УДК 621.382

В. В. СЕМЕНЕЦ, канд. техн. наук, *А. И. ДОВНАРЬ*, канд. техн. наук, *В. Н. ХРАМЦОВ*

АЛГОРИТМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТАКТОВ РАЗЪЕМОВ МЕЖДУ ЦЕПЯМИ

При проектировании печатных плат и микросборок встречаются ситуации, когда внешние контактные площадки (ВКП) не закреплены заранее за конкретными цепями схемы. Они являются инвариантными. В этом случае возникает задача оптимизации назначения ВКП цепям.

Пусть схема содержит W цепей, N ВКП $\{V_1, V_2, \ldots, V_N\}$, некоторое подмножество $\{V_{i_1}, V_{i_2}, \ldots, V_{i_k}\}$ которых заранее закреплено за определенными цепями. Необходимо распределить $M \leqslant N - K$ ВКП между $L \leqslant W$ цепями $\{c_1, c_2, \ldots, c_L\}$, причем цепи c_j назначить n_j ВКП, $j = 1, 2, \ldots, L$, $\sum\limits_{j=1}^{L} n_j = M$. Представим данную задачу как задачу оптимизации на комбинаторных объектах определенной природы и рассмотрим способы ее решения.

Каждому варианту назначения ВКП поставим в однозначное соответствие перестановку с повторениями P из S элементов ($S = N - K$) $L + 1$ групп по n_j элементов в j-й группе ($n_{L+1} = S - M$). Исходная задача сводится к отысканию перестановки, доставляющей оптимум некоторому критерию качества распределения контактов $F(P)$:

$$P^* = \arg\operatorname*{opt}_{P} F(P). \qquad (1)$$

Минимизируем общее число пересечений между цепями — общее число ребер графа пересечений цепей

$$F(P) = 0{,}5 \sum_{j=1}^{W} d_j, \qquad (2)$$

где d_j — степень соответствующей вершины графа пересечений.

Сформулируем условия взаимного пересечения двух цепей. Считаем ВКП точками на сторонах прямоугольника, представляющего собой монтажное поле (МП). Пусть цепи разводятся внутри своих минимальных описанных прямоугольников, элементы схемы размещены, инвариантные ВКП находятся на одной стороне МП, хотя бы одна цепь из каждой рассматриваемой пары цепей содержит инвариантные ВКП. Таким образом, цепей на МП известно с точностью до их описанных прямоугольников, не включающих инвариантные ВКП. Две цепи полагаем пересекающимися, если принципиально невозможно провести их в одном слое без взаимного пересечения.

Свяжем с МП систему координат $X0Y$, совместив ее начало с левым нижним углом МП. ВКП располагаются на оси $0X$. Приняв местоположение ВКП одной из двух цепей (назовем ее первичной) известным, определим левую $x^{\text{мин}}$ и правую $x^{\text{макс}}$ границы области, запрещенной для расположения ВКП вторичной цепи. Очевидно, что область односвязна. При расположении ВКП вторичной цепи в данной области невозможно развести цепи в одном слое без пересечений, в противном случае такая возможность существует, по крайней мере принципиально.

Рассмотрим случай, когда две цепи содержат по одной ВКП. Описанные прямоугольники цепей будем характеризовать минимальной и максимальной абсциссами $x_j^{\text{мин}}$, $x_j^{\text{макс}}$, а также максимальной ординатой h_j $(j = 1, 2)$. Опишем два возможных случая относительного расположения цепей.

1. $h_2 \neq h_1$. Первичной является цепь с $h = \min\{h_1, h_2\}$. Пусть $h_1 = \min\{h_1, h_2\}$, ВКП первичной цепи располагается в точке $x = x^*$. Тогда

$$x^{\text{мин}} = \begin{cases} x^*, \ x_2^{\text{мин}} < x_1^{\text{мин}}; \\ \min\{x^*, \ x_1^{\text{мин}}\}, \ x_2^{\text{мин}} \geqslant x_1^{\text{мин}}; \end{cases} \tag{3}$$

$$x^{\text{макс}} = \begin{cases} x^*, \ x_2^{\text{макс}} > x_1^{\text{макс}}; \\ \max\{x^*, \ x_1^{\text{макс}}\}, \ x_1^{\text{макс}} \leqslant x_1^{\text{макс}}. \end{cases} \tag{4}$$

2. $h_2 = h_1$. Первичной является цепь с описанным прямоугольником большей ширины. Пусть $x_1^{\text{макс}} - x_1^{\text{мин}} \geqslant x_2^{\text{макс}} - x_2^{\text{мин}}$. Тогда

$$x^{\text{мин}} = \begin{cases} x^*, \ x_2^{\text{мин}} < x_1^{\text{мин}} \\ 0, \ x_2^{\text{мин}} \geqslant x_1^{\text{мин}} \end{cases}; \tag{5}$$

$$x^{\text{макс}} = \begin{cases} x^*, \ x_2^{\text{макс}} > x_1^{\text{макс}} \\ X, \ x_2^{\text{макс}} \leqslant x_1^{\text{макс}} \end{cases}, \tag{6}$$

где X — размер МП по оси абсцисс.

Рассмотрим случай, когда двум цепям назначено соответственно по n_1 и n_2 ВКП. Аналогичным образом определим границы запрещенной области (также односвязной) для расположения ВКП второй цепи. Цепи будут пересекаться, если в запрещенную область попадает хотя бы одна ВКП вторичной цепи. Упорядочим координаты ВКП первичной цепи по возрастанию: $x_1^* < x_2^* < \ldots < x_{n_1}^*$. Рассмотрим два возможных случая относительного расположения цепей.

1. $h_2 > h_1$. Тогда

$$x^{\text{мин}} = \begin{cases} x_1^*, \ x_2^{\text{мин}} < x_1^{\text{мин}} \\ \min\{x_1^*, \ x_1^{\text{мин}}\}, \ x_2^{\text{мин}} \geqslant x_1^{\text{мин}} \end{cases}; \tag{7}$$

$$x^{\text{макс}} = \begin{cases} x_{n_1}^*, \ x_2^{\text{макс}} > x_1^{\text{макс}}; \\ \max\{x_{n_1}^*, \ x_1^{\text{макс}}\}, \ x_2^{\text{макс}} \leqslant x_1^{\text{макс}}. \end{cases} \tag{8}$$

2. $h_2 = h_1$, $x_1^{\text{макс}} - x_1^{\text{мин}} \geqslant x_2^{\text{макс}} - x_2^{\text{мин}}$. Тогда

$$x^{\text{мин}} = \begin{cases} x_1^*, & x_2^{\text{мин}} < x_1^{\text{мин}}; \\ 0, & x_2^{\text{мин}} \geqslant x_1^{\text{мин}}; \end{cases} \tag{9}$$

$$x^{\text{макс}} = \begin{cases} x_{n_1}^*, & x_2^{\text{макс}} > x_1^{\text{макс}}; \\ X, & x_2^{\text{макс}} \leqslant x_1^{\text{макс}}. \end{cases} \tag{10}$$

Если двум цепям назначены ВКП, находящиеся на различных сторонах МП, то условия пересечения проверяются последовательно на всех сторонах МП, где расположено хотя бы по одной ВКП рассматриваемых цепей. При этом координаты ВКП, расположенных на других сторонах, учитываются при определении параметров описанных прямоугольников. Если на выбранной стороне МП расположены инвариантные ВКП обеих цепей, то используются формулы (7) — (10), если присутствуют контакты только первичной цепи, то пересечения нет. Если, наконец, присутствуют контакты только вторичной цепи, то при $h_1 < h_2$

$$x^{\text{мин}} = x_1^{\text{мин}},\ x^{\text{макс}} = x_1^{\text{макс}},\ \text{если}\ x_1^{\text{мин}} \leqslant x_2^{\text{мин}},\ x_1^{\text{макс}} \geqslant x_2^{\text{макс}}; \tag{11}$$

в противном случае пересечения нет. При $h_1 = h_2$

$$x^{\text{мин}} = 0,\ x^{\text{макс}} = X,\ \text{если}\ x_1^{\text{мин}} \leqslant x_2^{\text{мин}},\ x_1^{\text{макс}} \geqslant x_2^{\text{макс}}; \tag{12}$$

в противном случае пересечения нет. В (11) — (12) предполагается, что ВКП находятся на оси абсцисс. Цепи считаем пересекающимися, если условие пересечения выполняется хотя бы на одной стороне МП.

Для решения задачи (1) использован алгоритм парных перестановок. Выбор алгоритма объясняется его эффективностью при решении практических задач, а также возможностью значительно сократить объем вычислений в случае подсчета очередного значения критерия: в парной перестановке ВКП пересчитываются только два слагаемых в (2).

В том случае, когда все инвариантные ВКП расположены на одной стороне МП, возможно предложить алгоритм получения хорошего начального приближения P_0. Пусть все ВКП расположены на оси абсцисс. Упорядочим цепи, содержащие инвариантные ВКП, по возрастанию высоты соответствующего описанного прямоугольника: $h_{i_1} \leqslant h_{i_2} \leqslant \ldots \leqslant h_{i_L}$. Цепи с одинаковой высотой упорядочим по убыванию ширины описанного прямоугольника: $h_{i_j} = h_{i_{j+1}} \Rightarrow x_{i_j}^{\text{макс}} - x_{i_j}^{\text{мин}} \geqslant x_{i_{j+1}}^{\text{макс}} - x_{i_{j+1}}^{\text{мин}}$. Пусть m-й цепи необходимо назначить n_m ВКП. Присвоим всем незакрепленным еще ВКП нулевой вес. Проверяя последовательно условия пересечения m-й цепи с ранее рассмотренными $m-1$ цепями, увеличиваем каждый раз вес ВКП, попавших в соответствующую запрещенную зону, на единицу. Затем из всех ВКП, имеющих вес, не превышающий некоторое пороговое значение, выбираем ложение ВКП одной из двух цепей (назовем ее первичной) известным, определим левую $x^{мин}$ и правую $x^{макс}$ границы области, запрещенной для расположения ВКП вторичной цепи. Очевидно, что область односвязна. При расположении ВКП вторичной цепи в данной области невозможно развести цепи в одном слое без пересечений, в противном случае такая возможность существует, по крайней мере принципиально.

Рассмотрим случай, когда две цепи содержат по одной ВКП. Описанные прямоугольники цепей будем характеризовать минимальной и максимальной абсциссами $x_j^{мин}$, $x_j^{макс}$, а также максимальной ординатой $h_j (j = 1, 2)$. Опишем два возможных случая относительного расположения цепей.

1. $h_2 \neq h_1$. Первичной является цепь с $h = \min\{h_1, h_2\}$. Пусть $h_1 = \min\{h_1, h_2\}$, ВКП первичной цепи располагается в точке $x = x^*$. Тогда

$$x^{мин} = \begin{cases} x^*, \ x_2^{мин} < x_1^{мин}; \\ \min\{x^*, \ x_1^{мин}\}, \ x_2^{мин} \geqslant x_1^{мин}; \end{cases} \tag{3}$$

$$x^{макс} = \begin{cases} x^*, \ x_2^{макс} > x_1^{макс}; \\ \max\{x^*, \ x_1^{макс}\}, \ x_1^{макс} \leqslant x_1^{макс}. \end{cases} \tag{4}$$

2. $h_2 = h_1$. Первичной является цепь с описанным прямоугольником большей ширины. Пусть $x_1^{макс} - x_1^{мин} \geqslant x_2^{макс} - x_2^{мин}$. Тогда

$$x^{мин} = \begin{cases} x^*, \ x_2^{мин} < x_1^{мин} \\ 0, \ x_2^{мин} \geqslant x_1^{мин} \end{cases}; \tag{5}$$

$$x^{макс} = \begin{cases} x^*, \ x_2^{макс} > x_1^{макс} \\ X, \ x_2^{макс} \leqslant x_1^{макс} \end{cases}, \tag{6}$$

где X — размер МП по оси абсцисс.

Рассмотрим случай, когда двум цепям назначено соответственно по n_1 и n_2 ВКП. Аналогичным образом определим границы запрещенной области (также односвязной) для расположения ВКП второй цепи. Цепи будут пересекаться, если в запрещенную область попадает хотя бы одна ВКП вторичной цепи. Упорядочим координаты ВКП первичной цепи по возрастанию: $x_1^* < x_2^* < \ldots < x_{n_1}^*$. Рассмотрим два возможных случая относительного расположения цепей.

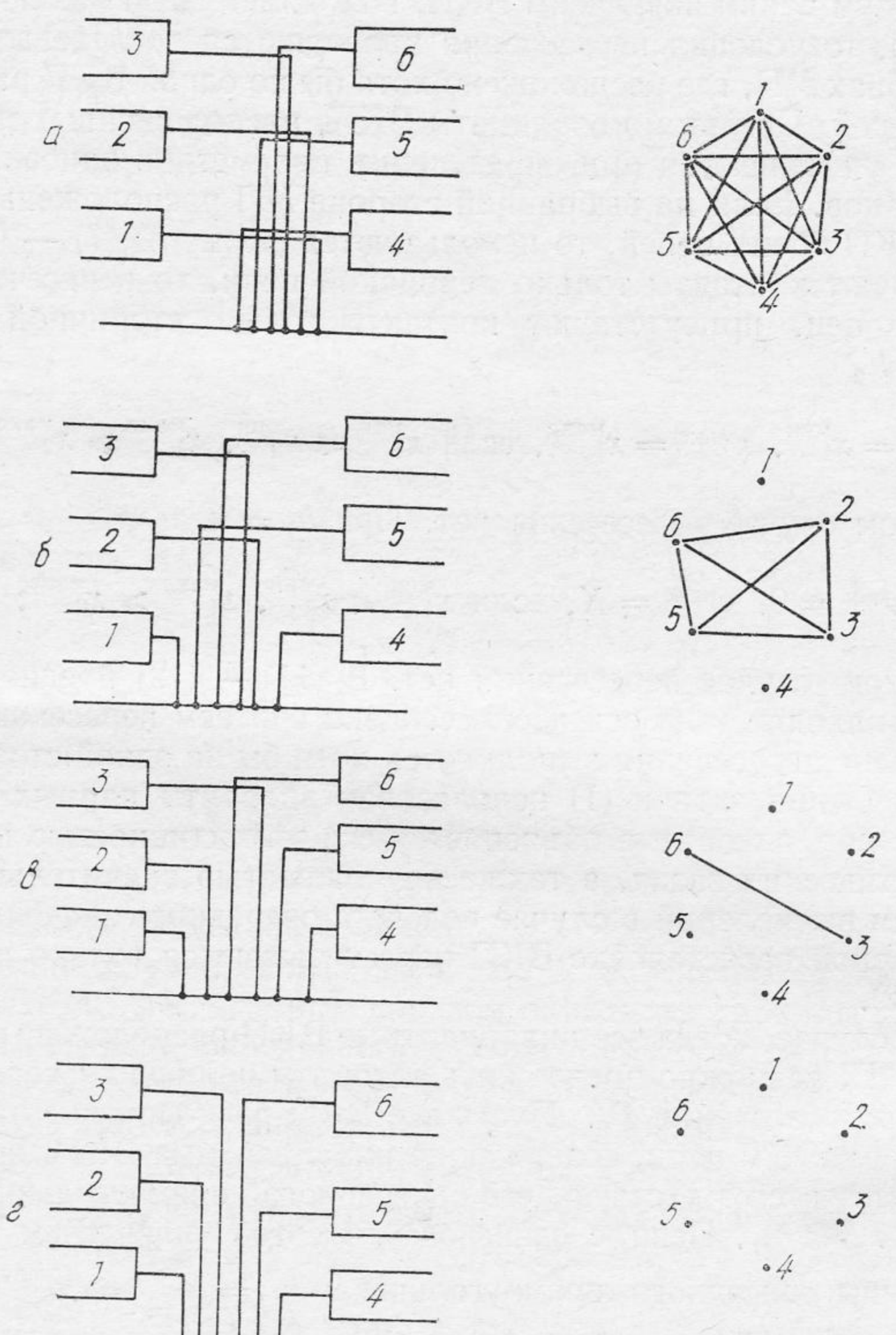
1. $h_2 > h_1$. Тогда

$$x^{мин} = \begin{cases} x_1^*, \ x_2^{мин} < x_1^{мин} \\ \min\{x_1^*, \ x_1^{мин}\}, \ x_2^{мин} \geqslant x_1^{мин} \end{cases}; \tag{7}$$

$$x^{макс} = \begin{cases} x_{n_1}^*, \ x_2^{макс} > x_1^{макс}; \\ \max\{x_{n_1}^*, \ x_1^{макс}\}, \ x_2^{макс} \leqslant x_1^{макс}. \end{cases} \tag{8}$$

n_m ВКП, наиболее близко расположенных к точке $0{,}5\,(x_m^{\text{мин}} + x_m^{\text{макс}})$. Увеличение порогового значения позволит выбирать ВКП, минимально увеличивающие периметр описанного прямоугольника цепи. Уменьшение порового значения позволит назначать текущей цепи ВКП, которые обеспечивают минимальное число пересечений с рассмотренными $m—1$ цепями.

Пример. Вариант начального назначения шести ВКП шести цепям вместе с соответствующим графом пересечений цепей представлен на рисунке (позиция *а*). Такой вариант назначения, очевидно, неоптимален, так как образуется



полный граф пересечений цепей, значение оптимизируемого критерия максимально. Пусть алгоритм оптимизации построен таким образом, что для рассматриваемой ВКП выбирается наилучший в смысле критерия (2) парный обмен. Возможный ход процесса оптимизации приведен ниже, текущие варианты назначения ВКП вместе с соответствующими графами пересечении представлены на рисунке (позиции *а—г*)

$$P_0 = (4,\ 5,\ 6,\ 3,\ 2,\ 1), \qquad F = 15;$$
$$P_1 = (1,\ 5,\ 6,\ 3,\ 2,\ 4), \qquad F = 6;$$
$$P_2 = (1,\ 2,\ 6,\ 3,\ 5,\ 4), \qquad F = 1;$$
$$P^* = P_3 = (1,\ 2,\ 3,\ 6,\ 5,\ 4), \qquad F = 0.$$

Если для варианта P_0 необходимо шесть слоев коммутации при условии, что каждая цепь разводится полностью в одном слое и в пределах минимального описанного прямоугольника, то для оптимального решения P^* достаточно одного слоя. В данном случае вариант P^* мог быть сразу получен описанным алгоритмом начального распределения ВКП.

Решение практических задач подтвердило целесообразность оптимизации распределения инвариантных ВКП, а также эффективность предлагаемого подхода. При проектировании топологии микросборок одного класса оптимизация назначения ВКП позволила уменьшить количество слоев коммутации на 25 %.

Поступила в редколлегию 30.05.86

УДК 62.512: 621.372

М. А. ИВАНОВ, канд. техн. наук

ВЕРОЯТНОСТНАЯ МЕРА ВЫХОДНОГО ОТКЛИКА НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ АСУ НА ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Актуальность анализа статистических характеристик нелинейных инерционных преобразований случайных процессов обусловлена прежде всего существенной значимостью данной задачи для широкого круга важных практических приложений [1, 2], а также недостаточной степенью исследованности указанных вопросов в известной литературе [1—6]. В частности, необходима оценка закона распределения сигнала на выходе достаточно широко распространенного на практике класса нелинейных систем АСУ тира Вольтерра — Винера [2,6] для важного в теоретическом и практическом отношениях случая их узкополосности относительно ширины спектра входных воздействий.

Предположим, что исследуемая нелинейная система АСУ— одномерная с постоянными во времени аналитическими (или приводимыми к аналитическим) характеристиками. Поэтому она может быть описана стационарным рядом Вольтерра [2]

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} y_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int h_n(\tau_1, \ldots, \tau_n) \prod_{i=1}^{n} x(t-\tau_i)\, d\tau_i \leftrightarrow$$
$$\leftrightarrow Y(f_1, f_2, \ldots) = \sum_{n=1}^{\infty} Y_n(f_1, \ldots, f_n) = \sum_{n=1}^{\infty} H_n(f_1, \ldots, f_n) \prod_{i=1}^{n} X(f_i), \quad (1)$$

где $x(t)$, $y(t)$ и $X(f)$, $Y(f_1, f_2, \ldots)$ — входной, выходной сигналы анализируемой нелинейной системы АСУ и их Фурье-преобразования; $y_n(t)$ и $Y_n(f_1, \ldots, f_n)$ — n-й член ряда Вольтерра (1) и его n-мерный