим в соответствие прямоугольную матрицу вида $W = \{b_i^j\}$, где $i = 1, \dots, g$; $j = (1, \dots, m_A)$,

$$b_i^j = \begin{cases} n_i^j, & \text{если нагрузка из узла } x_j \text{ идет через вершину } x_i, \\ o^j & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Шаг 3. В матрице W найдем $\sum_{j=1}^{m_A} b_i^j = \sigma(x_i)$. Построим двудольный граф $K=(X,Y;U)$ следующим образом: множеству вершин $x \in k$ поставим в соответствие вершины $x_1^l \in x_1 \in x$, а множеству $y \in k$ — вершины x_1^l т. е. вершины, которым соответствуют здания, в которые необходимо подвести пучки каналов вторичной сети. Очевидно, что множество вершин x_1^l претендует на место расположения РШ. Вершины x_i и y_j будут смежными, если “абонент y_j ” соединится с узлом связи через вершину x_i .

Шаг 4. В полученном двудольном графе $K=(X,Y;U)$ найдем независимое максимальное множество вершин $x^* \subseteq x_1$, такое что $\forall x_k, x_c \in X^* K[x_k] \cap K[x_c] = \emptyset$.

Шаг 5. Найденное множество вершин занесем в список $S[\hat{X}] := S[\hat{X}] \cup X^*$, определяющий места расположения РШ и соответствующие границы шкафных районов. Если все вершины (“абоненты”) подключены к РШ или входят в зону прямого питания, то перейти на шаг 7, иначе — на шаг 6.

Шаг 6. Удалим из исходного графа вершины из списка $S[\hat{X}]$ и соответствующие пучки каналов и перейдем к шагу 2.

Шаг 7. В списке $S[\hat{X}]$ перечислим вершины, в которых необходимо расположить РШ соответствующей емкости, а множество вершин $\{y_j\}$ для каждой x_i определяет зону влияния РШ_{*i*}.

Таким образом, будут определены не только места расположения РШ и их границы, но и структура кабельной канализации.

4. Метод построения первичной сети. В некотором смысле первичная сеть является метрическим пространством, в которое вкладываются все остальные сети. Также первичная сеть задает все возможные пространственные места для элементов вложенных сетей. В данной задаче первичная сеть необходима только в момент запуска алгоритма оптимального вложения вторичной сети в первичную. Следует отметить, что первичная сеть должна определяться расставленным оборудованием (узлами вторичных сетей) и архитектурными особенностями здания (схемой расположения комнат).

Для простоты рассматривается случай с одной вторичной сетью, например СКС.

Для построения первичной сети используем следующие стандарты проектирования:

S1: кабельные трассы не проходят по диагоналям комнат.

S2: кабельные трассы ведутся преимущественно вдоль стен.

S3: кабельные трассы располагаются в подпольном и межпотолочном пространствах.

С учетом трех указанных правил построим несложный алгоритм прокладки кабеля от информационной розетки до коммутатора.

1. От информационной розетки кабель либо опустим до пола, либо проведем вверх до потолка.

2. Доведем кабель вдоль стен по полу или потолку до проекции коммутатора.

3. Поднимем (или опустим) кабель до коммутатора.

В алгоритме построения первичной сети PS, содержащей все возможные маршруты, полученные с помощью алгоритма, приведенного выше, используется схема расположения комнат RS, представляющая собой граф, вершинами которого являются комнаты или коридоры, а ребрами — соединения комнат (соответствующие дверным или иным проемам). Комнаты представляются в виде полигона точек.

5. Программная реализация модели данных. Модель данных реализована на платформе .NET. Ее выбор обусловлен оптимальностью отношения расширяемости и кросс-платформенности к скорости работы и сложности поддержки.

S-гиперсеть. S -гиперсеть представлена структурой данных “дерево”, каждый узел которой содержит граф G , N ссылок на вложенные сети H_1, H_2, \dots, H_N и n отображений $\{f_i : H_i \rightarrow G\}$.

Класс инкапсулирует все операции добавления, удаления, редактирования, вложения элементов графа текущего уровня. Также класс содержит методы прохода по дереву.

Граф. Класс содержит набор вершин и ребер. Для наборов созданы собственные классы, реализующие стандартный интерфейс `IEnumerable`, что позволяет применять технологию LINQ, а также большой набор операций из данной библиотеки в прикладных задачах. Итераторы, возвращаемые методом `GetEnumerator`, реализованы таким образом, чтобы они обходили элементы в глубину или в ширину (в зависимости от установленного параметра) в порядке связности. Если граф не связан, то итератор будет по очереди обходить все компоненты связности.

Для данного класса создан декоратор (`wrapper`), использующий только методы для чтения элементов. Гиперсеть возвращает именно декоратор графа, а не сам граф, что гарантирует невозможность добавления элементов в граф в обход гиперсети.

Вершина. Класс содержит поля геометрических и логических данных, а также список инцидентных ребер, что упрощает получение связных элементов.

Ребро. Класс содержит поля геометрических и логических данных и указатели на соединяемые вершины.

В кабельных сетях провода объединяются в жгуты и укладываются в кабельную канализацию. Визуализация гиперсетей должна отображать все эти взаимосвязи.

Модель S -гиперсети позволяет поставить в соответствие ребру графа, расположенного на уровне $k > 1$, маршрут графа, расположенного на уровне $k - 1$.

Заключение. Описанный в работе подход к проектированию позволяет значительно уменьшить трудозатраты на построение инженерной инфраструктуры предприятия.

Предлагаемая математическая модель соответствует всем требованиям и в полной мере описывает инженерную инфраструктуру, а также позволяет формально описать поставленные задачи, некоторые свести к уже известным. Например, задача трассировки кабелей сводится к задаче нахождения оптимального вложения вторичной сети в первичную, которая в свою очередь сводится к задаче нахождения остовного дерева с рядом ограничений.

Алгоритм построения первичной сети позволяет значительно уменьшить количество входных параметров для генетического алгоритма нахождения оптимального вложения вторичной сети в первичную, что в свою очередь оказывает влияние на скорость алгоритма.

Программная реализация модели данных является удобным инструментом для работы с объектами, описываемыми S -гиперсетями.

Алгоритм визуализации позволяет представлять гиперсети в удобном для восприятия виде, не загружая чертеж лишними деталями. Имеется возможность подгона параметров сплайна к физическим параметрам кабеля, что позволит контролировать реальное положение кабеля в лотках.

Список литературы

1. Попков Г. В. К вопросу оптимизации построения сетей абонентского доступа // Тр. ИВМиМГ СО РАН. Сер. Информатика. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2002. Вып. 4.
2. Попков В. К. Математические модели связности. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2006.

3. Галямов В. А., Попков В. К. Задача синтеза первичной сети электросвязи города // Вестн. связи. 2005. № 12. С. 59–60.

4. Попков В. К. Применение S -гиперсетей для моделирования систем сетевой структуры // Пробл. информатики. 2010. № 4. С. 4–16.

Конин Максим Васильевич — магистрант

Новосибирского государственного университета; e-mail: maxim21214@gmail.com;

Лепнер Эдуард Юрьевич — магистрант

Новосибирского государственного университета; e-mail: eduard.lepner@gmail.com;

Попков Глеб Владимирович — канд. техн. наук, науч. сотр. Института вычислительной математики и математической геофизики; e-mail: glebpopkov@rambler.ru

Дата поступления — 15.02.13