

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 004.896

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ
МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ
В ЗАДАЧАХ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
МОДУЛЕЙ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

В. П. Корячко, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой САПР ВС РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0003-0272-673X, e-mail: koryachko.v.p@rsreu.ru

Д. А. Перепелкин, д.т.н., профессор, декан ФВТ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0003-4775-5745, e-mail: perepelkin.d.a@rsreu.ru

В. Ю. Ликучев, аспирант РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-2430-5234, e-mail: v.likuchov@yandex.ru

*Топологическое проектирование радиоэлектронных модулей заключается в решении задач размещения элементов на печатной плате и трассировки печатных проводников. Результаты выполнения этих процедур определяют уровень надежности и качества функционирования модулей в составе аппаратуры, особенно когда ввиду рабочего назначения к ней предъявляются множественные технические требования. Наиболее трудоемкой на рассматриваемом этапе является процедура размещения радиоэлектронных элементов. В ходе данной процедуры задается конечная печатно-узловая структура модуля и определяется время последующей трассировки соединений. Тенденция усложнения средств радиоэлектронной техники располагает к созданию новых методов, алгоритмов и инструментальных средств автоматизированного размещения радиоэлектронных элементов. Их использование позволит сократить период топологического проектирования, но при этом сохранить или даже повысить существующий уровень качества изделий. Одно из перспективных направлений в данной области – разработка и исследование интеллектуальных методов проектирования и, в частности, методов, построенных на основе мультиагентных систем. **Цель работы** – разработка математической модели представления мультиагентных систем для решения задачи размещения радиоэлектронных элементов.*

Ключевые слова: автоматизация проектирования, топологическое проектирование, размещение элементов, мультиагентная система, электронный модуль, печатная плата.

DOI:10.21667/1995-4565-2023-83-48-61

Введение

Изучение и разработка мультиагентных систем (МАС) за свою относительно короткую историю успели образовать обширную и богатую сферу научно-практической деятельности.

В частности, рассматривается применение МАС:

- для управления дорожным движением в мегаполисах [1];
- обеспечения информационной безопасности [2];
- разработки нейросетей [3];
- принятия решений [4];
- защиты информационных активов [3];
- защиты распределенных сетей [5];
- логистики в электронной коммерции [6].

С одной стороны, развитие теории МАС, стимулированное достижениями в таких областях, как искусственный интеллект, распределенные информационные системы, компьютерные сети и т.д., открыло возможность применять мультиагентный подход в решении многих практических задач, а с другой – породило большое число несогласованных формализмов, каждый из которых соответствует конкретному случаю использования данного подхода. В результате этого, совокупность теоретических знаний о МАС на сегодняшний день является плохо структурированной. Важной проблемой в сфере исследования мультиагентных систем является создание универсальных, адаптируемых и масштабируемых моделей их описания. Благоприятной почвой для такого рода исследований может выступить сфера проектирования радиоэлектронных средств.

В настоящее время многие задачи конструкторского проектирования и оптимизации приобретают все более сложный характер. Это вызвано постоянным ростом числа элементов, их функциональной сложности и стремлением к микроминиатюризации изготавливаемых устройств [7].

Развитие микроэлектронных компонентов характеризуется увеличением плотности активных элементов на кристалле примерно на 75 % в год, а это, в свою очередь, вызывает необходимость в увеличении количества их выводов на корпусе на 40 % в год. Это обуславливает постоянно растущий спрос на новые методы корпусирования, позволяющие увеличить плотность межсоединений на печатной плате. В результате общих тенденций площадь монтажных подложек уменьшается примерно на 7 %, а физические размеры электронной аппаратуры на 10-20 % в год [8].

Важную роль при проектировании современных печатных плат приобретает учет критериев электромагнитной совместимости, что обусловлено стремлением к повышению быстродействия и снижению габаритов цифровых электронных средств. В связи с этим является актуальным совершенствование математического и программного обеспечения систем автоматизированного проектирования печатных плат цифровых электронных средств [7].

В условиях современного уровня развития электронной техники многие стандарты и подходы к проектированию подвергаются пересмотру. Во многих случаях это связано с тем, что правила проектирования составляются как разумный компромисс между максимально достижимым качеством проектируемой техники и возможностями систем проектирования и производства. Постоянный рост технического уровня производственных площадок и развитие систем проектирования не могут и не должны сдерживаться отставанием развития методологических подходов. На сегодняшний день некоторые из таких подходов в области проектирования печатных плат требуют переоценки целесообразности применения [9].

В решении задач проектирования модулей радиоэлектронных средств мультиагентный подход отчасти реализуется применением биоинспирированных, роевых методов оптимизации, например алгоритм пчелиной колонии в решении задачи размещения элементов на печатной плате. В работе [10], в соответствии с предложенными в [11, 12] математическими моделями поведения пчел, разработана модификация метода пчелиной колонии для решения задачи размещения, позволяющая находить качественные решения задач большой размерности. В работе [13] на основе бионических методов оптимизации [14-16], был разработан муравьиный алгоритм решения задач размещения элементов. Основная идея муравьиных алгоритмов заключается в моделировании поведения колонии муравьев, при поиске кратчайшего пути от муравейника к источнику пищи.

В основе работы подобных алгоритмов лежит имитация поведения природных децентрализованных систем на уровне коллективного выполнения некоторой функции. Каждый агент такой МАС представлен абстрактным объектом без каких-либо свойств и способности к принятию решений и является по сути всего лишь вариантом набора переменных в области случайного поиска. Эвристический характер размещения элементов средствами таких алгоритмов делает их непригодными для использования в практике создания прецизионных устройств и систем (например, измерительных систем или систем автоматизированного кон-

троля), где разработчики предъявляют множественные требования к конструкции и качеству функционирования электронных модулей.

Так называемый агентно-ориентированный подход предполагает наличие у агентов возможности целеполагания и хотя бы примитивного интеллекта или вычислительной части (далее – ВЧ агента или ВЧА), а следовательно, способности к планированию и принятию решений. Создание методов оптимизации, учитывающих эти важнейшие свойства агентов, позволит сделать процесс автоматизированного решения задачи интеллектуальным, а также расширить число оптимизационных критериев.

Цель данной статьи – описать агентно-ориентированную модель представления мультиагентных систем для решения задачи топологического проектирования модулей радиоэлектронных средств, рассмотреть ее основные свойства и выделить из них те, которые позволят охарактеризовать эту модель как методологический базис для построения других, более сложных методов и моделей МАС в проектировании.

Модель «цель-регламент»

В работе [17] авторами предложена агентно-ориентированная модель для решения задачи размещения. Согласно модели, система состоит из агентов, между которыми существуют связи и отношения взаимного влияния. Каждый агент (в данном случае – элемент конструкции) представляется программной сущностью с набором параметров, состав которого определяется конструктивными и функциональными особенностями реального объекта, а также условиями и требованиями задачи. Поведение агента, состоящее из выполнения примитивных действий, отражается в изменении значений его параметров (например, координат положения в пространстве, угла поворота и т.д.). Агент принимает решение для выполнения следующего действия, опираясь на оценку состояний связанных агентов и условий среды в своей окрестности. В результате поведения агентов (преобразований агентных параметров) происходит самоорганизация децентрализованной системы с целью обнаружения своего оптимального состояния, соответствующего экстремуму целевой функции.

Отметим две ключевые особенности приведенной модели:

1. В контексте агентно-ориентированного подхода, находясь в условиях неопределенности, каждый агент осуществляет поиск экстремума своей собственной целевой функции, а целевая функция оптимизации состояния всей системы – есть некоторая композиция, примененная ко всем агентным целевым функциям. Такой принцип отражает свойство системной эмергентности в плане целеполагания.

2. Агенты действуют и, следовательно, изменяют значения своих параметров (еще можно сказать, что агенты совершают операции преобразования над параметрами), руководствуясь некоторыми списками правил – регламентами.

Таким образом, вычислительную часть агента можно представить детерминированным автоматом $A = (X, Y, S, \Delta, \Lambda)$, где X – множество входных данных о параметрах агента, положении цели, состоянии среды в окрестности агента; Y – множество формируемых управляющих воздействий или операций преобразования параметров; S – множество внутренних состояний решателя; $\Delta: S \times X \rightarrow S$ – функция переходов, отображающая пары «текущее состояние/единица входных данных» на следующее состояние; $\Lambda: S \times X \rightarrow Y$ – функция выходов или регламент, отображающая пары «текущее состояние/единица входных данных» на формируемое воздействие.

Вышеописанную модель мы будем называть моделью «цель-регламент» или ЦР-моделью. ЦР-модель описывает простейшую МАС, так как поведение агентов в ней регламентируется заданным набором правил, и поэтому является детерминированным. Отметим одно из возможных теоретических свойств модели.

Гипотеза: любую МАС можно выразить ЦР-моделью.

В случае задачи размещения агенты выполняют только одну функцию – поиск оптимального положения на плоскости путем перемещения, и ЦР-модель однозначно описывает

такую МАС. Однако многие МАС включают в себя агенты, которые выполняют множество функций в процессе самоорганизации, а значит, для них характерно более сложное поведение. Примерами являются экономические агенты, коллективные роботы, агенты природных роевых систем – пчелиных колоний, птичьих стай и т.д. Для представления МАС ЦР-моделью достаточно каждой отдельной функции агента поставить в соответствие отдельную архитектуру ВЧА с собственными целевыми задачами и регламентом. Такую архитектуру будем называть функциональным планом агента. В результате вычислительная часть многофункционального агента будет описываться вектором его функциональных планов.

В работе [18], посвященной процессам самоорганизации и развития МАС, приведена модель планирования поведения агента, главными компонентами которой являются вектор принятого $PL(t)$ и вектор фактически реализованного $Fa(t)$ планов действий (не путать с введенным понятием функционального плана), а также отношения $PL(t) > Fa(t)$ и $Fa(t) > PL(t)$. Запись $PL(t) > Fa(t)$ означает, что если был принят план $PL(t)$, а фактически вследствие случайных воздействий реализовался $Fa(t)$, то возникнут издержки (так называемые издержки завышения), которых можно было бы избежать, если бы был принят план $PL(t) > Fa(t)$. Аналогичным образом, $Fa(t) > PL(t)$ означает, что если бы был принят план $PL(t) > Fa(t)$, то можно было бы избежать так называемых издержек занижения. Условие оптимальности выражает требование, чтобы минимизировать большую из величин: математического ожидания издержек завышения (риска завышения) и математического ожидания издержек занижения (риска занижения). Задача планирования состоит в выборе варианта плана из имеющегося набора возможных альтернатив, и чтобы осуществить выбор, необходимо наличие у агента способности сопоставлять планы.

Очевидно, что многие агенты по своей природе не могут планировать поведение с учетом возможных издержек, особенно в условиях глобальной неопределенности и динамически изменяющейся среды. Их поведение носит либо рефлекторный, как в случае с животными, насекомыми и т.п., либо исполнительный характер, как в случае с техническими объектами, где предписания содержатся непосредственно в вычислительной структуре агентов. С другой стороны, вычислительная часть агентов, способных к планированию путем сопоставления возможных планов, также может быть представлена пятеркой A только с расширенным X , который будет включать компоненты из баз данных и знаний агента, накопленных в процессе обучения, и регламентом Λ , спроектированным таким образом, чтобы агент в процессе поведения минимизировал издержки выбора того или иного плана.

Обобщением вышесказанного и в то же время нестрогим аргументом справедливости гипотезы является утверждение о том, что агент не может функционировать в процессе самоорганизации системы, не руководствуясь хотя бы минимальным набором правил, заложенным в его вычислительную структуру. В противном случае, поведение агентов было бы хаотичным и бессистемным.

Математическое описание задачи и объекта размещения

Для построения методов и алгоритмов решения задачи размещения необходим формальный аппарат, включающий в себя математическое описание самой задачи и описание ее объекта, в данном случае – мультиагентной системы, которая включает элементы конструкции и среду размещения. Дадим такие описания с учетом особенностей представления МАС ЦР-моделью и специфики математических моделей САПР топологического проектирования печатных плат.

Среда размещения моделируется двумерным пространством. На него наложена сетка, единичный элемент которой называется дискретом. В ЭВМ сетка представляется массивом $M(I_x, I_y)$.

Поле размещения (печатная плата или другая монтажная поверхность) задается системой линейных уравнений:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i \quad (i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n), \quad (1)$$

$$x_j \geq 0 \quad (j=1, 2, \dots, n).$$

Линии, которые описываются уравнениями, образуют контуры многоугольников поля размещения и запрещенных зон, причем последние лежат внутри многоугольника поля размещения. Поверхности, ограниченные многоугольниками, проецируются на сетку среды размещения, изменяя признак элементов массива M .

Модель среды размещения представлена на рисунке 1.

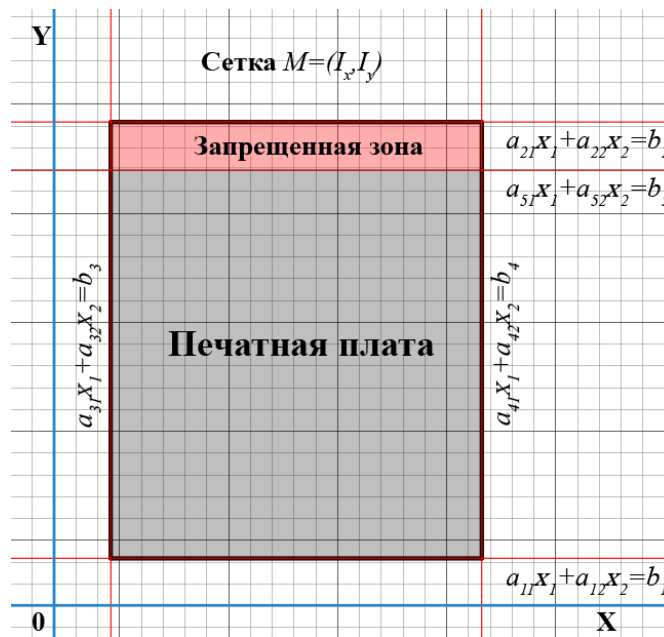


Рисунок 1 – Среда размещения
Figure 1 – Placement environment

Электрическая схема моделируется гиперграфом $H(Q, E)$, где $Q = \{q_i | 1, 2, \dots, n\}$ – множество элементов, $E = \{e_j | 1, 2, \dots, m\}$ – множество электрических цепей. Каждое ребро $e_j \in E$ связывает подмножество вершин $Q_j \in Q$, которым соответствуют элементы, соединенные j -й цепью.

Задача размещения состоит в нахождении такого отображения Q на область M , заданную системой (1), при котором обеспечивался бы экстремум целевой функции качества размещения. Позиции элементов на поле размещения не зафиксированы.

Для отражения метрических характеристик элементов каждый из них рассматривается в виде прямоугольника, полностью покрывающего контуры посадочного места элемента. Для прямоугольника заданы его размеры w и l , координаты (x', y') полюса или первого вывода элемента, координаты фиксированных внутри прямоугольника точек, то есть остальных выводов. Для всех элементов известна таблица принадлежности выводов цепям и координаты выводов перед началом размещения. Метрическая модель элемента представлена на рисунке 2.

Связь между двумя выводами, принадлежащими одной цепи, геометрически описывается отрезком, который соединяет две точки двух прямоугольников. Расстояние между этими точками с координатами (x_i, y_i) и (x_j, y_j) определяется выражением

$$d_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}.$$

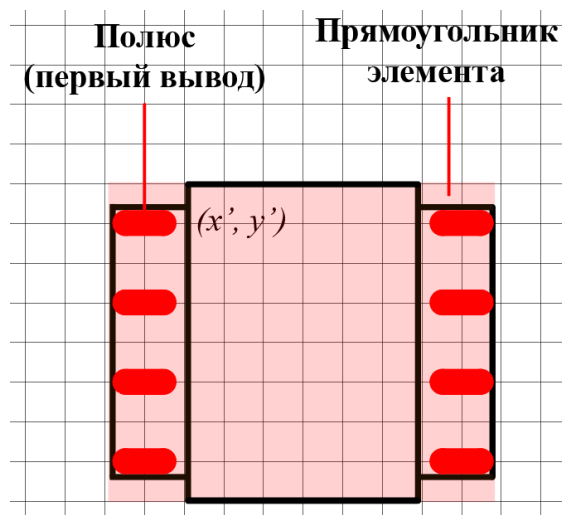


Рисунок 2 – Метрическая модель элемента
Figure 2 – Metric element model

Каждому элементу соответствует агент $a_i \in A$, где $A = \{a_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ – множество агентов, формирующих МАС. Пусть $P_i = \{p_{ki} | k = 1, 2, \dots, m\}$ – вектор параметров i -ого агента, который включает постоянные и изменяемые по значению компоненты. Определим параметры агента для задачи размещения и соответствующие операции преобразования над ними (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Параметры агента и операции преобразования параметров
Table 1 – Agent parameters and parameter conversion operations

Параметр p_{ki}	Операция преобразования
Габаритная ширина, w_i	$p_{ki} = const$
Габаритная длина, l_i	$p_{ki} = const$
Габаритная высота, h_i	$p_{ki} = const$
Абсцисса полюса, x'_i	$mov: (p_{ki}) \rightarrow (p_{ki} + \Delta p_{ki}), \Delta p_{ki} = n_{\Delta} \Delta l_{\Delta}, D(mov) = I_x, R(mov) = I_x$, где n_{Δ} – некоторое количество дискретов, l_{Δ} – размер дискрета, D – область определения операции, R – область значения операции
Ордината полюса, y'_i	$mov: (p_{ki}) \rightarrow (p_{ki} + \Delta p_{ki}), \Delta p_{ki} = n_{\Delta} \Delta l_{\Delta}, D(mov) = I_y, R(mov) = I_y$,
Угол поворота полюса, ϕ'_i	Поворот полюса на 90° : $rotate: (p_{ki}) \rightarrow (p_{ki} + \Delta p_{ki}), \Delta p_{ki} = 90, D(rotate) =$ $= \{0, 90, 180, 270, 360\}, R(rotate) = \{0, 90, 180, 270, 360\}, 0 \equiv 360$
Сторона платы, на которой расположен элемент (top или bottom), s'_i	Перенос на противоположную сторону (логическая): $side: (p_{ki}) \rightarrow (p_{ki} \oplus \Delta p_{ki}),$ $\Delta p_{ki} \in \{0, 1\}, R(side) = \{0, 1\}, D(side) = \{0, 1\}$
Тип элемента (chip или dip)	$p_{ki} \in \{0, 1\} = const$
Признак помехообразующего элемента (определяется относительно средней оценки)	$p_{ki} \in \{0, 1\} = const$
Признак тепловыделяющего элемента (определяется относительно средней оценки)	$p_{ki} \in \{0, 1\} = const$

Переменная Δp_{ki} есть величина приращения параметра p_{ki} при его преобразовании (совершении операции над ним), или, в другом смысле, величина управляющего воздействия, определяемая ВЧА по регламенту в зависимости от текущего состояния данного агента, состояний связанных с ним агентов и состояния среды в окрестности. Очевидно, что кроме количественной компоненты, управляющее воздействие задается значением селектора, определяющего, какую операцию нужно применить к вектору параметров агента. Таким образом, правило регламента есть отображение некоторой ситуации, в которой находится агент в данный момент времени, на некоторое управляющее воздействие или вид преобразования параметров, а регламент есть вектор всех возможных таких отображений. Формально:

$$\lambda : (P_i(t), \{P_j(t)|l, 2, \dots, l\}) \rightarrow \Delta p_{ki},$$

где $\lambda \in \Lambda$ – правило регламента; $P_i(t)$ – значение вектора параметров i -го агента, определяющее его положение в пространстве в момент времени t ; $\{P_j(t)|l, 2, \dots, l\}$ – положения l агентов из множества $B \subset A$ (связанных с i -м агентом или влияющих на него); $y[f][\Delta p_{ki}] \in Y$, $f \in \{move, side, rotate\}$ – управляющее воздействие с селектором операции $[f]$ и количественной компонентой Δp_{ki} .

Из таблицы 1 видна метрическая специфика поведения агента. Он перемещается строго по дискретам сетки, поворачивается против часовой стрелки на угол, кратный 90° , меняет сторону размещения. Параметры агента, которые характеризуют его положение в пространстве, то есть четверка $(x'_i, y'_i, \phi'_i, s'_i)$, а также операции над этими параметрами определены относительно полюса соответствующего прямоугольника (первого вывода элемента). Это позволяет сократить вектор P_i , не включая в него положения остальных выводов.

Изменение положения геометрического полюса агента, связанного с первым выводом, индуцирует изменение положения соответствующего прямоугольника, а значит всех его точек. Представляя вектор (x, y) каждой из точек вектором в однородных координатах $(x, y, 1)$, можно определить ее положение после изменения значений параметров агента, умножив этот вектор на матрицу линейных преобразований T . Вид матрицы зависит от выполняемой операции (см. таблицу 2).

Таблица 2 – Операции над параметрами и матрицы линейных преобразований координат
Table 2 – Operations on parameters and matrices of linear coordinate transformations

Операция преобразования	Матрица линейного преобразования
<i>mov</i> (случай изменения одновременно двух координат)	$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \Delta p_{ki} & \Delta p_{ki} & 1 \end{pmatrix}$
<i>rotate</i> (поворот против часовой стрелки)	$T = \begin{pmatrix} \cos \Delta p_{ki} & \sin \Delta p_{ki} & 0 \\ -\sin \Delta p_{ki} & \cos \Delta p_{ki} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
<i>side</i> (соответствует зеркальному отражению относительно оси ординат; преобразование происходит, если $\Delta p_{ki} = 1$)	$T = \begin{pmatrix} -\Delta p_{ki} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

Пользуясь таким приемом, можно вычислять координаты выводов элементов, а значит расстояния между выводами, принадлежащими одной цепи.

Перейдем к описанию оптимизационных задач для одного агента и всей МАС.

Задача оптимизации для i -го агента имеет вид:

$$\min_{\vec{P}_i \in D_p} (f_1(\vec{P}_i), f_2(\vec{P}_i), \dots, f_m(\vec{P}_i)),$$

где $\vec{P}_i$ – множество решений вектора параметров, относящееся к непустой области всех возможных решений D_p , $f_1(\vec{P}_i)$ – критерий оптимизации.

В качестве критерия может выступать, например, минимальная сумма длин связей данного агента (без учета степеней связности элементов):

$$f_k(\vec{P}_i) = \sum_{j=1}^l d_{ij},$$

где l – количество агентов, связанных с i -м агентом.

Критерии агента носят различный физический характер, и поэтому целесообразно составить целевую функцию с применением аддитивного критерия:

$$F = \sum_{k=1}^m \left[w_k \Delta O(f_k(\vec{P}_i)) \right],$$

где $O(f_k(\vec{P}_i))$ – нормированная оценка критерия, w_k – весовой коэффициент.

Задача оптимизации для всей МАС является составной. Она учитывает композиции агентных задач по всем агентным критериям, а также собственные критерии:

$$\begin{aligned} & \min_{\vec{P}_i \in D_p} (g_1(f_1(\vec{P}_1), f_1(\vec{P}_2), \dots, f_1(\vec{P}_n)), g_2(f_2(\vec{P}_1), f_2(\vec{P}_2), \dots, f_2(\vec{P}_n)), \dots, \\ & \dots, g_m(f_m(\vec{P}_1), f_m(\vec{P}_2), \dots, f_m(\vec{P}_n)), g_1((\vec{P}_1), (\vec{P}_2), \dots, (\vec{P}_n)), g_2((\vec{P}_1), (\vec{P}_2), \dots, (\vec{P}_n)), \dots, \\ & \dots, g_l((\vec{P}_1), (\vec{P}_2), \dots, (\vec{P}_n))) = \min_{\vec{P}_i \in D_p} \left(\overrightarrow{g_k(f_k(\vec{P}_i), z_j(\vec{P}_1, \vec{P}_2, \dots, \vec{P}_n))} \right) (i=1, 2, \dots, n, \\ & k=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, l), \end{aligned}$$

где $\overrightarrow{(f_k(\vec{P}_i))}$ – вектор содержаний однокритериальных задач для n агентов; $\overrightarrow{g_k(f_k(\vec{P}_i))} = (g_k \circ f_k)(\vec{P}_i)$, $k \in m$, $i = \overline{1, n}$ – содержание однокритериальной задачи для МАС, состоящей из n агентов по одному из m агентных критериев; $\overrightarrow{g_k(f_k(\vec{P}_i))}$ – содержание многокритериальной задачи для МАС по всем агентным критериям; $\overrightarrow{z_j(\vec{P}_1, \vec{P}_2, \dots, \vec{P}_n)}$ – вектор l собственных критериев МАС.

Применение g_k к $f_k(\vec{P}_i)$, то есть композиция $(g_k \circ f_k)(\vec{P}_i)$, в простейшем случае означает суммирование показателей критерия $f_k(\vec{P}_i)$ всех агентов МАС. Например, критерий минимальной длины связей i -го агента при осуществлении такой композиции станет критерием минимальной длины всех связей между всеми агентами:

$$\overrightarrow{g_k(f_k(\vec{P}_i))} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l d_{ij}.$$

Примером собственного критерия МАС является минимальная суммарная площадь, занимаемая элементами.

Аддитивный критерий оптимизации для МАС имеет вид:

$$G = \left(\sum_{k=1}^m \left[c_k \cdot O(\overrightarrow{g_k(f_k(\vec{P}_i))}) \right] \right) + \left(\sum_{j=1}^l \left[c_j \cdot O(z_j(\vec{P}_1, \vec{P}_2, \dots, \vec{P}_n)) \right] \right),$$

где c – весовой коэффициент.

Язык диалоговых аннотаций

Для описания процессов, реализующих важнейшее свойство агентов – способность общаться с целью обмена информацией и разрешения конфликтов в процессе совместного по-

ведения, в рассматриваемую модель необходимо ввести некоторое коммуникационное средство (язык агентов), которое должно отвечать следующим условиям:

- отсутствие избыточности;
- достаточность и полнота высказываний при минимальном числе элементов в нем;
- возможность обработки высказываний простой ВЧА;
- возможность регулирования ответных реакций с помощью списков правил (регламентов).

Другими словами, язык агентов должен быть настолько простым, чтобы его высказывания могли обрабатываться программными сущностями технических объектов; неизбыточным, чтобы вероятность информационных коллизий была минимальной; и достаточным в своих высказываниях, чтобы агенты полностью реализовывали свои коммуникационные возможности.

При таких условиях диалог между агентами, содержащий более одного высказывания с каждой стороны, является уже избыточным (во-первых, прохождение диалога может занимать неопределенное время, во-вторых, диалог может содержать ненужные, «паразитные» с точки зрения цели самого диалога высказывания), и здесь возникает противоречие между первыми двумя условиями, приведенными вначале. Для разрешения этого противоречия выберем такое средство: пусть единственное высказывание с каждой стороны будет представлять собой содержательное описание той части диалога, которая принадлежала бы этой стороне, то есть некую аннотацию диалога. Тогда стандартное высказывание будет иметь вид:

$$A \rightarrow B: \langle \text{намерение} \rangle, \langle \text{цель} \rangle.$$

Такая запись означает, что в данном диалоге агент А выражает агенту В намерение совершить некоторое действие с некоторой целью. Первая часть до знака «:» служит для инициализации диалога (установления диалоговой пары) и передачи в среду обработки данных о состоянии агентов. Элемент $\langle \text{намерение} \rangle$ содержит информацию о действии, которое намерен совершить агент А, и действии, которое предлагается совершить агенту В, чтобы разрешить намерение. Элемент $\langle \text{цель} \rangle$ отражает критерии оптимизации. Это необходимые элементы для осуществления обработки диалогов с помощью регламентов.

Приведем пример диалога агентов А и В в задаче размещения (содержание элементов высказываний представлены в неформальном виде):

$$A \rightarrow B: \langle \text{занять место В} \rangle, \langle \text{минимизация длины связей} \rangle,$$

$$B \rightarrow A: \langle \text{отказать А} \rangle, \langle \text{минимизация длины связей} \rangle.$$

Как видно из диалога, агент А обращается к В с просьбой уступить ему место на поле размещения, чтобы А смог уменьшить длину связей с другими агентами. Обработав обращение с помощью регламента, агент В отказывает А, так как находится в оптимальном для себя положении.

Чтобы диалог разрешил конфликтную ситуацию, агент А должен получить достаточное основание для отмены своего намерения. Это основание будет формироваться из анализа состояния агентов по критерию, который указан в элементе $\langle \text{цель} \rangle$ высказывания-запроса, а если состояния по данному критерию у агентов совпадают, то в соответствии с регламентом будет выбран другой критерий, и уже он будет записан в $\langle \text{цель} \rangle$ высказывания-ответа. Например, при осуществлении намерения агента А, оба агента оказались бы в одинаковом состоянии по критерию длины связей, но в разных по критерию тепловой нагрузки. По регламенту это позволило бы отказать агенту А, предоставив ему достаточное основание. Тогда диалог принял бы вид:

$$A \rightarrow B: \langle \text{занять место В} \rangle, \langle \text{минимизация длины связей} \rangle,$$

$$B \rightarrow A: \langle \text{отказать А} \rangle, \langle \text{тепловая нагрузка} \rangle.$$

Программная реализация языка агентов представляет собой механизм обработки условного блока, определяющего возникновение конфликтной ситуации между вычислительными решениями для двух агентов.

Инструментом для разрешения конфликтов может также выступить введение иерархии агентов по какому-либо признаку и, следовательно, возможности выражать свои намерения в разных наклонениях (просьба, приказ, рекомендация), приоритет которых будет устанавливаться в регламентах и соблюдаться при обработке высказываний и принятии решений. Это очередное возможное усовершенствование рассматриваемого средства взаимодействия агентов.

Уровневое представление ЦР-модели

ЦР-модель является комплексным описанием МАС. Она учитывает в себе наиболее важные сущностные аспекты системы в процессе ее самоорганизации. Чтобы структурировать такое описание, будем выражать его в форме стека уровней, каждый из которых соответствует определенному представлению системы через набор объектов (математических компонентов модели). Функции уровня – это выводы, получаемые в результате конкретного представления. Они могут передаваться на нижестоящие уровни, а также служить для построения методов, алгоритмов и процедур оптимизации. Представим уровневую структуру в виде таблицы:

Таблица 3 – Уровневое представление ЦР-модели

Table 3 – Layered representation of the Target-Regulation model

№	УРОВЕНЬ	ОБЪЕКТЫ УРОВНЯ	ФУНКЦИИ УРОВНЯ
1	ЦЕЛЕВОЙ	• целевые функции агентов и МАС; • критерии оптимизации; • условия и ограничения задачи	• общее описание задачи; • метод многокритериальной оптимизации
2	СИСТЕМНЫЙ	• структура МАС; • связи и отношения между агентами; • описания среды функционирования МАС	• конкретизация задачи; • построение системных иерархий; • разбиение МАС на подсистемы; • типизация агентов
3	ОБЪЕКТНЫЙ	• метрические характеристики агентов; • метрические особенности поведения агентов; • параметры агентов; • операции преобразования параметров	• функциональные планы ВЧА; • регламенты поведения; • регламенты коммуникации
4	ПРИКЛАДНОЙ	• представление объектов в памяти ЭВМ	• алгоритмы процедур решения задачи; • программная реализация алгоритмов решения задачи

Дадим краткую характеристику каждого уровня.

На первом уровне система представляется как совокупность целевых функций агентов вместе с их композицией – целевой функцией системы. Для реализации основной функции уровня – общего описания задачи вводятся такие объекты, как критерии оптимизации, условия и ограничения. На этом уровне могут быть выведены аддитивный критерий и метод многокритериальной оптимизации.

Системный уровень дает структурное представление МАС, описывает связи и отношения между агентами, их роли и иерархии, если таковые будут целесообразно ввести. Как и на первом уровне, здесь дается описание задачи, но уже в конкретных количественных и качественных выражениях. Например, в случае задачи размещения, вводится гиперграф соединений элементов, конструктивные особенности среды, ограничения в виде систем линейных неравенств и т.п. На данном уровне могут быть выведены эвристические алгоритмы оптимизации, алгоритмы группировки и типизации агентов, исследованы процессы системного развития.

На объектном уровне МАС представляется как множество интеллектуальных сущностей – агентов, которые характеризуются наборами параметров и допустимых операций. С учетом специфики этих атрибутов, на основе описаний, полученных на предыдущих уровнях, могут быть выведены структуры ВЧА, функциональные планы ВЧА, регламенты поведения и коммуникации в виде списков правил поведения и преобразования параметров. Этот уровень является ключевым в определении агентно-ориентированного подхода к решению задач оптимизации методами МАС.

Прикладной уровень отражает программную реализацию полученных алгоритмов решения задачи и представление объектов системы в памяти ЭВМ. Здесь определяются способы эффективного выполнения вычислительных процедур, состоящие в отсеке заведомо неоптимальных вариантов, а также механизмы распараллеливания вычислений.

Принцип уровневого описания ЦР-модели позволяет декомпозировать задачи синтеза и анализа конкретной МАС. Вообще говоря, описание МАС может ограничиваться, например, одним лишь целевым уровнем. Однако, чем больше уровней затрагивает описание МАС, тем более проработанной будет ее модель.

Кроме того, каждый уровень представления определяет целую предметную область для изучения в рамках теории МАС.

Заключение

Отражая расширенное множество условий задачи и свойств объекта размещения, ЦР-модель МАС может стать методологической и формальной основой для построения перспективных методов, алгоритмов и инструментальных средств автоматизированного проектирования. Развитие мультиагентного подхода требует решения широкого спектра задач в контексте ЦР-модели на всех ее уровнях. Вот лишь некоторые из них:

- на целевом уровне: определение приоритета критериев оптимизации размещения, построение композиционной целевой функции МАС;
- на системном уровне: создание механизмов выделения функциональных узлов схемы, определение признаков типизации элементов и узлов;
- на объектном уровне: составление регламентов поведения и коммуникации агентов;
- на программном уровне: создание механизмов распараллеливания вычислительных процедур.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ МД-3201.2022.1.6.

Библиографический список

1. Городецкий В. И. Самоорганизация и многоагентные системы // Известия РАН «Теория и системы управления». 2012. № 2, № 3.
2. Гаврилов А. В. Тихомиров А. В. Применение иммунных систем в целях защиты корпоративной информации от нецелевого использования // Известия ЮФУ, технические науки. 2010.
3. Шниперов А. Н., Сантьев Е. А. Разработка системы защиты информации для гетерогенных информационных систем на основе мультиагентного подхода // Информатика и системы управления. 2014. № 1(39).
4. Скобелев П. О. Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации в процессах принятия решений // Дис. д-ра техн. наук, 05.13.01, Самара, 2003.
5. Беляев В. И. Безопасность в распределенных системах // Открытые системы. 1995. № 3.
6. Иванов Д. А. Логистика. Стратегическая кооперация. М.: Вершина, 2006.

7. Курейчик В. В., Жиленков М. А. Гибридный алгоритм решения оптимизационных задач конструкторского проектирования с учетом электромагнитной совместимости // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. № 62. С. 64-70. DOI:10.21667/1995-4565-2017-62-4-64-70.
8. Мылов Г. В., Дрожжин И. В. Снижение плотности межсоединений многослойных печатных плат // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 54. С. 115-120.
9. Богданов Д. С., Богданова И. А. Проблемы современного проектирования печатных плат // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 65. С. 119-123. DOI:10.21667/1995-4565-2018-65-3-119-123.
10. Лебедев Б. К., Лебедев В. Б. Размещение на основе метода пчелиной колонии. Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 12 (113). С. 12-19.
11. Teodorović D., Dell'Orco M. Bee Colony Optimization – a Cooperative Learning Approach to Complex Transportation Problems // Advanced OR and AI Methods in Transportation: Proceedings of 16th Mini-EURO Conference and 10th Meeting of EWGT (13-16 September 2005). – Poznan: Publishing House of the Polish Operational and System Research, 2005, pp. 51-60.
12. Quijano N., Passino K. M. Honey Bee Social Foraging Algorithms for Resource Allocation: Theory and Application. Columbus: Publishing house of the Ohio State University, 2007. 39 p.
13. Латыпов И. Р., Суздальцев И. В. Размещение разногабаритных элементов на печатной плате, с использованием муравьиного алгоритма / Современные материалы, техника и технология. Сборник научных статей 7-й международной научно-практической конференции. 2017. С. 213-216.
14. Суздальцев И. В., Чермошенцев С. Ф., Богула Н. Ю. Бионические алгоритмы многокритериального проектирования печатных плат электронных средств // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. СПб., 2017. Т. 1. С. 527-530.
15. Bogula N. Yu., Chermoshencev S. F., Suzdaltsev I. V. Evolutionary algorithms for digital electronic printed circuit board design // Proceedings of International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2015. St. Petersburg, 2015, pp. 153-156.
16. Suzdaltsev I. V., Chermoshencev S. F., Bogula N. Y. Genetic algorithm for onboard equipment placement inside the unmanned aerial vehicle fuselage // Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016. St. Petersburg, 2016, pp. 262-264.
17. Перепелкин Д. А., Ликучев В. Ю. О многоагентном подходе к решению задач размещения радиоэлектронных компонентов. Информационные технологии, межвузовский сборник научных трудов. Рязань: ИП Коняхин А.В. (Book Jet), 2021. 207 с.
18. Лихтенштейн В. Е., Коняевский В. А., Росс Г. В., Лось В. П. Мультиагентные системы: самоорганизация и развитие. М.: Финансы и статистика, 2018. 264 с.: ил.

UDC 004.896

MATHEMATICAL MODEL OF REPRESENTATION OF MULTI-AGENT SYSTEMS AND ITS APPLICATION IN THE PROBLEMS OF TOPOLOGICAL DESIGN OF MODULES OF RADIO-ELECTRONIC DEVICES

V. P. Koryachko, Dr. Sc. (Tech.), full professor, Head of the Department, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0003-0272-673X, e-mail: koryachko.v.p@rsreu.ru
D. A. Perepelkin, Dr. Sc. (Tech.), professor, Dean of FCE, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0003-4775-5745, e-mail: perepelkin.d.a@rsreu.ru
V. Y. Likuchev, post-graduate student, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0002-2430-5234, e-mail: v.likuchov@yandex.ru

Topological design of radio-electronic modules consists in solving the problems of placing elements on a printed circuit board and tracing printed conductors. The results of the implementation of these procedures determine the level of reliability and quality of functioning of the modules in the equipment, especially

when, due to the working purpose, multiple technical requirements are imposed on it. The most time-consuming at this stage is the procedure for placing elements. During it, the final printed node structure of the module is set and the time of the subsequent connection tracing is determined. The tendency for the complication of electronic equipment means to create new methods, algorithms and tools for automated placement. Their use will reduce the period of topological design, but at the same time maintain or even improve the existing level of product quality. One of the promising areas is the development and research of intelligent design methods, and in particular methods based on multi-agent systems. **The aim of the work** is to describe one representation model of multi-agent systems for solving the problem of placing elements, to state the key aspects, properties, and also the mathematical formalism of this model.

Key words: design automation, topological design, placement of elements, multi-agent system, electronic module, printed circuit board.

The work is performed at the support of the Grant of the President of the Russian Federation МД-3201.2022.1.6.

DOI:10.21667/1995-4565-2023-83-48-61

References

1. **Gorodeckij V. I.** Samoorganizatsiya i mnogoagentnye sistemy. *Izvestiya RAN «Teoriya i sistemy upravleniya»*. 2012, no. 2, no. 3. (in Russian).
2. **Gavrilov A. V., Tihomirov A. V.** Primenenie immunnykh sistem v celyakh zashchity korporativnoj informatsii ot neceleovogo ispol'zovaniya. *Izvesti YUFU, tekhnicheskie nauki*. 2010. (in Russian).
3. **Shniperov A. N., Sant'ev E. A.** Razrabotka sistemy zashchity informatsii dlya geterogennykh informatsionnykh sistem na osnove mul'tiagentnogo podhoda. *Informatika i sistemy upravleniya*. 2014, no. 1(39). (in Russian).
4. **Skobelev P. O.** Otkrytie mul'tiagentnye sistemy dlya operativnoj obrabotki informatsii v processah prinyatiya reshenij. Dis. d-ra tekhn. nauk, 05.13.01, Samara, 2003. (in Russian).
5. **Belyaev V. I.** Bezopasnost' v raspredelennykh sistemah. *Otkrytye sistemy*. 1995, no. 3. (in Russian).
6. **Ivanov D. A.** Logistika. *Strategicheskaya kooperatsiya*. Moscow. Vershina, 2006. (in Russian).
7. **Kurejchik V. V., Zhilenkov M. A.** Gibridnyj algoritm resheniya optimizatsionnykh zadach konstruktorskogo proektirovaniya s uchetom elektromagnitnoj sovmestimosti. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2017, no. 62, pp. 64-70. DOI: 10.21667/1995-4565-2017-62-4-64-70. (in Russian).
8. **Mylov G. V., Drozhzhin I. V.** Snizhenie plotnosti mezhsoedinenij mnogoslownykh pechatnykh plat. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2015. No 54. S. 115-120. (in Russian).
9. **Bogdanov D.S., Bogdanova I. A.** Problemy sovremennogo proektirovaniya pechatnykh plat. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2018, no. 65, pp. 119-123. DOI: 10.21667/1995-4565-2018-65-3-119-123. (in Russian).
10. **Lebedev B. K., Lebedev V. B.** Razmeshchenie na osnove metoda pchelinoj kolonii. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki*. 2010, no. 12 (113), pp. 12-19. (in Russian).
11. **Teodorović D., Dell'Orco M.** Bee Colony Optimization – a Cooperative Learning Approach to Complex Transportation Problems. *Advanced OR and AI Methods in Transportation: Proceedings of 16th Mini-EURO Conference and 10th Meeting of EWGT (13-16 September 2005)*. Poznan: Publishing House of the Polish Operational and System Research, 2005, pp. 51-60.
12. **Quijano N., Passino K. M.** Honey Bee Social Foraging Algorithms for Resource Allocation: Theory and Application. *Columbus: Publishing house of the Ohio State University*, 2007. 39 p.
13. **Latypov I. R., Suzdaltsev I. V.** Razmeshchenie raznogabaritnykh elementov na pechatnoj plate, s ispol'zovaniem murav'inogo algoritma. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologiya. Sbornik nauchnykh statej 7-j mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. 2017, pp. 213-216. (in Russian).
14. **Suzdaltsev I. V., Chermoshencev S. F., Bogula N. Yu.** Bionicheskie algoritmy mnogokriterial'nogo proektirovaniya pechatnykh plat elektronnykh sredstv. *Mezhdunarodnaya konferenciya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam*. SPb., 2017, vol. 1, pp. 527-530. (in Russian).
15. **Bogula N. Yu., Chermoshencev S. F., Suzdaltsev I. V.** Evolutionary algorithms for digital electronic printed circuit board design. *Proceedings of International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2015*. St. Peterburg, 2015, pp. 153-156.

16. **Suzdaltsev I. V., Chermoshencev S. F., Bogula N. Y.** Genetic algorithm for onboard equipment placement inside the unmanned aerial vehicle fuselage. *Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016*. St. Petersburg, 2016, pp. 262-264.

17. **Perepelkin D. A., Likuchev V. Y.** O mnogoagentnom podhode k resheniyu zadach razmeshcheniya radioelektronnyh komponentov. *Informacionnye tekhnologii, mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov. Ryazan. IP Konyahin A.V. (Book Jet)*, 2021. 207 p. (in Russian).

18. **Lihtenshtejn V. E., Konyavskij V. A., Ross G. V., Los' V. P.** *Mul'tiagentnye sistemy: samoorganizaciya i razvitie*. Moscow. Finansy i statistika, 2018. 264 p.: il. (in Russian).