

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЛОКАЛЬНОЙ СЕТИ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

А.В. Погребной, Д.В. Погребной

Институт «Кибернетический центр» ТПУ

E-mail: Sasha@ad.ctpu.edu.ru

Сформулирована задача проектирования структуры локальной сети вычислительной системы реального времени. Предложен метод решения задачи, включающий операции построения графа передач данных между станциями сети, матрицы наличия конфликтов при доступе к магистралям сети, диаграммы совмещения параллельных передач данных. Изложение метода сопровождается пояснениями на примерах.

Введение

Рассматривается многопроцессорная вычислительная система для управления объектами с территориально распределенным оборудованием. Система относится к классу систем реального времени с жесткими ограничениями на время вычисления управляющих воздействий и строится на базе типовых станций (контроллеров) объединенных в локальную сеть. Стремление сократить время реакции системы на входные воздействия является преобладающим критерием для всех этапов проектирования таких систем. Основные задержки времени в системе приходятся на работу процессоров станций при выполнении программных модулей технологических алгоритмов, реализующих прикладные функции системы и на передачу данных между станциями в локальной сети.

Потребность в передаче данных в сети возникает всякий раз, когда при выполнении программного модуля используются ресурсы более чем одной станции. Например, модуль выполняется процессором одной станции, а программа модуля и необходимые данные хранятся в памяти других станций. Затраты времени на передачу данных между станциями сети могут оказаться соизмеримыми с временем работы процессоров при выполнении модулей. Поэтому при проектировании вычислительной системы наряду с определением числа станций, способных выполнить прикладные функции в установленное время, важно построить локальную сеть системы и план использования ее ресурсов так, чтобы сократить затраты времени на передачу данных.

Постановка задачи проектирования структуры сети

Задачу построения сети будем решать в условиях, когда минимально необходимое число станций для сети определено [1], а алгоритмы выполнения прикладных функций, составляющих основную часть программной нагрузки на вычислительную систему, представлены в форме информационного графа, построенного для модели программной нагрузки [2]. Информационный граф $G=(D,F,R)$ является двудольным взвешенным графом, где D – множество вершин данных $D=\{d_q\}$ с

указанием для каждого $d_q \in D$ размера требуемой памяти P_q , $q=1,2,\dots,Q$; F – множество вершин модулей $F=\{f_m\}$ с указанием для каждого $f_m \in F$ величины потребляемого процессорного времени T_m , $m=1,2,\dots,M$; $R=\|r_{qm}\|_{Q \times M}$ – матрица объемов данных, передаваемых между вершинами графа G .

На графе G заданно разрезание [3] на множество подграфов $\{G_i\}$, $i=1,2,\dots,n$. Число подграфов n соответствует числу станций вычислительной системы. Вершины подграфа G_i по требуемой памяти P_q и процессорному времени T_m суммарно не превышают ресурсы станции s_i по памяти $P(s_i)$ и процессорному времени $T(s_i)$. Величина $T(s_i)$ равна числу временных тактов, которые процессор станции s_i может выделить для выполнения модулей подграфа G_i за один цикл моделирования.

Разрезанию $\{G_i\}$ соответствует множество C ребер графа G , $C=\cup C_{ij}$, где C_{ij} – множество ребер, связывающих между собой подграфы G_i и G_j . Каждому ребру c_{qm} , связывающему вершину d_q и f_m в графе G , соответствует элемент r_{qm} матрицы R . Поэтому объем данных, передаваемых в сети между станциями s_i и s_j , можно определить величиной r_{ij} ,

$$r_{ij} = \sum_{c_{qm} \in C_{ij}} r_{qm}. \quad (1)$$

Таким образом, общий объем передаваемых по сети данных за один цикл моделирования для разрезания $\{G_i\}$ составит величину r ,

$$r = \sum_{i,j} r_{ij}. \quad (2)$$

Если пропускную способность магистрали сети обозначить величиной φ , определяющей объем данных, передаваемых за один такт моделирования, то для успешной работы локальной сети, построенной на базе одной магистрали, должно выполняться условие:

$$(r/\varphi)k_\varphi \leq \mu. \quad (3)$$

Здесь μ – число временных тактов в одном цикле моделирования; k_φ – коэффициент, учитывающий факторы снижения значения φ в реальной сети.

Очевидно, что решить проблему своевременной передачи данных в сети путем увеличения числа μ нельзя, так как величина r также зависит от μ . По-

этому, если условие (3) не выполняется, то это означает, что сеть на одной магистрали с параметром φ не работоспособна и необходимо принятие решений по уменьшению величины r или увеличению значения параметра φ . Среди таких решений могут быть следующие:

- найти другое разрезание с более низким значением r ;
- построить сеть на базе магистрали с более высокой пропускной способностью;
- выбрать другую структуру сети, построенную на базе нескольких магистралей.

Будем считать, что первые два вида решений исчерпаны, также как и многие другие, связанные, например, с изменением информационного графа, условий поступления входных и обновления выходных данных и другими изменениями в программной нагрузке. Рассмотрим решения по выбору структуры сети, построенной на базе нескольких магистралей с неизменной величиной φ , способной за цикл моделирования передать объем данных r . Перед изложением метода решения данной задачи приведем ряд примеров объединения нескольких магистралей в сеть и условий их загрузки при передаче данных.

Анализ базовых вариантов сетей

Число магистралей в сети ориентировочно можно определить исходя из отношения $(r/\varphi)k_{\varphi} \leq \mu$.

Полученный результат округлим в большую сторону и примем его как минимально возможное число магистралей в сети. Построим варианты структур сетей с различным числом магистралей. Варианты структур сетей будем считать базовыми и создадим для их хранения библиотеку. Базовые сети отражают различные конфигурации связи нескольких магистралей. На рис. 1 приведены примеры четырех базовых сетей.

Каждый пример базовой сети сопровождается диаграммой, которая иллюстрирует возможную загрузку магистралей сети при передаче данных между станциями. При этом предполагается, что станции подключены к каждой магистрали сети, а передача данных осуществляется как между станциями одной магистрали, так и между станциями разных магистралей. Длины отрезков, отражающих объемы передаваемых данных, приняты произвольно. Над каждым отрезком указан перечень магистралей, участвующих в передаче данных. Например, запись 1-4-2 над отрезками диаграммы (рис. 1, ε) обозначает загрузку магистралей $M1, M4, M2$ при передаче данных между станциями, подключенными к магистралям $M1$ и $M2$. Заметим также, что параллельно с этой передачей могут передаваться данные между станциями, подключенными к магистрали $M3$, то есть отрезок 3 на диаграмме рис. 1, ε , может размещаться параллельно отрезкам 1-4-2.

Анализ приведенных на рис. 1 базовых сетей по соответствующим диаграммам позволяет сделать

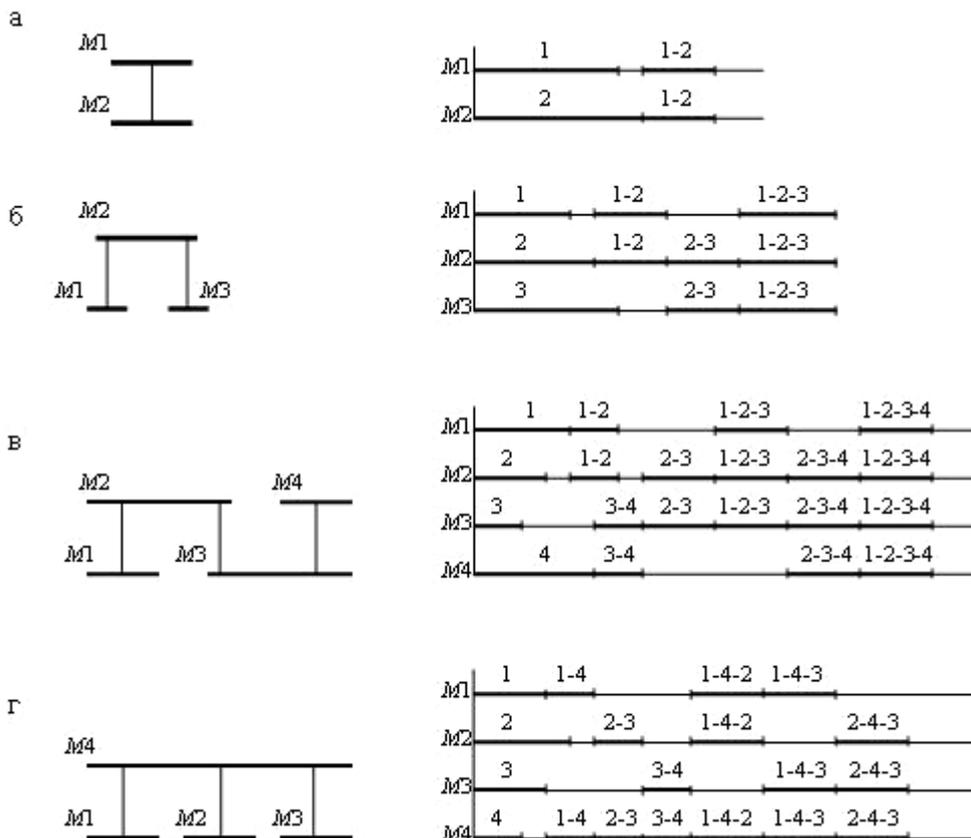


Рис. 1. Примеры базовых сетей и диаграмм загрузки магистралей

ряд выводов. В сети (а) станции желательно подключать к магистралям $M1$ и $M2$ так, чтобы отрезки 1 и 2 были примерно равны, а отрезок 1-2 был минимальной длины. Для сети (б) критичной по загрузке является магистраль $M2$. В сети (в) такими магистралями являются $M2$ и $M3$, а в сети (г) магистраль $M4$. Для данных сетей наилучшим вариантом подключения станций к магистралям будет такой вариант, который обеспечивает равную и минимальную загрузку магистралей. Например, для сети (б) условие равенства загрузки магистралей можно записать в виде: $[1]+[1-2]=[2]+[1-2]+[2-3]=[3]+[2-3]$. Здесь квадратные скобки обозначают длину соответствующих отрезков. Аналогичные условия равенства загрузки магистралей можно записать для сетей (в) и (г). Минимально возможная загрузка магистралей достигается в случае, если подключение станций к магистралям удастся выполнить таким образом, что между станциями, подключенными к разным магистралям, данные не передаются.

Метод решения задачи построения сети

При изложении метода решения задачи выбора базовой сети и варианта подключения станций к магистралям будем придерживаться примера информационного графа, представленного на рис. 2. Кругами здесь показаны данные d_q , а планками — модули f_m . У каждого ребра, связывающего вершины d_q и f_m проставлены веса r_{qm} , равные объему данных, передаваемых между вершинами d_q и f_m за один цикл моделирования [2]. Пунктирными линиями выделены подграфы разрезания и указаны номера станций, ресурсы которых занимают данные подграфы.

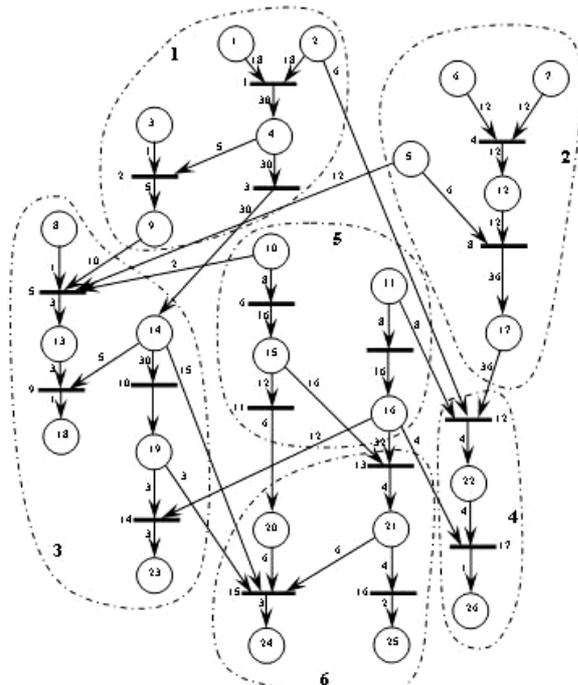


Рис. 2. Пример информационного графа

Пусть пропускная способность магистралей составляет 10 единиц объемов передаваемых данных за 1 такт, то есть величина $\varphi=10$, коэффициент $k_\varphi=1,3$, а цикл моделирования μ равен 12 тактам. Тогда для принятого варианта распределения модулей и данных по станциям можно определить ориентировочное число магистралей сети. Для этого на основе матрицы R согласно (2) вычисляем общий объем данных r , передаваемых между станциями. Для нашего примера $r=198$ единиц. Время на передачу данных составит $(r/\varphi)k_\varphi=(198/10)1,3=25,74$ тактов, что превышает цикл моделирования более чем в 2 раза. Таким образом, в сети должно быть не менее трех магистралей.

Исходя из имеющихся сведений о числе станций, распределения по ним модулей информационного графа, общей загрузке сети и рекомендации по числу магистралей, задачу выбора структуры сети можно сформулировать следующим образом. Необходимо выбрать структуру базовой сети и варианта подключения станций к магистралям сети так, чтобы по возможности большая часть данных могла передаваться между станциями сети параллельно.

Метод решения задачи основан на выявлении в структуре сети возможностей параллельных передач данных для различных вариантов подключения станций к магистралям базовой сети. С этой целью выполняется совокупность операций по построению следующих объектов:

- граф передачи данных между станциями сети;
- матрица наличия конфликтов при доступе к магистралям сети;
- диаграмма совмещения параллельных передач данных.

Граф передачи данных $P=(S,Z,R)$ строится на основе варианта распределения модулей и данных графа G по станциям и матрицы весов $R=\|r_{qm}\|$. Вершина $s_i \in S$ графа P соответствует станции s_i , на которую распределены модули и данные подграфа G_i разрезания $\{G_j\}$. Наличие ребра $z_{ij} \in Z$ соответствует тому, что подграфы G_i и G_j связаны между собой ребрами информационного графа $c_{qm} \in C_{ij}$, то есть $C_{ij} \neq \emptyset$. Каждому ребру z_{ij} графа P ставится в соответствие величина r_{ij} , которая вычисляется по выражению (1) и определяет объем данных, передаваемых между станциями s_i и s_j за один цикл моделирования.

Пример графа P , построенного для разрезания, показанного на рис. 2, представлен на рис. 3. Граф P содержит 6 вершин s_1-s_6 , по числу станций.

Веса r_{ij} ребер z_{ij} , представленные на рис. 3, получены по выражению (4) и в сумме составляют 198 единиц.

Построение матрицы наличия конфликтов Q осуществляется на основе графа P и варианта подключения станций к магистралям выбранной базовой сети. Методику построения матрицы Q покажем на рассматриваемом примере. В качестве базовой

вой структуры сети выберем вариант с тремя магистралями, представленный на рис. 1, б. На рис. 4, а, показан один из вариантов подключения станций к магистралям данной сети.

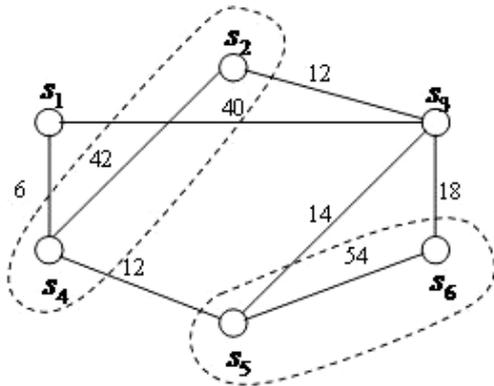


Рис. 3. Граф передачи данных P

Размерность матрицы Q определяется числом ребер графа P . Множество ребер $(z_{1,3}, z_{1,4}, z_{2,3}, z_{2,4}, z_{3,5}, z_{3,6}, z_{4,5}, z_{5,6})$ графа P обозначим соответствующими кодовыми номерами, сохранив в них номера станций. Получим множество кодовых номеров ребер

(13, 14, 23, 24, 35, 36, 45, 56) и, соответственно, номеров строк и столбцов матрицы Q . Так, например, номер ребра 24, означает наличие передач данных между станциями 2 и 4 с объемом $r_{24}=42$ единиц. Элемент q_{vk} матрицы наличия конфликтов $Q=\|q_{vk}\|$, $v, k \in (13, 14, 23, 24, 35, 36, 45, 56)$ определяется следующим образом: $q_{vk}=1$, если пары станций ребер v и k при передаче данных в сети (рис. 4, а) имеют конфликт по доступу к магистрали; $q_{vk}=0$, в противном случае.

Так, например, элемент $q_{24,45}=1$, так как при одновременной передаче данных между станциями s_2 и s_4 и станциями s_4 и s_5 имеет место конфликт за доступ к магистрали. Напротив, элемент $q_{56,13}=0$, так как и при одновременной передаче данных в парах станций s_5, s_6 и s_1, s_3 конфликта за доступ к магистрали не будет. Это объясняется тем, что в данном случае используются разные магистрали. Построенная таким образом матрица Q представлена на рис. 4, б.

В матрице Q на рис. 4, б, строки и столбцы 35, 36 выделены. Они отличаются тем, что у них все элементы $q_{vk}=1, v \neq k$. Это означает, что при передаче данных между соответствующими станциями, например, для строки 35 – это станции s_3 и s_5 , заняты все три магистрали и параллельно с парой s_3, s_5 не мо-

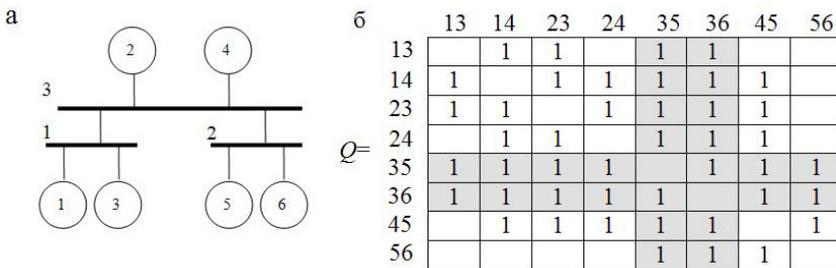


Рис. 4. Вариант сети: а) вариант подключения станций к базовой сети; б) матрица наличия конфликтов Q

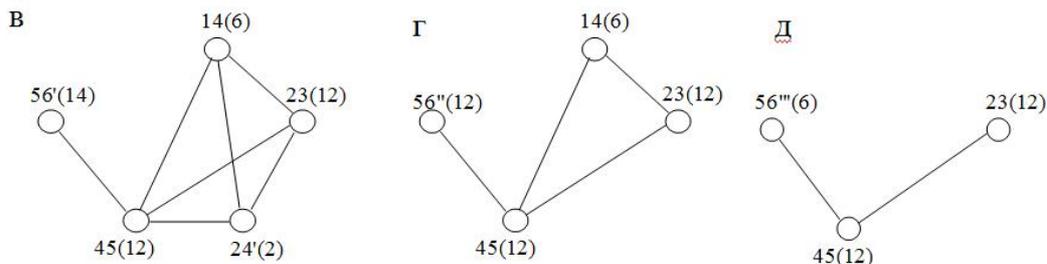
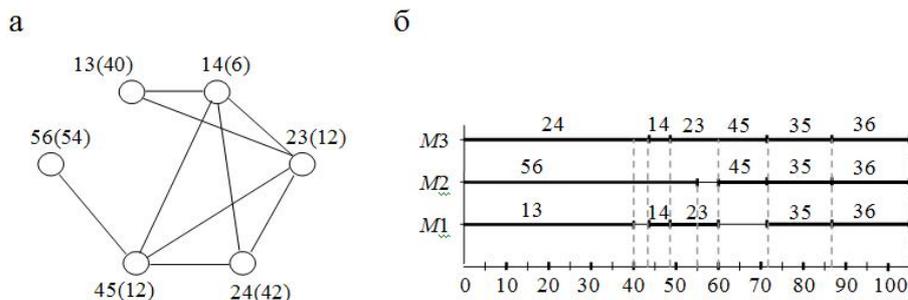


Рис. 5. Построение диаграммы совмещения: а) граф Q; б) диаграмма совмещения передач данных; в-д) преобразования графа Q при построении диаграммы

гут выполняться передачи данных между станциями во всех других парах. Поэтому выделенные строки и столбцы могут быть исключены из матрицы Q .

На основе матрицы Q строится диаграмма совмещения параллельных передач данных. Для удобства построения диаграммы матрица Q принимается в качестве матрицы связности вершин графа. Соответствующий граф Q представлен на рис. 5, а. Вершины 35, 36 в граф Q не вошли по изложенной выше причине. Включать эти вершины в граф Q нет смысла, т. к. при передаче данных в соответствующих парах станций происходит захват всех магистралей сети и, следовательно, передачи данных в других парах станций параллельно с указанными невозможны. В скобках у вершин графа Q указаны объемы данных, передаваемых между соответствующими станциями.

Для построения диаграммы в графе Q последовательно выделяются максимальные пустые подграфы [3] и объемы передач соответствующих вершин совмещаются на диаграмме (рис. 5, б). Так, на первой стадии выделяется максимальный пустой подграф, например, с вершинами 13, 56, 24 и соответствующие объемы 40, 54 и 42 единицы могут передаваться в сети параллельно и, следовательно, на диаграмме они совмещаются. Вершины с минимальным объемом передач данных исключаются из графа Q . В данном случае это вершина 13, а вершины 56' и 24' сохраняются в графе с новыми объемами 14 и 2 единицы (рис. 5, в) и помечаются штрихами. При формировании следующего максимального пустого подграфа вершины, помеченные штрихами, выбираются в первую очередь. Для графа на рис. 5, в, выбираются вершины 56' и 24'. Вершина 24' исключается, и процесс продолжается для графа на рис. 5, г. Здесь выбираются вершины 56'' и 14. Вершина 14 исключается, а для графа на рис. 5, д, максимальный пустой подграф включает вершины 56''' и 23. Обе они последовательно исключаются из графа, а оставшаяся вершина 45 отражается на диаграмме.

Заметим, что при построении диаграммы (рис. 5, б) объемы передаваемых данных для каждой вершины графа отражаются на всех магистралах, участвующих в передаче этих данных. Построение диаграммы завершается отражением объемов передач для вершин 35 и 36, помеченных в матрице Q и не вошедших в граф Q .

Из диаграммы следует, что суммарный объем передач данных в сети с учетом их совмещения составляет 104 единицы или при $\varphi=10-10,4$ времен-

ных тактов, что укладывается в цикл моделирования 12 тактов. Однако при этом коэффициент k_φ достигает лишь величины 1,15. Общий объем передач данных согласно графа P составляет 198 единиц. Таким образом, для выбранной локальной сети и варианта подключения станций, рис. 4, а, последовательная цепь передач данных за счет использования параллельных передач сокращается с 198 до 104 единиц. Соответственно сокращается время передач с 19,8 до 10,4 тактов. Оценивая сокращение времени передач, следует иметь в виду, что выигрыш в 9,4 такта сократится на величину задержек в адаптерах, связывающих магистрали в сети.

Заключение

Удалось формализовать переход от плана использования ресурсов, получаемого при решении задачи распределения модулей и данных информационного графа по станциям вычислительной системы, к задаче выбора структуры ее локальной сети с минимальными затратами времени на передачу данных.

Результат, полученный при решении задачи выбора структуры сети, в общем случае следует рассматривать как один из возможных. Действительно, если в полученной сети изменить подключение станций к магистралям, то изменится матрица конфликтов и, соответственно, диаграмма. Для поиска наилучшего варианта структуры сети, доставляющего наибольшее совмещение параллельных передач данных, нужно перебрать множество приемлемых базовых сетей и для каждой из них сформировать и оценить множество вариантов подключения станций. При формировании вариантов подключения станций решения принимаются на основе анализа графа передач данных и структуры базовой сети.

Эксперименты показали, что для сетей на основе 2–4 магистралей с подключением до 10 станций перебор базовых сетей и поиск наилучших вариантов подключения станций с использованием изложенных правил не приводит к большим объемам вычислений. При дальнейшем увеличении размерности сетей необходимо наряду с предложенными выше разработать дополнительные более эффективные правила отсеивания неперспективных вариантов сетей на основе сопоставления весов ребер графа передач данных и структуры графа конфликтов базовой сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Погребной А.В. Определение числа и топологии размещения станций многопроцессорной вычислительной системы // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 7. – С. 160–164.
2. Погребной А.В. Определение объемов передач данных в сети вычислительной системы для заданной модели программной

нагрузки // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 310. – № 3. – С. 103–107.

3. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. – М.: Мир, 1978. – 432 с.

Поступила 31.10.2007 г.