

УДК 338.3: 339.19

В.Ю. Конотопский**ЭЛЕМЕНТЫ МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ
МАРШРУТОВ В СФЕРЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЛОГИСТИКИ**

Статья содержит описание варианта алгоритмизации процесса построения субоптимального множества кольцевых транспортных маршрутов (R^) для условной потоковой системы с большим количеством транспортных операционных путей. Получение R^* в общем случае не означает, что проектирование множества эффективных маршрутов завершено, так как оно предполагало равномерность и непрерывность грузопотоков. Однако так как для большинства реальных логистических систем характерны дискретные вероятностные потоки, кольцевое движение еще не гарантирует высокую эффективность использования транспортных средств. Дополнительно необходимо синхронизировать режим их движения с моментами возникновения требований на транспортировку в пунктах маршрута.*

Ключевые слова: *кольцевой маршрут, путь, цикл, контур.*

Одним из традиционных направлений интенсификации использования внутризаводского транспорта является организация кольцевых маршрутов движения, что позволяет повысить коэффициент использования пробега и соответственно производительность. Оно предполагает решение разработчиками подобных систем ряда достаточно сложных технических, организационных и экономических задач.

Прежде всего, необходима классификация функционирующих в пределах соответствующего производственного пространства грузовых потоков и обеспечивающих их транспортных технологий. Очевидно, что закольцовыванию подлежат только технологически однородные транспортные операции, т.е. в рамках одной микрологистической системы может параллельно проектироваться несколько систем данного типа для различных транспортно-логистических технологий. Также очевидно, что для больших потоковых систем (количество транспортных операций имеет порядок 10^2 и более) в общем случае можно предложить ряд вариантов множества таких маршрутов (контуров в терминологии теории графов), исчерпывающих возможности целесообразного закольцовывания, в зависимости от принятого критерия эффективности транспортного процесса.

В данной статье сделана попытка эскизно алгоритмизировать процесс построения субоптимального¹ варианта такого множества для условной системы (имеются в виду в первую очередь промышленные предприятия) с большим количеством протяженных (многозвенных) технологических, а следовательно, и транспортных операционных путей, сконцентрированных на отно-

¹ Считаем, что строго оптимальное решение задач данного класса невозможно в границах категорий классического математического анализа. Здесь необходим специальный математический аппарат, доступный только специалистам-математикам, но отнюдь не экономистам.

сительно небольшой площади. Именно такая концентрация при естественном соблюдении принципа прямоточности производственного процесса создает условия для построения систем кольцевых маршрутов.

Допустим, что в качестве исходного объекта дано ограниченное плоское пространство, на котором заданы координаты конечного множества пунктов, являющихся либо источниками, либо приемниками грузовых потоков, либо тем и другим одновременно. Для каждой пары пунктов «источник $\rightarrow$ приемник» задан вектор (l_{ij}, p_{ij}) , где l_{ij} – кратчайшее расстояние между пунктами «i» и «j» в соответствии с планировкой производственного объекта; p_{ij} – мощность грузового потока. Параметр l_{ij} может быть заменен на нормативное время транспортной операции, он только положителен. Что касается p_{ij} , он либо положителен (между «i» и «j» существует грузопоток), либо равен нулю (прямой путь между «i» и «j» не используется). Обозначим полное множество этих пар через Θ . Для формального представления множества транспортных операций Θ можно использовать равноценные по информативности матрицы инцидентности или сопряженности. И та и другая могут служить информационной основой формирования исходного множества кольцевых маршрутов, которое обозначим через R^0 .

Проведенный нами предварительный и, разумеется, не исчерпывающий анализ возможных вариантов алгоритмов формирования R^0 говорит о предпочтительности (сравнительной простоте) использования матриц первого типа, хотя в любом случае приходится иметь дело с довольно сложной, многоэтапной процедурой.

При построении алгоритмов формирования R^0 мы исходили из нерациональности попыток использования только ненулевых позиций матрицы инцидентности, т.е. полного отсутствия во всех входящих в R^0 циклах незагруженных пробегов транспортных средств (ТС). Учитывая реальные возможные состояния множества Θ , это привело бы скорее всего к тому, что доля таких «полных» циклов в общем грузообороте по Θ и соответствующий общесистемный эффект были бы незначительны. Поэтому в алгоритмах построения образующих R^0 циклов допускалось включение в них нулевых дуг ($p_{ij} = 0$), но вводилось ограничение снизу на количество дуг в каждом цикле – более 2, таким образом, в частности, изначально исключались маятниковые маршруты.

Естественно, что такой подход позволяет сформировать только предварительное множество циклов – претендентов на роль пространственной основы маршрутов. Для описания каждого отдельного цикла, обозначаемого R_k , будем использовать матрицу $\|O_{ij}^{(k)}\| \equiv \|\bar{x}_{ij}^{(k)}; l_{ij}^{(k)}; p_{ij}^{(k)}\|$, в которой каждая строка

соответствует отдельной дуге цикла в порядке их следования. Здесь $\bar{x}_{ij}^{(k)}$ – признак направления дуги относительно k-го цикла, принимающий значения:

+1, при движении по часовой стрелке;

-1, при движении против часовой стрелки;

0, если движения нет, хотя оно и возможно по дуге «i $\rightarrow$ j» или ребру «i-j».

Для получения субоптимального множества циклов (обозначение $\mathbf{R}^*$) необходимо исходное множество $\mathbf{R}^0$ отредактировать с помощью ряда нижеописанных процедур-фильтров.

А. Фильтр совпадения направлений движения по дугам, он необходим в силу того, что при формировании $\mathbf{R}$ было получено множество простых циклов (замкнутых последовательностей ребер без повторений), т.е. направления не учитывались. Лишь полное совпадение направлений по всем дугам с ненулевыми значениями $\bar{x}_{ij}^{(k)}$ в пределах конкретного $\mathbf{R}_k$ превращает его в контур, на основе которого при выполнении ряда дополнительных условий может быть организован кольцевой маршрут. Формально – если $\{[\forall \langle i-j \rangle \in \mathbf{R}_k \rightarrow (\bar{x}_{ij}^{(k)} \geq 0)] \cup [\forall \langle i-j \rangle \in \mathbf{R}_k \rightarrow (\bar{x}_{ij}^{(k)} \leq 0)]\}$, то $\mathbf{R}_k \in \mathbf{R}$, иначе $\mathbf{R}_k \notin \mathbf{R}$, т.е. анализируемый контур исключается из $\mathbf{R}$.

Б. Фильтр достаточности нагрузки на контур с точки зрения принятой транспортной технологии. Рассчитывается величина грузооборота по $\mathbf{R}_k$ за единицу времени $CR_k = \sum x_{ij} \cdot l_{ij} \cdot p_{ij}$, $k = \overline{1, \beta_k}$, где β_k – количество дуг в $\mathbf{R}_k$.

Одновременно задается величина LCR – уровень грузооборота, минимально необходимый для обеспечения преимущества кольцевого движения по сравнению с независимым маятниковым движением по всем дугам цикла. Ее определение предполагает проведение конкретных технико-экономических расчетов для соответствующих потоков и принятой технологии их обслуживания. Если $CR_k < CRL$ то $R_k \notin R$.

В качестве альтернативного упрощенного варианта можно предложить коэффициент использования пробега ($\equiv \Omega$), рассматривая его как частный показатель сравнительной эффективности вариантов маршрутизации. Расчет Ω осуществляется по формуле $\Omega = (\sum x_{ij} \cdot l_{ij}) / \sum l_{ij}$. В этом случае следует задать минимально необходимое превышение ($\equiv \alpha$) получаемого значения $\Omega(CR_k)$ над исходным ($\equiv \Omega_0$). Тогда если $\Omega(R_k) < \Omega_0 + \alpha$, то $R_k \notin R$. Аналогично можно воспользоваться коэффициентом использования потенциала маршрута ($\equiv \Lambda$), определяемого формулой $\Lambda = (\sum x_{ij} \cdot l_{ij} \cdot p_{ij}) / \sum l_{ij} \cdot p_{ij}$. Здесь соответственно необходимо задать минимальное превышение β и действовать аналогично.

В. Фильтр избыточных дуг. Если в контуре встречается непрерывный локальный путь, состоящий из неиспользуемых дуг ($x_{ij} = 0$), то он замыкается накоротко одной дугой, соединяющей начало первой дуги данного пути с концом последней. То есть если в ряду значений $\bar{x}_{ij}^{(k)}$, соответствующих $\mathbf{R}_k$, встречается непрерывная локальная последовательность $\bar{x}_{ij} \rightarrow \bar{x}_{i_1j_2} \rightarrow \bar{x}_{i_2j_3} \rightarrow \dots \rightarrow \bar{x}_{i_{n-1}j_n}$, такая, что все принадлежащие ей $\bar{x}_{ij}$ равны нулю, то соответствующий ей путь заменяется дугой $\langle i \rightarrow j_n \rangle$. В общем случае подобная ситуация в отдельном контуре может быть не единственной, поэтому следует иметь в виду возможность нескольких подобных «шунтирований» одного контура. Затем необходимо проверить, имеется ли полученный цикл в $\mathbf{R}$. Если нет, то его следует включить в $\mathbf{R}$, присвоив параметру l_{ij_n} по

данным матрицы Θ значение кратчайшего расстояния между пунктами « i » и « j ». Исходный контур исключается из R .

Отдельно следует рассмотреть функционирование контуров, входящих в подмножества, условно называемые *совмещенными* и *пересекающимися*. Элементарные примеры такого взаимодействия приведены на рис.1, 2 и 3.

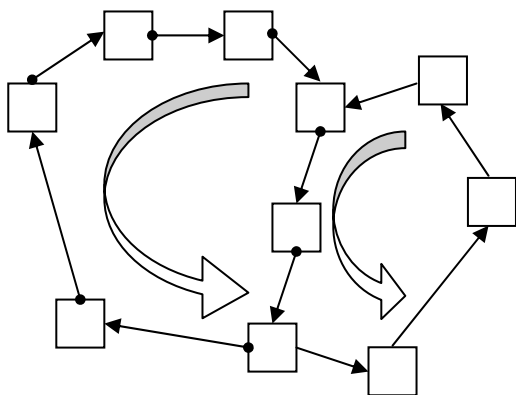


Рис. 1. Пример внешнего совмещения контуров

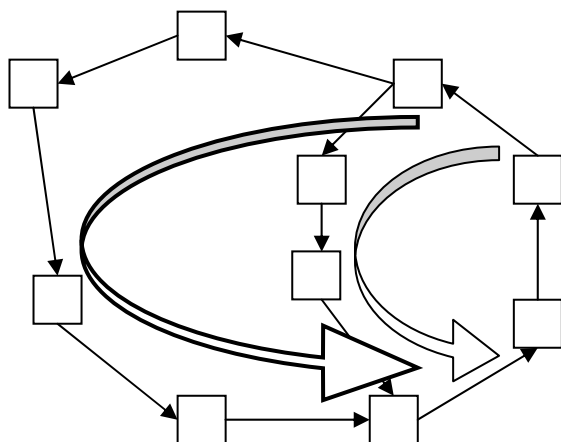


Рис. 2. Пример внутреннего совмещения контуров

Их возможное наличие связано с тем, что при формировании стартового множества R^0 возможность совмещения специально не рассматривается – полностью отсутствуют какие-либо ограничения в этом отношении. Мы считаем это оправданным, так как иначе при формировании R^0 возникает риск изначально исключить из дальнейшего процесса некоторое количество контуров, эффективных в смысле общих затрат на транспортный процесс.

Совмещение контуров может носить характер внешнего (рис. 1) и внутреннего касания (рис. 2). В обоих случаях возникает один и тот же вопрос: каким контуром (маршрутом) будут осуществляться перевозки, соответствующие общим дугам, т.е. возникает частная распределительная задача. Ответ в зависимости от ситуации может носить как альтернативный характер (если соответствующие транспортные операции неделимы), так и непрерыв-

ный характер (возможно доленое участие всех связанных совместными операциями маршрутов в их осуществлении). Критерии эффективности для данной распределительной задачи различны для конкретных случаев. Как частный случай может быть предложено максимальное выравнивание нагрузок по всему подмножеству совмещенных контуров, формализуемое следующим образом:

$$\sum_{\tilde{O}_{ij}^{(k)} \in R_k \in R_k^{(1)}} \max (x_{ij} \cdot p_{ij}) - \frac{1}{x_{ij}^{(k)} \in X_{ij}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

при условии

$$\sum_{x_{ij}} x_{ij}^{(k)} = 1. \quad (2)$$

Здесь $R_k^{(1)}$ – l -е множество совмещенных контуров ($l \geq 1$); $\tilde{O}_{ij}^{(k)}$ – множество участвующих в совмещении дуг, принадлежащих R_k . Если предположить, что x_{ij} – булевы переменные, то условие означает, что соответствующая дуге « $i - j$ » операция осуществляется только в одном контуре подмножества, которому принадлежит единичное значение $x_{ij}^{(k)}$. Если на данные переменные накладывается только требование неотрицательности, то их получаемые значения дают наиболее рациональное в смысле принятого критерия распределение нагрузки по этой операции между транспортными средствами, занятыми на совмещенных маршрутах.

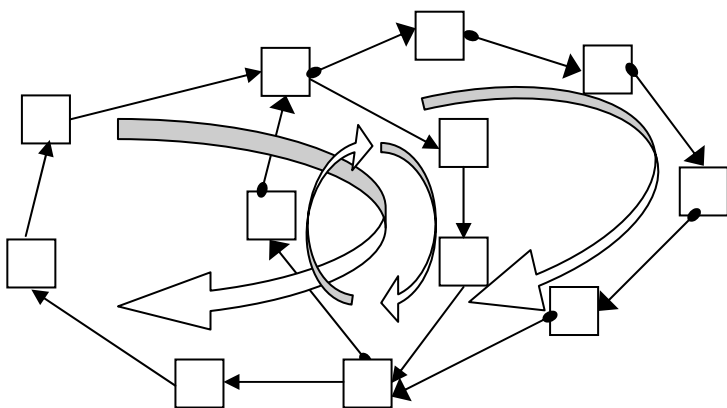


Рис. 3. Пример пересечения контуров

Несколько иная, хотя и родственная задача возникает при пересечении контуров с одинаковыми значениями $x_{ij}^{(k)}$, простой пример которого дан на рис. 3. В общем случае множество пересекающихся контуров может содержать более 2 элементов и образовывать несколько пересечений, каждому из которых соответствует дополнительный контур. Здесь встает вопрос о целе-

сообразности использования образуемых пересечением контуров, если они изначально отсутствовали в множестве $\mathbf{R}$ или были исключены из него в процессе фильтрации. Ответ положителен, если за счет этого удастся снизить потребность в транспортных средствах на всем подмножестве контуров $\mathbf{R}^{(l)}, l = \overline{1, L}$, здесь l – порядковый индекс пересекающихся множеств. Источником снижения является такое перераспределение нагрузок в пределах $\mathbf{R}^{(l)}$, которое приводит к их выравниванию. Эффект от такого перераспределения и его план определяются результатами решения задачи, аналогичной (1) – (2), с той лишь разницей, что в качестве регулируемых переменных выступает

множество параметров $\Delta \equiv \left\{ \left(x_{ij} \leftrightarrow O_i^{(l)} \right) \cup \left(x_{ij}^{(s)}, s = \overline{1, S_{ij}^t} \right) \right\}$. Здесь $O_i^{(l)}$ – множество дуг, принадлежащих $\tilde{\mathbf{R}}_i^{(l)}$ – t -му по порядку контуру-совмещению в пределах $\tilde{\mathbf{R}}^{(l)}$ – множества контуров-совмещений, порождаемых $\mathbf{R}^{(l)}$; $x_{ij}^{(s)}$ – параметр направления для дуги « $i - j$ » в s -м по порядку содержащем ее контуре из множества $\{\mathbf{R}^{(l)} \setminus \tilde{\mathbf{R}}_i^{(l)}\}$; S_{ij}^t – количество контуров, входящих в $\tilde{\mathbf{R}}^{(l)}$ и участвующих в формировании контура-совмещения $\tilde{\mathbf{R}}_i^{(l)}$. $\tilde{\mathbf{R}}_i^{(l)}$ включается в $\mathbf{R}$ или сохраняется в нем, если в результате решения данной задачи хотя бы один элемент множества $\left(x_{ij} \leftrightarrow O_i^{(l)} \right)$ оказывается ненулевым, иначе он исключается из $\mathbf{R}$. Если происходит пополнение $\mathbf{R}$ за счет некоторого контура $\tilde{\mathbf{R}}_i^{(l)}$, то все элементы множества $\{\mathbf{R}^{(l)} \setminus \tilde{\mathbf{R}}_i^{(l)}\}$, уступившие ему часть своего грузопотока (полностью или в определенных долях), подлежат повторной проверке на состоятельность с помощью фильтра (Б). Отметим, что идентификация случаев смыкания и пересечения контуров в $\mathbf{R}^0$ алгоритмически относительно легко осуществляется на основе так называемой матрицы цикличности, формируемой одновременно со стартовым множеством циклов $\mathbf{R}^0$.

Вышеописанный комплекс процедур построения множества $\mathbf{R}^*$ мы рассматриваем лишь как один из возможных вариантов достижения цели по двум причинам. Во-первых, разнообразие топологии сетевых потоковых моделей настолько велико, что охват абсолютно всех возможных ситуаций оказывается труднодостижимым в алгоритме ограниченного объема и сложности. Поэтому целесообразна при необходимости его дальнейшая разработка применительно к конкретно заданным классам потоковых систем. Во-вторых, содержание такого алгоритма зависит от содержания генетически предшествующего ему алгоритма формирования $\mathbf{R}^0$, которое многовариантно, в частности, из-за различий в требованиях к алгоритмической дистанции между $\mathbf{R}^0$ и $\mathbf{R}^*$. Будем считать, что граница между этими процессами в общем случае строго не определена.

Однако предположим, что все вопросы пространственного назначения эффективных кольцевых маршрутов решены. Означает ли это, что можно переходить к организационно-практической стадии их реализации? В большинстве случаев нет, так как все ранее описанные процедуры исходили из предположения о статичности системы грузопотоков (все ее параметры были постоянными величинами). В то же время для большинства систем, перед которыми стоит проблема значительного повышения эффективности исполь-

зования ТС, характерны дискретные (партионные) потоки с вероятностным характером их генерации и поглощения. В этом случае увеличение полноты использования пробега ТС, обеспечиваемое кольцевым движением, еще не гарантирует его более высокую эффективность по сравнению с маятниковым. Она должна быть дополнена достаточно высокой непрерывностью движения ТС, которая, в свою очередь, обеспечивается достаточным уровнем синхронизации между собой моментов возникновения требований на транспортировку во всех пунктах маршрута с учетом их накопительных возможностей и режимов движения ТС. В противном случае при обслуживании маршрутов неизбежны множественные простои ТС, либо ситуационно-вынужденные пустые пробеги, либо неоправданно большие ожидания грузов, либо, что наиболее характерно для практики, некоторая комбинация перечисленных негативных явлений. В результате потенциал сравнительной эффективности данных маршрутов скорее всего не будет реализован.

Таким образом, получение множества R^* завершает первый самостоятельный этап решения задачи кольцевой маршрутизации, далее должен последовать достаточно содержательный этап исследования их эффективности в условиях вероятностной динамики потоков. Главной задачей этого исследования является определение на уровне количественных характеристик условий достижения заданной эффективности маршрутизации, а основными инструментами – аппарат математической статистики и имитационное моделирование функционирования грузопотоков.