

УПРАВЛЕНИЕ ТРАНСПОРТНЫМИ СЕТЯМИ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ С УЧЕТОМ НЕЧЕТКИХ ПРЕДПОЧТЕНИЙ

Р.Л. Гилязов, М.Б. Гитман, В.Ю. Столбов

Пермский государственный технический университет

Рассмотрена задача оптимального управления параметрами транспортной сети электросвязи. Построена модель транспортной сети. Разработаны два алгоритма решения задачи, решены тестовые задачи и проверена адекватность модели.

ВВЕДЕНИЕ

Управление транспортными сетями связи — одна из серьезных проблем, с которыми приходится сталкиваться поставщикам информационных услуг. При проектировании любой сети связи необходимо учитывать требования надежности всей сети и отдельных ее компонентов, а также удовлетворять ряду ограничений, налагаемых существующей структурой сети и прогнозируемой потребностью со стороны потребителей телекоммуникационных услуг. Обычно стремятся найти такой вариант построения транспортной сети, который бы обеспечивал необходимую связь при заданной надежности и наименьших общих затратах на построение, обслуживание и последующее развитие сети.

При создании и эксплуатации любой сети связи размеры капитальных затрат и эксплуатационных расходов должны быть минимальны при условии, что сеть выполняет с заданными качественными показателями возложенные на нее функции по передаче и распределению информационных потоков, поступающих от потребителей [1].

Быстрое развитие современных технологий приводит к тому, что зачастую меняются принципы построения и методики расчета основных показателей сетей связи. Одно из преимуществ новых технологий управления потоками информации в транспортных сетях состоит в гибкой маршрутизации и настройке сети и отдельных ее элементов. В этой ситуации невозможно качественное проектирование сетей электросвязи на основе одного лишь опыта и интуитивных решений. Многие

крупные операторы, эксплуатирующие сети связи, вынуждены собственными силами решать задачи развития, модернизации и анализа сетей электросвязи. Как правило, им приходится довериться опыту разработчиков оборудования, не имея возможности проверить полученный результат. Очень часто группа специалистов проектирует сети эмпирическим путем, полагаясь, в основном, на личный опыт. Для сведения к минимуму последствия ошибок приходится неоправданно завышать требования к надежности сети, что в свою очередь ведет к необоснованному увеличению ее стоимости.

Для более качественного проектирования сетей электросвязи необходимо разработать математическую модель транспортной сети, позволяющую решать задачу анализа и оптимизации сетей электросвязи в целях максимизации надежности и минимизации ее стоимости. На основе такой модели возможно создание программного комплекса — рабочего места проектировщика сетей электросвязи с учетом предпочтений со стороны пользователей телекоммуникационных услуг.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ

Рассмотрим модель транспортной сети [2]. Пусть сеть электросвязи представляет собой множество узлов связи и каналов передачи данных между ними. Для изучения структурных свойств сетей их удобнее всего представить в виде графа без петель $G = \{A, B\}$, состоящего из множества вершин $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ и множества ребер $B = \{b_{ij}\}$, $i \neq j$. В реальной сети, как правило, для связи между заданными узлами используются не все воз-



возможные пути, а только пути, выделенные по какому-либо показателю или обладающие некоторыми заданными свойствами. В некоторых случаях приходится рассматривать независимые по ребрам и узлам пути. Пути, соединяющие узлы A и B , называются независимыми по ребрам (узлам), если они не включают в себя общих ребер (узлов). Важным фактором, влияющим на качество обслуживания на сетях связи, является надежность. Интерес к проблемам обеспечения надежности особенно возрос с конца 1980-х гг., что объясняется комплексом причин, к числу которых относятся: повышение требований к надежности со стороны пользователей; усиление конкуренции между операторами связи; быстрое развитие и внедрение новых технологий, архитектур и услуг; возникновение на сетях связи ряда стран (в первую очередь США) серьезных аварий, вызвавших значительный общественный резонанс, и принятие соответствующих организационных мер, направленных на снижение риска подобных ситуаций в дальнейшем [3].

Надежность узла a определяется как вероятность нахождения узла в рабочем состоянии и может быть вычислена следующим образом:

$$P_a = 1 - T_a/365.$$

Здесь T_a — число дней в году, в течение которых узел был выведен из строя. Как правило, надежность узлов много выше, чем надежность связей между ними, поэтому ее обычно принимают равной единице. Надежность ребра определяется аналогично надежности узла:

$$P_{ij} = 1 - T_{ij}/365.$$

Путем $\mu(ab)$ между узлами a и b называется упорядоченная последовательность ребер, по которым возможна передача сообщений из узла a в узел b . Считая ребра независимыми друг от друга и соединенными последовательно, надежность всего пути можно найти как произведение надежностей ребер и узлов, входящих в путь:

$$P(\mu(ab)) = \prod_{\mu(ab)} P_k \times \prod_{\mu(ab)} P_{ij}, \quad (1)$$

где P_k — надежность узлов, входящих в путь.

Между любыми двумя пунктами сети можно построить, как правило, множество путей. Связью между двумя узлами a и b сети принято называть совокупность $S(ab)$ независимых по ребрам путей между этими узлами. Учитывая зависимость путей связи, надежность связи можно определить следующим образом:

$$P(S(ab)) = 1 - \prod_{S(ab)} (1 - P(\mu(ab))).$$

Порядком связи принято называть число составляющих связь путей.

Надежность всей сети можно определить по-разному. Однако во всех возможных случаях используется одна и та же схема, суть которой состоит в том, что каждое состояние сети характеризуется определенным показателем эффективности ее функционирования. Этот показатель дает количественную характеристику качества выполнения сетью своих функций при условии, что она при этом находится именно в данном состоянии [4]. В настоящей работе было решено использовать два частных критерия надежности сети связи. Один из них — средняя надежность путей доставки информации в сети

$$P_{cp} = \frac{\sum_l P(\mu_l)x_l}{\sum_{i,j} r_{ij}}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n}, \quad j < i, \quad (2)$$

где x_l — поток по пути l , r_{ij} — потребность в связи между узлами i и j . Суммирование в числителе ведется по всем путям сети, используемым для доставки информации. С учетом формулы (1) выражение (2) можно переписать в виде:

$$P_{cp} = \frac{\sum_l \left(\prod_{\mu_l} P_k \times \prod_{\mu_l} P_{ij} \right) x_l}{\sum_{i,j} r_{ij}}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n}, \quad j < i.$$

При современном уровне развития сетей связи все чаще по сетям передается информация, критичная к скорости передачи данных (такая как видео-данные, on-line базы данных и др.). Для потребителей такой информации важна минимальная надежность связи [4]. Поэтому в качестве одного из частных критериев надежности была принята минимальная надежность связи:

$$P_{N^2} = \min_l \left(\prod_{\mu_l} P_k \times \prod_{\mu_l} P_{ij} \right),$$

где минимум берется по всем путям доставки информации с ненулевой емкостью.

Не менее важным показателем транспортной сети связи выступает ее стоимость. В данной работе стоимость ребер полагалась пропорциональной емкости V_{ij} ребра, цене c_l единицы длины стандартного канала и длине ребра L_{ij} , т. е. $C_{ij} = c_l V_{ij} L_{ij}$.

Стоимость оборудования в узлах сети не учитывалась. Общая стоимость сети складывается из стоимости отдельных ее ребер:

$$C = \sum_{i,j \in B} C_{ij},$$

где B — множество ребер сети.

Как уже говорилось, современное интеллектуальное коммутационное оборудование в случае обрыва линии или перегруженности канала способно пропускать данные по обходным каналам связи, т. е. современная сеть способна сама перераспределять нагрузку в соответствии со своей топологией. Для проектирования сети связи необходимо определить оптимальные емкости ребер сети. Однако определение емкости ребер невозможно без определения оптимальных путей доставки информации в сети и их емкостей. Зная пути доставки информации в сети и емкости этих путей, можно определить емкости ребер сети:

$$V_{ij} = \sum_k d_{ijk} x_k, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n},$$

где $d_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{если ребро } ij \text{ входит в путь } k, \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$

x_k — емкость пути k ; суммирование ведется по всем путям доставки информации в сети.

Таким образом, параметрами управления служат пути передачи сигнала с нагрузкой на них. Итак, можно сформулировать следующую задачу оптимизации транспортной сети: найти такой вектор $x \in D$, который доставляет минимум цене $C(x)$ сети и максимум надежности ($P_{cp}(x)$ и $P_{N^2}(x)$).

Рассмотрим подробнее допустимое множество D . Напомним, что в параметры оптимизации входят пути доставки информации и нагрузки на них, следовательно, $D = R^w$, где R — множество неотрицательных действительных чисел, w — число путей в сети. Кроме того, в множество D входят только те параметры x , которые удовлетворяют ограничениям на емкость ребер и потребностям в связи между узлами. Таким образом, имеем:

найти вектор $\tilde{x} \in R^w$ такой, что

$$C(\tilde{x}) = \min_x C(x), \quad (3)$$

$$P_{cp}(\tilde{x}) = \max_x (P_{cp}(x)), \quad (4)$$

$$P_{N^2}(\tilde{x}) = \max_x (P_{N^2}(x)), \quad (5)$$

$$\sum_j a_{ij} x_j \leq b_i, \quad i = \overline{1, m}, \quad (6)$$

$$\sum_k T_{ijk} x_k = r_{ij}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n} \quad (j < i), \quad (7)$$

где $a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если ребро } i \text{ входит в путь } j, \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$

m — число ребер в сети, b_i — максимальная пропускная способность ребра i ,

$T_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{если поток } x_k \text{ удовлетворяет потребность} \\ & \text{в связи между узлами } i \text{ и } j, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$

2. АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ

Задача (3)—(7) является многокритериальной нелинейной многомерной задачей оптимизации. Нами предложено два способа решения задачи проектирования транспортной сети. В соответствии с одним из них была введена логарифмическая надежность $\bar{P} = \ln(P)$, что позволило первый критерий оптимальности записать в линейной форме:

$$\bar{P}_{cp} = \frac{\sum_l \left(\sum_{\mu_l} \bar{P}_k + \sum_{\mu_l} \bar{P}_{ij} \right)}{\ln \sum_{ij} r_{ij}} = \sum_l \beta_l x_l,$$

$$i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n} \quad (j < i),$$

где $\beta_l = \frac{\sum_l \left(\sum_{\mu_l} \bar{P}_k + \sum_{\mu_l} \bar{P}_{ij} \right) x_l}{\ln \sum_{ij} r_{ij}}$ — константы, завися-

щие от структуры сети и потребностей в связи между узлами. Для разрешения многокритериальной неопределенности была построена линейная свертка критериев оптимизации:

$$J_1(x) = K_c C(x) - K_p \bar{P}_{cp}(x) - K_{N^2} P_{N^2}(x), \quad (8)$$

где K_c , K_p и K_{N^2} — весовые коэффициенты, характеризующие важность критериев стоимости и надежности сети соответственно. Для возможности применения методов линейного программирования в постановке (3)—(7) критерий (5) был заменен ограничением:

$$P_{N^2}(x) = \prod_{\mu_l} P_k \times \prod_{\mu_l} P_{ij} \geq P_{N^2}^*, \quad (9)$$

где $P_{N^2}^*$ — константа, ограничивающая минимальную надежность снизу. Так как надежность в ограничении (9) не зависит от емкостей путей дос-



тавки информации, то его можно переписать в виде:

$$x_l S_l = 0, \quad l = \overline{1, w},$$

$$\text{где } S_l = \begin{cases} 1, & \text{если } \prod_{\mu_l} P_k \times \prod_{\mu_l} P_{ij} < P_{N^2}^*, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (10)$$

Условие (10) означает, что к постановке (3)–(7) добавляются ограничения вида $x_q = 0$, где индекс q соответствует номеру пути доставки информации в сети с надежностью меньше $P_{N^2}^*$. Таким образом, получим линейную постановку задачи:

Найти вектор $\tilde{x} \in R^w$ такой, что

$$J_2(\tilde{x}) = \min_x (K_c C(x) - K_p \bar{P}_{cp}(x)), \quad (11)$$

$$\sum_j a_{ij} x_j \leq b_i, \quad i = \overline{1, m}, \quad (12)$$

$$\sum_k T_{ijk} x_k = r_{ij}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n}, \quad j < i, \quad (13)$$

$$x_l S_l = 0, \quad l = \overline{1, w}. \quad (14)$$

Для решения поставленной задачи линейного программирования применялся модифицированный симплекс-метод и алгоритм Дейкстры поиска кратчайшего пути в графе [5].

Основная идея модификации симплекс-метода заключается в следующем: в классическом симплекс-методе все элементы симплексной таблицы пересчитываются на каждой итерации. В модифицированном симплекс-методе на каждой итерации пересчитываются только базисные элементы симплекс-таблицы. При этом исходная таблица сохраняется, и все остальные элементы текущей таблицы могут быть получены из исходной с помощью преобразования перехода от базиса исходной таблицы к базису текущей. Так как небазисные элементы текущей таблицы не вычисляются при помощи стандартной процедуры симплекс-метода, невозможно выбрать столбец текущей таблицы, который необходимо ввести в базис следующей таблицы. Однако в задачах о потоке минимальной стоимости, (к которым относится задача (11)–(14)) для нахождения минимальной относительной оценки замещения можно воспользоваться алгоритмом поиска кратчайшего пути в графе [5].

Задача нелинейной оптимизации с критерием (8) и ограничениями (12) и (13) решалась методом равномерного дискретного перебора значений минимальной надежности в ограничениях (10) с использованием решения линейной задачи. При этом значение $P_{N^2}^*$ изменялось в диапазоне [0,1] с некоторым шагом, и на каждой итерации решалась задача (11)–(14). Среди всех решений выби-

ралось то, которое соответствовало минимальному значению функции $J_1(\tilde{x})$. Таким образом, находилось приближенное решение задачи (8), (12) и (13).

Второй способ решения задачи учитывал эмпирический опыт проектирования сетей электросвязи. Для учета нескольких критериев было принято решение построить комплексный критерий в виде нечеткого множества.

Математическая теория нечетких множеств позволяет описывать нечеткие понятия и знания, оперировать этими знаниями и делать нечеткие выводы. В последнее время нечеткое управление является одной из самых активных и результативных областей применения теории нечетких множеств. Экспериментально показано, что нечеткое управление дает лучшие результаты по сравнению с получаемыми при общепринятых алгоритмах управления [1]. Основное отличие нечеткого множества U от обычного (четкого) заключается в том, что для элементов этого подмножества нет однозначного ответа «да» или «нет» относительно вхождения в множество U . В связи с этим нечеткое подмножество U универсального множества E определяется как множество упорядоченных пар $U = \{\lambda(u)/u\}$, где $\lambda(u)$ — функция принадлежности, принимающая значения в некотором вполне упорядоченном множестве M . Функция принадлежности указывает степень (или уровень) принадлежности элемента u подмножеству U .

Если элементами $u \in U$ считать значения соответствующих критериев оптимизации, приведенных выше, то в качестве функции принадлежности удобно принимать важность соответствующего значения конкретного критерия. Конкретные значения функций принадлежности могут выбирать эксперты в зависимости от типа преобладающей нагрузки на сеть (телефония, видео, Интернет, передача данных, виртуальная реальность, передача информации, связанной с органами чувств и др.), от прогнозируемых параметров сети и от целей оператора связи. Для более обоснованного задания значений функций принадлежности необходимо применять методы экспертных оценок. Для сравнения двух нечетких множеств A и B используются различные индексы ранжирования. В данной работе был принят следующий индекс [6]:

$$H(A, B) = \text{sign} \text{extr}_i \{\lambda_i(a_i - b_i)/d_i\}, \quad (15)$$

где λ_i — функция принадлежности a_i , $d_i = \max(a_i, b_i)$. При этом, если существует единственный $\max_i \{\lambda_i(a_i - b_i)/d_i\} = G$, где максимум берется по модулю, и если $G > 0$, то $H(A, B) = 1$; если $G < 0$, то $H(A, B) = -1$. Если равных по модулю экстремумов несколько, то вычисляется сумма $\theta = \sum G_i$, где суммирование ведется по всем равным по мо-

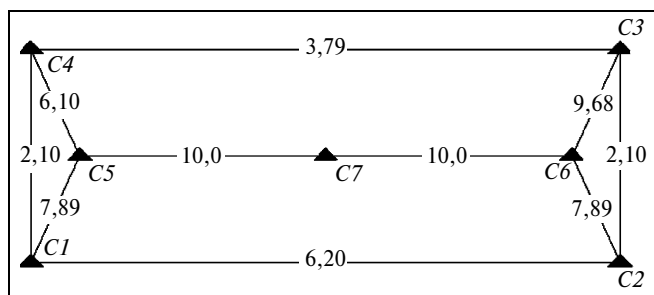


Рис. 1. Демонстрационный пример транспортной сети

дулю экстремумам. Если $\theta = 0$, то $H(A, B) = 0$; если $\theta > 0$, то $H(A, B) = 1$; если $\theta < 0$, то $H(A, B) = -1$.

Для решения задачи оптимального проектирования был построен алгоритм неполного перебора вариантов проектирования сетей связи, использующий эвристики, применяющиеся при проектировании «вручную». Для сравнения вариантов применялся нечеткий комплексный критерий, где каждый вариант построения сети характеризовался нечетким множеством $A = \{\lambda(a_i)/a_i\}$, $i = \overline{1, 3}$, где a_i — значение i -го частного критерия оптимальности, $\lambda(a_i)$ — значение функции принадлежности этого критерия.

В процессе проектирования сетей вручную, как правило, используются независимые пути. На самый надежный путь связи обычно стараются распределить наибольшую долю нагрузки. Однако определенную (меньшую) долю нагрузки стараются распределить на второй по надежности путь (резерв, в случае выхода из строя первого пути); если порядок связи больше 2, то часть нагрузки может распределяться также на остальные пути связи.

Для решения задачи был предложен следующий алгоритм. Проектировщик сети задает функции принадлежности для каждого из критериев (3)—(5) и (в зависимости от нормативов оператора сети и своего личного опыта) выбирает несколько приоритетных вариантов распределения нагрузки $\{\chi_i^h\}$ для каждого порядка связи, где h — порядок связи, i — номер варианта. Например, для связи порядка 3 выбор варианта $\chi_1^3 = (70, 20, 10)$ означает, что 70 % нагрузки распределяется на самый надежный путь, 20 % — на второй по надежности, 10 % — на третий. Полным перебором на ЭВМ выбираются лучшие варианты распределения для каждой пары узлов из предложенных проектировщиком. Лучшими считаются такие варианты распределения, которые обеспечивает выполнение условий (6), (7) и обеспечивают наилучшее решение среди всех рассмотренных вариантов в смысле критериев (3)—(5). Сравнение вариантов производится с помощью индекса ранжирования (15).

3. ДЕМОСТРАЦИОННЫЙ ПРИМЕР

Для проверки правильности модели был решен ряд тестовых задач. Транспортная сеть в тестовой задаче состояла из нескольких несвязанных сетей, что позволило провести сравнение результатов, полученных методами линейного программирования и эвристическим методом. Сравнение показало правильность работы алгоритмов и подтвердило возможность их применения для оптимизации реальных транспортных сетей связи [7].

Для демонстрации возможностей алгоритмов и сравнения их эффективности была исследована транспортная сеть, структура которой изображена на рис. 1. Подписи ребер на рис. 1 показывают оптимальную емкость ребер, полученную методом линейной оптимизации при следующих значениях важности критериев: стоимости — 1, средней надежности — 10, минимальной надежности — 0. Максимальная емкость всех ребер сети была принята равной 10. Потребность в связи между узлами $C5-C6$, $C5-C7$, $C6-C7$ исследованной транспортной сети была равна 0, между всеми остальными парами узлов потребность в связи была равна 2. Надежность единицы длины каждого ребра принималась равной 0,99, стоимость — равной 1. Длины ребер приведены в таблице. В данном примере считается, что все возможные пути являются допустимыми.

Для упрощения анализа результатов в качестве критерия надежности сети был выбран критерий «средняя надежность». Методами линейной оптимизации строилось Парето-множество. На рис. 2 представлена зависимость средней надежности сети от ее стоимости в некоторых условных единицах. Точки на графике (сплошная линия) соответствуют решениям задачи при различных значениях важности критериев. Крайней левой точке на графике соответствуют значения важности стои-

Емкость ребер демонстрационной сети

Узел i	Узел j	Длина ребра
$C1$	$C2$	6
$C2$	$C3$	
$C3$	$C4$	
$C1$	$C4$	
$C1$	$C5$	3
$C4$	$C5$	
$C3$	$C6$	
$C2$	$C6$	2,5
$C5$	$C7$	
$C6$	$C7$	

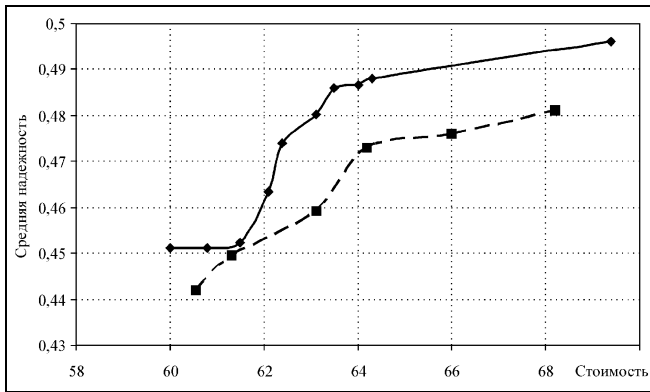


Рис. 2. Зависимость средней надежности сети от стоимости

мости — 10, средней надежности — 1, крайней правой стоимости — 1, средней надежности — 10. При нечеткой оптимизации методом неполного перебора построить Парето-множество не представляется возможным. Поэтому этим методом были получены решения для различных функций принадлежности критериев. Крайней левой точке на графике (штриховая линия) соответствуют значения функции принадлежности: стоимости $\lambda(a_1) = 1$, средней надежности $\lambda(a_2) = 0,1$; крайней правой точке — стоимости $\lambda(a_1) = 0,1$, средней надежности $\lambda(a_2) = 1$.

Отметим, что алгоритм, основанный на методах линейного программирования, в данном случае намного эффективнее по затратам машинного времени, чем алгоритм нечеткой оптимизации. Среднее время решения задачи для одной комбинации важности критериев составило для алгоритма линейной оптимизации 2,17 с, для алгоритма нечеткой оптимизации — 735,4 с. Однако первый алгоритм не позволяет учесть некоторые предпочтения со стороны пользователей сетей. Поэтому он может быть применен для достаточно быстрой верхней оценки эффективности сети.

Из рис. 2 видно, что решения задачи, получаемые методами линейной оптимизации, в целом лучше по значениям оптимизируемых параметров, чем решения задачи, получаемые методом неполного перебора. Однако, как уже отмечалось, метод неполного перебора позволяет учитывать дополнительные эвристики и предпочтения, такие как требование направления трафика по независимым путям, учет приоритетов связи между конкретными парами узлов и др. Из приведенных результатов также видно, что стоимость построения сети для различной важности критериев варьируется в пределах 15 %, надежность — в пределах 10 %. В более сложных сетях разброс показателей стоимости и надежности может достигать сотен и более процентов. Тем не менее, даже десятипроцентная эконо-

номия в стоимости может дать существенный выигрыш оператору сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определяющее значение для качества функционирования транспортной сети электросвязи имеет надежность сети в целом. Предложено два способа расчета надежности сети — по средней и минимальной надежности связи. Построена математическая модель транспортной сети электросвязи, учитывающая ее качественные и стоимостные характеристики, разработан численный алгоритм оптимизации сети передачи данных с учетом критериев и ограничений, заданных в нечеткой форме. Для более полного описания сетей электросвязи необходимо учитывать распределительный и пользовательский уровни сети, потребности связи на которых носят существенно случайный характер. Сеть электросвязи на этих уровнях может быть представлена в виде системы массового обслуживания. В качестве развития предложенной модели предполагается учитывать в ней расходы на капитальное строительство новых линий связи. Это может быть сделано путем введения штрафа в функцию стоимости в случае, если поток по ребру больше нуля. Вместо алгоритма неполного перебора для поиска оптимальной структуры транспортной сети электросвязи целесообразно применять методы искусственного интеллекта (например, генетические алгоритмы) и распараллеливания вычислений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Давыдов Г.Б. Информатизация и сети связи. — М.: Наука, 1984. — 128 с.
2. Микрюков Р.А., Ашихмин В.Н., Столбов В.Ю. Оптимальное проектирование транспортных сетей электросвязи // Теор. и прикл. аспекты инф. технологий. Сб. науч. тр. ГосНИИУМС, Вып. 49. — Пермь, 2000. — С. 98–108.
3. Нетес В.А. Надежность сетей связи: тенденции последнего десятилетия // Электросвязь. — 1998. — № 1. — С. 29–38.
4. Методика выбора показателей для оценки надежности сложных технических систем. — М.: Стандарты, 1977.
5. Ху Т. Целочисленное программирование и потоки в сетях. — М.: Мир, 1974.
6. Литман М.Б., Микрюков Р.А. Применение теории нечетких множеств в задаче стохастической оптимизации процессов обработки материалов // Проблемы механики и управления. Нелинейные динамические системы. — Пермь, изд. ПГТУ, 1996. — С. 230–238.
7. Гилязов Р.Л., Столбов В.Ю. Моделирование и оптимизация сетей электросвязи с учетом нечетких предпочтений // Материалы 2-й междунар. конф. «Инфокоммуникационные технологии в науке и технике» / Сев.-кав. техн. ун-т. — Ставрополь, 2006. — С. 146–151.

☎ (342) 239-12-97, e-mail: Gilyazov@er-capital.ru

Статья представлена к публикации членом редколлегии Д.А. Новиковым. □