УДК 004.896:621.3

РАЗДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ПРИ МУЛЬТИАГЕНТНОМ СИНТЕЗЕ СХЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ

Курлюк Е.А., Ларченко Н.А., Давыдов М.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, kurluke750@gmail.com

Аннотация: предложен мультиагентный подход к синтезу схем электрических принципиальных, основанный на разделении электрического и пространственного представлений. Электрическая структура и компоновка схемы формируются разными агентами и проходят собственные этапы проверки. Для контроля согласованности представлений вводится операция восстановления электрической связности по пространственному графу. Рассмотрен итерационный процесс синтеза, предусматривающий раздельную корректировку электрического и пространственного графов по результатам проверки.

Ключевые слова: большие языковые модели, САПР, схемотехника, синтез, мультиагентность, графы.

I. ВВЕДЕНИЕ

Рост сложности электронных устройств сопровождается увеличением трудоёмкости разработки и проверки схем электрических принципиальных. Процесс проектирования включает выбор структуры и компонентов, построение электрических соединений, назначение параметров, проверку полученного решения и подготовку схемы к последующему анализу и редактированию. Применение больших языковых моделей расширяет возможности автоматизации этих операций за счёт взаимодействия с инструментами автоматизированного проектирования [1].

Современные исследования показывают возможность использования больших языковых моделей для генерации схемотехнических решений, управления средствами проектирования и организации итерационного процесса улучшения полученного результата [1, 2]. Мультимодальные модели применяются при построении графического представления схемы и его оценке по визуальной обратной связи [3]. При этом электрическая структура схемы и расположение её элементов описывают разные свойства одного проектного решения и требуют различных способов обработки и проверки.

В работе предлагается мультиагентный подход, основанный на разделении электрического и пространственного представлений схемы электрической принципиальной. Электрическая структура и пространственная компоновка формируются специализированными агентами, соответствие между ними контролируется программными средствами.

II. БОЛЬШИЕ ЯЗЫКОВЫЕ МОДЕЛИ В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

В исследованиях последних лет большие языковые модели используются для автоматизации отдельных этапов проектирования электронных схем. Среди разработанных на их основе решений можно выделить ChatEDA [4], EDAid [5], AnalogCoder [6] и AaLLM [7]. В подобных решениях модели используются для формирования электрических схем, управления последовательностью проектных операций, взаимодействия со средствами моделирования и анализа полученных результатов.

Одним из способов снизить сложность задачи, решаемой большой языковой моделью, является распределение отдельных этапов проектирования между несколькими агентами. Такой принцип используется в EDAid и AaLLM, где каждый агент работает с ограниченным набором задач и передаёт полученные результаты другим участникам процесса. Такая организация системы упрощает управление процессом проектирования и позволяет отдельно настраивать требования, инструменты и правила работы каждого агента.

Ещё одной важной особенностью таких систем является итерационный характер проектирования. Полученное решение не считается окончательным после первого этапа синтеза, а последовательно изменяется с учётом результатов программной проверки. Так в AnalogCoder результаты моделирования используются для корректировки ранее сформированной схемы и повторной оценки её характеристик. Это позволяет не требовать от модели получения полностью корректного решения за одну итерацию, последовательно приближая его к установленным техническим требованиям.

В рассмотренных системах разделение процесса проектирования между несколькими агентами позволяет уменьшить сложность задач, решаемых каждой моделью, и организовать итерационное улучшение результата с использованием программной проверки. Этот принцип можно развить, разделив работу агентов не только по этапам проектирования, но и по виду обрабатываемой информации. Один агент может отвечать за состав компонентов, их параметры и электрические соединения, другой – за размещение условных графических обозначений и построение линий связи. В предлагаемом подходе этим задачам соответствуют электрический и пространственный графы, согласованность которых контролируется программными средствами.

III. ОРГАНИЗАЦИЯ МУЛЬТИАГЕНТНОГО СИНТЕЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И ПРОСТРАНСТВЕННОГО ГРАФОВ

Для описания схемы предлагается использовать два связанных графа: электрический G_E и пространственный G_S.

Электрический граф задаёт состав схемы и её электрическую связность без сведений о расположении элементов на листе. Граф G_E можно представить в виде:

$$G_E = (V_C, V_N, E_E, \Phi_E), \quad (1)$$

где V_C – множество компонентов, V_P – множество их выводов, V_N – электрические цепи, E_E – связи между выводами и цепями, Φ_E – электрические параметры компонентов и соединений.

Пространственный граф описывает расположение и графическое соединение элементов схемы:

$$G_S = (V_S, E_S, \Phi_S), \quad (2)$$

где V_S – множество графических объектов схемы, включающее условные графические обозначения компонентов, их выводы и точки соединения; E_S – участки линий связи между этими объектами; Φ_S – сведения об их размещении, включающие координаты, ориентацию элементов и геометрию линий связи.

Компоненты и их выводы имеют одинаковые идентификаторы в обоих графах, что позволяет однозначно сопоставлять электрические и графические объекты схемы.

Для проверки согласованности электрического и пространственного графов вводится операция

$$\Pi: G_S \to G_E', \quad (3)$$

которая по условным графическим обозначениям, выводам и линиям связи восстанавливает электрическую связность изображённой схемы. Пространственный граф считается согласованным с электрическим, если

$$\Pi(G_S) \equiv G_E, \quad (4)$$

где знак «≡» означает совпадение состава компонентов, их выводов и соединений между ними. Такая проверка выполняется после каждого изменения пространственного графа.

Формирование и изменение электрического графа выполняет агент электрического синтеза A_E. Он получает техническое задание, текущее состояние G_E, сведения о доступных компонентах и результаты электрической проверки. При необходимости ему также передаются замечания, полученные на этапе пространственного синтеза и требующие изменения электрической структуры. Агент A_E определяет состав компонентов, их параметры и соединения. Полученный граф передаётся на электрическую проверку; при обнаружении ошибок результаты проверки возвращаются агенту для следующей итерации.

После успешной электрической проверки граф G_E передаётся агенту пространственного синтеза A_S. Его задача состоит в формировании и последующем изменении G_S с учётом размеров условных графических обозначений, положения выводов, допустимых ориентаций элементов и правил построения линий связи. Агент определяет взаимное расположение элементов, их ориентацию и общую компоновку схемы, тогда как соблюдение точных геометрических ограничений контролируется программными средствами.

После каждого изменения G_S сначала проверяется его соответствие электрическому графу по условию выражения (4). При нарушении соответствия результаты проверки передаются агенту A_S для изменения пространственного графа. После успешной проверки выполняются построение изображения схемы и его визуальная оценка. Если выявленные недостатки могут быть устранены изменением размещения или линий связи, агент A_S продолжает работу с текущим G_S. Если для их

устранения требуется изменение состава компонентов, параметров или электрических соединений, соответствующие замечания передаются агенту A_E, после чего последовательно повторяются электрическая и пространственная части синтеза. Описанный алгоритм представлен на рисунке 1.

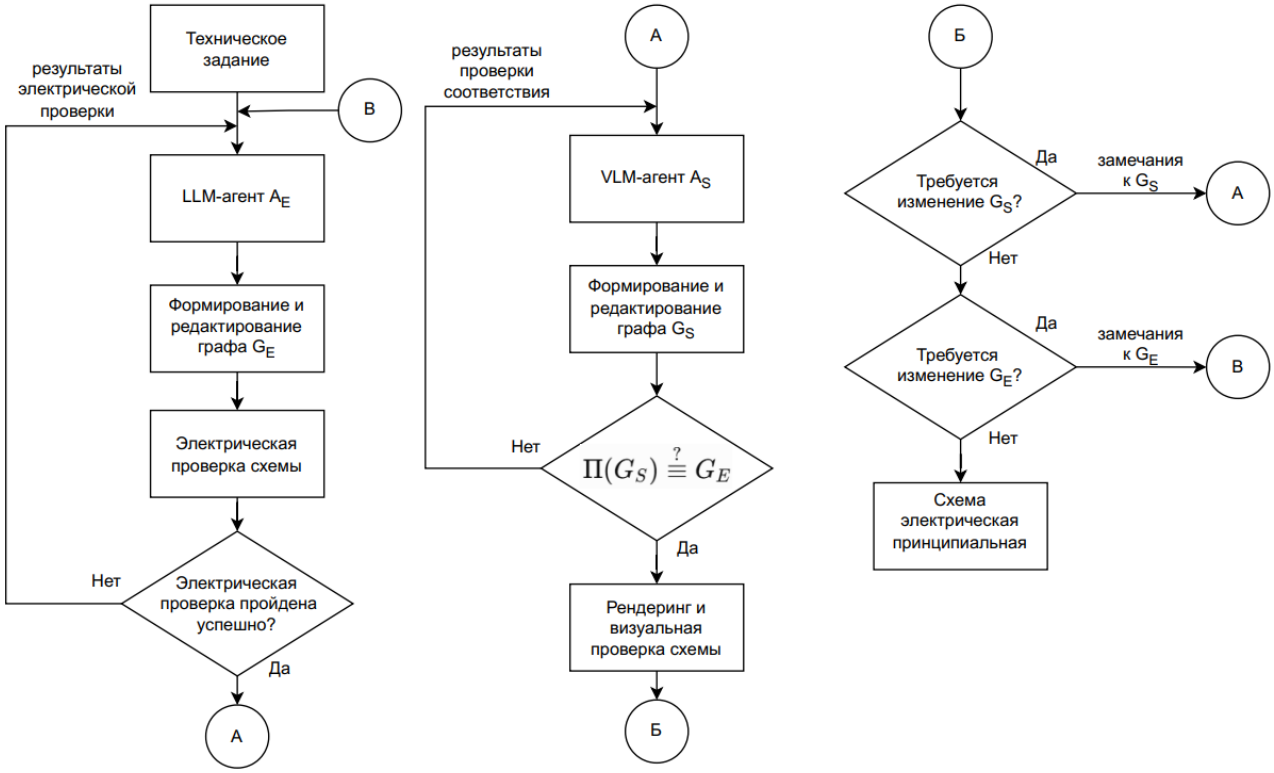


Рисунок 1. Итерационный процесс мультиагентного синтеза схемы с разделением электрического и пространственного представлений

Результаты каждой проверки передаются агенту, отвечающему за соответствующее представление схемы. Это позволяет выполнять изменения пространственного графа без повторного формирования электрической структуры и возвращаться к её изменению только в тех случаях, когда выявленные замечания требуют изменения G_E.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен мультиагентный подход к синтезу схем электрических принципиальных, в котором проектное решение разделено на электрическое G_E и пространственное G_S представления. Электрическая структура формируется агентом A_E, а компоновка и графическое соединение элементов – агентом A_S. Каждое представление проходит собственный этап проверки. Согласующим элементом между графами является программный этап согласования представлений на основе операции $\Pi: G_S \rightarrow G_E'$, которая по графическим объектам и линиям связи восстанавливает электрическую связность.

Разделение представлений даёт возможность независимо дорабатывать электрическую и пространственную составляющие в рамках единого итерационного процесса. Такой подход позволяет в полной мере задействовать большие языковые модели для порождения и изменения электрической структуры и компоновки, мультимодальные – для визуальной оценки схемы.

Дальнейшая работа направлена на разработку прототипа и формализацию правил операции Π.

ЛИТЕРАТУРА

[1] A Survey of Research in Large Language Models for Electronic Design Automation / J. Pan [et al.] // ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems. 2025. Vol. 30, No. 3. P. 34:1–34:21.

[2] Schemato – An LLM for Netlist-to-Schematic Conversion / R. Matsuo [et al.] // 2025 ACM/IEEE 7th Symposium on Machine Learning for CAD (MLCAD). 2025. P. 1–7.

[3] Liu, C. EEschematic: Multimodal-LLM Based AI Agent for Schematic Generation of Analog Circuit / C. Liu, D. Chitnis // 2026 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). 2026. P. 822–826..

[4] ChatEDA: A Large Language Model Powered Autonomous Agent for EDA / H. Wu [et al.] // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. 2024. Vol. 43, No. 10. P. 3184–3197.

[5] Divergent Thoughts toward One Goal: LLM-based Multi-Agent Collaboration System for Electronic Design Automation / H. Wu, H. Zheng, Z. He, B. Yu // Proceedings of the 2025 Conference of the Nations of the Americas Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies. 2025. Vol. 1. P. 1710–1721.

[6] AnalogCoder: Analog Circuit Design via Training-Free Code Generation / Y. Lai [et al.] // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2025. Vol. 39, No. 1. P. 379–387.

[7] AaLLM: An End-to-End Analog Circuit Design Framework from Topology Generation to Sizing Using Large Language Models [Electronic Resource] / M. A. Habib, R. Hart, M. Fayazi // arXiv. 2026. arXiv:2608.13472. Mode of access: https://arxiv.org/abs/2608.13472. Date of access: 13.09.2026.

SEPARATION OF ELECTRICAL AND SPATIAL REPRESENTATIONS IN MULTI-AGENT SYNTHESIS OF ELECTRICAL SCHEMATICS USING LARGE LANGUAGE MODELS

E.A. Kurliuk, N.A. Larchenko, M.V. Davydov

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
kurluke750@gmail.com

Abstract: a multi-agent approach to electrical schematic synthesis based on the separation of electrical and spatial representations is proposed. The electrical structure and schematic layout are generated by different agents and undergo separate verification stages. To control the consistency between the representations, an operation that reconstructs electrical connectivity from the spatial graph is introduced. An iterative synthesis process is considered, enabling separate modification of the electrical and spatial graphs based on verification results.

Keywords: large language models, computer-aided design, circuit design, synthesis, multi-agent systems, graphs.