

УДК 658.512

А. А. Абдулраб

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Генератор графовых моделей вычислительно-преобразовательных цепей как потоковых процессоров сред виртуальных инструментов

Изложена общая постановка задачи структурного синтеза потоковых процессоров в классе вычислительно-преобразовательных цепей на операционных элементах с управляемым параметром. Дана ее декомпозиция на ряд частных графовых задач с привлечением аппарата алгебры структурных чисел. Установлены условия построения класса минимальных по числу используемых операционных элементов вычислительно-преобразовательных цепей с одноранговой s-моделью для сред виртуальных инструментов.

Среды виртуальных инструментов (VI-среды), IP-блоки, потоковые процессы, структурный синтез вычислительно-преобразовательных цепей, САПР с развивающейся базой знаний

Сообществу исследователей, занимающихся формальными методами синтеза вычислительно-преобразовательных цепей (ВП-цепей) [1]–[4], неплохо удастся изучение их математических аспектов, а вот с продвижением этих методов в практику автоматизированного проектирования реальных СФ-блоков (IP-блоков¹) [5] и последующим тиражированием полезных практик для воплощения их в средах виртуальных инструментов (VI-средах) [6] дела обстоят хуже. Хотя и наблюдается устойчивая тенденция роста числа проектов с использованием формальных методов, однако эта практика автоматизированного проектирования остается скорее исключением, чем нормой.

В настоящей статье рассматривается применение аппарата алгебры структурных чисел для комбинаторно-топологического синтеза минимальных по сложности (по числу операционных с линейно управляемым параметром элементов) ВП-цепей с эквивалентными аппроксимационными возможностями в классе рациональных функций.

Общая постановка задачи. Общая задача синтеза сводится к генерации полного множества неизоморфных циклически связных неприведенных структур (N -структур) $\Pi(r, r_{kk})$ s-моделей ВП-цепей, каждая из которых обеспечивает заданные значения рангов (порядков полиномов в числителе и знаменателе дробно-рациональной функции) r и r_{kk} при минимальном числе операционных элементов (ОЭ) из базового набора, т. е.

$$F\{H_T, \text{rang}(S), \text{rang}'(S_{kn})\} \rightarrow \min_{H_T \in \tilde{H}_T} \quad (1)$$

при:

$$\text{rang}(S) = r, \quad (2)$$

$$\text{rang}'(S_{kn}) = r_{kk}, \quad (3)$$

$$T = \{T_1, T_2\}, \quad (4)$$

$$H_T \not\approx H'_T, \quad (5)$$

$$\exists_{\alpha \in A} \quad \forall_{\beta \in A} \quad \left(\frac{\partial A}{\partial \alpha} \cap \frac{\partial A}{\partial \beta} \neq 0 \right). \quad (6)$$

Здесь $F\{\cdot\}$ – функционал сложности, заданный на универсальном множестве H_T помеченных N -структур H_T ; $\text{rang}(\cdot)$ и $\text{rang}'(\cdot)$ – операторы вычисления рангов r и r_{kk} структурных моделей ВП-цепей; S и S_{kn} – одноранговые s-модели ВП-цепей с разомкнутыми и короткозамкнутыми внешними координатными полюсами соответственно; T – двухтиповой набор ОЭ; знак отношения « $\not\approx$ » выражает неизоморфизм N -структур H_T и H'_T , являющихся элементами универсального множества $\tilde{H}_T$; A – структурное число, обратным геометрическим изображением которого является N -структура H_T ; $\frac{\partial A}{\partial \alpha}$ и $\frac{\partial A}{\partial \beta}$ – алгебраические производные структурного числа A по его элементам α и β соответственно.

¹ IP - Intellectual property.

Подходы к решению задачи. Возможны 2 принципиально различных подхода к решению этой задачи.

Первый подход предусматривает комбинаторный характер ее решения как экстремальной задачи на графах.

В рамках *второго подхода* задача сводится к решению систем компонентных уравнений, причем наилучшим при прочих равных условиях считается такое решение, которое содержит максимально возможное число нулевых параметров ОЭ, составляющих полную топологическую структуру цепи [7], [8]. Применительно к рассматриваемому классу цепей с нелинейно управляемым параметром реализация этого подхода сопряжена со значительными трудностями как алгоритмического, так и вычислительного характера. Это объясняется дискретностью и многоэкстремальностью, а также сложностью учета ограничений на структурные параметры цепи, когда применение непрерывной постановки задачи влечет за собой существенные трудности ее решения.

С этой точки зрения представляется более рациональной декомпозиция общей задачи синтеза (включающей задачи параметрического и структурного синтеза) на две отдельные задачи:

- поиск рациональной структуры;
- вычисление параметров ОЭ цепи с найденной структурой, удовлетворяющих заданным критериям качества.

Конечно, эти задачи нельзя ставить и решать абсолютно независимо друг от друга. Этапы структурного и параметрического синтеза взаимосвязаны вследствие итеративного характера поиска наилучшего технического решения, что обуславливает необходимость многократного решения упомянутых задач. Однако затрачиваемые дополнительные временные ресурсы в сравнении с решением общей задачи синтеза на основе компонентных уравнений в рамках полной топологической структуры (конечно, в предположении удачного исхода, гарантирующего глобальность оптимума) цепи окупаются упрощением как процедуры структурного синтеза, так и процедуры вычисления параметров ОЭ при заданной структуре цепи. Практический опыт, приобретенный при решении достаточно широкого круга задач синтеза ВП-цепей, подтверждает результативность этой точки зрения. Поэтому в дальнейшем изложении вопросов структурного синтеза будем придерживаться первого (комбинаторного) подхода.

Декомпозиция задачи. Из сформулированной общей задачи синтеза можно выделить частные задачи, имеющие самостоятельное значение.

Решение осуществляется в условиях ограничений на варьируемые N -структуры, каждая из которых является подграфом графа полной топологической структуры с фиксированным числом вершин. В связи с этим прежде всего возникает вопрос о существовании решения этой задачи.

Содержание *первой частной задачи* и составляет исследование вопросов о разрешимости общей задачи. Если в системе ограничений (1)–(6) оставить только одно ограничение на ранг цепи, т. е. не принимать во внимание идентификацию внешних полюсов и рассматривать ее без учета взаимосвязи с внешней средой, то приходим к задаче синтеза одноранговой цепи. Это *вторая частная задача*. Ее содержанием является исследование условий построения класса минимальных ВП-цепей с одноранговой s -моделью. Важным является то обстоятельство, что искомая биранговая минимальная цепь является элементом класса одноранговых цепей с заданным значением ранга.

Учет ограничения (3) составляет содержание *третьей частной задачи* – сокращение полученного в результате решения второй задачи множества конкурентоспособных структур с заданным значением ранга $r(r_{kk})$ до множества структур, удовлетворяющих значению второго ранга r_{kk} . Здесь проявляется учет связи ВП-цепи с внешней средой посредством идентификации внешней пары полюсов.

Комбинаторный характер решения перечисленных частных задач не исключает получения двух и более биранговых структур, являющихся представлениями одной и той же ВП-цепи. Под одинаковостью цепей здесь понимается изоморфизм их N -структур при фиксированной паре внешних вершин.

Проблема определения, являются ли N -структуры изоморфными, составляет содержание *четвертой частной задачи*, отражающей выполнение ограничения (5). Проблема изоморфизма сетей относится к числу труднейших в теории графов [9]–[11]. В работе [12] показано, что эта задача относится к классу задач, обладающих NP-полнотой. Для нее неизвестны методы установления изоморфизма сетей общего вида с полиномиальной зависимостью времени решения от размерности задачи. Все известные строгие алгоритмы характеризуются экспоненциальной зависимостью времени решения от размерности задачи. Учет специфики рассматриваемого класса задач на графах позволяет в ряде случаев разработать вполне пригодные для большинства практических задач процедуры установления изоморфизма с привлечением некоторых

эвристических правил. При использовании в качестве инварианта графа цепи ее приведенной структуры (P -структуры²) возможно построение процедуры установления изоморфизма графов с привлечением некоторых эвристических правил.

Сокращению числа конкурентоспособных структур, минимальных по сложности, способствует учет в процессе синтеза N -структур ВП-цепей их циклической связности (6). Исследование вопроса алгоритмизации проверки условия циклической связности составляет содержание *пятой частной задачи*. Для ее решения привлекается аппарат алгебры структурных чисел [1], способствующий автоматизации этой непростой процедуры в процессе анализа структур ВП-цепей.

Очевидна большая общность в постановке частных задач синтеза двух- и трехполусных ВП-цепей. Основное отличие состоит в характеристических параметрах N -структур, а также в тех топологических объектах, которые связаны с определением и вычислением рангов цепей исходя из условий связи с внешней средой.

Синтез минимальной по рангу s -модели ВП-цепи. Согласно работе [3] справедлива следующая теорема синтеза N -структуры s -модели ВП-цепи.

Теорема. Минимальная по рангу r N -структура ВП-цепи представляет собой композицию $H_{T_{r_{\min}}} = DR_V \dot{\cup} DR_\eta$ двух сопряженных деревьев

DR_V и DR_η , $DR_V \in \tilde{DR}_V$, $DR_\eta \in \tilde{DR}_\eta$. Здесь $\dot{\cup}$ – знак композиции деревьев, определяемой как такое наложение двух деревьев, при котором их конечные вершины с одинаковыми метками совпадают.

Доказательство. Поскольку N -структура минимальна по рангу r , то, как показано в работе [3], она имеет только одну пару сопряженных деревьев $\langle DR_V, DR_\eta \rangle$, где DR_V – дерево из ветвей типа g , а DR_η – дерево из ветвей типа $G\theta$, причем $\text{card}(DR_V \dot{\cup} DR_\eta) = 2r$. Так как

$$DR_V \dot{\cup} DR_\eta \subseteq H_{T_{r_{\min}}} \quad \text{и} \quad \text{card } H_{T_{r_{\min}}} = 2r, \quad \text{то}$$

$$H_{T_{r_{\min}}} = DR_V \dot{\cup} DR_\eta, \quad \text{что и требовалось доказать.}$$

Покажем, что существует N -структура $H_{T_{r_{\min}}}$, минимальная относительно ранга r . Доказательство проведем по методу математической индукции. Пусть $r = 0$. Тогда $n = 1$, $m = 0$. Но по-

лучающийся тогда граф не будет удовлетворять определению N -структуры³ [2], предполагающей наличие, как минимум, двух вершин. Пусть $r = 1$. Тогда $n = 2$, $m = 2$ и возможны следующие 3 варианта N -структур (рис. 1). Ранг N -структуры, изображенной на рис. 1, в, равен 1, т. е. N -структура, минимальная по рангу $r = 1$, существует. Допустим, что существует N -структура $H_{T_{r_{\min}}}$, минимальная относительно ранга $r = p$. Тогда $n = p + 1$, $m = 2p$ и $H_{T_{p_{\min}}} = DR_V^p \dot{\cup} DR_\eta^p$, где $\langle DR_V^p \dot{\cup} DR_\eta^p \rangle$ – единственная пара сопряженных деревьев N -структуры, причем DR_V^p – дерево из ветвей типа g , а DR_η^p – дерево из ветвей типа $G\theta$.

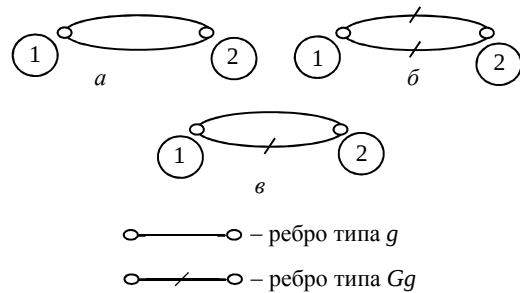


Рис. 1

Покажем, что существует N -структура $H_{T_{(p+1)_{\min}}}$, минимальная относительно ранга $r = p + 1$. Пусть X^P – множество вершин N -структуры $H_{T_{(p+1)_{\min}}}$. Эту структуру построим следующим образом:

$$H_{T_{(p+1)_{\min}}} = H_{T_{(p)_{\min}}} \dot{\cup} \begin{pmatrix} \langle x^*, x_{p+1} \rangle & \langle x^{**}, x_{p+1} \rangle \\ G\theta & g \end{pmatrix},$$

где $x^*, x^{**} \in X_p$ (возможно, $x^* = x^{**}$), $x_{p+1} \notin X_p$. Число вершин N -структуры равно $p + 1$, число ребер – $-2p + 2$. Покажем, что ее ранг равен $p + 1$. Действительно,

$$\begin{aligned} H_{T_{(p+1)}} &= \\ &= DR_V^p \dot{\cup} DR_\eta^p \dot{\cup} \begin{pmatrix} \langle x^*, x_{p+1} \rangle & \langle x^{**}, x_{p+1} \rangle \\ G\theta & g \end{pmatrix} = \\ &= DR_V^{p+1} \dot{\cup} DR_\eta^{p+1}, \end{aligned}$$

³ N -структура ранга r называется минимальной по рангу, если ее размерность по вершинам n и ребрам m минимальна, т. е. n и m не могут быть уменьшены без уменьшения r .

² P -структура, в отличие от N -структуры, не имеет меток, характеризующих тип ребра.

где DR_V^{p+1} , DR_η^{p+1} – деревья N -структуры $H_{T_{(p+1)}}$ из ветвей типа g и $G\theta$ соответственно (это легко проверяется по определению дерева). Нетрудно видеть, что пара $\langle DR_V^{p+1}, DR_\eta^{p+1} \rangle$ является парой сопряженных деревьев N -структуры $H_{T_{(p+1)}}$. Тогда, учитывая, что $r = \eta - v$, где $\eta = G_\eta$, $v = G_v$, а G_η и G_v – число ветвей типа $G\theta$ в деревьях DR_η и DR_v , получим $r = p + 1$. Кроме того, так как пара $\langle DR_V^p, DR_\eta^p \rangle$ единственная, то и пара $\langle DR_V^{p+1}, DR_\eta^{p+1} \rangle$ единственная. Тогда N -структура $H_{T_{(p+1)}}$ минимальна относительно ранга $r = p + 1$, т. е. $H_{T_{(p+1)}} = H_{T_{(p+1)\min}}$.

Пример. Требуется синтезировать минимальную по рангу $r = 3$ N -структуру цепи в базовом наборе ОЭ.

С учетом изложенного число вершин N -структуры $n = 4$, а число ребер $m = 6$. Один из возможных вариантов N -структуры представлен на рис. 2. Δ -функцию s -модели цепи, соответствующей этой N -структуре, найдем в алгебре структурных чисел:

$$\Delta(\theta) = \det A, \quad \{G\theta, g\}$$

где $A = [1 \ 4][3 \ 4 \ 5 \ 6][1 \ 2 \ 3 \ 6]$ – структурное число, геометрическим изображением которого является граф N -структуры цепи (рис. 2). В результате выполнения операции умножения однострочных структурных чисел получим

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 3 & 4 & 5 & 5 & 5 & 6 & 3 & 5 & 5 & 5 & 5 & 6 \\ 2 & 2 & 2 & 3 & 6 & 2 & 2 & 1 & 2 & 3 & 6 & 2 \end{bmatrix}.$$

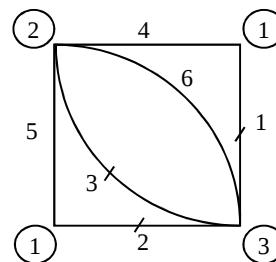


Рис. 2

Отсюда

$$\begin{aligned} \Delta(\theta) = & \theta^3 G_1 G_2 G_3 + \\ & + \theta^2 [G_1 G_2 (G_4 + G_5 + G_6) + G_1 G_3 G_5 + G_2 G_3 G_4] + \\ & + \theta [G_4 G_5 (G_1 + G_2 + G_3) + G_1 G_5 G_6 + G_2 G_4 G_6] + \\ & + G_4 G_5 G_6, \end{aligned}$$

где G_i – проводимости ОЭ, представленных в N -структуре цепи соответствующими по номеру ребрами ($i = 1-6$).

Подведем итоги:

1. Универсальность предложенного комбинаторно-алгебраического подхода генерации графовых моделей ВП-цепей позволяет преодолеть общепризнанную сложность процессов разработки потоковых процессоров для сред виртуальных инструментов.

2. Общая задача структурного синтеза представлена в виде композиции на частные задачи, имеющие самостоятельное значение. Декомпозиция предполагает учет условий, ограничивающих варьируемые N -структуры. Каждая из них является связным подграфом графополной топологической структуры с фиксированным числом вершин.

3. Сокращение числа конкурентоспособных структур, минимальных по сложности, предполагает учет в процессе синтеза N -структур ВП-цепей их циклической связности. Исследование вопросов циклической связности составляет содержание отдельной частной задачи, для решения которой целесообразно привлечение аппарата алгебры структурных чисел, открывающее возможность автоматизации этой непростой процедуры при анализе ВП-цепей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беллерт С., Возняки Г. Анализ и синтез электрических цепей методом структурных чисел / пер. с польск.; под ред. П. А. Ионкина. М.: Мир, 1972.
- Герасимов И. В., Родионов С. В. О возможности применения метода структурных чисел для синтеза функциональных преобразователей на основе элементов с линейноуправляемым параметром // Изв. ЛЭТИ. 1980. Вып. 278. С. 17–21.

- Герасимов И. В. Теория, проектирование и применение вычислительно-преобразовательных цепей (синтез и реализация): Дис. ... д-ра техн. наук / ЛЭТИ. Л., 1986.
- Герасимов И. В., Сафьянников Н. М. Эволюция проблемы структурно-аналоговых вычислений: квантовый компьютер // Вестн. молодых ученых. Сер. «Технические науки». 2003. № 6. С. 3–16.

5. Герасимов И. В., Сафьянников Н. М., Якимовский Д. О. Сложно-функциональные блоки смешанных систем на кристалле: автоматизация функционального проектирования / под ред. И. В. Герасимова. СПб.: ЭЛМОР, 2012.

6. Основания технологии комплементарного проектирования наукоемких изделий / И. В. Герасимов, С. А. Кузьмин, Л. Н. Лозовой, А. В. Никитин. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010.

7. Ланнэ А. А. Оптимальный синтез линейных электронных схем. М.: Связь, 1978.

8. Оптимальная реализация линейных электронных RLC-схем / А. А. Ланнэ, Е. Д. Михайлова, Б. С. Саркисян, Я. Н. Матвийчук. Киев: Наук. думка, 1982.

9. Кристофидес Н. Теория графов: Алгоритмический подход. М.: Мир, 1978.

10. Ильницкий Л. Я. Применение дробно-рациональных приближений в теории функциональных преобразователей. Киев: Наук. думка, 1971.

11. Уилсон Р. Введение в теорию графов. М.: Мир, 1977.

12. Свами М., Тхуласираман К. Графы, сети и алгоритмы. М.: Мир, 1984.

A. A. Abdulrab

Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

GENERATOR OF GRAPH MODELS OF COMPUTATIONALLY-CONVERTER CIRCUITS AS STREAM PROCESSORS OF VIRTUAL INSTRUMENTS ENVIRONMENTS

Present the General formulation of the problem of structural synthesis of stream processes in a class of computationally-Converter EAP-chains operating with the controlled parameter elements. Given its decomposition to a number of private graph tasks with attraction of the staff of the algebra of structural numbers. The terms of construction of a class of minimal number of the operating elements of the EAP-chain with a one-rank s-model for environments of virtual instruments.

Virtual instruments (VI-environment), IP-blocks, stream processes, structural synthesis EAP-circuits, CAD emerging knowledge base

УДК 004.67

Н. А. Жукова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Гармонизация, интеграция и слияние многомерных измерений параметров природных и технических объектов в системах мониторинга¹

Предлагаются решения по адаптации технологий гармонизации, интеграции и слияния данных и их применению для обработки и анализа измерений параметров природных и технических объектов в системах мониторинга. Для каждой технологии приводится перечень основных этапов и определяются особенности работы с данными на каждом этапе. Рассматривается технология исследования данных, расширяющая стандартный набор технологий работы с данными.

Интеллектуальный анализ данных, гармонизация данных, интеграция данных, слияние данных

Технологии гармонизации, интеграции и слияния измерений активно развивались на протяжении последних десяти лет в области интеллектуальных геоинформационных систем [1] и нашли широкое применение при решении практических задач обработки и анализа данных в различных предметных областях.

Гармонизация данных предполагает определение основных понятий и их взаимоотношений (онтологии) по соответствующим предметным областям и/или сферам ответственности [2]. В широком смысле под гармонизацией данных понимается приведение данных к стандартному формату. Основные аспекты гармонизации заключаются в обеспечении доступа к большому числу разнородных источников данных, а также в преобразовании данных в необходимый пользователю вид или формат конкретных приложений.

¹ Работа выполнена при поддержке «Российского фонда фундаментальных исследований» по конкурсу молодежных инициативных проектов «Мой первый грант» (соглашение №12-07-31209\13).