

УДК 621.316.11:621.316.31:004.896:004.415.2

**ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ЭВМ
С УЧЕТОМ КРИТЕРИЕВ НАДЕЖНОСТИ И ЭКОНОМИЧНОСТИ****С.С. Трунов, А.В. Крупнов***Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Трунов С.С., Крупнов А.В., 2024

Аннотация. Рассмотрено создание перспективной математической модели для САПР в области электроснабжения с учетом надежности элементов электропитания технологического процесса, а также самостоятельного планирования программой линий электропитания на основе параметров «экономичность – надежность» и «секторы ограничения».

Ключевые слова: САПР, надежность, экономичность, математическая модель, автоматическое проектирование.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-1-57-74**Введение**

В основу современных САПР промышленных цехов положен классический подход к созданию линий электроснабжения:

I. Схема питания заранее задана и определяется отдельно.

II. Используется математическая модель, определяющая токи нагрузки, падение напряжений, потерю напряжения от цехового трансформатора (ЦТ) через распределительный пункт (РП) до электроприемника (ЭП), токи короткого замыкания (КЗ) и т.д.

III. Основная или сопровождающая документация создается по нормам ЕСКД.

IV. Надежность как самих линий электропитания, так всей схемы электроснабжения относительно технологического процесса (ТП) при расчетах не учитывается или рассчитывается отдельно.

Современные возможности ПЭВМ позволяют автоматизировать I и IV пункты или, по крайней мере, рассчитать различные оптимальные варианты схем по данным категориям, что открывает широкие возможности для инженеров-проектировщиков при выборе окончательного варианта схемы электроснабжения. Вычислительная машина по заранее заданному ТП определяет, какие узлы цеха нуждаются в большем значении отказоустойчивости, и на основе этого рассчитывает оптимальную схему питания всей системы за счет прямого перебора всех возможных вариантов или за счет решения задач линейного/нелинейного программирования, а также с применением различных методов итерации.

В «оптимальную схему» входят:

1) возможность самостоятельного расположения кабелей, ЦТ и РП на основе параметра «экономичность – надежность»;

2) выполнение расчетов (потери напряжения, токи КЗ, определение сечения проводов (кабеля, провода и спецкабеля), проверка выбранного сечения на нагрев и экономическую плотность тока, энергопотери и т.д.) согласно нормативно-технической документации

Под «самостоятельным расположением» понимается, что программа сама определит наилучшее размещение элементов питания цеха и проложит линии электропитания на основе определенного параметра «экономичность – надежность», «секторы ограничения» электрооборудования (области, где размещение элементов электроснабжения разрешено).

Критерий «экономичность – надежность» определяется соотношением между капиталовложением в систему и ее устойчивостью к отказам электропитания. Экономическая составляющая рассчитывается исходя из цены на материал, электрических потерь в элементах электроснабжения цеха, потерь от простоя линии производства при отказе электропитания узлов промышленного цикла, стоимости замены поврежденных элементов и т.д.

Надежность системы определяется на основе технологической карты производства цеха, которая является единственной заранее заданной и не проектируется самой математической моделью.

Актуальность темы

На российском рынке к современным САПР в области электроснабжения относятся T-FLEX «Электротехника» [1], КОМПАС-3D «Электрика» [2], ElectriCS [3] и Model Studio CS [3]. Во всех указанных приложениях присутствует пункт III. При этом в T-FLEX «Электротехника» и КОМПАС-3D «Электрика» пункт II не реализован, а пункты I и IV не имеют режима автоматизации, поскольку основное направление данных программ не связано с проектированием электроснабжения напрямую – упор в них делается на чертеж схем, 3D-моделирование и составление документации по нормам ЕСКД. При этом в САПР ElectriCS (и отчасти Model Studio CS), наоборот, полностью реализован II пункт и частично I пункт в автоматизированном режиме. На данный момент на российском рынке САПР ElectriCS в наибольшей степени приближена к цели полной автоматизации размещения линий питания, РП и ЦТ.

В узкоцелевых САПР, направленных на вычисление линий электроснабжения (SetiROV [4], Электрик 9.01 [5], D-Fend [6], EATON xSpider, «Эльф» и др. [7, 8]), в полной мере реализованы только II и III пункты (I и IV пунктов в автоматизированном варианте нет).

За рубежом в сегменте профессиональных САПР, к которым относятся AutoCAD Electrical Toolset [9], CYME 9.0 [10], OpenBuildings Designer [11], Microstation [12], CADprofi Electrical [13], DDSCAD Electrical [14], та же проблема, что и в вышеперечисленных: расчет надежности либо отсутствует вовсе, либо существует в «статическом» варианте, когда схема задана заранее и нужно проанализировать ее надежность. Самостоятельная прокладка линий электропитаний по критерию «экономичность – надежность» отсутствует либо реализована в ограниченном режиме (для соединения кабелей и проводов внутри силовых щитов).

В научных работах, монографиях и учебных пособиях по созданию САПР и математических моделей разделяются темы расчета надежности электроснабжения и проектирования электроснабжения. К примеру, В.И. Чиндяскин и Е.Ф. Кислова

рассматривают только математическую модель без расчета надежности ее узлов [4]. А.Н. Шилин и О.И. Карпенко предлагают программу, которая полностью определяет надежность всей системы, но при этом не автоматизирует проектирование линий электропередач, а работает постфактум, когда схема уже выбрана и необходимо провести ее анализ [15]. В математических моделях для сетей 6–35 кВ И.И. Бандурин, О.А. Чернова реализуют только IV пункт в автоматизированном варианте, используя методы линейного программирования [16]. В диссертационной работе И.Е. Рыдиной по методам компьютерного моделирования для проектирования и анализа режимов систем электроснабжения обосновано отсутствие возможности самостоятельного проектирования на ПЭВМ линий электроснабжения. Упор делается на точность математической модели и возможность автоматической оптимизации схемы за счет режимов энергосистемы, а также интуитивность интерфейса программы [17]. А.П. Карпенко, И.А. Кузьмина рассматривают автоматизацию линий электроснабжений в виде математической модели для САПР с учетом будущего роста, но без расчета надежности системы и ее влияния на расположение элементов электропитания [18].

В зарубежных работах, где исследуется электроснабжение в развивающихся странах, применяются методы автоматизированного соединения узлов питания: авторами [19] использован метод математического моделирования на основе решения линейного программирования со смешанно-целочисленными параметрами, но данная модель не учитывает надежность системы, а также не распространяется на линии электроснабжения цехового уровня, хотя и реализует автоматизацию I пункта. В статье [20] для расчета определения линий сети электроснабжения применяется алгоритм OnSSET, основанный на алгоритме поиска по дереву, итеративно обходит неэлектрифицированные населенные пункты (подмножества узлов дерева графа) с учетом их местоположения для определения ближайшего соседнего пункта, который в свою очередь может быть также выбран для следующего итерационного прохода. Как и в предыдущей работе, здесь не учитывается параметр надежность/экономичность, а также возможность применения данной модели к сетям электроснабжения промышленных цехов.

Авторы указанных статей рассматривают отдельно математические модели для расчета электроснабжения, надежности и самостоятельного расположения программой электрооборудования и линий питания. При этом не учитывается параметр «экономичность – надежность», который может помочь ЭВМ определить оптимальную схему электроснабжения под конкретную задачу с учетом требуемой надежности при выбранном ограничении капиталовложения. Создание такой математической модели в виде плагина оптимизирует САПР (например, ElectriCS) благодаря возможности применения сторонних программ.

Основные параметры математической модели

Критическими параметрами математической модели в данной статье являются:

1. Экономичность – надежность.
2. Сектор ограничения.

Экономичность – надежность

Раскроем идею проектирования с данным параметром подробнее. Любой промышленный цех обладает какой-либо линией производства, определенной технологическим процессом. Карта такого технологического процесса может быть очень

разветвленной и сложной, т.е. обладать большим количеством узлов производства. Под узлами понимается некоторое единичное оборудование или целый комплекс. Аварийная остановка разных узлов по-разному влияет на экономическую стабильность всей линии производства (рис. 1).

К примеру, элемент \mathcal{E}_1 – это 3D-принтер, работающий на основе выплавки деталей из металлического порошка, а \mathcal{E}_2 – печь сопротивления, необходимая для последующей термообработки детали после ее создания на принтере. Выход любого из этих элементов из строя остановит *линейный* технологический процесс, что приведет как минимум к финансовым издержкам за простой – ущерб, который можно оценить по аварийной недополученной электроэнергии во время перерыва электроснабжения. При этом отказ элемента \mathcal{E}_1 по ущербу не равноценен отказу элемента \mathcal{E}_2 : отключение питания на металлическом 3D-принтере во время его работы может привести к полному его повреждению, что повлечет за собой не только потери от простоя, но и необходимость приобретения нового оборудования или долговременный вывод его в ремонт, в отличие от внезапного отключения печи сопротивления, где будут «стандартные» финансовые потери от времени простоя.

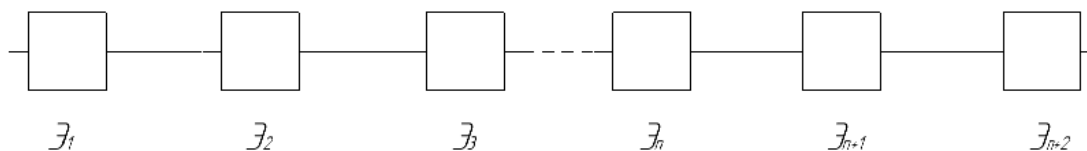


Рис. 1. Однолинейная модель элементов отказов некоторого технологического процесса

Очевидно, что узел \mathcal{E}_1 должен обладать наибольшим или как минимум равным коэффициентом надежности, по сравнению с другими узлами. Однако повышение его надежности всегда ограничено бюджетом проектируемого цеха. Стремление довести вероятность безотказной работы $P_{\mathcal{E}_n}$ всей системы ТП до единицы приведет к огромным капиталовложениям, которые могут превышать бюджет на проект.

Идея данной математической модели с параметром «экономичность – надежность» заключается в том, чтобы при заданном уровне капиталовложения получить максимально высокий уровень надежности из всех возможных вариаций схемы электроснабжения для данного цеха и его ТП. При этом ЭВМ сама перебирает варианты схем, комбинируя различные пути электропитания, самостоятельно располагает ЦТ, РП и (в некоторых случаях) ЭП с учетом их параметра потока отказов в секторе ограничения, рассчитывает экономическую составляющую (цены на кабели, шинопроводы, щиты распределительные, а также энергопотери, рост энергопотребления и т.д.) с ограничениями нормативно-технической документации, к которым относятся потери напряжения, токи КЗ, определение сечения проводников, проверка выбранного сечения на нагрев и экономическую плотность тока и т.д.).

Сектор расположения, ограничения и запрета

Сектор расположения – это та область цеха, в которой размещение элементов нейтрально и никак не влияет на параметры потока отказов или максимальное количество элементов.

Второй ограничивающий основной параметр – сектор ограничения, который указывает САПР, что размещение в данной зоне может повлиять на параметры расположенных в ней или проходящих через нее линий электропитания. На рис. 2 представлена схема производственного помещения с девятью ЭП, двумя РП и одним ЦТ.

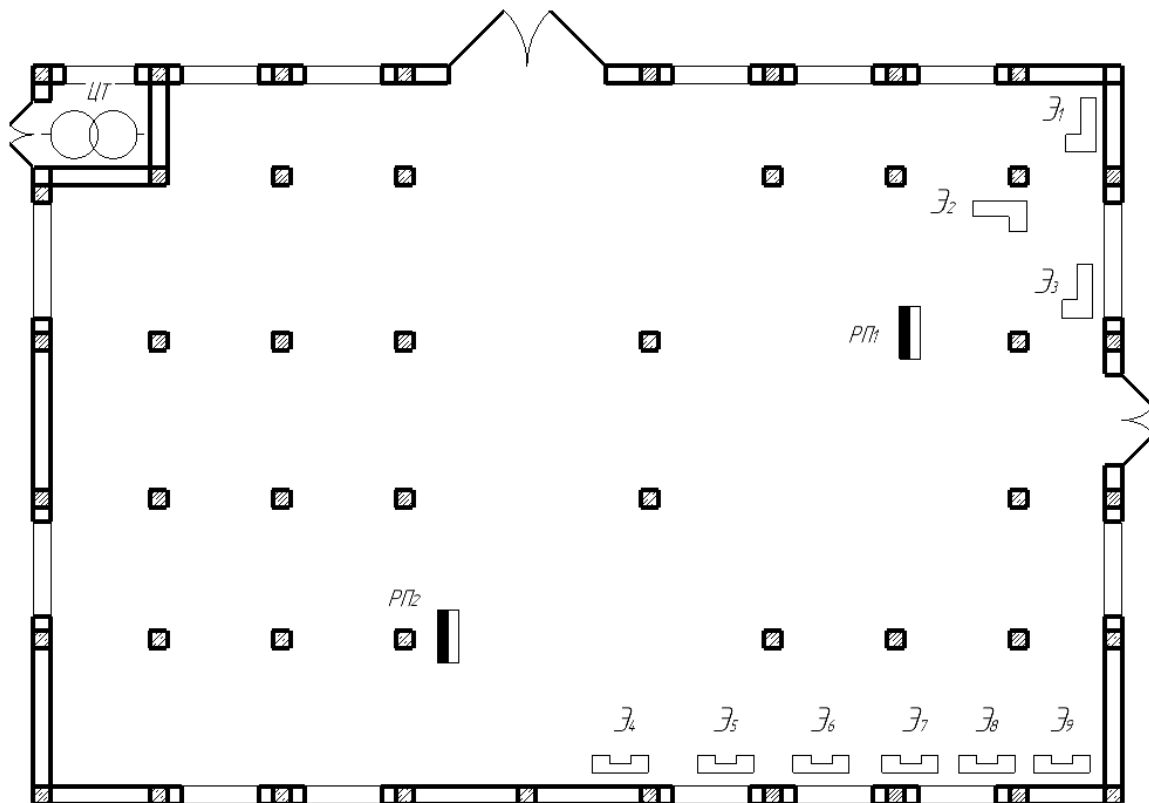


Рис. 2. Схема промышленного цеха с девятью элементами электрооборудования

В некоторых частях данного помещения (например, там, где располагается легковоспламеняющаяся продукция или специальное оборудование) размещение линий электроснабжения запрещено, а в тех частях, где разрешено, есть элементы приоритета (поскольку часть цеха активно используется для работы с кран-балкой при погрузке машин, количество протягивания силовых кабелей может быть ограничено в зависимости от их сечения или же существует вероятность их повреждения).

Сектор ограничения имеет как минимум два параметра:

α_1 – коэффициент влияния на отказоустойчивость, проложенного в данном секторе элементов энергосети;

β_1 – максимальное количество силовых кабелей для данного сектора.

Таких ограничивающих параметров может быть больше – для каждого сектора с разными значениями. На рис. 3 отображено два «сектора ограничения» с параметрами α_1 и β_1 для красной штриховки и α_2 и β_2 для желтой штриховки. Синяя штриховка – сектор запрета, в котором прокладка кабелей и расположение элементов энергосистемы запрещены. Бесштриховая зона соответствует «сектору расположения», размещение энергооборудования здесь ничем не ограничено.

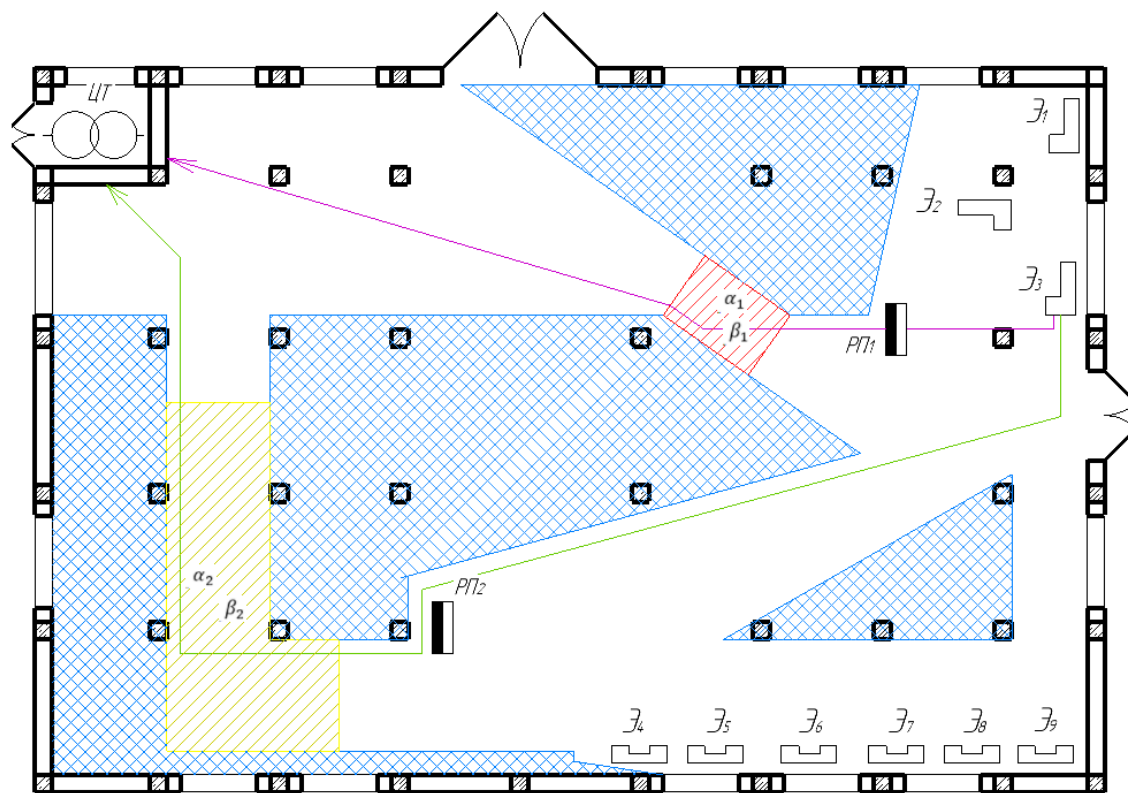


Рис. 3. Секторы на схеме цеха (синяя штриховка – сектор запрета;
желтая и красная – сектор ограничения;
бесштриховая зона – сектор расположения)

Влияние параметров «экономичность – надежность» и «сектор ограничения» на автоматическое проектирование электроснабжения

Параметр α_i влияет на параметр потока отказов элементов, проходящих через ограниченную область. Параметр β_2 влияет на выбор кабелей или токопровода, а также на их расположение. На основе этих ограничений возможно много вариаций прокладки линий электропитания, а также расположения РП, в зависимости от того, какие узлы должны обладать определенным уровнем надежности. К примеру, если узел 2 нуждается в высоком значении отказоустойчивости, а коэффициенты α_1 и β_1 красной зоны оказывают более негативное влияние на отказоустойчивость узла 2, чем α_2 и β_2 , то при определенном заданном отношении параметра «экономичность – надежность» (при перевесе в сторону надежности системы) САПР может, просчитав множество вариантов схемы электроснабжения, остановиться на одной из них, удовлетворяющей требуемому соотношению «экономичность – надежность», и проложить кабель от узла 2 через дальнюю желтую зону в обход РП 2 (см. рис. 3, зеленая стрелка).

Если же перевес должен быть на стороне экономичности, то программа выберет оптимальный вариант, который удовлетворяет выставленной финансовой категории капиталовложения, и при этом рассчитает максимально возможную надежность для данного элемента (см. рис. 3, фиолетовая стрелка) и системы в целом с учетом всех экономических издержек.

Базы математической модели

Для решения задач прямого пересчета ядро движка САПР может быть основано на таких математических подходах, как метод прямого пересчета с ограничивающими параметрами, линейное (нелинейное) программирование и итерационный метод.

Метод прямого пересчета основывается на расчете всех возможных комбинаций соединений и положений электрооборудования. Существует два пути его реализации:

динамический – определение вариаций через построение кратчайшего пути и его последующего усложнения;

статический – определение всех возможных вариаций путей в пространстве и отсеивание ненужных.

Данный метод можно условно назвать современным в том смысле, что современные ПЭВМ и тем более ЭВМ позволяют провести такие вычисления с очень высокой скоростью и точностью без ограничения памяти, в отличие от предыдущего поколения вычислительных машин. Из-за таких ограничений оборудования ранее разрабатывались различные упрощенные вычислительные алгоритмы или использовались методики математического программирования, адаптированные под параметры ЭВМ. Одно из преимуществ метода прямого пересчета – возможность сохранять в базе данных все вариации расчета и, следовательно, быстро просматривать любые выборки, сравнивать их или анализировать эволюцию некоторой серии вычислений, что невыполнимо при остальных подходах. К недостаткам метода относятся продолжительное время расчетов по сравнению с другими методами и высокие требования к мощности ЭВМ.

При этом динамический метод менее изучен, чем статический, и требует научных изысканий в области программирования, численных методов для решения ряда проблем, связанных с открытыми пространствами (множествами), о которых будет сказано далее.

Проблемы динамической математической модели прямого пересчета с ограничениями

Рассмотрим некоторые трудности, связанные с использованием динамической математической модели для двухмерного пространства, обусловленные свойством открытых пространств и соединений элементов энергосистемы. Это бесконечные вариации, топология пространства, генерация путей и генерация схем.

1-я проблема – бесконечные вариации. В данном методе любая схема электроснабжения в общем виде представляет собой сильно связанный (сильный) гиперграф (с бесконечным числом ребер), если его вершины взаимно достижимы (рис. 4а):

$$\uparrow \Gamma(\varepsilon, \wedge p),$$

где $\uparrow \Gamma$ – сильный гиперграф; ε – количество вершин; $\wedge p$ – количество мультиребер.

Вершинами здесь являются элементы электрооборудования (ЭП, РП, ЦТ, шинопровод и т.д.), а мультиребрами – все варианты пути прохождения линий электропитания от одной вершины к другой. К примеру, для вершины 3 (см. рис. 3, Э₃) существует как минимум два пути прохождения к вершине ЦТ – через красную и зеленую области, но в реальности для такого мультиребра существует бесконечная вариативность прохода, так как оно представляет собой неограниченное множество линий – соединений между двумя вершинами на рис. 4б (ниже этот момент раскрыт подробнее). Каждая линия имеет собственные параметры.

Расчет такой модели представляет собой сложную задачу в виде бесконечного поиска решений, неосуществимого как из-за конечного времени расчетов, так и в силу технических ограничений ЭВМ.

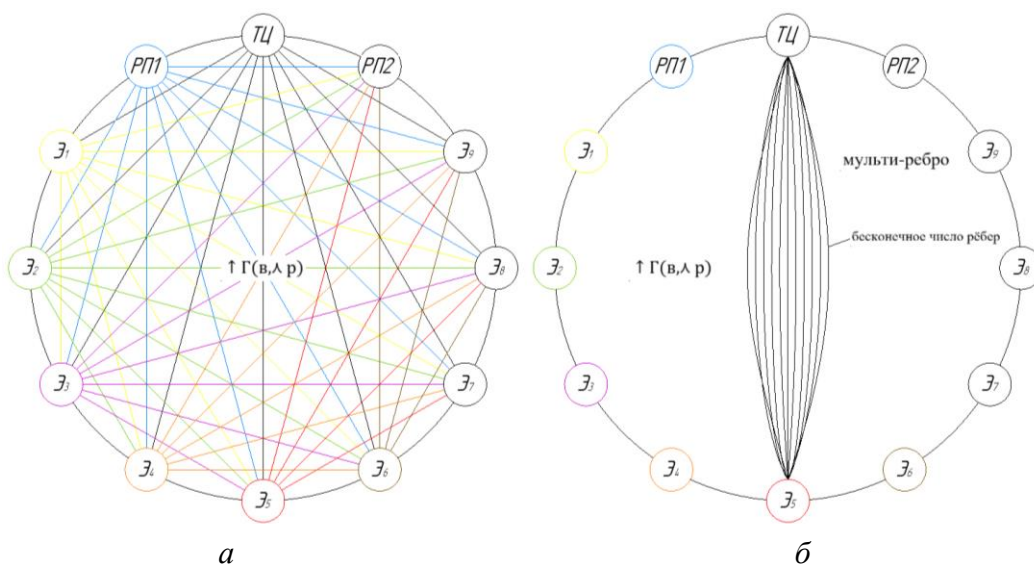


Рис. 4. Схематическое отображение сильно связанного гиперграфа (а); внутреннего содержания мультиребра в виде пучка бесконечного числа ребер (б)

На рис. 5а показан один из вариантов соединений вершин мультиребрами, возможный при «обходе» гиперграфа. Хотя в таких вариантах количество соединений между вершинами не превышает λp , каждое такое мультиребро само в себе несет неограниченное множество вариаций путей между двумя вершинами. Например, мультиребро λp_4 между \mathcal{E}_4 и ЦТ содержит три разновидности маршрута из бесконечного числа возможных, которые изображены на рис. 5б. Отметим, что расчет схемы на рис. 5а не имеет никакой практической ценности. Таких вариантов электроснабжения в гиперграфе может быть много.

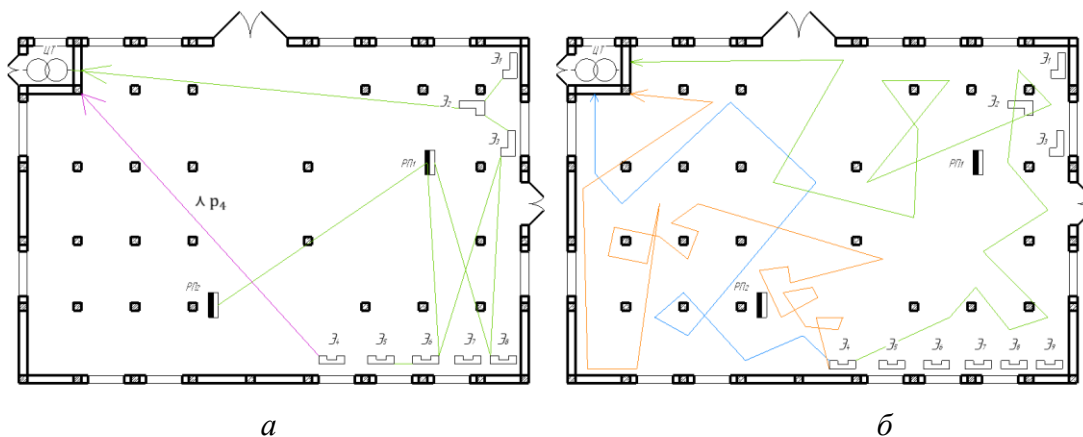


Рис. 5. Примеры соединения мультиребер между вершинами графа (а); узлов внутри мультиребра λp_4 (б)

Решение 1-й проблемы. Несмотря на то, что сильный гиперграф является основой для всех возможных вариантов коммутаций, в реальности его можно упростить, наложив ограничения, которые преобразуют его в обычный граф без утраты полезных комбинаций элементов схемы:

1. Важное стремление к наименьшему расстоянию ρ между двумя вершинами (s_i, s_j) в каждом варианте n из множества путей N^n :

$$\forall n \in N^n: \inf \rho_n(s_i, s_j). \quad (1)$$

2. Ограничение шага пространства. Под шагом понимается минимальное расстояние между двумя точками абсциссы или ординаты:

$$\begin{aligned} & A_0(x_0; y_0); \\ & A_1(x_1; y_1) = A_0(x_0 \pm \ell \cdot 1; y_0 \pm \ell \cdot 1); \\ & A_2(x_0; y_1) = A_0(x_0 \pm \ell \cdot 0; y_0 \pm \ell \cdot 1); \\ & A_3(x_1; y_0) = A_0(x_0 \pm \ell \cdot 1; y_0 \pm \ell \cdot 0); \\ & \dots \\ & A(x_m; y_k) = A_0(x_0 \pm \ell \cdot m; y_0 \pm \ell \cdot k), \quad m, k \in Z^+. \end{aligned}$$

Все значения координат $A(x_m; y_k)$ представляют собой элементы некоторого множества R^ℓ :

$$\forall m, k \in Z^+: A(x_m; y_k) \in R^\ell.$$

3. Ограничение общего пространства проектирования. Существует некоторая область точек $M(a, b)$ (к примеру, территория промышленного цеха на рис. 6), такая, что любая точка, взятая за центр координат $A_0(x_0; y_0)$ в ней, имеет ограничение построения относительно $A_0(x_0; y_0)$ любого ряда точек $A(x_m; y_k)$. Другими словами, множество R^ℓ является подмножеством ограниченного множества M :

$$R^\ell \subset M: [A(x_m; y_k) \in M] \wedge [A(x_m; y_k) \in R^\ell]. \quad (2)$$

4. Правило обхода вершин, или технологичность соединений по правилам электроснабжения. Например, будет некорректно присоединить $PP_1 \rightarrow \mathcal{E}_1 \rightarrow ЦТ$, если должно быть так: $\mathcal{E}_1 \rightarrow PP_1 \rightarrow ЦТ$. Сюда же относится ограничение на зацикленность соединений, или неполнота используемых элементов (можно также запретить или, наоборот, разрешить последовательное соединение элементов $\mathcal{E}_1 \rightarrow \mathcal{E}_2 \rightarrow \dots \rightarrow \mathcal{E}_m$). Это в свою очередь ограничит количество мультиребер за счет направленности прохождения p^τ при расчете всех возможных вариантов соединения, а также исключит возможность появления бессмысленных схем, подобных показанным на рис. 4а):

$$\wedge p^\tau < \wedge p. \quad (3)$$

На основе данных пунктов получаем преобразование сильно связанного гиперграфа $\uparrow \Gamma(\varepsilon, \lambda p)$ в обыкновенный граф $\Gamma(\varepsilon, p)$:

$$[\forall n \in N^n: \inf \rho_n(\varepsilon_i, \varepsilon_j)] \wedge [\forall m, k \in Z^+: A(x_m; y_k) \in R^\ell] \wedge [R^\ell \subset M] \wedge \wedge [\lambda p^\tau < \lambda p]: \uparrow \Gamma(\varepsilon, \lambda p) \rightarrow \Gamma(\varepsilon, p).$$

Рассмотрим подробнее преобразование связанного гиперграфа в обыкновенный: пункт 1 (стремление к наименьшему расстоянию) избавит от расчета вариаций с точками, излишне удлиняющими путь (благодаря этому устраняются маршруты по типу «броуновского движения», как на рис. 5б). За счет пункта 2 пространство представляется не как бесконечное множество точек относительно начальной точки $A_0(x_0; y_0)$, а в виде сетки с шагом ℓ и ограничивающим множеством М (пункт 3), что позволяет получить конечное число ребер вместо мультиребра. Рассмотрим это на примере построения пути между вершинами ε_1 и ε_2 с сектором запрета в виде многоугольника abcdefa на рис. 6. Синей пунктирной линией $\rho(\varepsilon_i, \varepsilon_j)$ изображен абсолютный наикратчайший путь между вершинами ε_1 и ε_2 через запрещенную зону, при этом маршрут обходных путей строится строго по точкам $A(x_m; y_k)$ сетки относительно начала координат $A_0(x_0; y_0)$. Перебирая разные точки вокруг сектора запрета и за счет стремления к наименьшему расстоянию и удовлетворив условие (1), ЭВМ построит серию кратчайших линий $\rho_0, \rho_1, \rho_2, \rho_3$ (отмечены оранжевыми цветом).

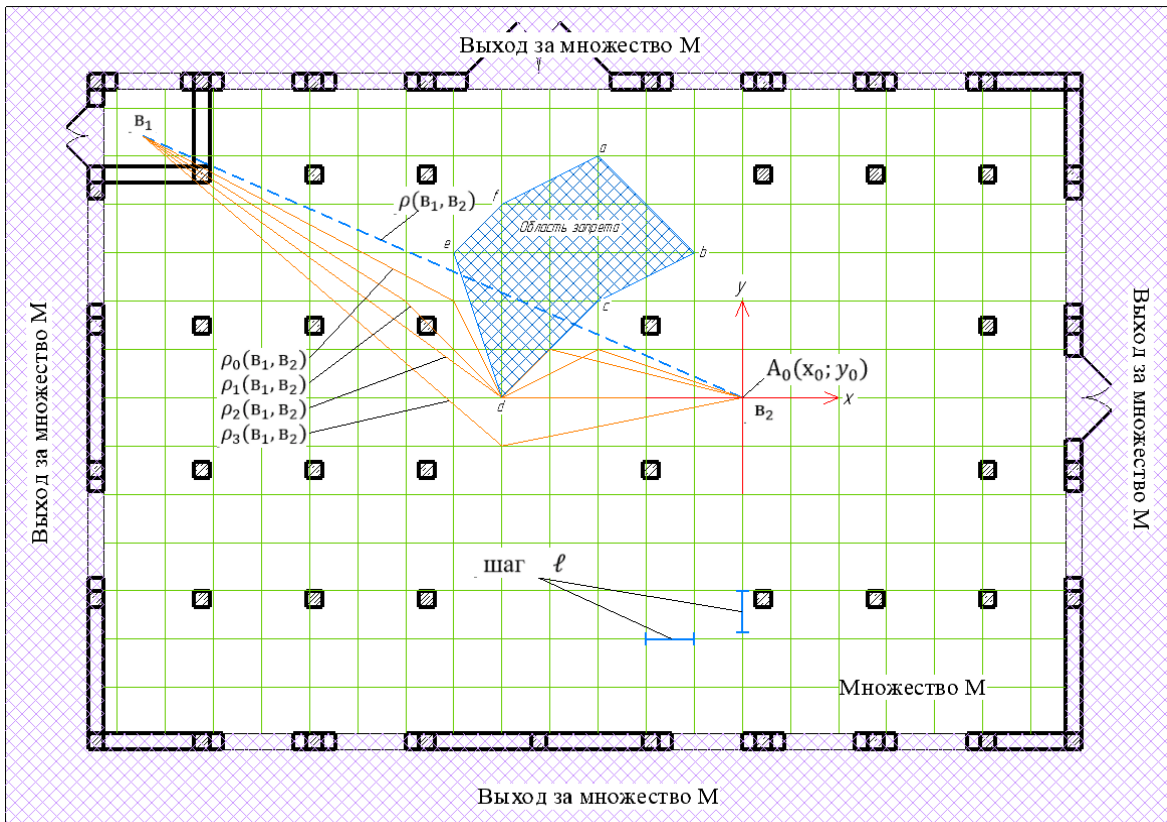


Рис. 6. Сетка с шагом ℓ с началом координат в $A_0(x_0; y_0)$, ограниченная множеством М

Заметим, что ЭВМ может перебрать любое количество точек $A(x_m; y_k)$, так как их число конечно на ограниченном множестве M . Построив их, программа выберет наиболее близкое значение к $\rho(\varepsilon_i, \varepsilon_j)$. При таком подходе невозможно построение «хаотических» путей с многократным самопересечением или необоснованных «скитаний» вдоль всего цеха.

Составим таблицу с относительными длинами построенных вариантов ребер, изображенных на рис. 6.

Длина ребер между вершинами ε_1 и ε_2 и их значение, стремящееся к абсолютному значению $\rho(\varepsilon_i, \varepsilon_j)$

$\rho_n(\varepsilon_i, \varepsilon_k)$	о.е.	Удовлетворение условию $\forall n \in N: \inf \rho_n(\varepsilon_i, \varepsilon_j)$	Длина, о.е.
$\rho_0(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$	224	$\rho_2(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$	213
$\rho_1(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$	222		
$\rho_2(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$	213		
$\rho_3(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$	224		
Абсолютная длина ρ			
$\rho(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$		204	

Из таблицы видно, что оптимальный путь обхода будет при значении $\rho_2(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$, наиболее близком к $\rho(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$, тем самым выполняется условие (1).

Уменьшение значения шага ℓ приведет к возрастанию количества вариации $\rho_n(\varepsilon_i, \varepsilon_j)$, а значит, и к повышению точности модели, но это число должно быть подобрано оптимально, так как «скрупулезность» математической модели бессмысленна, если входные данные не обладают такой же точностью, что и внутренние. Это приведет лишь к дополнительной загрузке ЭВМ.

Пункт 4 переводит граф из «сильно связанного» в «простой» с ограниченным количеством ребер, в котором в зависимости от направления прохождения ребро может входить или не входить в граф. Это зависит от правил электроснабжения.

2-я проблема. Топология пространства. Зададимся вопросом: как алгоритмически задать множество M или любое другое множество (сектор запрета, выход за границы проектируемой области)? Если область представляет собой прямоугольник (рис. 7), короткая сторона которого параллельна абсциссе или ординате, то ограничение задается стандартно:

Если $A(x_m; y_k) \in [x_1, x_2] \wedge [y_1, y_2]$, **то** ...
Иначе ... ;
Все;

Однако если фигура более сложная – невыпуклый многогранник abcdefghijka (рис. 7), имеющий 11 точек, то задать его таким методом проблематично.

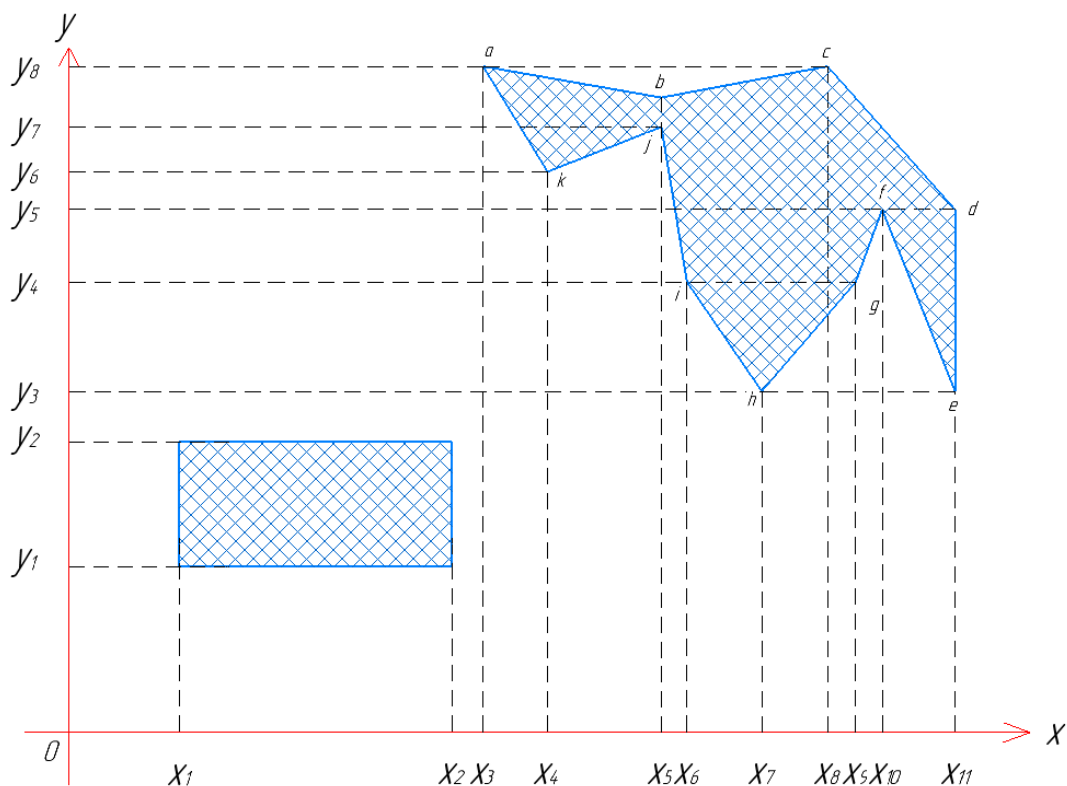


Рис. 7. Прямоугольник и невыпуклый многоугольник abcdefghijka

Кроме того, существенную роль играет топология пространства M при ведении сектора ограничений. Определение ее способствует сокращению количества вычислений, благодаря чему увеличивается скорость выполнения задач программой, а также защищает ЭВМ от перегрузки. На рис. 8 изображена некоторая ограниченная область, топология которой нам первоначально неизвестна. Допустим, нужно провести путь от вершины ε_1 до вершины ε_3 . Проведя прямую линию $\rho(\varepsilon_1, \varepsilon_3)$, программа столкнется с препятствием в виде многогранника $ijklmnpqr$. Если топология пространства M нам неизвестна, то алгоритмически задаем проверку возможности проложения пути в обход сектора запрета с левой (стрелка Π_1 на рис. 8) и с правой стороны (стрелка Π_2) до вершины ε_3 . Это приведет к необходимости выполнения не только дополнительных, но и повторных расчетов каждый раз, когда будет прокладываться $\rho(\varepsilon_i, \varepsilon_j)$ от других вершин с проверкой на обход (так как прежде, чем строить различные варианты путей $\rho_n(\varepsilon_i, \varepsilon_j)$, нужно определить, возможны ли они в принципе).

При построении пути $\rho(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ от вершины ε_1 до вершины ε_2 будет пересечение с многогранником $abcdefgh$, прилегающим к области выхода за множество M . Воспользуемся тем же методом, т.е. проверим возможность обхода слева (зеленая стрелка Π_1) и справа (зеленая стрелка Π_2). В отличие от многогранника $ijklmnpqr$, проверка пути Π_1 у $abcdefgh$ может привести к безостановочной рекурсии, и в лучшем случае количество лишних операций станет многократно больше, чем в предыдущем моменте, в худшем случае ЭВМ просто войдет в режим перегрузки («зависнет»).

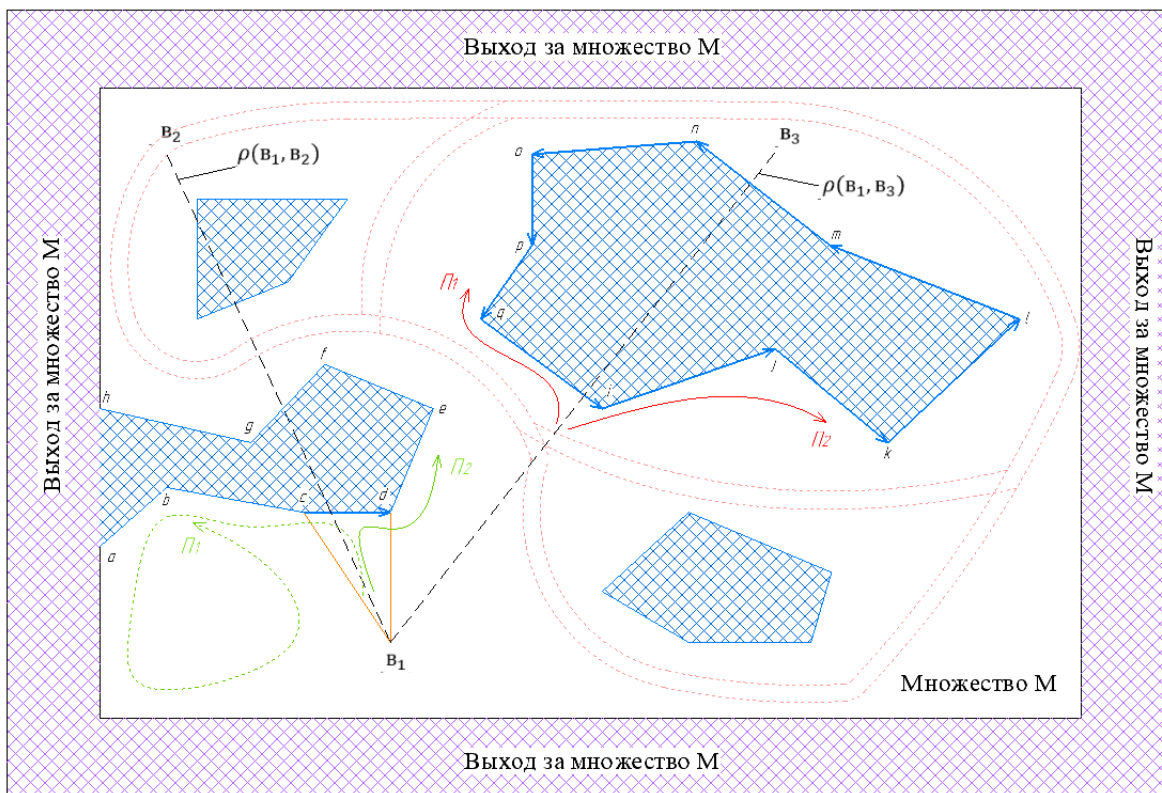


Рис. 8. Отображение топологии множества М.
Двойной красной пунктирной линией изображена топологическая карта данной области

Решение 2-й проблемы. Введенные нами ранее ограничения (2) и (3) способствуют точному определению точек множества R^f в любой заданной области. Приведем определения некоторых понятий [21, с. 144]:

1. Ориентированный многогранник – это фигура, контур которой состоит из векторов, направленных против часовой стрелки (или наоборот) вдоль обхода этого же контура. На рис. 8 таким способом изображен многогранника $ijklmnpqr$.

2. Дека – метод последовательной записи некоторого множества.

3. Освещение ребра многогранника – это позиционирование любого одного ребра фигуры относительно любой заданной точки. На рис. 8 изображено освещение ребра cd из точки ε_1 в виде двух оранжевых линий, образующих Δcde_1 . Такой подход обладает важным свойством: если точка ε_1 находится внутри области ориентированного выпуклого многогранника $abcdefgh$, то любое освещение любого ребра будет всегда против часовой стрелки. Если точка ε_1 расположена вне области данной многоугольной фигуры, то ближайшее освещаемое ребро поменяет направление. Математически это легко определяется по площади Δcde_1 через векторы $\vec{\varepsilon_1 c}$, $\vec{\varepsilon_1 d}$ и \vec{cd} : если \vec{cd} поменяет направление, то площадь Δcde_1 сменит знак. В данном случае величина площади Δcde_1 представляет собой коэффициент ориентации, обозначим его как Δ_{op} .

Если представить ориентированный многогранник в виде деки, а именно:

$$\langle F_1, F_2, F_3, \dots, F_d, F_1 \rangle,$$

где $F_1, F_2, F_3, \dots, F_d, F_1$ – запись координат точек начала и конца векторов в той последовательности, в которой они складываются, то можно определить область ограничения. Для этого достаточно представить выход за множество M как некоторый выпуклый ориентированный многогранник $Z_1 Z_2 \dots Z_8 Z_1$ (а значит, тоже в виде деки), внутри которого расположено само множество M (рис. 9). Тогда относительно некоторой любой начальной точки $A_0(x_0; y_0)$, принятой за начало координат $Z_1 Z_2 \dots Z_8 Z_1$, можно точно подсчитать все точки подмножества R_ℓ множества M , задав цикл расчета точек $A(x_m; y_k)$ с проверкой выхода их за границу сменой коэффициента Δ_{op} ближайшего освещенного ребра. Определим такой минимальный четырехугольник из начала координат $A_0(x_0; y_0)$ со сторонами M_x^{zp} и M_y^{zp} , чтобы ориентированный многогранник $Z_1 Z_2 \dots Z_8 Z_1$ мог полностью расположиться в нем. Тогда алгоритм будет таким:

Дано: $\ell = const, k = 0, m = 0$;

Цикл <перечислить точки ординаты>

$$k = k + 1;$$

Цикл <перечислить точки абсциссы>

$$A(x_m; y_k) = A_0(x_0 + \ell \cdot m; y_0 + \ell \cdot k);$$

Если $\Delta_{op} > 0$ **То** записывать $A(x_m; y_k)$ в базу данных;

$$m = m + 1;$$

Условие выхода: $x_0 + \ell \cdot m > M_x^{zp}$;

Конец цикла.

Условие выхода: $y_0 + \ell \cdot k > M_y^{zp}$;

Конец цикла.

На рис. 9 выход точки A_{m3} за область M (выполнение условия $\Delta_{op} < 0$) не дает возможности программе записать ее в базу данных топологии пространства M . Видно, что сумма все точек сетки внутри области M имеет конечное число, что и дает основу для создания топологии данной области. **Если после подсчета и внесения в базу данных координат всех точек подмножества R^ℓ обозначить на схеме секторы запрета** (рис. 9, многогранник $a_1 a_2 \dots a_7 a_1$), **то для определения точек, попадающих в эти секторы, достаточно просто последовательно брать каждую точку $A(x_m; y_k)$ из базы данных и проверять освещенность ближайшего ребра для каждого многогранника в отдельности.** Если ближайшим является ребро сектора запрета с $\Delta_{op} > 0$, то это значит, что точка расположена внутри данной области (например, точка A_{d12} на рис. 9), тогда ее вычеркивают из основного списка и перезаписывают в отдельный лист. Таким образом будут вычеркнуты все точки, не принадлежащие пространству M :

$$M = [(R^\ell \setminus Z^1) \cup \dots \cup (R^\ell \setminus Z^t)] \setminus M^0,$$

где Z^t – различные множества секторов запрета; M^0 – множество вне области M . В результате в основном списке останется полная топология области проектирования, что нам и требовалось.

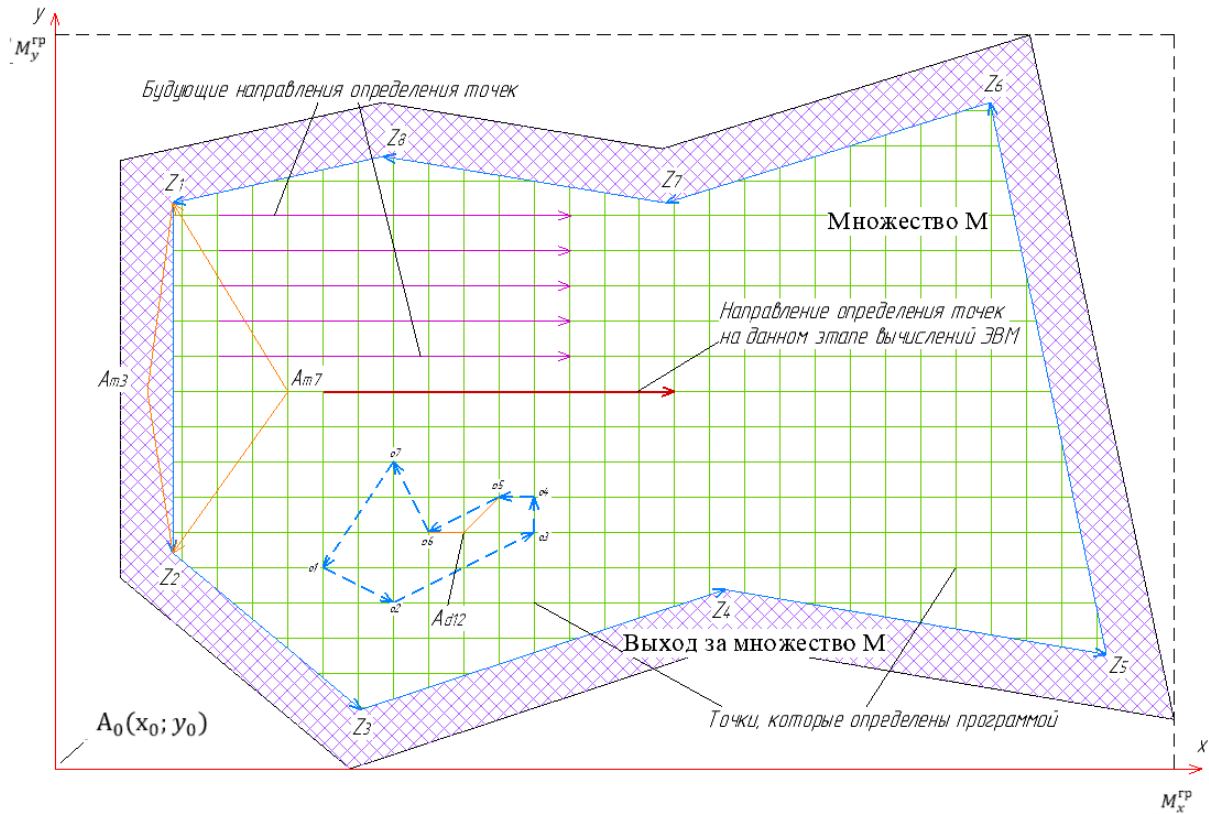


Рис. 9. Определение всех точек R_i в области M .
Пунктирной синей линией обозначен сектор запрета,
веденный после определения всех точек внутри $Z_1Z_2 \dots Z_8Z_1$

Теперь рассмотрим проблему попадания в рекурсию при проверке пути обхода области запрета. Лучшее решение – не делать эту попытку вообще. Так как мы теперь знаем топологию пространства M , то многогранник $abcdefgh$ (см. рис. 8) можно записать в деку со специальным оператором \blacksquare в той части, где есть соприкосновение с M^0 :

$$\langle F_1, F_2, F_3, \dots, F_d, \blacksquare \rangle$$

$$\langle a, b, c, d, e, f, g, h, \blacksquare \rangle$$

Данный оператор только указывает программе на то, что эта область запрета является не многогранником, а разрывной ломаной линией и к ней нужно применить другой алгоритм, который рассмотрим далее.

Для такой линии возможен обход только в одну сторону. Чтобы определить эту сторону, достаточно отметить два первых ребра $abcdefgh$, которые пересекает путь $\rho(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$, и сравнить их последовательность в деке (рис. 10). Сторона, в которую нужно повернуть, будет та же, что и последовательность пересеченных векторов в деке:

$$\langle a, b, c, d, e, f, g, h, \blacksquare \rangle$$

$$\langle \vec{ab}, \vec{bc}, \vec{cd}, \vec{de}, \vec{ef}, \vec{fg}, \vec{gh}, \blacksquare \rangle$$

(от \vec{cd} к \vec{fg} – против часовой стрелки)

На рис. 10 это изображено схематически. Если будет наоборот, т.е. на некотором пути $\rho(\varepsilon_i, \varepsilon_j)$ первым вектором станет \overrightarrow{fg} , а следующим \overrightarrow{cd} , то направление будет от \overrightarrow{fg} к \overrightarrow{cd} по часовой стрелке. Основным условием является заполнение дек всех многогранников в одном направлении (в нашем случае против часовой стрелки).

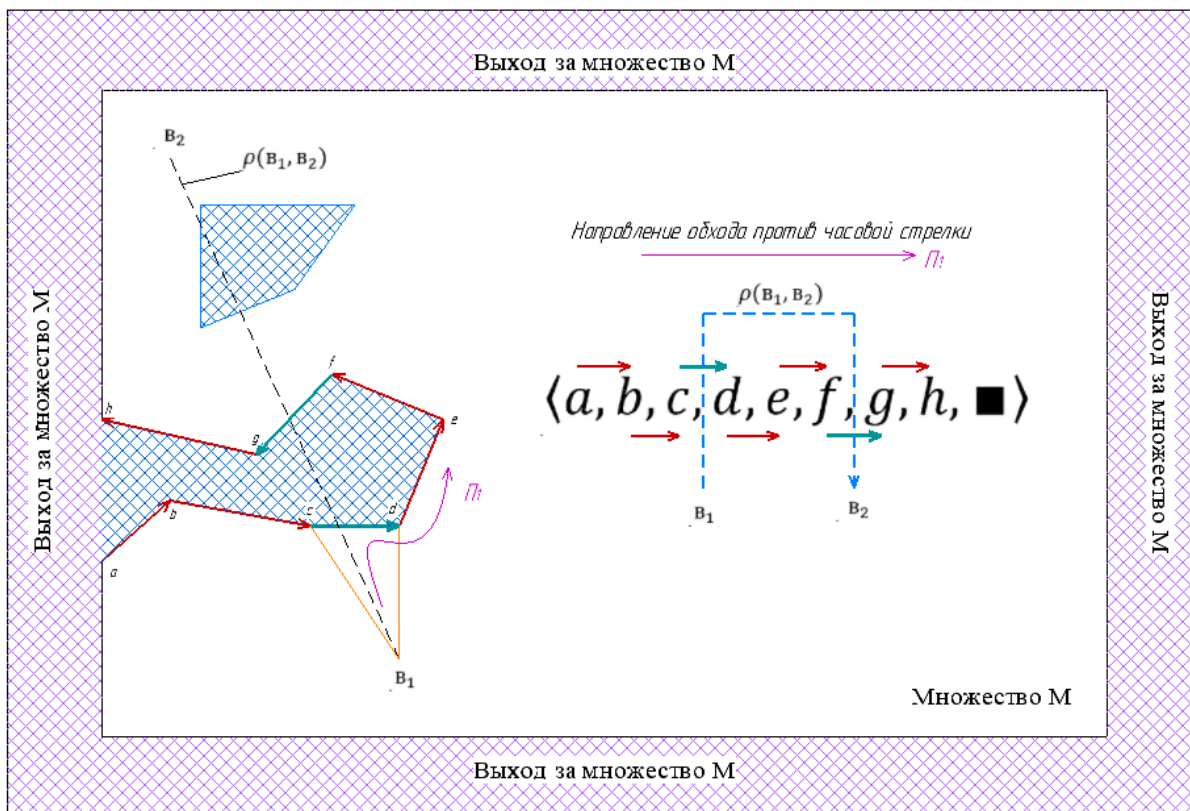


Рис. 10. Определение обхода сектора запрета по оператору \blacksquare в деке.
Векторы зеленого цвета – два ближайших на прямом пути
из вершины ε_1 в ε_2

Таким образом, рассмотрены и решены две указанные выше основные проблемы: бесконечных вариаций и топологии пространства.

Математическая модель с параметрами «экономичность – надежность» и «сектор ограничения» способствует более гибкому и точному определению различных вариантов схемы под различные ограничения технического задания для инженеров-проектировщиков. Она может быть выполнена в виде плагина, встроенного в профессиональный САПР как дополнительная опция для улучшения возможности проектирования электроснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T-flex: официальный сайт. URL: <https://www.tflex.ru/> (дата обращения: 20.12.2023).
2. КОМПАС-3D: официальный сайт. URL: <https://kompas.ru/> (дата обращения: 20.12.2023).

3. CSoftDevelopment: официальный сайт. URL: <https://csdev.ru/soft.html> (дата обращения: 20.12.2023).
4. Чиндяскин В.И., Кислова Е.Ф. Разработка компьютерной модели для расчета эффективной локальной системы электроснабжения сельских поселений // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2009. № 4 (24). С. 88
5. САПР Электрик 9.01. URL: <https://electronics-workbench.ru/electric-9-01-na-russkom-yazyke> (дата обращения: 20.12.2023).
6. Система автоматизированного проектирования внутризаводского электроснабжения: методические указания / сост. Е.В. Бондаренко. Ульяновск: УЛГТУ, 2014. 8 с.
7. Программа для создания схемы электрощита: программа для проектирования и последующей сборки электрощита. URL: <https://readmehouse.ru/populyarnoe/programma-dlya-sozdaniya-shemy-elektroshhita-programma-dlya-proektirovaniya-i-posleduyushhij-sborki-elektroshhita.html> (дата обращения: 20.12.2023).
8. Лучшие программы для электриков – бесплатные и платные. URL: https://elektrikipro.ru/ustrojstva/programma-dlya-proektirovaniya-elektroshchitov.html?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F (дата обращения: 20.12.2023).
9. The 2024 Electrical toolset is included with AutoCAD. URL: <https://www.autodesk.com/products/autocad/included-toolsets/autocad-electrical> (дата обращения: 20.12.2023).
10. Latest Headlines from CYME International URL: <https://www.cyme.com/> (дата обращения: 20.12.2023).
11. CAD Software for Modeling&Visualization | Bentley Systems | openbuildings designer. URL: <https://www.bentley.com/software/openbuildings-designer/> (дата обращения: 20.12.2023).
12. CAD Software for Modeling&Visualization | Bentley Systems | microstation. URL: <https://www.bentley.com/software/microstation/> (дата обращения: 20.12.2023).
13. CADprofiElectrical. URL: <https://www.cadprofi.com/main/ru/products/cadprofi/cadprofi-electrical> (дата обращения: 20.12.2023).
14. 2D-CAD and 3D-BIM for Electrical. URL: <https://www.dds-cad.net/products/dds-cad-electrical/> (дата обращения: 20.12.2023).
15. Шилин А.Н., Карпенко О.И. Автоматизированная система анализ надежности работы системы электроснабжения потребителей // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2011. № 8 (81). С. 99–103.
16. Бандурин И.И., Чернова О.А. Математическая модель для городских электрических сетей 6–35 кВ, позволяющая создать рациональную систему электроснабжения с заданной надежностью // *Вестник Псковского государственного университета. Серия: Экономические и технические науки*. 2013. № 3. С. 109–123.
17. Рындина И.Е. Методы компьютерного моделирования для проектирования и анализа режимов систем электроснабжения. Дисс. ... канд. техн. наук. СПб. 2000. 170 с.
18. Карпенко А.П., Кузьмина И.А. Математическая модель распределительной городской сети электроснабжения с учетом ее перспективного развития // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2014. № 5. С. 162–180.
19. Nocka D., Levinb T., Bakerc E. Changing the policy paradigm: A benefit maximization approach to electricity planning in developing countries // *Applied Energy*. 2020. № 264 (7), pp. 114583.

20. Isihak S., Akpan U., Bhattacharyya S. Evolution of GIS-based rural electrification planning models and an application of OnSSET in Nigeria // *Renewable and Sustainable Energy Transition*. 2022. № 2(9), pp. 100019.
21. Кушниренко А.Г., Лебедев Г.В. Программирование для математиков: учеб. пособие для вузов. М.: Наука, 1988. 384 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТРУНОВ Сергей Сергеевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: 89607182380@mail.ru

КРУПНОВ Андрей Владимирович – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: AV.Krupnov@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Трунов С.С., Крупнов А.В. Оптимальное проектирование систем электроснабжения на ЭВМ с учетом критериев надежности и экономичности // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 1 (21). С. 57–74.

CAD WITH INDEPENDENT DESIGN OF POWER SUPPLY SYSTEMS, TAKING INTO ACCOUNT THE CRITERIA OF RELIABILITY AND EFFICIENCY

S.S. Trunov, A.V. Krupnov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The creation of a promising mathematical model for CAD in the field of power supply is considered, taking into account the reliability of the power supply elements of the technological process, as well as the independent planning of power transmission lines by the program based on the parameter «efficiency – reliability» and «sectors of restriction».

Keywords: CAD, reliability and efficiency of power supply, mathematical model, independent calculation of the location of power lines and electrical receivers.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

TRUNOV Sergey Sergeevich – Graduate Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: 89607182380@mail.ru

KRUPNOV Andrey Vladimirovich – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: AV.Krupnov@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Trunov S.S., Krupnov A.V. Cad with independent design of power supply systems, taking into account the criteria of reliability and efficiency // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 1 (21), pp. 57–74.