ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

А. Г. Евдокимов, Ю. Ю. Завизиступ, Г. Ф. Кривуля

Харьков

Существует широко распространенный класс задач расчета потокораспределения в сложных сетевых системах, где под сетевой систе-

мой подразумевается сеть [1] (электрическая, энергетическая, газовая, водопроводная, вентиляционная и т. д.), для которой справедливы I и II законы Кирхгофа и которую можно представить как ориентированный связный граф, состоящий из e дуг (ветвей или участков сети с выбранным направлением) и v — вершин (узлов) сети. Каждой дуге графа поставлены в соответствие ряд активных и пассивных элементов и две переменные величины: последовательная переменная q_j и параллельная переменная h_j, связанные между собой определенной, в общем случае нелинейной, зависимостью $h_j = h_j(q_j)$.

Сложность рассматриваемых сетевых систем в основном определяется их топологическими свойствами, поскольку большинство таких сетей содержит от нескольких десятков до нескольких тысяч взаимосвязанных участков.

При расчете потокораспределения на универсальных ЦВМ наибольшие трудности возникают на этапе ввода исходной информации о сети и этапе хранения топологических матриц сети, что определяется недостаточной приспособленностью существующих ЦВМ для решения задач рассматриваемого класса.

Эффективность решения задач расчета потокораспределения может быть существенно повышена путем создания специализированной вычислительной системы, ориентированной на данный класс задач.

Такая система, построенная на базе существующих универсальных ЦВМ, должна иметь дополнительные устройства ввода, хранения и отображения больших массивов специфической информации о топологии сети и ее параметрах.

В настоящей работе предложены две структуры такой вычислительной системы, реализующей задачу дискретного моделирования потокораспределения в сложной сетевой системе.

Моделирование процесса потокораспределения. Математическая модель процесса потокораспределения установившегося режима сетевой системы произвольной топологии может быть записана в виде системы μ (цикломатическое число графа сети) нелинейных алгебраических уравнений

$$f_r = h_r(q_r) + \sum_{l=1}^{v-1} b_{rl} h_l(q_l) = 0 \quad (r = v, \ldots, e) \tag{1}$$

при $(v-1)$ линейном уравнении связи

$$q_i = \sum_{r=v}^{e} b_{ri} q_r \quad (i = 1, \ldots, v-1), \tag{2}$$

а дискретное моделирование потокораспределения в этой сети заключается в решении уравнений (1), (2) относительно вектора последовательной переменной

$$\bar{q} = (q_1, \ldots, q_e)$$

Здесь b_{rl} — элемент цикломатической матрицы для ветвей дерева [2]. При этом предполагается, что ветви дерева занумерованы от 1 до $v-1$, а хорды — от v до e.

В [2] приведен анализ методов дискретного моделирования процесса потокораспределения в инженерной сети для определенного класса задач с целью обоснования и выбора методов, реализация которых позволяет наиболее эффективно использовать ЦВМ в зависимости от сложности моделируемой сети и производительности ЦВМ.

В результате этого анализа было установлено, что метод покоординатного спуска может быть реализован с наименьшими аппаратурными затратами, отличается простотой алгоритма в каждой итерации, хотя и требует большего числа итераций для решения задачи. Сходимость данного метода резко повышается за счет выбора системы фундаментальных циклов, опирающихся на дерево минимальной длины (длина или вес — сопротивление ветви), т. е. на такое дерево, сумма сопротивлений ветвей которого минимальна.

Таким образом, для решения задачи потокораспределения в вычислительной системе должны быть реализованы следующие алгоритмы:

а) выбор дерева минимальной длины;

б) определение фундаментальных циклов, опирающихся на выбранное дерево;

в) решение системы уравнений (1), (2).

Выбор дерева минимальной длины. Задача заключается в следующем: среди множества деревьев связного конечного графа $G=G(V,E)$ определить дерево $G_1(V, E_{v-1})$ на котором достигается

$$\min_{(i,j)\in G_1} \Sigma l_{ij},$$

где V, E — непустые множества вершин и дуг соответственно; каждому элементу $e_{ij}\in E$ поставлена в соответствие упорядоченная узловая пара (i, j) и вес (длина) ребра l_{ij}, причем i — начало, j — конец дуги e_{ij}.

Алгоритм оперирует с исходной информацией о сети, представленной в виде множества узловых пар (эквивалентного матрице смежности вершин графа сети) и поставленных им в соответствие длин (весов), что исключает необходимость хранения и преобразования нулевых элементов топологических матриц.

Работа алгоритма основана на следующих предпосылках, аналогичных Приму [3], но взятых с определенными ограничениями:

1. Образуется поддерево, состоящее из ребра кратчайшей длины.

2. Осуществляется поиск кратчайшего ребра, соединяющего любую вершину, смежную вершине выбранного кратчайшего поддерева.

Первый принцип используется на первом шаге алгоритма для получения изолированного поддерева, которое затем расширяется путем последовательного применения второго принципа на последующих шагах алгоритма.

Предлагаемый алгоритм выбора дерева реализован с учетом того, что множество e узловых пар и соответствующих им весов сетевой системы хранится во внешнем запоминающем устройстве. Выбранные ветви дерева минимальной длины помечаются оперативным признаком. Для реализации алгоритма не требуется хранить массивы исходных данных о сети в оперативном запоминающем устройстве ЦВМ. Объем используемой оперативной памяти ЦВМ ограничивается количеством рабочих ячеек, необходимых для организации программы, реализующей данный алгоритм.

Определение системы фундаментальных циклов. Сущность предлагаемого алгоритма [4] заключается в целенаправленном устранении висячих вершин в частичных графах на основе анализа степени их вершин. Каждый из частичных графов состоит из дерева графа сети и соответствующей хорды, образующей цикл. Очевидно, что если частичный граф $G_1(V, E_{v-1})$ является деревом графа сети $G(V, E)$, т. е. $G_1\subset G$, то частичный граф $G_2(V, E\mu)=G_1(\overline{V, E_{v-1}})$ является антидеревом

графа G. Добавление к множеству элементов $G_1(V, E_{v-1})$ любого элемента e_{ij} из множества $G_2(V, E\mu)$ образует частичный граф

$$G_k = G_1(V, E_{v-1}) \cup G_k'(\{i, j\}, \{e_{ij}\})$$

$$G_k' \subset G_2, \quad k = 1, \ldots, \mu.$$

Из частичного графа G_k может быть выделен элементарный цикл K путем последовательного исключения дуг, для которых соблюдается условие $p_{(i)} = 1$, либо $p_{(j)} = 1$, где $p_{(i)}$, $p_{(j)}$ — степени вершин дуг частичного графа. Оставшиеся дуги, входящие в элементарный цикл K, имеют степени вершин $p_{(i)}$, $p_{(j)} = 2$, причем ориентация дуги в цикле определяется по отношению к соответствующей хорде.

Дискретное моделирование по методу покоординатного спуска. Рассмотрим алгоритм решения уравнений (1) и (2) относительно составляющих вектора q для k-й итерации [2]:

1. Вычисление составляющих $q_{(i)}$ вектора $\bar{q}_1$ по произвольно заданным составляющим вектора $\bar{q}_2$ согласно формуле (2), где

$$\bar{q}_1 = (q_1, \ldots, q_{v-1}); \quad \bar{q}_2 = (q_v, \ldots, q_e).$$

2. Вычисление функции f_{v+l-1} ра l-м шаге k-й итерации по формуле (1). При этом $\bar{q}_2 = \bar{q}_2^{(k_l)} = (q_v^{(k+1)}, q_{v+l-2}^{(k+1)}, q_{v+l-1}^{(k)}, \ldots, q_e^{(k)})$

k_l — индекс l-го шага k-й итерации.

3. Определение поправки составляющей вектора $\bar{q}_2$

$$\Delta q_{v+l-1}^{(k+1)} = -\frac{(f_{v+l-1})\bar{q}_2 = \bar{q}_2^{(k_l)}}{\left(\frac{\partial f_{v+l-1}}{\partial q_{v+l-1}}\right)\bar{q}_2 = \bar{q}_2^{(k_l)}}, \tag{3}$$

где

$$\frac{\partial f_{v+l-1}}{\partial q_{v+l-1}} = \frac{\partial h_{v+l-1}}{\partial q_{v+l-1}} + \sum_{i=1}^{v-1} (b_{(v+l-1)i})^2 \frac{\partial R_i}{\partial q_i}; \tag{4}$$

4. Вычисление вектора $\bar{q}$ на l-м шаге k-й итерации

$$q_{v+l-1}^{k+1} = q_{v+l-1}^{k} + \Delta q_{v+l-1}^{k+1}, \tag{5}$$

$$q_l^k{}_l = q_l^k{}_{l-1} + b_{(v+l-1)i} \Delta q_{v+l-1}^{k+1}. \tag{6}$$

5. Анализ количества шагов — если $l < \mu$, то переход к п. 2; если $l = \mu$, то выполнение следующего пункта.

6. Анализ окончания решения. Последовательно вычисляются значения f_r^{k+1}, где $(r = v, \ldots, e)$ согласно формуле (1) и сравниваются с заданной точностью расчета ε. При первом $|f_r^{k+1}| > \varepsilon$ переход к п. 2; при всех $|f_r^{k+1}| \leqslant \varepsilon$ окончание решения задачи.

Структуры вычислительной системы. Анализ приведенных выше алгоритмов показывает, что для расчета потокораспределения требуются следующие этапы обработки информации:

1) ввод исходных данных о сети в ЦВМ;

2) получение и хранение топологических матриц графа сети;

3) итерационный расчет потокораспределения сети.

Для конечного этапа расчета сетей характерно наличие ряда хорошо разработанных методов и программ, реализация которых на ЦВМ,

имеющих даже минимальный набор команд, легко осуществима. Наиболее трудоемким является первый этап расчета, требующий от оператора сравнительно высокой квалификации и больших затрат времени на подготовку и ввод информации о сети. Исходные данные вводятся с помощью перфокарт или перфолент, что связано с большими затратами времени на перфорирование и на исправление возможной ошибки, характеризуется ненаглядностью и трудностью визуального обнаружения ошибки, большими затратами времени при многовариантных

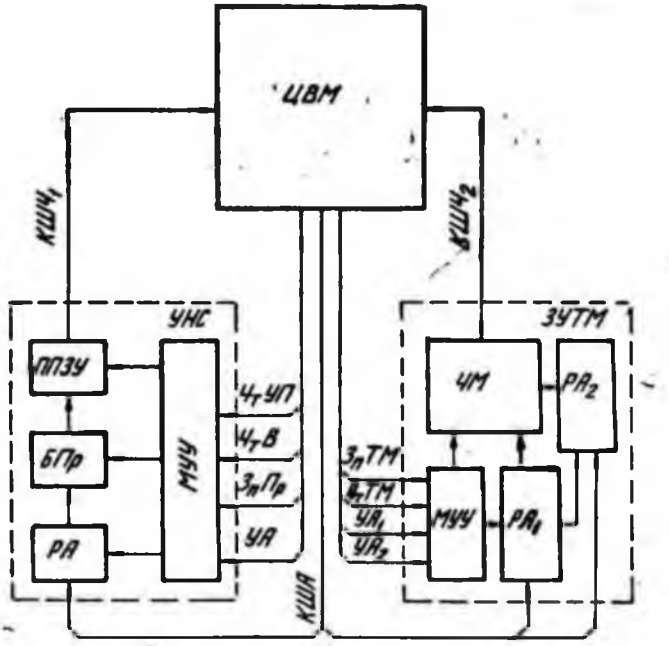


Рис. 1.

просчетах и невозможностью использования перфокарт или перфолент в качестве промежуточного запоминающего устройства в процессе расчета сети с целью сокращения требуемой машинной памяти.

Для второго этапа расчета сетей характерно неэффективное использование ячеек памяти ЗУ существующих ЦВМ при хранении элементов топологических матриц графа сети ввиду малой насыщенности этих матриц (большое количество нулевых элементов) для реальных сетей.

С ростом размеров и сложности сетевых систем решение задач потокораспределения затруднительно даже на ЦВМ высокой производительности в связи с трудностями, возникающими при вводе, хранении и обработке больших массивов числовой информации о топологии сети. Особенно важной при этом является возможность вмешательства оператора в ход вычислительного процесса, что может быть осуществлено при наличии устройства визуального отображения информации на электронно-лучевой трубке (ЭЛТ).

В связи с этим целесообразна разработка специализированных устройств, предназначенных для автоматизации первого и второго этапов расчета сетей. Использование данных устройств совместно с малыми ЦВМ обеспечивает при небольшой стоимости и сравнительной простоте вычислительного комплекса возможность эффективно решать ряд

практически важных и широко распространенных задач потокораспределения в инженерных сетях.

На рис. 1 представлен первый вариант вычислительной системы, на базе малой ЦВМ «Проминь-М».

В состав системы входят следующие дополнительные устройства.

1) устройство набора сети (УНС);

2) запоминающее устройство топологических матриц (ЗУ, ТМ).

УНС предназначено для индикации, хранения и ввода в ЦВМ исходных данных о сети в виде цифровых кодов узловых пар и соответствующих им весов. Задание исходной информации о графе сети в виде узловых пар исключает необходимость хранения информации о несвязной части графа, приводит к резкому сокращению количества чисел, необходимого для ввода в ЦВМ и используемого в процессе вычислений.

УНС состоит из полупостоянного запоминающего устройства (ППЗУ), блока признаков (БПр), регистра адреса (РА) и местного устройства управления (МУУ). Оператор осуществляет задание исходных данных о сети на ППЗУ, причем веса набираются в виде десятичных чисел с тремя разрядами мантиссы и одним разрядом порядка. После реализации алгоритма выбора дерева минимальной длины узловые пары ветвей дерева помечаются признаком блока признаков (БПр), чем осуществляется разделение массива исходных данных на подмассивы и исключается необходимость хранения данных подмассивов в оперативной памяти ЦВМ.

Регистр адреса УНС предназначен для приема из ЦВМ адреса требуемого цифрового кода, а местное устройство управления обеспечивает работу всех блоков УНС.

Запоминающее устройство топологической матрицы предназначено для хранения элементов матрицы контуров $(-1, 0, +1)$ с возможностью обращения к любому элементу матрицы. ЗУ ТМ имеет два регистра адреса: регистр столбцов ($РА_1$) и регистр строк ($РА_2$), что позволяет осуществить выборку элементов матрицы контуров по столбцам или по строкам при увязке переменных сети по I и II законах Кирхгофа. Длина слова, записываемого в ЗУ ТМ, равна двум двоичным разрядам (первый разряд — для хранения знака элемента матрицы контуров, второй — для хранения элемента). Числовые матрицы (ЧМ) запоминающего устройства состоят из двух физических кассет матричного типа, что обеспечивает простоту структуры и управления данным устройством.

Для обеспечения функционирования блоков вычислительной системы команды ЦВМ «Проминь-М» дополнены следующими:

1. Команды обращения к устройству набора сети:

а) установка адреса УНС (УА) — по данной команде осуществляется передача адреса из регистра адреса ЦВМ в РА УНС;

б) чтение узловой пары (Чт УП) — осуществляется выборка из ППЗУ цифрового кода узловой пары и признака по данному адресу;

в) чтение веса (Чт В) — выбирается из ППЗУ число, соответствующее весу данной ветви (узловой пары) по установленному адресу;

г) запись признака (Зп Пр) — устанавливается в единичное состояние двоичный элемент блока признаков при выбранном адресе.

2. Команды обращения к запоминающему устройству топологической матрицы:

а) установка адреса регистра столбцов ($УА_1$) — передается содержимое регистра адреса ЦВМ в регист столбцов ЗУ ТМ;

б) установка адреса регистра строк ($УА_2$);

в) запись элементов матрицы контуров (Зп ТМ) — производится запись в числовые матрицы «0», —«1» или «+1» по выбранным адресам столбца и строки;

г) чтение элементов матрицы контуров (Чт ТМ) — читается данный элемент матрицы.

Основные алгоритмы вычислительного процесса расчета сетей целесообразно прошить в блоке микропрограммного управления ЦВМ «Проминь-М», чем обеспечивается простота и удобство программиро-

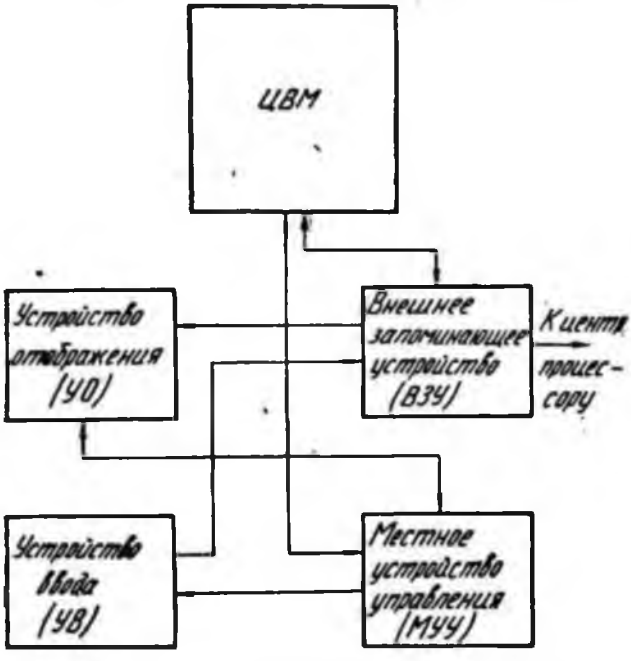


Рис. 2.

вания. Алгоритмы выбора дерева минимальной длины, определения системы фундаментальных циклов и итерационного расчета сети требуют около трехсот одноадресных команд ЦВМ «Проминь-М».

Данная система имеет определенные ограничения по объему и классу решаемых задач потокораспределения. Ее целесообразно использовать при объеме сети до 100 ветвей.

На рис. 2 показана блок-схема вычислительной системы для расчета задач потокораспределения в сетевых системах большого размера с непосредственным влиянием оператора на ход вычислительного процесса.

В состав системы входят следующие устройства:

1) устройство ввода (УВ);
2) устройство отображения (УО);
3) внешнее запоминающее устройство (ВЗУ);
4) местное устройство управления (МУУ).

УВ предназначено для ввода массива исходных данных о топологии сети и ее параметрах во внешнее запоминающее устройство. Набор чисел осуществляется на клавишном устройстве УВ с отображением страницы записываемой в память информации на экране ЭЛТ устройства отображения. УО позволяет индицировать набор десятичных цифр и необходимые символы. Объем отображаемых на экране данных

равен 30 двадцатиразрядным числам, что соответствует странице исходных данных о сети, вводимых в ВЗУ. По мере реализации алгоритмов преобразования топологической информации и расчета потокораспределения на индикатор могут быть вызваны требуемые числовые массивы (система фундаментальных циклов, значения рассчитываемых потоков и т. п.). Совместно с устройством ввода УО позволяет осуществлять оперативную коррекцию обрабатываемой информации.

Внешнее запоминающее устройство может быть выполнено на основе магнитного барабана, магнитного диска или ОЗУ на магнитных сердечниках емкостью около 4096 20-разрядных чисел. В ВЗУ хранятся массивы исходных, промежуточных и расчетных данных, содержимое указанных массивов по вызову оператора отображается на экране электронно-лучевого индикатора в виде буквенно-цифровых символов. Через ВЗУ предусмотрен обмен информацией с центральным процессором, что позволяет использовать предлагаемую систему в качестве локального вычислительного устройства.

Местное устройство управления координирует работу блоков системы в режиме ввода и отображения информации.

В предлагаемой системе использована ЦВМ «Проминь-М» с расширенной системой команд, как и в предыдущем случае.

В данной системе объем рассчитываемой сети может быть доведен до нескольких сотен ветвей, что делает систему равной по своим вычислительным возможностям с универсальной ЦВМ средней производительности.

ВЫВОДЫ

Сравнительный анализ предложенных структур вычислительных систем для расчета задач потокораспределения в сложных сетевых системах позволяет сделать вывод, что обе системы существенно расширяют возможности существующих (особенно маломощных) универсальных ЦВМ для расчета рассматриваемого класса задач за счет добавления специализированных дополнительных устройств ввода, отображения и хранения информации. Встроенные в систему подпрограммы, ориентированные на данный класс задач, обеспечивают простоту и удобство программирования.

Первая система аппаратурно проще, обладает меньшей стоимостью, но более ограничена по объему и классу решаемых задач. Систему целесообразно использовать для расчета сетевых систем с медленно изменяющейся структурой, объемом не более 100 ветвей — в частности, для решения задач управления конкретными сетевыми объектами (шахтной вентиляционной сетью, газовой сетью и т. п.).

Структура второй системы позволяет решать задачи потокораспределения в сетях, содержащих несколько сотен ветвей, т. е. менее ограничена по объему решаемых задач. Страничная организация и отображение массивов из ВЗУ значительно облегчает работу оператора при повторных и многовариантных расчетах, обеспечивает естественный и удобный ввод, вывод исходных, промежуточных и расчетных данных. Наличие внешнего запоминающего устройства позволит реализовать более эффективные по быстродействию алгоритмы, требующие большего объема памяти ЦВМ.

Вычислительные возможности данной структуры могут быть значительно расширены при использовании последней в качестве локального вычислительного устройства при работе с центральным процессором большой производительности в режиме разделения машинного времени.

Оценка стоимости систем показывает, что при примерно равных вычислительных возможностях по сравнению с универсальными ЦВМ, применительно к рассматриваемому классу задач, предлагаемые структуры вычислительных систем будут иметь гораздо меньшую стоимость, обладая при этом простым программированием решаемых задач и оперативным вводом, выводом и отображением информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. М. Ермольев, Н. М. Мельник. Экстремальные задачи на графах. «Наукова думка», Киев, 1968.

2. А. Г. Евдокимов, Б. Д. Яловкин. Анализ методов дискретного моделирования на ЦВМ установившихся процессов воздухораспределения в ШВС. «Изв. вузов. Горный журнал», № 3, 1966.

3. Кибернетический сборник, № 2, ИЛ, 1962.

4. А. Г. Евдокимов, Ю. Ю. Завизиступ, Г. Ф. Кривуля. Определение независимых контуров и главных сечений в сложной сети. Материалы IV республиканской научной конференции молодых исследователей по системотехнике. Киев, 1969.

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ УСТРОЙСТВ ИНДИКАЦИИ

И. Ф. Огороднейчук, Ю. К. Худенский, Ф. Я. Евсеев, А. И. Бых

Харьков

Устройства отображения информации находят применение в системах административного управления производственными предприятиями, при управлении различными производственными процессами, в системах управления полетами и морскими объектами [1]. Так как в настоящее время не существует полностью автоматизированных таких систем и присутствие человека-оператора в одном из ее звеньев является обязательным, то требования к элементам данного звена должны определяться психофизиологическими возможностями человека-оператора [2, 3, 4, 5, 6].

Прежде чем анализировать устройства отображения с этой точки зрения, рассмотрим существующие индикаторные устройства. Их можно разбить на два класса [1]:

а) Индикаторные устройства индивидуального пользования—предназначены для одного наблюдателя.

б) Индикаторные устройства коллективного пользования—предназначены для группы наблюдателей.

Основным различием между ними является размер создаваемого изображения. Для первого класса он редко превышает 500×500 *мм*. Во втором классе устройств этот размер колеблется от 1×1 *м* до 4×4 *м*. В свою очередь, каждый класс можно разбить на четыре подкласса, отличающиеся своим назначением [10, 11, 13, 14].

1. **Сигнальные индикаторные устройства** — предназначены для сигнализации состояния того или иного устройства и выполняются обычно на лампочках накаливания. Сигнализация осуществляется либо за счет изменения цвета лампочки, либо за счет подсвета соответствующих надписей. Характер изменения информации статический, так как смена информации происходит сравнительно редко.

2. **Табло** — предназначены для вывода количественной информации. Отображение информации осуществляется обычно при помощи цифр, реже — букв или символов. Характер изменения информации — статический.