

УДК 504.1:519.05

**ЗАДАЧА ВЫБОРА ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ
МНОГОПРОДУКТОВОЙ КОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ
С МЕЛКОПАРТИОННЫМИ ДИСКРЕТНЫМИ
ПОТОКАМИ**

*В.А. Васянин, канд. техн. наук
(Институт телекоммуникаций и глобального
информационного пространства НАН Украины)
А.Н. Трофимчук, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАНУ
(Институт телекоммуникаций и глобального
информационного пространства НАН Украины)*

В работе рассматривается и экспериментально исследуется задача выбора иерархической структуры многопродуктовой сети с мелкопартионными потоками. Предложена математическая модель задачи и разработана общая схема эвристического алгоритма ее решения. На основании доказанного утверждения о том, что выбор структуры сети слабо зависит от пропускных способностей ее дуг, исходная задача заменена на более простую, для решения которой могут быть использованы алгоритмы оптимизации упаковок. Полученные результаты могут применяться при проектировании структуры реальных транспортных сетей и сетей передачи данных.

У роботі розглядається й експериментально досліджується задача вибору ієрархічної структури багатопродуктової мережі з дрібнопартионними потоками. Запропоновано математичну модель задачі і розроблена загальна схема евристичного алгоритму її рішення. На підставі доведеного твердження про те, що вибір структури мережі слабо залежить від пропускних спроможностей її дуг, вихідна задача замінена на більш просту, для рішення якої можуть бути використані алгоритми оптимізації упакувань. Отримані результати можуть застосовуватися при проектуванні структури реальних транспортних мереж і мереж передачі даних.

© В.А. Васянин, А.Н. Трофимчук, 2012

In work is considered and experimentally investigated the problem of a choice of hierarchical structure of a multicommodity network with small packages of flows. The mathematical model of a problem is offered and the general circuit of heuristic algorithm of its decision is developed. On the basis of the proved statement, that the choice of structure of a network poorly depends on bandwidths of its arches, the initial problem is replaced with more simple, for decision of which the algorithms of optimization of packings may be used. The received results may be applied at designing structure of real transport networks and data networks.

ВВЕДЕНИЕ

Существующие и проектируемые коммуникационные сети в большинстве случаев имеют иерархическую структуру, где число уровней иерархии может определяться административным делением территории, структурой органов территориального управления, принятой технологией обработки и распределения потоков грузов и информации и др. Обычно такие сети состоят из децентрализованной распределенной сети верхнего уровня - магистральной сети и низовых сетей - зональных и внутренних сетей.

В данной работе мы будем рассматривать в основном транспортные многопродуктовые коммуникационные сети, а также базирующиеся на использовании технологии виртуальных контейнеров перспективные крупномасштабные общенациональные и интернациональные сети на основе сверхширокополосных каналов и схем типа опорной сети – backbone. Для таких сетей характерно наличие множества источников и стоков мелкопартионных потоков продуктов или требований. Под продуктом или требованием понимается пара различных узлов сети, между которыми имеется направленный (адресный) дискретный поток элементов (например, неделимых грузов унифицированного размера, пакетов сообщений). В многопродуктовой сети все мелкопартионные потоки продуктов подлежат единовременной передаче из источников в стоки в некоторых транспортных блоках (контейнерах) заданного объема. При этом объемы отдельно взятых потоков, выраженные количеством единиц потока из узлов источников в узлы стоки, значительно меньше объема транспортного блока.

В работе [1] были предложены структурная схема автоматизированной системы поддержки принятия решений для многопродуктовых коммуникационных сетей с мелкопартионными дискретными потоками с использованием новейших технологий инфраструктуры пространственных данных (Spatial Data Infrastructure - SDI, Storage Area Network - SAN) и геоинформационных систем (geoinformational systems – GIS) и принципы организации сортировки и транспортировки (передачи) мелкопартионных потоков в зонально-узловой структуре транспортной сети или сети передачи данных. Согласно этим принципам в сети выделены магистральный, зональный и внутренний уровни и четыре типа узлов (см. рис. 1).

Розділ 3. Науково-технологічна безпека та інтелектуальні ресурси

Зоны обслуживания узла (ЗОУ) любого типа строятся по следующим правилам: 1) от узла проводятся все пути через узлы 2-го и 3-го типов до первых встретившихся узлов первого типа и тупиковых узлов второго и третьего типов; 2) определенные по правилу 1) узлы первого типа и тупиковые узлы соединяются

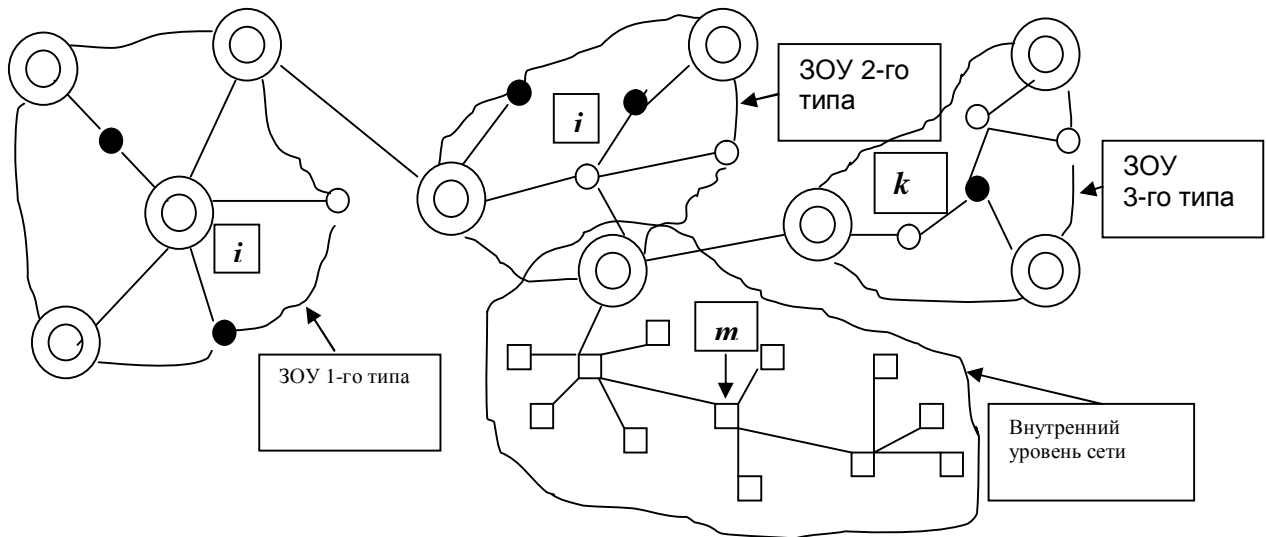


Рис. 1. Где i, j, k, m - соответственно узлы 1-го, 2-го, 3-го и 4-го типов

условной границей зоны обслуживания узла. Определенные таким образом области ЗОУ представляют зональные уровни иерархической сети или зональные сети. Внутренние уровни сети представлены централизованными подсетями с различными структурами (радиальными, древовидными, радиально-узловыми) и содержат только узлы 4-го типа. Узлы 4-го типа явно не входят в рассматриваемую модель, однако всегда подразумевается, что создаваемые ими исходящие потоки и входящие в них потоки обрабатываются в главном узле (1-го, 2-го или 3-го типа) внутренней сети. В соответствии с принципами зонально-узловой сортировки узлы 2-го и 3-го типов могут отправлять потоки требований, адресованные за свою зону обслуживания только через узлы 1-го типа, лежащие на границе своей зоны. Аналогично в соответствующих узлах 1-го типа обрабатываются и входящие потоки в узлы 2-го и 3-го типов, поступающие от узлов в других зонах обслуживания. В реальных транспортных сетях и сетях передачи данных узлы 1-го типа являются, как правило, крупными предприятиями связи, обладающими мощной материально-технической базой. В узлах этого типа достигается максимальный уровень концентрации потоков. Узлы 2-го и 3-го типов могут отличаться между собой функциональными возможностями, уровнем технической оснащенности, числом обслуживающего персонала и пр. Так, например, в узлах 3-го типа, в отличие от узлов 2-го типа, может быть запрещена обработка транзитных потоков транспортных блоков.

Для решения задач перспективного развития, текущего планирования и оперативного управления на магистральном, зональном и внутреннем уровнях сети необходима информация о межузловых потоках в полной сети, включающей все типы узлов. Для постоянно развивающейся сети неизбежно периодическое изменение ее структуры с переводом узлов с одного типа на другой. Перестройка структуры сети вызывает определенные трудности в организации системы сбора данных в крупных узлах, так как сбор данных должен осуществляться с учетом принципов зонально - узловой сортировки. В этом случае возникает также задача перестройки информационной базы данных сети. Поэтому узлы всех типов должны являться независимыми источниками информации. Тогда перестройка структуры сети не вызовет никаких изменений в организации и обработке данных на уровне узлов, а все функции, связанные с переработкой данных в соответствии с иерархической структурой выбранной магистральной сети, могут быть выполнены процедурами редукции централизованно автоматизированным способом. Таким образом принимаем, что потоки узлов 4-го типа учтены в межузловых потоках магистральной сети.

Проектирование иерархических сетевых структур имеет, как правило, нисходящий характер. На верхнем уровне решаются задачи структурного синтеза и перспективного развития сети, для которых используются крупно-агрегированные модели распределения потоков. На низших уровнях проектирования детализация объектов должна увеличиваться с целью наиболее адекватного описания их функционирования и принятия рациональных решений. Это обуславливает итерационно-циклический характер процессов проектирования и управления, включающих процедуры синтеза и анализа возможных решений на всех уровнях сети. Поскольку решения принимаются в условиях неопределенности, связанных с неполнотой имеющейся информации, а также с огрублением математических моделей, необходимо разделять решения на перспективные, текущие и оперативные. В этой связи представляется актуальной разработка комплекса взаимосвязанных многоуровневых моделей перспективного развития, текущего планирования и оперативного управления, отображающих иерархию сети и соответствующую ей степень агрегирования показателей.

В данной статье рассматриваются модели и алгоритмы для решения задачи оптимального выбора структуры сети (выбора множеств узлов 1-го, 2-го и 3-го типов) в случае, когда нет жесткой необходимости в значительных дополнительных инвестициях на модернизацию и развитие ее структурных элементов (узлов и дуг). С точки зрения проектирования многоуровневой системы управления распределением потоков, ее можно отнести к задачам текущего планирования, в которых в качестве дискретности времени отправления потоков принимаются одни сутки для транспортных сетей и одна секунда для сетей передачи данных. При этом, в качестве мгновенных потоков, распределяемых по

Розділ 3. Науково-технологічна безпека та інтелектуальні ресурси

сети, используются средние планируемые потоки, рассчитанные для конкретных периодов. Поскольку при решении задачи не удастся формализовать все факторы, влияющие на оптимальную структуру магистральной сети, для окончательного выбора структуры может использоваться опыт диспетчеров транспортных сетей и администраторов сетей передачи данных, а также базы знаний в автоматизированной системе поддержки принятия решений [1].

Модели, методы и программно-инструментальные средства анализа и проектирования иерархических многоуровневых структур, а также вопросы синтеза интеллектуальных экспертных систем и систем поддержки принятия решений рассматривались в многочисленных работах отечественных и зарубежных ученых: Д.А. Поспелова, В.М. Глушкова, Г.П. Захарова, В.М. Вишневого, Ю.П. Зайченко, Ю.Е. Малашенко, Н.М. Новиковой, Е.В. Попова, В.В. Солодовникова, А.Д. Цвиркуна, В.В. Кульбы, В.Н. Вагина, А.П. Еремеева, В.А. Виттиха, Е.В. Лысенко, А.Е. Федоровича, Е.Г. Петрова, В.М. Илюшко, К.А. Соловьевой, И.Б. Сироджи, L. Kleinrock, R. Gallager, L.R. Ford, D.R. Fulkerson, A.A. Assad, J.L. Kennington, L. Fratta, M. Gerla, J. J. Garcia-Luna-Aceves, S. Vutukury, D. Mesarovic, D. Macko, Y. Takahara, I. Lefcowitz, D. P. Eckman, L. Lasdon, J. D. Schoeffler, D. W. Hasling, D. A. Waterman, M. D. Grover и др.

В работах этих авторов обсуждаются общетеоретические вопросы анализа и синтеза иерархических многоуровневых сетей и систем управления сложными организационно-техническими объектами, создания экспертных систем, а также исследуются некоторые конкретные задачи организации поддержки принятия решений на основе экспертных систем. В большинстве из известных работ, непосредственно посвященных распределению многопродуктовых потоков и связанных с задачами анализа и структурного синтеза многопродуктовых сетей, предлагаются линейные и нелинейные модели и соответствующие методы решения в основном для непрерывных переменных и параметров элементов сети. Кроме того, рассматриваемые модели являются, как правило, довольно грубыми математическими описаниями функционирования сложной сетевой структуры и не учитывают целый ряд физических характеристик и параметров, присущих реальным системам (т.е. являются сильно агрегированными). Поэтому актуальной остается проблема разработки методологии проектирования многопродуктовых коммуникационных сетей, обобщающей полученные ранее результаты и позволяющей с использованием моделей различной степени агрегирования и для всех уровней иерархии успешно решать практические задачи перспективного развития, текущего планирования и оперативного управления для сетей большой размерности с дискретными потоками и дискретными параметрами элементов сети.

ПОСТАНОВКА И ОБЩАЯ СХЕМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Перейдем к формальной постановке задачи. Пусть $G(N,E)$ – иерархическая магистральная многопродуктовая сеть с множеством узлов N , $n=|N|$, $N=N_1 \cup N_2 \cup N_3$, где N_1, N_2, N_3 - множества узлов первого, второго и третьего типов соответственно и множеством ориентированных топологических дуг E , $e=|E|$, где “ \cup ” - знак объединения множеств, $|\cdot|$ - знак мощности множества. Под топологической дугой будем понимать физический отрезок линии связи: железной или автомобильной дороги, кабеля сети передачи данных, телефонного кабеля и т. д., соединяющий два любых узла из множества N так, что между рассматриваемыми узлами на данном отрезке нет больше ни одного узла из N . Узлы сети соответствуют пунктам отправления, получения, перегрузки (перекоммутации) грузов или информационных потоков.

На сети задана целочисленная матрица междуузловых магистральных потоков $A=||a_{ij}||_{n \times n}$, в которой учтены потоки от, и в узлы 4-го типа в полной сети. Потоки a_{ij} представляют внутренние потоки между узлами 4-го типа в зоне обслуживания i -го узла. Они не подлежат распределению по магистральной сети, но должны учитываться при расчете затрат на сортировку мелкопартионных потоков в узлах 1, 2 и 3 типов. Предполагается, что число узлов 4-го типа во внутренней зоне каждого i -го узла 1, 2 и 3 типа, а значит и число внутренних направлений сортировки $q_{вн}^i$ из этих узлов на внутренние узлы 4-го типа известны и относительно постоянны.

Потоки a_{ij} из источников i в стоки j , $i,j=1,n$ должны одновременно передаваться в некоторых транспортных блоках (контейнерах) объема $\omega \gg a_{ij}$ заданной периодичностью. При этом предполагается, что каждый поток может быть упакован в транспортный блок только целиком. Пусть далее:

- S - множество пар индексов потоков (i,j) , определенное на декартовом произведении $n \times n$;

- x_{ij}, u_{ij} - переменные, определяющие соответственно величину потока (количество единиц потока) из i в j в исходных единицах и транспортных блоках. Первоначально все $x_{ij}=a_{ij}$, а $u_{ij}=\lceil x_{ij}/\omega \rceil$, $ij \in S$, где знаки $\lceil \cdot \rceil$ - означают округление числа до большего целого;

- $w_{kl}, kl \in E$ - пропускные способности дуг сети в транспортных блоках, $w_{kl} \in \{w_1, w_2, \dots, w_\alpha\}$, $w_i, i=1,\alpha$ - упорядоченные по неубыванию целые положительные числа;

- $d_{kl}, kl \in E$ - длины дуг;

- $f_{kl}, kl \in E$ - суммарные многопродуктовые потоки в транспортных блоках, протекающие по дугам сети при заданном способе маршрутизации потоков, $f_{kl}=\sum_{ij \in S} U_{ij}^{kl}$, где U_{ij}^{kl} - поток транспортных блоков из i в j , проходящий по дуге kl ;

Розділ 3. Науково-технологічна безпека та інтелектуальні ресурси

- t_{cp}, T_{\max} – расчетная средняя и заданная максимальная задержка в передаче потоков в сети;
- $y_{kl}^i, i=1, n, kl \in S$ – переменные, определяющие количество единиц исходных потоков a_{kl} , проходящих дополнительную сортировку в узле i . Напомним, что транзитная сортировка исходных потоков разрешена только в узлах 1-го типа. Так как по условию задачи дробление исходных потоков запрещено, т. е. они запаковываются в транспортный блок только целиком, то

a_{kl} , если в узле $i, i \neq k \neq l$ дополнительная сортировка исходного

$y_{kl}^i = \begin{cases} 1 & \text{потока } a_{kl} \text{ производится,} \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$

- $t_{ij}, T_{ij}, ij \in S$ – расчетное и заданное время на доставку исходных потоков a_{ij} , из i в j ;

• $h_i, i=1, n$ – максимальная пропускная способность i -го узла в исходных единицах потока. Пропускная способность задается для транзитных потоков, так как исходящие и входящие потоки для каждого узла должны быть обработаны безусловно;

• $v_{ij}, ij \in S, v_{\max}$ – число слияний потока a_{ij} с другими потоками и максимально допустимое число слияний;

• $C_{\text{тр}}^{kl}$ – нелинейная и, в общем случае, не сепарабельная функция, определяющая зависимость транспортных затрат от пропускных способностей дуг w_{kl} и их длины $d_{kl}, kl \in E$;

• $C_{\text{сорт}}^i$ – нелинейная функция затрат на сортировку исходных потоков в узле i ;

• $C_{\text{груз}}^i$ – нелинейная функция затрат на обработку транспортных блоков в узле i .

Требуется выбрать структуру сети, при которой достигается минимум функционала:

$$\sum_{kl \in E} C_{\text{тр}}^{kl}(w_{kl}, d_{kl}) + \sum_{i=1}^n C_{\text{сорт}}^i(a_i, q_i) + \sum_{i=1}^n C_{\text{груз}}^i(u_i), \quad (1)$$

где

$$a_i = a_{ij} + \sum_{j=1, j \neq i}^n (a_{ij} + a_{ji}) + y_i, \quad y_i = \sum_{j \neq i, kl \in S} y_{kl}^i, \quad i=1, n,$$

$$q_i = q_{\text{вн}}^i + \sum_{j=1}^n \delta_{ij}, \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } u_{ij} \neq 0, \\ 0, & \text{если } u_{ij} = 0, i=1, n, \end{cases}$$

$$u_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n (u_{ij} + u_{ji}), \quad i=1, n,$$

при ограничениях:

$$y_i \leq h_i, i = 1, n, (2)$$

$$f_{kl} < w_{kl}, w_{kl} \in \{w_1, w_2, \dots, w_\alpha\}, \text{ для всех } kl \in E, (3)$$

$$t_{ij} \leq T_{ij}, ij \in S, (4)$$

$$v_{ij} \leq v_{\text{макс}}, ij \in S, (5)$$

$$t_{\text{ср}} = 1 / u_\Sigma \sum_{kl \in E} f_{kl} / (w_{kl} - f_{kl}) \leq T_{\text{макс}}, \text{ где } u_\Sigma = \sum_{ij \in S, i \neq j} u_{ij}, (6)$$

$$x_{ij}, u_{ij} - \text{целые неотрицательные числа.} (7)$$

Первая составляющая функционала определяет транспортные затраты, вторая – затраты на сортировку, а третья - затраты на обработку транспортных блоков (контейнеров). Условия (2) представляют собой ограничения на пропускные способности узлов, (3) – пропускные способности дуг, (4) - время доставки исходных потоков адресату, (5) - число слияний исходных потоков с другими потоками, (6) – среднее время задержки потоков.

Сформулированная задача (1)-(7) относится к классу дискретных многопродуктовых задач с нелинейным и невыпуклым функционалом и является NP-полной. Сложность ее решения приводит к необходимости разработки комбинаторных приближенных методов, использующих специфику структуры задачи, различные схемы агрегирования и декомпозиции, эвристические приемы и интерактивный режим поиска решения.

Интуитивно ясно, что для выбора оптимальной структуры сети нужно в процессе решения задачи каким-то образом генерировать различные варианты множеств N_1, N_2, N_3 , сравнивать значения функции цели для каждого варианта и таким образом определить искомый минимум. Комбинаторное число вариантов состава множеств N_1, N_2, N_3 растет экспоненциально, поэтому полный перебор вариантов решения просто невыносим. Одним из главных факторов, влияющих на выбор претендентов на узлы 2-го и 3-го типа, является начальный суммарный поток av в узлах сети, когда $y = 0$. Очевидно, что, чем он меньше, тем у соответствующего узла больше шансов попасть в множество $N_2 \cup N_3$. Поскольку узлы 2-го и 3-го типа отличаются друг от друга только тем, что в узлах 2-го типа разрешена обработка транзитных транспортных блоков, будем принимать, что изначально в множество $N_2 \cup N_3$ выбираются узлы 3-го типа. Если в процессе решения задачи в отдельных введенных узлах 3-го типа появляются транзитные

Розділ 3. Науково-технологічна безпека та інтелектуальні ресурси

потоки транспортних блоків, то вони отримують статус вузлів 2-го типу. Другими критеріями відбору кандидатів в вузли множини $N_2 \cup N_3$ можуть бути дані про відсутність під'їзних шляхів, площадок для установки сортировального обладнання і контейнерних терміналів (для транспортних мереж), мережевого обладнання і сучасних ПЕВМ, кваліфікованого обслуговуючого персоналу і інші складноформалізовані фактори. Всі такі дані повинні присутувати в базі знань автоматизованої системи підтримки прийняття рішень і бути доступними для диспетчерів транспортних систем і адміністраторів мереж передачі даних.

Резюмуючи вищесказане, можна визначити загальну стратегію евристичного алгоритму оптимізації структури мережі:

1) Початкова структура мережі визначається диспетчерами і адміністраторами на основі досвіду, практичних знань і даних в базі знань, формується множина $N_{\text{канд}}$ кандидатів (претендентів) в $N_2 \cup N_3$. Всім вузлам з $N_{\text{канд}}$ присвоюється статус вузлів 3-го типу;

2) Початкові сумарні потоки $a_i, i=1, n$ вузлах мережі упорядковуються по неубуванню їх величини. Формується відповідний список номерів вузлів, причому, в початку списку знаходяться тільки вузли з множини $N_{\text{канд}}$. Далі, після останнього вузла з $N_{\text{канд}}$, йдуть вузли 1-го типу. До множини вузлів з $N_{\text{канд}}$ може бути додано вказане число вузлів 1-го типу, розташованих після останнього вузла з $N_{\text{канд}}$ і також являються потенційними кандидатами в $N_2 \cup N_3$;

3) Алгоритм послідовно, з накопиченням, вибирає з списку вузли, включає їх в множину $N_2 \cup N_3$ і вирішує задачу (1-7). В процесі рішення задачі і виснаженні списку кандидатів $N_{\text{канд}}$, визначається структура мережі з мінімальним значенням функції цілі (1). Після рішення задачі множина $N_2 \cup N_3$ може виявитися порожньою, т.е. всі вузли мережі повинні бути вузлами 1-го типу. Якщо по будь-яким причинам множина $N_{\text{канд}}$ не була вказана, то алгоритм повинен сам упорядкувати всі вузли мережі в списку по неубуванню їх сумарних потоків, запросити верхню межу числа вузлів з множини $N_{\text{канд}}$ і перейти в режим оптимізації.

Як видно з опису загальної схеми алгоритму вибору оптимальної структури мережі, для кожного знову включеного вузла з $N_{\text{канд}}$ в множину $N_2 \cup N_3$ необхідно вирішувати задачу (1-7). Для аналізу рішення цієї задачі розглянемо сутність перетворення мелкопартионних потоків в процесі оптимізації їх упаковок в транспортні блоки. Перетворення будь-якого вихідного потоку X_{ij} заключається в виконанні наступних дій :

$$\begin{aligned} X'_{ik} &\leftarrow X_{ik} + X_{ij}, \\ X'_{kj} &\leftarrow X_{kj} + X_{ij}, \end{aligned} \tag{8}$$

$$y_{ij}^k \leftarrow x_{ij}, x_{ij} \leftarrow 0.$$

Где " \leftarrow " знак операции присваивания; k - узел, через который выполняется преобразование, $k \in K$, K - множество узлов-претендентов, через которые может быть выполнено преобразование потока x_{ij} без нарушения всех заданных ограничений. При этом поток x_{ij} сливается с потоками x_{ik} и x_{kj} , а в узле k появляется транзитный поток. Соответственно изменяются и переменные U_{ij}, U_{ik} и U_{kj} . На последующих итерациях алгоритма для потоков x_{ik} и x_{kj} вновь может быть выполнено преобразование (8). Независимо от того, как будет осуществляться преобразование потоков на каждом шаге алгоритма упаковок - выбираться только один поток или некоторое подмножество потоков, ясно, что на каждой итерации необходимо решать задачу балансировки матрицы межузловых потоков в транспортных блоках $U = \| u_{ij} \|_{n \times n}$ (такая задача возникает для транспортных сетей из-за образования в отдельных узлах сети избытка и недостатка порожних транспортных блоков - контейнеров) и задачу маршрутизации (распределения) потоков. Из-за большой размерности и сложности сформулированной задачи решать эти дополнительные задачи на каждой итерации алгоритма оптимизации структуры сети и каждой итерации вложенного алгоритма оптимизации упаковок не представляется возможным.

Покажем, что для решения задачи выбора структуры сети можно отказаться от решения задачи балансировки матрицы межузловых потоков и задачи маршрутизации потоков. Для этого нужно доказать утверждение о том, что выбор структуры сети слабо зависит от пропускных способностей ее дуг $w_{kl}, w_{kl} \in \{w_1, w_2, \dots, w_\alpha\}$, для всех $kl \in E$ (грузоподъемности транспортных средств или пропускной способности каналов связи). Для доказательства этого факта рассмотрим несколько иную постановку задачи (1-7).

Найти структуру сети, при которой достигается минимальное значение функционала

$$\sum_{ij \in S} C_{\text{тр}}^{ij}(u_{ij}, d_{ij}) + \sum_{i=1}^n C_{\text{сопт}}(a_i, q_i) + \sum_{i=1}^n C_{\text{груз}}(u_i), \quad (9)$$

при ограничениях (2-5), (7).

В постановке задачи (9), (2-5), (7), которую назовем задачей формирования потоков транспортных блоков в магистральной сети (или задачей упаковок транспортных блоков), не учитываются ограничения на пропускные способности дуг (3) и ограничения на среднее время задержки потоков (6). Первая составляющая функционала (1), определяющая транспортные затраты, заменена на другую, зависящую от объемов передаваемых потоков u_{ij} и расстояний d_{ij} между i и j для всех $ij \in S$.

Розділ 3. Науково-технологічна безпека та інтелектуальні ресурси

В работе [2], при анализе задачи выбора пропускных способностей дуг сети было доказано, что дискретную ступенчатую функцию $C_{\text{тр}}^{kl}(w_{kl}, d_{kl})$ можно заменить на любую функцию удельной стоимости передачи потока объема U_{ij} на расстояние d_{ij} от пропускной способности $W_{\xi} \in \{W_1, W_2, \dots, W_{\alpha}\}$, $\xi = 1, \alpha$. Так, например, можно принять

$$C_{\text{тр}}^{ij}(u_{ij}, d_{ij}) = u_{ij}(k_{\xi_1}^{\xi} + k_{\xi_2}^{\xi} d_{ij}) / w_{\xi},$$

для всех $ij \in S$, где $k_{\xi_1}^{\xi}$, $k_{\xi_2}^{\xi}$ - заданные коэффициенты.

Если при решении задачи оптимизации структуры сети выбрать для всех дуг наименьшую пропускную способность (W_1), то можно гарантировать, что значение $\sum_{kl \in E} C_{\text{тр}}^{kl}(w_{kl}, d_{kl})$ будет минимальным. Этот факт и то обстоятельство, что функции $C_{\text{сорт}}^i(a_i, q_i)$ и $C_{\text{груз}}^i(u_i)$ явно не зависят от W_{ξ} и при увеличении W_{ξ} сумма затрат $C_{\text{сорт}}^i(a_i, q_i) + C_{\text{груз}}^i(u_i)$ при заданных исходных потоках почти не изменяется, позволяют утверждать о правомерности сделанной подмены первой составляющей функционала (1) и дают возможность решения задачи выбора структуры сети независимо от пропускных способностей ее дуг. Таким образом, после выбора структуры сети можно перейти к отдельному решению задач выбора пропускных способностей дуг, балансировки матрицы межузловых потоков, маршрутизации и определению величины действительных транспортных затрат. Следует также отметить, что при увеличении величины W_{ξ} уменьшаются значения $t_{\text{ср}}$, т. е. имеется возможность получения верхней оценки величины реальной пропускной способности дуг, при которой начинает выполняться ограничение (6). Утверждение доказано.

При решении задачи (9), (2-5), (7) на каждой итерации алгоритма выбора структуры сети необходимо распределять исходящие потоки из узлов 2-го и 3-го типов в зональных сетях в соответствии с принципами зонально-узловой сортировки, согласно которым исходящий поток из этих узлов направляется (рассортировывается) в узлы первого типа, лежащие на границе зон их обслуживания. В отдельной работе авторов будет показано, что такая задача может быть сведена к задаче линейного программирования без учета ограничений на пропускные способности дуг и для ее решения могут быть использованы методы декомпозиции Данцига - Вулфа и релаксации ограничений Розена. Для практического решения задачи в реальных сетевых структурах, всегда функционирующих в условиях неопределенности, воздействия случайных факторов, динамически изменяющихся с течением времени ресурсов, а также при недостаточной точной исходной информации, будут предложены алгоритмы, основанные на методах построения кратчайших путей.

После распределения потоков из узлов 2-го и 3-го типов на вход задачи упаковок транспортных блоков поступают преобразованная матрица потоков A и

вектор $Y = \{y_i\}$, $i = 1, n$, в котором просуммированы дополнительные объемы обработки исходных потоков от преобразованных потоков узлов второго и третьего типов. К правым частям ограничений (2) добавляются соответствующие значения вектора Y , так как распределение потоков из узлов 2-го и 3-го типа осуществляется по принципам зонально-узловой сортировки и эти потоки должны быть обработаны безусловно. В процессе работы алгоритма оптимизации упаковок на каждой его итерации возрастают затраты на сортировку за счет появления новых транзитных потоков, а транспортные затраты и затраты на обработку транспортных блоков уменьшаются. В работе [3] было показано, что в качестве критерия выбора исходных потоков для преобразования (8) следует использовать неувеличение транспортных блоков после операции преобразования. Там же, а также в работе [4] был предложен ряд алгоритмов решения задачи оптимизации упаковок, основанных на общей схеме метода последовательного анализа вариантов и эвристических соображениях, существенно опирающихся на специфику комбинаторной структуры задачи. Первая группа алгоритмов применяется для решения задачи в случае заданных функций затрат на транспортировку (передачу) и обработку потоков, вторая группа - эвристические алгоритмы, используются, когда нет твердой уверенности в адекватности предлагаемых функций затрат, а также в случае, когда функции затрат вообще не заданы. Эвристические алгоритмы не используют в своей работе функции затрат, но полученное ими решение задачи все равно оценивается. Для оценки выполняется расчет по встроенным в программу конкретным функциям годовых приведенных затрат. Так, например, при проведении численных экспериментов решения задачи выбора структуры сети с помощью пакета программ [5] были использованы функции затрат следующего вида:

$$C_{\text{тр}}^{ij}(u_{ij}, d_{ij}) = u_{ij}(k_{1\xi}^i + k_{2\xi}^i d_{ij}) / w_{\xi}, \quad ij \in S, w_{\xi} \in \{w_1, w_2, \dots, w_{\alpha}\}, \xi = 1, \alpha;$$

$$C_{\text{сорт}}^i(a_i, q_i) = k_3^i a_i e^{\uparrow} - (k_4^i a_i / (1 + q_i)), \quad i = 1, n; \quad (10)$$

$$\overline{C}_{\text{груз}}^i(u_i) = \sqrt{k_5^i u_i^2 + k_6^i u_i}, \quad i = 1, n, \text{ где } k_{1\xi}^i, k_{2\xi}^i, k_3^i, k_4^i, k_5^i, k_6^i -$$

заданные коэффициенты.

Следует отметить, что при решении задачи упаковок рассчитываются и сравниваются только нижние оценки транспортных затрат и затрат на обработку транспортных блоков. Реальные оценки этих затрат могут быть получены только после решения задач балансировки матрицы межузловых потоков и маршрутизации (распределения) сформированных потоков транспортных блоков на транспортной сети или сети передачи данных. Как видно из постановки задачи,

Розділ 3. Науково-технологічна безпека та інтелектуальні ресурси

в затратах на обработку транспортных блоков в узлах сети учитываются только исходящие и входящие потоки, - транзитные потоки не учитываются. Для транспортных сетей не учитываются затраты на перевозку и обработку порожних контейнеров. Затраты на сортировку исходных потоков в узлах сети отражают реальные затраты, при условии, что при решении задачи используются адекватные процессам сортировки функции затрат.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Перейдем к описанию и анализу результатов численных экспериментов решения задачи выбора структуры сети. Для проведения экспериментов была выбрана сгенерированная датчиком случайных чисел транспортная сеть с числом узлов $n=30$ и числом исходящих дуг из каждого узла (валентностью узлов) $val=5$. Длины дуг d_{kl} , $kl \in E$ генерировались в пределах от 80 до 300 км; объем транспортного блока ω принимался равным 40 единицам грузов; грузоподъемность транспортных средств WC (параметр W_{ξ} в модели) $\in \{10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 65\}$ транспортных блоков; время на обработку (сортировку) исходных потоков в узлах сети 1 сутки; время на транзитную перегрузку транспортных блоков в узлах сети 0,5 суток; средняя скорость движения транспортных средств - 80 км/час; пропускные способности узлов по обработке транзита h_i , $i=1, n$ принимались равными 800 единиц исходных потоков в сутки для всех узлов сети; максимальное время доставки исходных потоков адресату $T_{ij}=15$ суток для всех $ij \in S$; максимальное число слияний исходных потоков $FSMAX$ (параметр v_{\max} в модели) не ограничивалось; средняя задержка транспортных блоков в сети $t_{\text{ср}}$ рассчитывалась, а их максимальная задержка T_{\max} не ограничивалась. Исходящие потоки из узлов сети также задавались датчиком случайных чисел для трех интенсивностей роста суммарных потоков в узлах: A1 - слабый рост, A2 – средний рост, A3 – более крутой рост (см. рис. 2). В качестве функций затрат использовался конкретный вид формул (10) в условных единицах стоимости. Для расчета времени доставки исходных потоков конечному адресату применялись формулы, приведенные в работе [2].

Начальная структура сети генерировалась так, чтобы каждый узел 3-го типа был связан в своей зоне обслуживания только со смежными узлами 1-го типа. Это ограничение позволяет для любой сети с заданными параметрами n и val сгенерировать строго определенное число узлов 3-го типа и придать структуре сети более правдоподобный вид. Для сети с $n=30$ и $val=5$ было сгенерировано 10 узлов 3-го типа. Параметры датчика случайных чисел для генерации исходящих потоков из узлов 3-го и 1-го типа подбирались так, чтобы в начале списка кандидатов $N_{\text{канд}}$ оказались только узлы 3-го типа, а далее шли узлы 1-го типа, причем на границе разрыва узлов разного типа не было резких скачков в сторону

уменьшения или увеличения суммарных потоков в узлах сети (см. рис. 2). Для всех вариантов решения задачи выбора структуры сети к начальному множеству $N_{\text{канд}}$ узлов 3-го типа добавлялось 6 узлов 1-го типа, расположенных непосредственно за последним узлом 3-го типа в списке кандидатов.

Для практического доказательства утверждения о том, что выбор структуры сети слабо зависит от пропускных способностей ее дуг, была решена задача упаковок (9), (2-5),(7) для значений $WC \in \{10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 65\}$ и суммарных потоков узлов A2. Задача решалась с помощью приближенных и эвристических алгоритмов, при этом для каждого WC фиксировались значения следующих параметров: $C_{\text{полн}}$ – полных затрат или функции цели; $C_{\text{тр}}$ – транспортных затрат; $C_{\text{сорт}}$ – затрат на сортировку; $C_{\text{гр}}$ – грузовых затрат на погрузку-выгрузку транспортных блоков; $C_{\text{сорт}} + C_{\text{гр}}$ – суммы сортировочных и грузовых затрат; N_3 – числа узлов 2-го и 3-го типов в оптимизированной структуре

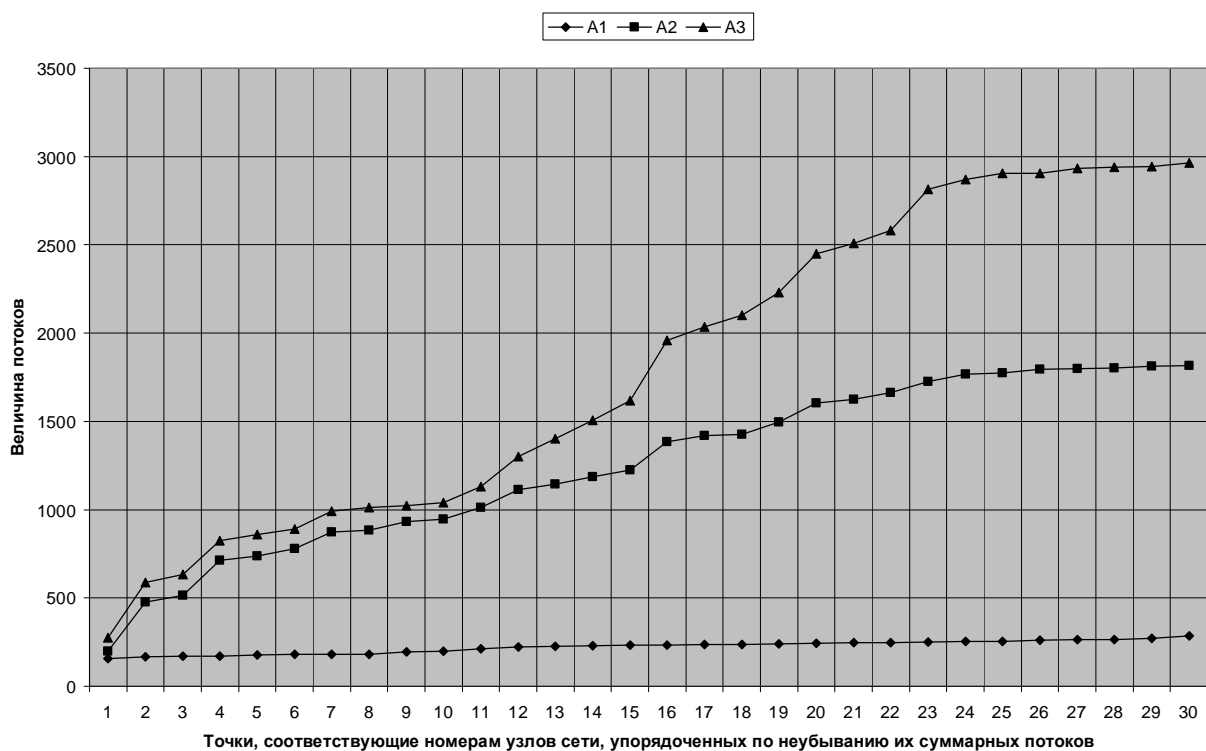


Рис. 2. Графики потоков A1, A2, A3

сети; $t_{\text{ср}}$ – среднего времени задержки в сети; FS (параметр v_{ij} в модели) – числа слияний исходных потоков с другими потоками (уровня сортировки потоков), при котором получено наилучшее решение; KZ– среднего коэффициента загрузки транспортного блока; Конт.– числа транспортных блоков (контейнеров), необходимых для единовременной передачи всех исходных потоков в сети; Сорт.– среднего числа магистральных направлений сортировки потоков в узлах сети; $T_{\text{ср}}$ – среднего времени доставки исходных потоков грузов получателю.

Как видно из графиков на рис. 3 и 4, при увеличении пропускной способности WC всех дуг от 10 до 65, полные и транспортные затраты уменьшаются, а затраты

Розділ 3. Науково-технологічна безпека та інтелектуальні ресурси

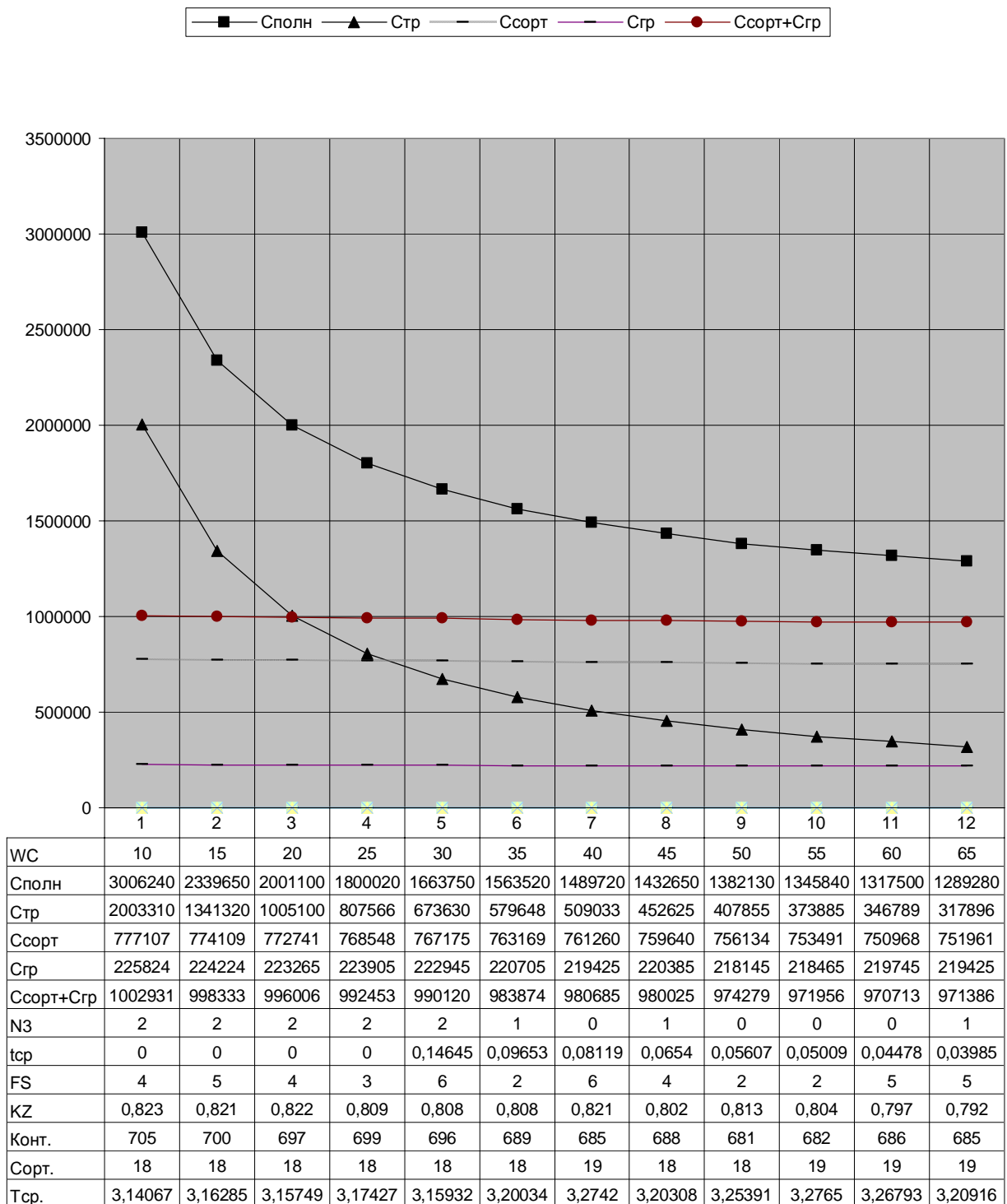


Рис. 3. Значения параметров в точках после решения задачи выбора оптимальной структуры сети приближенными алгоритмами

на сортировку, грузовые затраты и их сумма изменяются незначительно. Для приближенных алгоритмов отклонение значений параметра $C_{\text{сорт}} + C_{\text{гр}}$ от минимального – 970713 при $WC = 60$ до максимального - 1002931 при $WC =$

Екологічна безпека та природокористування

10составляет 32218 или 3,32 %. Для эвристических алгоритмов отклонение значений этого параметра от минимального – 1018995 при WC = 55 до максимального - 1064420 при WC = 10 составляет 45425 или 4,46 %.

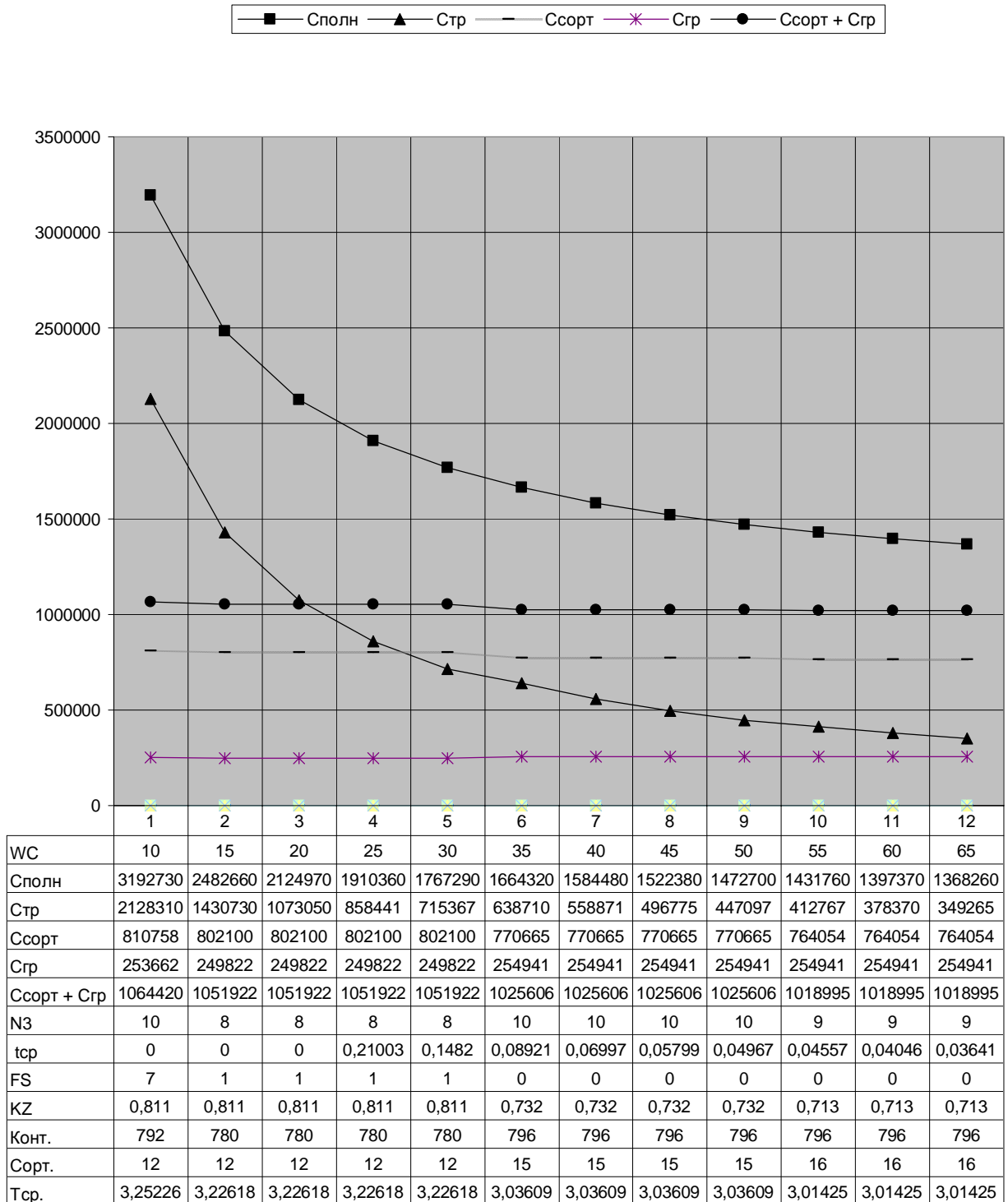


Рис. 4. Значения параметров в точках после решения задачи выбора структуры сети эвристическими алгоритмами

Розділ 3. Науково-технологічна безпека та інтелектуальні ресурси

Минимальные значения параметра $C_{\text{сорт}} + C_{\text{гр}}$ для приближенных и эвристических алгоритмов отличаются на 48282 условных единиц стоимости или на 4,97 %.

Для первой группы алгоритмов при увеличении значений WC от 10 до 30 в структуру сети было введено 2 узла 2-го и 3-го типа, при дальнейшем увеличении WC наблюдалось уменьшение числа таких узлов с 2 до 1 и 0. Для эвристических алгоритмов число вводимых в структуру сети узлов 2-го и 3-го типа с увеличением WC изменялось в пределах от 8 до 10. Такое поведение алгоритмов можно объяснить тем, что первые в процессе своей работы используют функции затрат, а вторые – нет. При увеличении WC до 30 в приближенных алгоритмах с точки 5 (см. рис. 3) транспортные затраты $C_{\text{тр}}$ становятся меньше затрат на сортировку $C_{\text{сорт}}$ и дальнейшее введение узлов 2-го и 3-го типа в структуру сети препятствуется возрастанием удельного веса сортировочных затрат по сравнению с транспортными в значении полных затрат. Эвристические алгоритмы в процессе работы стремятся максимально уменьшить число транспортных блоков Конт.и ввести в структуру сети как можно больше узлов 2-го и 3-го типа, а оценивают затраты только после решения задачи. Как было показано в работе [4], лучшие эвристические алгоритмы упаковок дают решения, отличающиеся от решений, полученных приближенными алгоритмами не более чем на 10 %. В нашем случае, в точках минимальных значений параметра $C_{\text{сорт}} + C_{\text{гр}}$, полные затраты $C_{\text{полн}}$ составляют 1317500 и 1431760 условных единиц стоимости соответственно для приближенных и эвристических алгоритмов и отличаются на 8,67 %.

Важным параметром, влияющим на выбор окончательной структуры сети, является среднее время задержки потоков $t_{\text{ср}}$. Параметр принимает значение infin , когда пропускной способности дуг сети, заданной параметром WC , недостаточно для передачи всех транспортных блоков из источников в стоки, т. е. когда условия (3) в задаче (1)-(7) не выполняются. Увеличивая значения WC при решении задачи упаковок, можно добиться выполнения условий (3), а также условия (6) – наиболее значимого для сетей передачи данных. Поэтому для выбора окончательной структуры сети (2,1,0 узлов 2-го и 3-го типа для приближенных алгоритмов или 8,9,10 узлов для эвристических), следует выбирать вариант при котором $t_{\text{ср}}$ принимает первое значение, отличное от infin . Для нашего случая, это значения $t_{\text{ср}} = 0,14645$ при $WC = 30$ и $N3 = 2$ и $t_{\text{ср}} = 0,21003$ при $WC = 25$ и $N3 = 8$ соответственно для приближенных и эвристических алгоритмов. Для удобства сравнения решений задачи выбора структуры сети различными алгоритмами в зависимости от интенсивности роста суммарных потоков узлов – $A1, A2, A3$ при одинаковой пропускной способности дуг WC , примем для эвристических алгоритмов вариант $t_{\text{ср}} = 0,1482$ при $WC = 30$ и $N3 = 8$.

Итак, принимаем структуру сети для приближенных и эвристических алгоритмов, которая была получена при значениях всех параметров в точке 5,

когда транспортные затраты становились меньше затрат на сортировку (см. рис. 3 и 4). В этой точке для групп алгоритмов значения параметра $C_{\text{сорт}} + C_{\text{гр}}$ отличаются на 61802 условных единиц стоимости или на 6,24 %, а значения параметра $C_{\text{полн}}$ на 103540 единиц или на 6,22 %.

Перейдем к обсуждению результатов решения задачи выбора структуры сети, полученных при фиксированной пропускной способности дуг $WC = 30$ и различных интенсивностях роста суммарных потоков узлов $A1, A2, A3$. На рис. 5 и 6 приведены графики изменения полных затрат $C1п, C2п, C3п$ в зависимости от числа узлов 2-го и 3-го типа, включаемых в структуру сети и интенсивности потоков $A1, A2, A3$ соответственно для приближенных и эвристических алгоритмов. В множество кандидатов узлов $N_{\text{канд}}$ в узлы 2-го и 3-го типа включалось 16 узлов, из которых 6 узлов имели первоначальный статус узлов 1-го типа. В таблицах значения полных затрат $C1п, C2п, C3п$ приведены в масштабе 1:1000. Из графиков и таблиц видно, что для приближенных алгоритмов для потоков $A1$ лучшая структура сети была получена при $N3 = 2$ ($C1п = 534570$), для $A2$ при $N3 = 2$ ($C2п = 1663750$), для $A3$ при $N3 = 1$ ($C3п = 2191650$). Для эвристических алгоритмов лучшие результаты были получены для $A1$ при $N3 = 10$ ($C1п = 577278$), для $A2$ при $N3 = 8$ ($C2п = 1767290$), для $A3$ при $N3 = 4$ ($C3п = 2309190$). Соответствующие отклонения лучших решений для групп алгоритмов составили 7,99 %, 6,22 % и 5,36 %, т. е. при увеличении потоков уменьшается

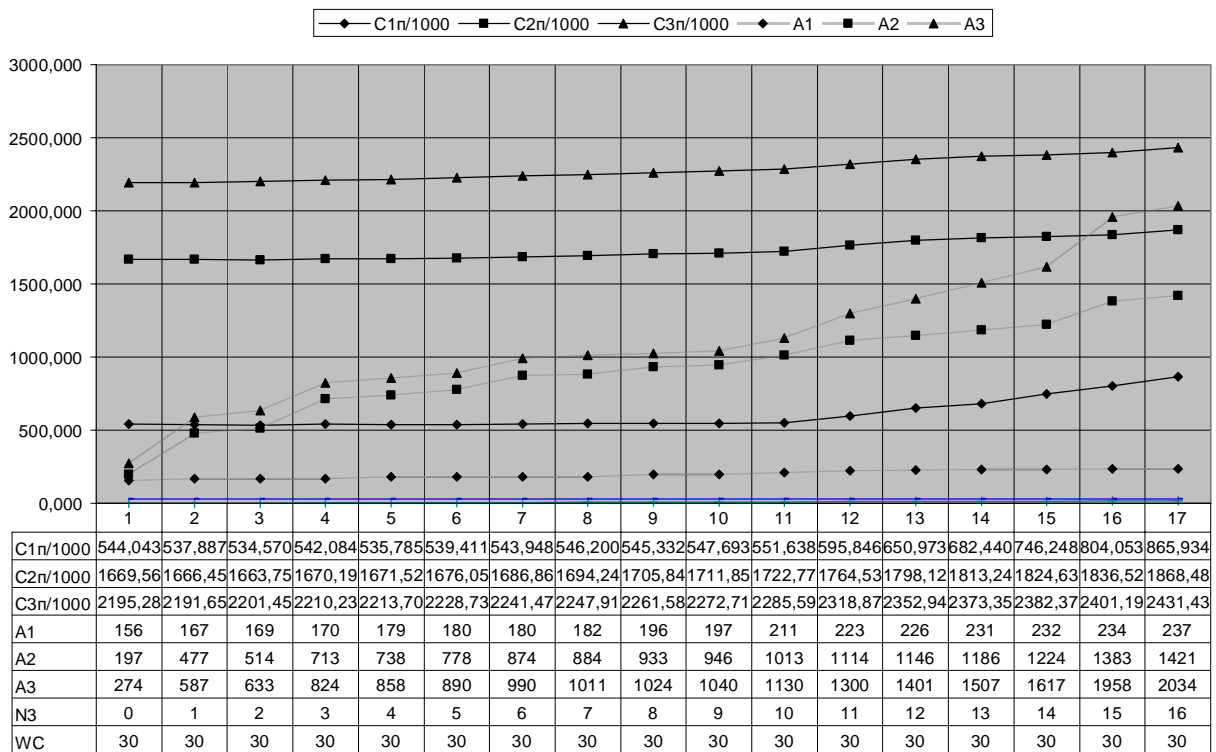


Рис. 5. Графики изменения полных затрат в зависимости от числа узлов 2-го и 3-го типа, включаемых в структуру сети приближенным алгоритмом

Розділ 3. Науково-технологічна безпека та інтелектуальні ресурси

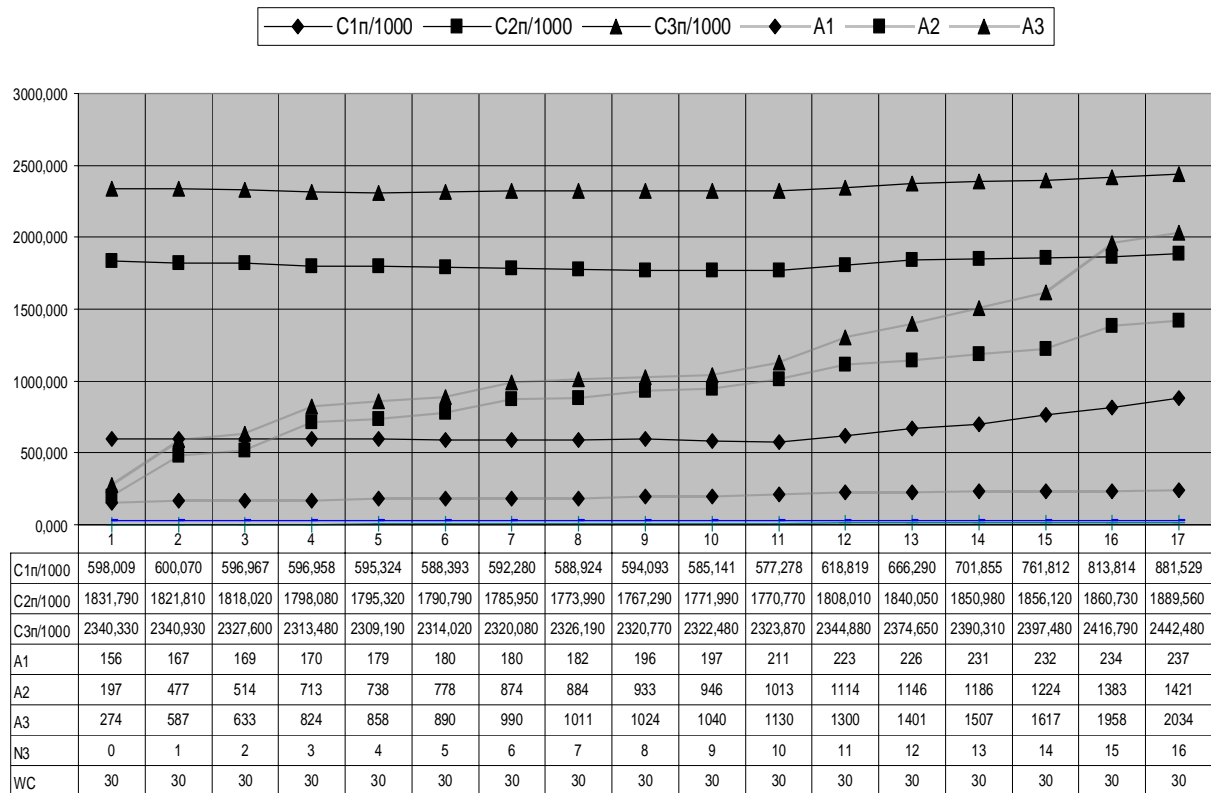


Рис. 6. Графіки изменения полных затрат в зависимости от числа узлов 2-го и 3-го типа, включаемых в структуру сети эвристическим алгоритмом

разница между результатами полученными приближенными и эвристическими алгоритмами. Результаты расчетов показывают и подтверждают интуитивное предположение, что при увеличении суммарных потоков узлов уменьшается общее число узлов 2-го и 3-го типов, включаемых в структуру сети. Отметим также, что для заданной сети и потоков A1, A2, A3 в множество $N_2 \cup N_3$ не было введено ни одного узла 1-го типа из первоначально включенных в $N_{\text{канд}}$.

Для наглядного представления полученных результатов на рис. 7 показана гистограмма распределения затрат после решения задачи выбора структуры сети для приближенных и эвристических алгоритмов, полученная по данным, приведенным в таблице. В таблице в столбцах с заголовком «До оптим.» приведены значения параметров после решения задачи распределения исходящих потоков из узлов 2-го и 3-го типов в зональных сетях в соответствии с принципами зонально-узловой сортировки для выбранной структуры сети. При этом значение $FS = 0$. В процессе решения задачи упаковок (9),(2-5),(7) параметр FS увеличивается на единицу на каждой итерации алгоритма для поиска наилучшего решения. Алгоритм останавливается, когда не выполняются ограничения (5) или когда значение функции цели ($C_{\text{полн}}$) перестает изменяться. В таблице показаны значения параметра FS, при которых был достигнут лучший результат. В строках таблицы с заголовками «Эфф.», «WCмакс.», «Транз.»

«Тмин.», «Тмакс.» соответственно приведены значения относительного эффекта ($C_{полн}$ до оптимизации - $C_{полн}$ после оптимизации), максимальной загрузки дуг сети в транспортных блоках, объемов транзита в узлах сети в исходных единицах потока, минимального и максимального времени доставки исходных потоков (грузов) из источников в стоки.

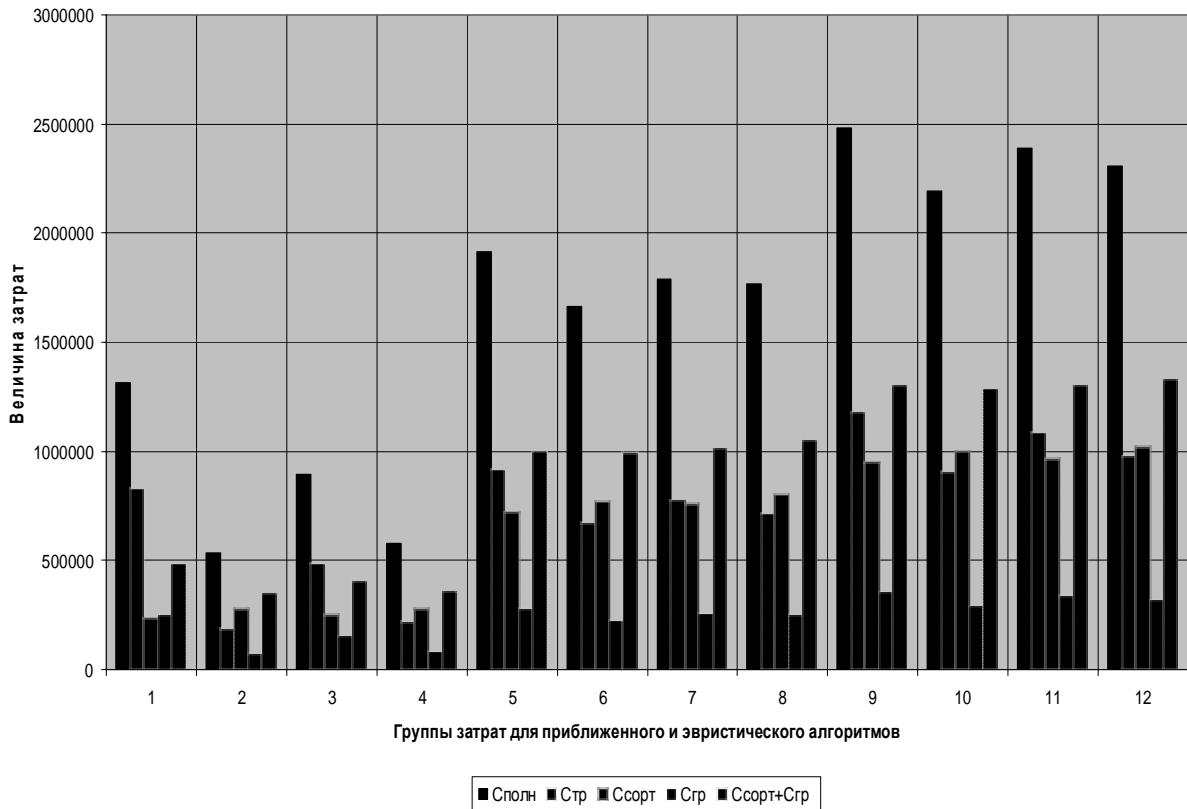


Рис. 7. Гистограмма распределения затрат после решения задачи выбора структуры сети

В заключение обсуждения экспериментальных исследований отметим, что аналогичные по характеру поведения численные результаты были получены при решении задачи выбора структуры сети передачи данных, а также при проектировании структуры сетей большой размерности ($n=300$ и $n=600$ при $val=5$). Для сети с $n=300$ в множество $N_{канд}$ было автоматически введено 75 узлов 3-го типа и добавлено 30 узлов 1-го типа. Потоки генерировались с интенсивностью A_2 , а пропускные способности узлов по обработке транзита $h_i, i=1, n$ были увеличены до 1500 единиц. Значения остальных параметров, кроме WC , не изменялись.

Решение задачи для $WC = 40$ и $WC = 6550$ выполнялось эвристическими алгоритмами с целью максимального сокращения времени расчета. Для первого значения параметра WC в структуру сети было введено 86 узлов 2-го и 3-го типа и 214 узлов 1-го типа, для второго – 81 2-го и 3-го типа и 219 1-го типа. То есть с

Розділ 3. Науково-технологічна безпека та інтелектуальні ресурси

Таблица Значения параметров в «оптимальных» точках после решения задачи выбора структуры сети приближенным и эвристическим алгоритмами при заданной грузоподъемности транспортных средств (параметр WC) для потоков с интенсивностями A1, A2, A3 (см.рис. 2)

Параметры	Потоки A1, WC=30						Потоки A2, WC=30						Потоки A3, WC=30					
	Прибл. алгоритм		Эврист. алгоритм		Прибл. алгоритм		Эврист. алгоритм		Прибл. алгоритм		Эврист. алгоритм		Прибл. алгоритм		Эврист. алгоритм			
	До оптим	После оптим	До оптим	После оптим	До оптим	После оптим	До оптим	После оптим	До оптим	После оптим	До оптим	После оптим	До оптим	После оптим	До оптим	После оптим		
Номер точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12						
WC	30	30		30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30		
N3	2	2	10	10	2	2	8	8	1	1	4	4						
Сполн	1312900	534570	891889	577278	1913720	1663750	1789360	1767290	2481560	2191650	2388190	2309190						
Стр	829120	185369	487959	215651	915484	673630	775023	715367	1175490	905065	1083900	977847						
Ссорт	235233	276961	250419	280109	720255	767175	757796	802100	951612	996765	967752	1017530						
Сгр	248542	72239	153511	81518,1	277979	222945	256541	249822	354452	289818	336534	313816						
Ссорт+Сгр	483775	349200	403930	361627,1	998234	990120	1014337	1051922	1306064	1286583	1304286	1331346						
Эфф.	-	778330	-	314611	-	249970	-	22070	-	289910	-	79000						
top	0,16159	0,05748	0,08865	0,05863	Infinit	0,14645	Infinit	0,1482	Infinit	Infinit	Infinit	Infinit						
WCмакс.	27	7	0	9	33	27	30	29	41	36	39	41						
FS	0	6	9	9	0	6	0	1	0	5	0	1						
KZ	0,132	0,683	0,294	0,586	0,553	0,808	0,695	0,811	0,566	0,843	0,651	0,836						
Конт.	776	225	479	868	696	689	801	780	1107	905	1051	980						
Сорт.	25	7	15	6	25	18	18	12	27	19	23	15						
Транз.	249	3115	1283	3358	557	4410	3829	7771	228	4599	1852	6901						
Тмин.	15,00000	204219	15,00000	2,04219	15,00000	2,04219	15,00000	2,04219	15,00000	2,04219	15,00000	2,04219						
Тмакс.	15,00000	9,82708	15,00000	8,67292	15,00000	6,54063	15,00000	6,06406	15,00000	7,01406	15,00000	6,01615						
Тср.	15,00000	3,78798	15,00000	3,95987	15,00000	3,15932	15,00000	3,22618	15,00000	3,15933	15,00000	3,27104						

увеличением значения WC проявляется та же тенденция к сокращению числа узлов 3-го типа, вводимых в структуру сети.

Для сети с $n=600$ в множество $N_{\text{канд}}$ было автоматически введено 159 узлов 3-го типа и добавлено 30 узлов 1-го типа. Потoki генерировались с интенсивностью A_2 , а пропускные способности узлов по обработке транзита не ограничивались. В результате решения задачи при заведомо недостаточной пропускной способности дуг ($WC = 20000$, при $WC_{\text{макс}} = 42363$) в структуру сети было включено 189 узлов 2-го и 3-го типа и 411 узлов 1-го типа, т. е. все дополнительные узлы 1-го типа потеряли свой первоначальный статус.

Проведенный анализ полученных результатов экспериментальных исследований позволяет сделать следующие выводы.

1. Внутри групп приближенных и эвристических алгоритмов решения задачи оптимизации упаковок, выбор структуры сети слабо зависит от величины пропускных способностей ее дуг.

2. Несмотря на то, что приближенные алгоритмы включают в структуру сети меньшее число узлов 2-го и 3-го типов, чем эвристические алгоритмы, обе группы алгоритмов могут с успехом применяться для решения задачи выбора структуры реальных сетей, функционирующих в условиях воздействия случайных факторов, колебаний величин исходящих потоков и изменения текущих ресурсов, так как полученные ими решения с практической точки зрения отличаются незначительно. Эвристические алгоритмы работают гораздо быстрее приближенных и в ряде случаев, когда нет необходимости в получении наилучшего решения, могут быть более предпочтительными по сравнению с приближенными.

3. При выборе окончательной структуры сети и предварительной оценке пропускных способностей WC дуг сети следует учитывать значение среднего времени задержки потоков $t_{\text{ср}}$, при котором начинают выполняться ограничения (3).

ВЫВОДЫ

1. Предложена математическая модель задачи выбора иерархической структуры многопродуктовой сети с мелкопартионными потоками и разработана общая схема эвристического алгоритма оптимизации ее структуры.

2. Доказано утверждение о том, что выбор структуры сети слабо зависит от пропускных способностей ее дуг. Доказательство подтверждено результатами экспериментальных расчетов. На основании утверждения показано, что исходная модель может быть заменена на более простую, в которой не учитываются ограничения на пропускные способности дуг сети и ограничения на среднее время задержки потоков. Использование более простой модели позволяет при решении задачи выбора структуры сети отказаться от решения трех других задач -

Розділ 3. Науково-технологічна безпека та інтелектуальні ресурси

балансировки матрицы межузловых потоков, выбора пропускных способностей дуг и маршрутизации потоков, которые могут быть решены независимо после оптимизации структуры сети.

3. Экспериментально доказано, что внутри схемы алгоритма оптимизации структуры сети могут с успехом применяться приближенные и эвристические алгоритмы оптимизации упаковок, предложенные авторами в ранее опубликованных работах.

4. Полученные результаты экспериментальных исследований для транспортных сетей справедливы и для крупномасштабных общенациональных и интернациональных сетей передачи данных, базирующихся на использовании технологии виртуальных контейнеров и схем типа опорной сети – backbone.

* * *

1. Васянин В.А. Автоматизация процессов принятия решений в многопродуктовых коммуникационных сетях с мелкопартионными дискретными потоками/В.А. Васянин, А.Н. Трофимчук // Екологічна безпека та природокористування: Зб. наук. праць, Київ, 2010, вип. 5, С. 172-213.

2. Васянин В.А. Выбор пропускных способностей дуг при оптимизации упаковок мелкопартионных потоков в многопродуктовых коммуникационных сетях/В.А.Васянин, А.Н.Трофимчук // Екологічна безпека та природокористування: Зб. наук. праць, Київ, 2011, вип. 9, С. 181-200.

3. Васянин В.А. Об одной задаче дискретной оптимизации в процессах управления перевозками на мультипоточковых транспортных сетях/В.А. Васянин // Кибернетика и вычислит. техника.- 1983.- Вып. 60.- С. 82-87.

4. Васянин В.А. Сравнительная эффективность алгоритмов оптимизации упаковок в мультипоточковых сетях /В.А. Васянин // Дискретные системы управления: Сб. науч. тр.- Киев : Ин-т кибернетики им В,М, Глушкова АН УССР, 1988.- С. 36-45.

5. Васянин В.А. Пакет программ для решения задач оптимизации распределения дискретных потоков в многопродуктовых сетях большой размерности. Рабочий макет пакета программ. Руководство пользователя.- <http://vovvas.narod.ru/userguide.doc>.

Отримано: 19.04.2012 р.