

Н.К. Тимофієва

Самоналагоджувальні алгоритми знаходження невизначених параметрів у задачах комбінаторної оптимізації

Описаны самонастраивающиеся алгоритмы нахождения параметров в системе автоматизированного проектирования печатных плат, которые невозможно задать при определенных условиях, но которые появляются в процессе решения конкретной задачи комбинаторной оптимизации. Эта проблема решается путем введения формальных параметров на этапе подготовки входных данных и динамической перестройкой модели печатной платы.

The self-adjusted algorithms of finding the indefinite parameters in a computer-aided printed-circuit-boards, which it is impossible to set in a condition are described, but they appear in the process of solution of certain combinatorial optimization problem. This problem is solved by introduction of formal parameters at a stage of preparation of the entrance data and dynamic reorganization of the model of the printed-circuit-board.

Описано самоналагоджувальні алгоритми знаходження параметрів в системі автоматизованого проектування друкованих плат, які неможливо задати за умовою, але які з'являються в процесі розв'язання певної задачі комбінаторної оптимізації. Ця проблема вирішується шляхом введення формальних параметрів на етапі підготовки вхідних даних та динамічною перебудовою моделі друкованої плати.

Вступ. У теорії прийняття рішень виникають ситуації, які характеризуються певною мірою невизначеності [1–5], зокрема такі, що пов'язані з неповною вхідною та поточною інформацією. В літературі при дослідженні цієї проблеми основна увага приділяється задачам з нечіткими, стохастичними або комбінованими вхідними даними (одночасно випадковими і нечіткими). Але в задачах комбінаторної оптимізації в різних галузях людської діяльності вхідні дані характеризуються як нечіткою, так і чіткою структурою. Для задач, у яких вхідні дані мають чітку структуру, математичні моделі, відповідно і цільова функція, розроблено досить ґрунтовно, тому невизначеність для них зведена до мінімуму. Пошуком способів розв'язання задач з нечіткими вхідними даними займаються не одне десятиліття, але точної математичної постановки для них ще не розроблено. Незважаючи на спробу строго формалізувати поняття невизначеності, наприклад [5], цим поняттям користуються на інтуїтивному рівні. Для цих задач досить складно змодельовати цільову функцію таку, щоб глобальне розв'язання задовольняло дійсну мету дослідження.

* **Ключевые слова:** неопределенность в комбинаторной оптимизации, комбинаторная оптимизация, целевая функция, комбинаторная конфигурация, автоматизированное проектирование, печатные платы, размещение разноразмерных модулей.

Постановка проблеми

Розглянемо знаходження параметрів в умовах невизначеності в задачах з чіткою вхідною інформацією. Ця проблема виникає тому, що прикладні задачі комбінаторної оптимізації складні за своєю природою і розділяються на підзадачі, для розв'язання яких розробляють незалежні алгоритми, за допомогою яких основна задача розв'язується їхньою послідовною роботою або вони працюють як вбудовані процедури в ітераційному режимі. Алгоритм, який об'єднує незалежні алгоритми, орієнтовані на розв'язання певних задач, називається *гібридним* або *комбінованим* [6–8]. В процесі його роботи при передачі інформації, яка є результатом розв'язання попередньої задачі, на вході наступного алгоритму можуть з'явитися нові, невизначені параметри, необхідні для розв'язання чергової задачі і які неможливо задати у вхідних даних за умовою. Виникає проблема знаходження параметрів в умовах невизначеності. Такі задачі трапляються і в конструкторському проектуванні обчислювальної апаратури. Від ефективного знаходження таких параметрів залежить зручність в експлуатації певних систем, можливість повної автоматизації всього процесу проектування. На прикладі конструкторського проектування друкованих плат розглянемо цю проблему і опишемо самоналагоджувальні алгоритми знаходження параметрів в умовах невизначеності [9].

Загальна задача конструкторського проектування друкованих плат розділяється на такі підзадачі [10]: задача компоновки базових елементів у модулі, оптимальне розміщення виводів базових елементів у модулі і призначення їхніх бібліотечних (реальних) номерів, задача розміщення різногабаритних модулів на поверхні друкованої плати, моделювання конструкції друкованої плати при підготовці її до наступного етапу проектування, трасування друкованих провідників, контроль топології друкованого монтажу, випуск конструкторської документації, формування інформації для пристроїв з числовим програмним управлінням, де є задача комівояжера. У процес проектування входить підготовка електричної схеми і підготовка бібліотеки постійної інформації. Вхідна інформація в цій задачі розділяється на змінну, яка задається для певної індивідуальної задачі, і постійну, яка однакова для серії індивідуальних задач. Постійну інформацію заносять попередньо в бібліотеку і використовують її в процесі розв'язання задачі на різних етапах. Використання бібліотечних даних економічно доцільне, коли проектування проводиться для невеликої номенклатури багатосерійних виробів. Але такий підхід економічно неефективний при великій номенклатурі малосерійних виробів та розв'язанні задач, для яких деякі параметри занести в бібліотеку неможливо. Їх можна задати лише після розв'язання чергової задачі. Це стосується задачі розміщення виводів базових елементів у модулі і призначення їхніх бібліотечних номерів та визначення посадкових місць для розміщення різногабаритних модулів. Так, призначити реальні номери виводам модулів можна лише після розв'язання задачі компоновання, визначити структуру посадкових місць на монтажному полі для встановлення різногабаритних модулів – після знаходження певного варіанту їхнього розміщення тощо. Уведення цієї інформації в діалоговому режимі досить трудомісткий процес, тому для автоматизації проектування на цьому етапі розроблено самоналагоджувальні алгоритми знаходження невизначених параметрів. Оскільки на початку

розв'язання задачі явно присутні невідомі параметри, то вона належить до класу параметричних ситуацій рішення [5].

Розв'язання проблеми

Математичну постановку загальної задачі проектування друкованих плат сформулюємо так. Нехай задано електричну схему, яку подамо графом G . Множиною $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ позначимо його вершини, кожній a_j з яких у відповідність поставлено заданий базовий елемент. Позначимо $\Phi(G)$ функціональні характеристики заданої електричної схеми. Розміщення компонент електричної схеми проводиться на платі, яка являє собою прямокутну поверхню з нанесеною на ній координатною сіткою. Вона може бути одношаровою, двошаровою, багатшаровою. Перенумеруємо комірки цієї сітки і їхню послідовну нумерацію подамо множиною $D = \{d_1, \dots, d_\xi\}$. Із елементів a_j базової множини A , $j \in \{1, \dots, n\}$, утворюється комбінаторна множина W – сукупність комбінаторних конфігурацій певного типу (перестановки, розбиття тощо), а із елементів d_l базової множини D , $l \in \{1, \dots, \xi\}$, утворюється комбінаторна множина M – розміщення без повторень. На елементах w комбінаторної множини W і μ комбінаторної множини M вводиться цільова функція. Тоді задача проектування друкованих плат полягає у знаходженні такого розміщення компонент заданої електричної схеми на одному або декількох шарах, тобто виборі для розміщення елементів $w^* \in W$ комбінаторної конфігурації μ^* із множини M , для яких уведена цільова функція набуває оптимального значення з необхідним виконанням умови $\Phi(G) = \tilde{\Phi}(\tilde{G})$, де $\tilde{\Phi}(\tilde{G})$ – функціональні характеристики електричної схеми \tilde{G} , одержаної із G в процесі проектування.

Як було обумовлено, задача проектування друкованих плат розділяється на підзадачі, аргументом цільової функції в яких – комбінаторні конфігурації різних типів [11]. Наприклад, аргументом цільової функції в задачі компоновки є розбиття n -елементної множини на під-

множини, задачі розміщення різногабаритних модулів на поверхні друкованої плати і розподілення виводів модулів – перестановка, трасування друкованих плат – розміщення без повторень. Виходячи з цього, функціонал для поставленої задачі запишемо як $F(\rho^*, \mu^*, \omega^*) = \underset{\substack{\rho \in \Theta \\ \mu \in M \\ \omega \in \Omega}}{\text{ext}} F(\rho, \mu, \omega)$, де ρ – розбиття n -елементної

множини на підмножини, μ – розміщення без повторень, ω – перестановка, а Θ, M, Ω – їхні множини.

Далі опишемо самоналагоджувальні алгоритми знаходження параметрів, які необхідно задавати як вхідні дані для розв'язання чергової задачі і які неможливо задати на початку обчислювального процесу. Оскільки основний результат проектування – оптимальне розміщення компонент електричної схеми на платі, то при виборі критеріїв якості, за якими оцінюється результат розв'язання задачі на окремих етапах, ураховується оптимальне трасування друкованих плат. Тобто критерії якості, які задаються на черговому етапі розв'язання задачі, моделюються з урахуванням прогнозу для майбутніх результатів.

Виділимо підзадачі, які потребують обчислення параметрів в умовах невизначеності.

Задача компоновки базових елементів у модулі. Змістовна постановка цієї задачі така. Задано n базових елементів різних типів, між якими існують електричні зв'язки. Необхідно ці елементи розподілити по корпусах мікросхем так, щоб кількість зв'язків між останніми була мінімальною, або кількість зв'язків між елементами, об'єднаними у мікросхеми, була найбільшою. Кількість типів, до яких відносяться елементи, і кількість елементів, які необхідно об'єднати за мікросхемами, задано.

Після розв'язання цієї задачі необхідно задати реальні номери виводів модулів, тобто знайти параметри в умовах невизначеності.

Якщо компоновка проводиться довільно, то базові елементи об'єднуються в модулі без оптимізації, вручну, а виводам присвоюються номери згідно з конструкторськими вимогами.

Оскільки призначення реальних номерів виводам включає в себе задачу оптимального розміщення базових елементів у модулі, то ця задача, як і компоновка, не оптимізується, що погіршує умови для оптимального трасування друкованих провідників на наступному етапі. Аналогічна задача призначення реальних номерів виводам базових елементів виникає при проектуванні надвеликих інтегральних мікросхем в процесі розробки типових бібліотечних модулів. Якщо при проектуванні друкованих плат компоновку допускається проводити довільно, то при проектуванні інтегральних мікросхем її розв'язують вручну, в діалоговому режимі і вона є досить трудомістка.

Для автоматичного призначення реальних номерів виводам базових елементів на етапі підготовки вхідної інформації присвоюються формальні параметри і задаються типи модулів. Бібліотечні параметри генеруються автоматично самоналагоджувальною програмою-генератором постійних параметрів. Управління цією програмою проводиться формальними параметрами, які задаються на початку обчислювального процесу. При такій організації обчислювального процесу бібліотека не створюється. Побудуємо математичну модель цієї задачі.

Нехай в результаті оптимальної компоновки утворено набір модулів, який задамо множиною $V = \{v_1^t, \dots, v_\zeta^t\}$. Кожному елементу $v_j^t \in V$ поставлено у відповідність деякий його тип $P(v_j^t)$, $t = \overline{1, \kappa}$, $j = \overline{1, \zeta}$, де κ – кількість типів, ζ – кількість елементів у V . Позначимо $v_j^t = \{a_{j_1}^t, \dots, a_{j_{q^t}}^t\}$, $a_{j_i}^t \in A$ множину базових елементів, які входять у модуль t -го типу, а $a_{j_i}^t = \{\tilde{a}_{j_i}^t, \dots, \tilde{a}_{j_{q^t}}^t\}$ – множина формальних номерів виводів j -го елементу t -го типу, де q^t – кількість базових елементів у v_j^t , \tilde{q}^t – кількість номерів виводів j -го елементу t -го типу. Для розміщення базових елементів $a_{j_i}^t$ у модулі v_j^t уведемо установчі позиції, які позначимо множиною $p_j^t =$

$= \{p'_{j_1}, \dots, p'_{j_{q_t}}\}$, а $p'_{j_l} = \{\tilde{p}'_{j_1}, \dots, \tilde{p}'_{j_{q_t}}\}$ – відповідно множина позицій для установаження виводів базових елементів t -го типу.

Задача призначення реальних номерів виводам базових елементів полягає у заміні їхніх формальних номерів бібліотечними так, щоб для знайденого варіанту розміщення цих виводів у посадкових місцях сумарна довжина друкованих електричних зв'язків була мінімальною, тобто $F(\omega^*) = \min_{\omega \in \Omega} F(\omega)$ і виконувалася

умова $\Phi(G) = \tilde{\Phi}(\tilde{G})$. Розміщення базових елементів у модулі і призначення реальних номерів виводам варто проводити на останній ітерації розміщення модулів.

Задача розміщення різногабаритних модулів формулюється таким чином. Множину модулів, які мають різні розміри, необхідно розмістити на поверхні плати так, щоб сумарна довжина зв'язків і площа, яку вони займають, були мінімальними, а зазори між модулями дорівнювали заданій величині. Цю задачу можна звести до одногабаритної, використавши алгоритм компоновки базових елементів у модулі з наступним розміщенням одержаних одногабаритних блоків на платі [8]. В процесі роботи алгоритму проводиться динамічна перебудова позицій на платі для встановлення модулів, тобто оптимізується вибір посадкових місць для їхньої установки. Це – третя задача, в якій аргументом цільової функції є розміщення без повторень. Варіантів розміщення $\mu \in M$, утворених із елементів $d_j \in D$, може бути багато. Тому в процесі розв'язання задачі розміщення різногабаритних модулів з'являється нечіткість і невизначеність, а цільова функція залежить від перестановок, від розбиття n -елементної множини на підмножини і від розміщення без повторень. Запишемо для неї функціонал: $F(\rho^*, \omega^*, \mu^*) = \text{ext}_{\substack{\rho \in \Theta \\ \omega \in \Omega \\ \mu \in M}} F(\rho, \omega, \mu)$.

На етапі розв'язання задач розміщення модулів і трасування друкованих провідників необхідна інформація про конструкцію друкованої плати. Як правило, її модель попередньо

описується і заноситься в бібліотеку. Оскільки електричні схеми відрізняються одна від однієї елементною базою, то така підготовка проводиться або для серії індивідуальних задач, або для кожної схеми окремо. При попередній підготовці моделі плати її поверхню, як правило, розбивають на смуги різної ширини, на кожній з яких можна установажувати модулі певного габариту. Тобто нечіткі параметри, якими є посадкові місця для розміщення модулів і які утворюються вибиранням елементів $d_j \in D$, «огрублюються». В результаті одержується чіткий, але не оптимальний результат. До того ж така підготовка моделі плати ускладнює експлуатацію системи та обмежує її можливості.

Сформулюємо математичну постановку і опишемо обчислювальну схему самоналагоджувального алгоритму знаходження параметрів в умовах невизначеності при розміщенні модулів і побудові моделі друкованої плати. Позначимо $Y = \{v_1, \dots, v_r\} \subset V$ множину модулів, кожен з яких має найбільші габарити, $r \in \{1, \dots, n\}$; $r \in \{1, \dots, n\}$; $\bar{Y} = \{\bar{v}_1, \dots, \bar{v}_r\} \subset V$ – множину модулів, кожен з яких має найменші габарити; $\tilde{V}^k = \{\tilde{v}_1^k, \dots, \tilde{v}_{\xi}^k\}$ – множину модулів, утворену із заданої множини модулів V на k -й ітерації. Задамо $\tilde{D} = \{\tilde{d}_1, \dots, \tilde{d}_{\xi}\}$ – множину позицій для установаження модулів із \tilde{V}^k , утворених на k -й ітерації. В процесі роботи алгоритму проводиться динамічна перебудова моделі плати. Суть цього алгоритму полягає у проведенні послідовних кроків, на кожному з яких задані елементи електричної схеми об'єднуються в модулі. На сформованому із найменших комірок координатної сітки, яким відповідають елементи множини D , регулярному полі позицій розміщуються модулі $\tilde{v}_j^k \in \tilde{V}^k$. Цей процес відбувається доти, доки не буде розміщено найменший за габаритами модуль.

Встановлення модуля $v'_j \in V$ на платі проводиться шляхом обчислення установчих координат (x'_{j_1}, y'_{j_1}) для його виводів за виразами: $x_j = x_0 + f(\kappa, \sigma, \eta, \tau)$, $y_j = y_0 + \tilde{f}(\kappa, \sigma, \eta, \tau)$, де

x_0, y_0 – базові координати для установлення модуля t -го типу, які визначаються за результатами розміщення $v_j' \in V$, k – тип модуля, o – тип орієнтації модуля на платі, η – кількість виводів модуля t -го типу, τ – відстань між виводами модуля t -го типу. Модулі за типами класифікуються згідно з побудовою їхніх корпусів. Такий підхід дає можливість повністю автоматизувати розв'язання задачі розміщення різногабаритних модулів і підготовку моделі друкованої плати для подальшої автоматизації процесу проектування.

Висновок. Уведення формальних параметрів на етапі підготовки вхідних даних та динамічна перебудова моделі друкованої плати дозволяють знаходити параметри в умовах невизначеності, що забезпечує повну автоматизацію проектування друкованих плат. Запропонована організація обчислювального процесу дозволяє перелаштовуватися на різні типи індивідуальних задач, не потребує попередньої підготовки бібліотек, що є досить трудомісткою роботою, спрощує експлуатацію систем автоматизованого проектування.

1. Трухаев Р.И., Лернер В.С. Динамические модели процессов принятия решений. – Кишинев: Штиинца, 1974. – 264 с.
2. Иваненко В.И., Лабковский В.А. Проблема неопределенности в задачах принятия решений. – К.: Наук. думка, 1990 – 136 с.
3. *Обработка нечеткой информации в системах принятия решений* / А.Н. Борисов, А.В. Алексеев, Г.В. Меркурьева и др. – М.: Радио и связь, 1989. – 304 с.

4. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. – М.: Наука, 1981. – 208 с.
5. Иваненко В.И. Проблема невизначеності в теорії рішень і теорії керування // Матеріали XIII міжнар. конф. з автоматичного управління «Автоматика-2006», Вінниця, 25–28 вер. 2006 р. – Вінниця, 2006. – С. 38–46.
6. Корбут А.А., Сигал И.Х., Финкельштейн Ю.Н. Гибридные алгоритмы в дискретной оптимизации // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. – 1986. – № 1. – С. 65–77.
7. Гуляницкий Л.Ф. Разработка гибридных методов дискретной оптимизации на основе G-алгоритмов // Компьютерная математика. – 2005. – № 1. – С. 143–151.
8. Гуляницкий Л.Ф., Тимофеева Н.К. О размещении разногабаритных элементов на печатных платах // УСиМ. – 1982. – № 3. – С. 50–53.
9. Тимофієва Н.К. Знаходження параметрів в умовах невизначеності при розв'язанні задач комбінаторної оптимізації гібридним алгоритмом / Міжнар. наук. конф. «Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту (ISDMCI'2008)». Зб. наук. пр. у 3-х т. – Т. 2 (Ч. 2). – Херсонський нац. техн. ун-т. – Євпаторія, 2008. – С. 73–76.
10. Тимофеева Н.К. Вопросы разработки алгоритмического и программного обеспечения, предназначенного для решения одного класса задач конструкторского проектирования цифровой аппаратуры: Автореф. дис... канд. физ-мат. наук / Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова АН УССР. – К., 1984. – 24 с.
11. Тимофієва Н.К. Теоретико-числові методи розв'язання задач комбінаторної оптимізації: Автореф. дис. ... докт. техн. наук / Ін-т кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України. – К., 2008. – 32 с.

Поступила 08.01.2009

Тел. для справок: (044) 526-6332 (Київ)

© Н.К. Тимофеева, 2009

Н.К. Тимофеева

Самонастраивающиеся алгоритмы нахождения неопределенных параметров в задачах комбинаторной оптимизации

Введение. В теории принятия решений возникают ситуации, характерные некоторой степенью неопределенности [1–5], в частности, связанные с неполной входной и текущей информацией. В литературе при исследовании этой проблемы основное внимание уделяется зада-

чам с нечеткими, стохастическими или комбинированными входными данными (одновременно случайными и нечеткими). Но в задачах комбинаторной оптимизации, наблюдаемых в различных отраслях человеческой деятельности, входные данные характеризуются как нечет-

кой, так и четкой структурой. Для задач, в которых входные данные имеют четкую структуру, математические модели, соответственно и целевая функция, разработаны достаточно фундаментально, поэтому неопределенность для них сведена к минимуму. Поиском способов решения задач с нечеткими входными данными занимаются не одно десятилетие, но точной математической постановки для них еще не разработано. Незирая на попытку строго формализовать понятие неопределенности, например [5], этим понятием пользуются на интуитивном уровне. Для этих задач достаточно сложно смоделировать целевую функцию такую, чтобы глобальное решение удовлетворяло действительной цели исследования.

Постановка проблемы

Рассмотрим нахождение параметров в условиях неопределенности в задачах с четкой входной информацией. Эта проблема возникает потому, что прикладные задачи комбинаторной оптимизации сложны по своей природе и разделяются на подзадачи, для решения которых разрабатывают независимые алгоритмы, с помощью которых основная задача решается их последовательной работой или они работают как встроенные процедуры в итерационном режиме. Алгоритм, объединяющий независимые алгоритмы, ориентированные на решение определенных задач, называется *гибридным* или *комбинированным* [6–8]. В процессе его работы при передаче информации, которая является результатом решения предыдущей задачи, на входе следующего алгоритма могут появляться новые, неопределенные параметры, необходимые для решения очередной задачи, которые невозможно задать во входных данных по условию. Возникает проблема нахождения параметров в условиях неопределенности. Такие задачи наблюдаются и в конструкторском проектировании вычислительной аппаратуры. От эффективного нахождения таких параметров зависит удобство в эксплуатации определенных систем и возможность полной автоматизации процесса проектирования. На примере конструкторского проектирования печатных плат рассмотрим эту проблему и опишем самонастраивающиеся алгоритмы нахождения параметров в условиях неопределенности [9].

Общая задача конструкторского проектирования печатных плат разделяется на такие подзадачи [10]: задача компоновки базовых элементов в модули, оптимальное размещение выводов базовых элементов в модуле и назначение их библиотечных (реальных) номеров, задача размещения разногабаритных модулей на поверхности печатной платы, моделирование конструкции печатной платы при подготовке ее к следующему этапу проектирования, трассировка печатных проводников, контроль топологии печатного монтажа, выпуск конструкторской документации, формирование информации для устройств с числовым программным управлением, где имеет место задача коммивояжера. В процесс проектирования вхо-

дит подготовка электрической схемы и библиотеки постоянной информации. Входная информация в этой задаче разделяется на переменную, которая задается для определенной индивидуальной задачи, и постоянную, одинаковую для серии индивидуальных задач. Постоянную информацию заносят предварительно в библиотеку и используют в процессе решения задачи на разных этапах. Использование библиотечных данных экономически целесообразно, когда проектирование проводится для небольшой номенклатуры многосерийных изделий. Но такой подход экономически неэффективен при большой номенклатуре малосерийных изделий и решении задач, для которых некоторые параметры занести в библиотеку невозможно. Их можно задать лишь после решения очередной задачи. Это касается задачи размещения выводов базовых элементов в модули и назначения их библиотечных номеров и определения посадочных мест для размещения разногабаритных модулей. Так, назначить реальные номера выводам модулей можно лишь после решения задачи компоновки, определить структуру посадочных мест на монтажном поле для установки разногабаритных модулей – после нахождения определенного варианта их размещения. Введение этой информации в диалоговом режиме достаточно трудоемкий процесс, поэтому для автоматизации проектирования на этом этапе разработаны самонастраивающиеся алгоритмы нахождения неопределенных параметров. Поскольку в начале решения задачи наблюдаются неизвестные параметры, то она принадлежит к классу параметрических ситуаций решения [5].

Решение проблемы

Математическую постановку общей задачи проектирования печатных плат сформулируем так. Пусть задана электрическая схема, которую представим графом G . Множеством $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ обозначим его вершины, каждой a_j из которых в соответствие поставлен заданный базовый элемент. Обозначим $\Phi(G)$ функциональные характеристики заданной электрической схемы. Размещение компонент электрической схемы проводится на плате, представляющей собой прямоугольную поверхность с нанесенной на ней координатной сеткой. Она может быть однослойной, двухслойной, многослойной. Перенумеруем ячейки этой сетки и их последовательную нумерацию представим множеством $D = \{d_1, \dots, d_\xi\}$. Из элементов a_j базового множества $A, j \in \{1, \dots, n\}$, образуется комбинаторное множество W – совокупность комбинаторных конфигураций определенного типа (перестановки, разбиения и т.п.), а из элементов d_l базового множества $D, l \in \{1, \dots, \xi\}$, образуется комбинаторное множество M – размещение без повторов. На элементах w комбинаторного множества W и μ комбинаторного множества M вводится целевая функция. Тогда задача проектирования печатных плат заключается в нахождении такого размещения компонент заданной электрической схемы на одном или нескольких слоях, т.е. вы-

боре для размещения элементов $w^* \in W$ комбинаторной конфигурации μ^* из множества M , для которых введённая целевая функция принимала бы оптимальное значение с необходимым выполнением условия $\Phi(G) = \tilde{\Phi}(\tilde{G})$, где $\tilde{\Phi}(\tilde{G})$ – функциональные характеристики электрической схемы \tilde{G} , полученной из G в процессе проектирования.

Как было оговорено, задача проектирования печатных плат разделяется на подзадачи, аргумент целевой функции в которых – комбинаторные конфигурации разных типов [11]. Например, аргументом целевой функции в задаче компоновки является разбиение n -элементного множества на подмножества, задачи размещения разногабаритных модулей на поверхности печатной платы и распределение выводов модулей – перестановка, трассировка печатных плат – размещение без повторов. Исходя из этого, функционал для поставленной задачи запишем как $F(\rho^*, \mu^*, \omega^*) = \text{ext}_{\substack{\rho \in \Theta \\ \mu \in M \\ \omega \in \Omega}} F(\rho, \mu, \omega)$, где ρ – разбиение

n -элементного множества на подмножества, μ – размещение без повторов, ω – перестановка, а Θ, M, Ω – их множества.

Далее опишем самонастраивающиеся алгоритмы нахождения параметров, которые необходимо задавать как входные данные для решения очередной задачи и которые невозможно задать в начале вычислительного процесса. Поскольку основной результат проектирования – оптимальное размещение компонент электрической схемы на плате, то при выборе критериев качества, по которым оценивается результат решения задачи на отдельных этапах, учитывается оптимальная трассировка печатных плат, т.е. критерии качества, задаваемые на очередном этапе решения задачи, моделируются с учетом прогноза результатов.

Выделим подзадачи, требующие вычисления параметров в условиях неопределенности.

Задача компоновки базовых элементов в модули. Содержательная постановка этой задачи такова. Задано n базовых элементов разных типов, между которыми существуют электрические связи. Необходимо эти элементы распределить по корпусам микросхем так, чтобы количество связей между последними было минимальным, или количество связей между элементами, объединенными в микросхемы, было наибольшим. Количество типов, к которым относятся элементы, и количество элементов, которые необходимо объединить по микросхемам, задано. После решения этой задачи необходимо задать реальные номера выводов модулей, т.е. найти параметры в условиях неопределенности.

Если компоновка проводится произвольная, то базовые элементы объединяются в модули без оптимизации, вручную, а выводам присваиваются номера согласно с конструкторскими требованиями. Поскольку назначе-

ние реальных номеров выводам включает в себя задачу оптимального размещения базовых элементов в модуле, то эта задача, как и компоновка, не оптимизируется, что ухудшает условия для оптимальной трассировки печатных проводников на следующем этапе. Аналогичная задача назначения реальных номеров выводов базовых элементов возникает при проектировании сверхбольших интегральных микросхем в процессе разработки типичных библиотечных модулей. Если при проектировании печатных плат компоновка допускается произвольная, то при проектировании интегральных микросхем ее решают вручную, в диалоговом режиме и она достаточно трудоемка.

Для автоматического назначения реальных номеров выводам базовых элементов на этапе подготовки входной информации присваиваются формальные параметры и задаются типы модулей. Библиотечные параметры генерируются автоматически самонастраивающей программой-генератором постоянных параметров. Управление этой программой осуществляется формальными параметрами, задаваемыми в начале вычислительного процесса. При такой организации библиотека не создается. Построим математическую модель этой задачи.

Пусть в результате оптимальной компоновки образован набор модулей, который зададим множеством $V = \{v_1^t, \dots, v_\zeta^t\}$. Каждому элементу $v_j^t \in V$ поставлен в соответствии некоторый его тип $P(v_j^t)$, $t = \overline{1, \kappa}$, $j = \overline{1, \zeta}$, где κ – количество типов, ζ – количество элементов в V . Обозначим $v_j^t = \{a_{j_1}^t, \dots, a_{j_{q^t}}^t\}$, $a_{j_i}^t \in A$, множество базовых элементов, входящих в модуль t -го типа, а $a_{j_i}^t = \{\tilde{a}_{j_{q_1}}^t, \dots, \tilde{a}_{j_{q_1}}^t\}$ – множество формальных номеров выводов j -го элемента t -го типа, где q^t – количество базовых элементов в v_j^t , \tilde{q}^t – количество номеров выводов j -го элемента t -го типа. Для размещения базовых элементов $a_{j_i}^t$ в модуле v_j^t введем установочные позиции, которые обозначим множеством $p_j^t = \{p_{j_1}^t, \dots, p_{j_{q^t}}^t\}$, а $p_{j_i}^t = \{\tilde{p}_{j_{q_1}}^t, \dots, \tilde{p}_{j_{q_1}}^t\}$ – соответственно множество позиций для установки выводов базовых элементов t -го типа.

Задача назначения реальных номеров выводам базовых элементов заключается в замене их формальных номеров библиотечными так, чтобы для найденного варианта размещения этих выводов в посадочных местах суммарная длина печатных электрических связей была бы минимальной, т.е. $F(\omega^*) = \min_{\omega \in \Omega} F(\omega)$ и выполнялось условие $\Phi(G) = \tilde{\Phi}(\tilde{G})$. Размещение базовых элементов в модуле и назначение реальных номеров выводов желательно проводить на последней итерации размещения модулей.

Задача размещения разногабаритных модулей формулируется так. Множество модулей, имеющих разные габариты, необходимо разместить на поверхности платы

так, чтобы суммарная длина связей и площадь, которую они занимают, были минимальными, а зазоры между модулями равнялись заданной величине. Эту задачу можно свести к одногабаритной, используя алгоритм компоновки базовых элементов в модули с последующим размещением полученных одногабаритных блоков на плате [8]. В процессе работы алгоритма проводится динамическая перестройка позиций на плате для установки модулей, т.е. оптимизируется выбор посадочных мест для их установки. Это – третья задача, в которой аргументом целевой функции является размещение без повторений. Вариантов размещения $\mu \in M$, образованных из элементов $d_j \in D$, может быть много. Поэтому в процессе решения задачи размещения разногабаритных модулей появляется нечеткость и неопределенность, а целевая функция зависит от перестановок, от разбиения n -элементного множества на подмножества и от размещения без повторений. Запишем для нее функционал:

$$F(\rho^*, \mu^*, \omega^*) = \underset{\substack{\rho \in \Theta \\ \omega \in \Omega \\ \mu \in M}}{\text{ext}} F(\rho, \mu, \omega)$$

На этапе решения задачи размещения модулей и трассировки печатных проводников необходима информация о конструкции печатной платы. Как правило, ее модель предварительно описывается и заносится в библиотеку. Поскольку электрические схемы отличаются одна от другой элементной базой, то такая подготовка проводится или для серии индивидуальных задач, или для каждой схемы отдельно. При предварительной подготовке модели платы ее поверхность, как правило, разбивают на полосы разной ширины, на каждой из которых можно устанавливать модули определенного габарита, т.е. нечеткие параметры, которыми являются посадочные места для размещения модулей и которые образуются выбором элементов $d_j \in D$, «огрубляются». В результате получается четкий, но далеко не оптимальный результат. К тому же такая подготовка модели платы осложняет эксплуатацию системы и ограничивает ее возможности.

Сформулируем математическую постановку и опишем вычислительную схему самонастраивающегося алгоритма нахождения параметров в условиях неопределенности при размещении модулей и построении модели печатной платы. Обозначим $Y = \{v_1, \dots, v_r\} \subset V$ множество модулей, каждый из которых имеет наибольшие габари-

ты $r \in \{1, \dots, n\}$; $\bar{Y} = \{\bar{v}_1, \dots, \bar{v}_r\} \subset V$ – множество модулей, каждый из которых имеет наименьшие габариты; $\tilde{Y}^k = \{\tilde{v}_1^k, \dots, \tilde{v}_r^k\}$ – множество модулей, образованное из заданного множества модулей V на k -й итерации. Заданное множество модулей V на k -й итерации. Заданное множество $\tilde{D} = \{\tilde{d}_1, \dots, \tilde{d}_r\}$ – множество позиций для установки модулей из \tilde{Y}^k , образованных на k -й итерации. В процессе работы алгоритма проводится динамическая перестройка модели платы. Суть этого алгоритма заключается в проведении последовательных шагов, на каждом из которых заданные элементы электрической схемы объединяются в модули. На сформированном из наименьших ячеек координатной сетки, которым соответствуют элементы множества D , регулярном поле позиций размещаются модули $\tilde{v}_j^k \in \tilde{Y}^k$. Этот процесс проводится до тех пор, пока не будет размещен наименьший по габаритам модуль.

Установка модуля $v_j^t \in V$ на плате проводится путем вычисления установочных координат $(x_{j_t}^t, y_{j_t}^t)$ для его выводов по выражениям: $x_j = x_0 + f(\kappa, \omega, \eta, \tau)$, $y_j = y_0 + \tilde{f}(\kappa, \omega, \eta, \tau)$, где x_0, y_0 – базовые координаты для установки модуля t -го типа, определяемые по результатам размещения $v_j^t \in V$, κ – тип модуля, ω – тип ориентации модуля на плате, η – количество выводов модуля t -го типа, τ – расстояние между выводами модуля t -го типа. Модули по типам классифицируются согласно с построением их корпусов. Такой подход дает возможность полностью автоматизировать решение задачи размещения разногабаритных модулей и подготовку модели печатной платы для последующей автоматизации процесса проектирования.

Заключение. Ввод формальных параметров на этапе подготовки входных данных и динамическая перестройка модели печатной платы позволяют находить параметры в условиях неопределенности, что обеспечивает полную автоматизацию проектирования печатных плат. Предложенная организация вычислительного процесса позволяет достаточно гибко перестраиваться на разные типы индивидуальных задач, не требует образования библиотек, подготовка которых – достаточно трудоемка, упрощает эксплуатацию систем автоматизированного проектирования.