

Алгоритм синтеза системы оптимизации ресурсов медицинских организаций

М. Эйрих^{1,2}, В. Д. Олисеенко¹

¹Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук

²Санкт-Петербургский государственный университет
michael.eirich@mail.ru, vdo@dscs.pro

Аннотация. В данной работе представлен алгоритм синтеза системы оптимизации ресурсов для медицинских организаций с использованием имитационного моделирования мультиагентных систем (МАС). МАС может предоставить информацию о потоках пациентов, уровне укомплектованности персоналом, распределении ресурсов и безопасности пациентов. Однако создание и внедрение МАС сопряжено с определенными трудностями, такими как необходимость наличия специальных знаний и навыков. В работе обсуждаются вопросы определения оптимальных весовых коэффициентов для показателей эффективности и выбора программного обеспечения для реализации системы МАС. Теоретическая значимость заключается в разработке алгоритма для определения основных инструментов и средств для синтеза системы оптимизации ресурсов медицинских организаций. Практическая значимость заключается в возможности применения разработанного алгоритма для создания работающей МАС оптимизации ресурсов конкретных медицинских организаций.

Ключевые слова: имитационное моделирование, мультиагентные системы, оптимизация ресурсов, медицинские организации, алгоритм оптимизации, показатели эффективности, время ожидания пациентов, экономическая эффективность, весовые коэффициенты

I. ВВЕДЕНИЕ

Управление медицинскими организациями – важная задача, требующая тщательного планирования, эффективного распределения ресурсов и способности адаптироваться к постоянно меняющимся условиям внешней среды [1]. В последние годы имитационное моделирование стало мощным инструментом для управления медицинскими организациями, позволяющим заинтересованным сторонам анализировать поведение медицинских организаций в динамике и синтезировать новые управленческие решения. Среди таких подходов отдельно стоит выделить имитационное моделирование с использованием мультиагентных систем (МАС) [2]. Благодаря разработке моделей, включающих множество агентов, представляющих различные стороны в системе здравоохранения, имитационное моделирование МАС может предоставить сведения о потоках пациентов, уровне укомплектованности персоналом, распределении ресурсов и безопасности пациентов. Однако создание и внедрение МАС сопряжено с определенными трудностями, такими как необходимость в специальных знаниях и навыков для создания и настройки МАС систем, подборе правильного специалиста. Для решения

этих и других проблем необходимо разработать алгоритм синтеза, который позволит разработать систему для оптимизации ресурсов медицинских организаций.

Целью работы является разработка алгоритма для синтеза системы оптимизации ресурсов медицинских организаций. Теоретическая значимость заключается в разработке алгоритма для определения основных инструментов и средств для синтеза системы оптимизации ресурсов медицинских организаций. Практическая значимость заключается в возможности применения разработанного алгоритма для создания работающей МАС для оптимизации ресурсов конкретных медицинских организаций.

II. РЕЛЕВАНТНЫЕ РАБОТЫ

Проанализировав работы [3]–[5], можно сделать вывод, что существуют различные программные и теоретические решения для создания мультиагентных систем в медицинской сфере. Однако неясно, как создать такую систему для конкретно выбранной медицинской организации. В работе [3] приводится пример того, что МАС могут использоваться как на уровне организации, так и на уровне конкретного исследования. В данной работе была представлена высокомодульная агентная система поддержки принятия медицинских решений, способная обрабатывать все этапы радиомикологического исследования. Получив набор медицинских изображений, предлагаемая система способна извлечь широкий спектр характеристик, проанализировать и выбрать их с точки зрения прогнозируемого результата и сгенерировать оптимизированную прогностическую модель. В работе [4] представлен агент персонального медицинского помощника, разработанный для поддержки врачей во время реанимационных мероприятий при травмах. В частности, он позволяет автоматически и в режиме реального времени документировать травму и генерировать предупреждения. Принятая технология агента основана на архитектуре Belief-Desire-Intention (BDI). Система была оценена на 430 отчетах, собранных врачами в течение 9 месяцев экспериментальной фазы в полевых условиях.

В работе [5] обсуждается роль мультиагентных систем в сценариях телереабилитации. В ней представлен всеобъемлющий обзор подходов, разработанных в литературе, с особым акцентом на подходы, основанные на мультиагентных системах, а также анализ практики и требований экспертов в данной области. Таким образом, несмотря на наличие существующих решений для создания мультиагентных систем в медицинской сфере, необходимо провести дополнительные исследования,

Работа выполнена в рамках проекта по государственному заданию СПб ФИЦ РАН № FFZF-2022-0003.

чтобы определить способ (алгоритм) создания такой системы для медицинских организаций в целом.

III. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть H — медицинское учреждение, состоящее из n агентов, включая пациентов, медицинских работников и администраторов. Каждый агент i представлен вектором состояния S_i который включает его местоположение, статус и атрибуты. В качестве примера, в контексте данной задачи, статус будет указывать на уровень занятости медицинских работников [6] и состояние самих пациентов [7]. Что касается атрибутов, то для медицинских работников это будет скорость их работы, стратегия лечения, а для пациентов — список необходимых процедур [8]. Агенты взаимодействуют друг с другом посредством набора правил и ограничений, которые могут быть выражены в виде уравнений (в т.ч. систем) и функций.

Поведение медицинских организаций может быть смоделировано как стохастический процесс, представленный цепью Маркова с вероятностями перехода $P(S_j | S_i)$ для всех i и j . Цепь Маркова управляется набором правил перехода и вероятностей, которые могут быть получены из взаимодействия агентов и внешних факторов, таких как прибытие и отъезд пациентов [9].

Целью модели является оптимизация набора показателей эффективности, включая время ожидания пациента, использование ресурсов и экономическую эффективность, с учетом ряда ограничений, таких как уровень укомплектованности персоналом, наличие оборудования и безопасность пациента. Исходя из этого, опишем проблему оптимизации одним из способов:

Минимизировать:

$$f(S) = \alpha_1 W + \alpha_2 U + \alpha_3 C \quad (1)$$

При условии:

- ограничения на состояния и взаимодействия агентов;
- ограничения на использование ресурсов и мощности;
- ограничения на безопасность пациента и качество обслуживания,

где: W — среднее время ожидания для пациентов; U — коэффициент использования ресурсов; C — стоимость предоставления медицинских услуг; α_1 , α_2 и α_3 — весовые коэффициенты для показателей эффективности.

Задача оптимизации направлена на поиск оптимальных значений вектора состояния S , которые минимизируют показатели эффективности при соблюдении ограничений. Решение задачи оптимизации дает представление об оптимальных уровнях укомплектованности персоналом, потоке пациентов и распределении ресурсов, что может улучшить общую эффективность системы медицинских организаций. Решение данной задачи может быть реализовано с помощью имитационного моделирования мультиагентных систем, что позволяет имитировать различные сценарии и анализировать их влияние на систему здравоохранения.

IV. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАИЛУЧШЕГО КОЭФФИЦИЕНТА ДЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ВЫБОР ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ МАС

Определение оптимальных весовых коэффициентов для показателей эффективности предполагает компромисс между различными целями и приоритетами. Один из подходов к определению весовых коэффициентов заключается в использовании алгоритма многоцелевой оптимизации, который может найти набор Парето-оптимальных решений уравнивающих конкурирующие цели [10]. Например, медицинские организации могут захотеть сбалансировать цели минимизации затрат на лечение и максимизации результатов лечения пациентов. Применяя методы скаляризации, можно найти набор оптимальных по Парето решений, уравнивающих эти конкурирующие цели. При таком подходе проблема оптимизации переформулируется как многообъектная проблема, где каждая метрика производительности рассматривается как отдельная цель. Затем алгоритм многоцелевой оптимизации генерирует набор Парето-оптимальных решений, которые не могут быть улучшены по одной цели без ущерба для другой цели [11]. Затем лицо, принимающее решение, может рассмотреть Парето-оптимальные решения и выбрать решение, которое наилучшим образом соответствует его предпочтениям и приоритетам. В качестве альтернативы лицо, принимающее решение, может использовать методы анализа решений, такие как аналитический иерархический процесс (АИП) [12] или аналитический сетевой процесс (АНП) [13], для определения относительной важности каждого показателя эффективности и соответствующего назначения весовых коэффициентов [14].

Другой подход к определению весовых коэффициентов заключается в проведении анализа чувствительности, который включает в себя изменение весовых коэффициентов в диапазоне значений и анализ влияния на показатели эффективности. Затем лицо, принимающее решение, может выбрать весовые коэффициенты, которые приводят к наиболее желательным показателям эффективности [15].

Следующим этапом для выбора является выбор программного обеспечения для создания системы оптимизации ресурсов медицинских организаций. Среди таких программных комплексов можно выделить следующие 5: Anylogic¹, Arena², COMSOL³, Simulink⁴ и NetLogo⁵. Их сравнение представлено в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1 СРАВНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

	Доступность	Удобство в использовании	Гибкость в решении задач	Сложность в изучении
Anylogic	+	++	++	–
Arena	+	+	+	++
COMSOL	–	–	+	++

¹ AnyLogic. URL: <https://www.anylogic.ru> (дата обращения: 18.03.2023).

² Arena. URL: <https://www.rockwellautomation.com/en-us/products/software/arena-simulation.html> (дата обращения: 18.03.2023).

³ COMSOL. URL: <https://www.comsol.ru> (дата обращения: 18.03.2023).

⁴ Simulink. URL: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html> (дата обращения: 18.03.2023).

⁵ NetLogo. URL: <https://ccl.northwestern.edu/netlogo> (дата обращения: 18.03.2023).

	Доступность	Удобство в использовании	Гибкость в решении задач	Сложность в изучении
Simulink	-	-	+	-
NetLogo	++	+	-	++

В табл. 1 колонка «Доступность» определяет то, в какой форме распространяется программной обеспечение, где знак минуса (-) обозначает наличие только платной версии, знак плюса (+) обозначает наличие пробной версии, а два знака плюса (++) наличие полностью бесплатной версии. «Удобство в использовании» определяет трудоёмкость создания сложной модели, где знак минуса (-) обозначает наличие ограничений в создании сложной модели, знак плюса (+) возможность создания сложной модели, а два знака плюса (++) простоту в создании сложной модели. «Гибкость в решении задач» определяет спектр приложений, где знак минуса (-) ограниченный спектр приложений, знак плюса (+) обозначает достаточный спектр приложений, а два знака плюса (++) широкий спектр приложений. «Сложность в изучении» определяет требования к знаниям программирования, где знак минуса (-) обозначает требование обширных знаний программирования, знак плюса (+) обозначает требование некоторых знаний программирования, а два знака плюса (++) отсутствие конкретных требований к знанию программирования.

Решение любой задачи оптимизации во многом зависит от ресурсов, по которым проводится оптимизации. Это означает, что выбор программного обеспечения должен быть сделан в соответствии с задачей, которая поставлена перед разработчиком системы. Выбор правильного программного обеспечения может значительно ускорить процесс оптимизации и привести к лучшим результатам.

V. АЛГОРИТМ И ВЫВОДЫ

Ниже приводится алгоритм синтеза системы оптимизации ресурсов медицинских организаций:

1. провести математическую формализацию проблемы оптимизации;
2. выбрать подход с моделями и методами для решения формализованной проблемы оптимизации;
3. выбрать ресурсы для целевой функции оптимизации;
4. определить программную платформу для реализации MAC;
5. разработать MAC для конкретной медицинской организации.

Первым шагом (1) в алгоритме синтеза системы оптимизации ресурсов медицинских организаций является математическая формализация проблемы оптимизации. Этот шаг включает в себя определение целевой функции системы и выявление ограничений, которые необходимо учитывать. Проблема оптимизации может решаться через максимизацию использования ресурсов при минимизации затрат или максимизации результатов лечения пациентов при минимизации времени ожидания.

После того как проблема оптимизации формализована, следующим шагом является выбор подхода к ее решению (2). Подход может включать использование математических моделей, имитационных моделей и методов оптимизации, таких как генетические алгоритмы, линейное программирование или эвристические методы. Выбор подхода зависит от конкретной решаемой проблемы и имеющихся ресурсов. Например, проблемой при моделировании может быть присутствие людей в процессе [16], что добавляет неточность и неопределенность при создании модели. На этапе (3) важно определить наиболее предпочтительные ресурсы для оптимизации. Ресурсы могут включать персонал, оборудование, помещение, расходные медицинские материалы и др. Выбор ресурсов будет зависеть от конкретных целей системы и ограничений. Следующим шагом (4) является определение программной платформы для реализации имитационной модели мультиагентной системы. Например, использование таких программных инструментов, как Anylogic, Arena, или NetLogo. Выбор программной платформы будет зависеть от конкретных требований системы и опыта команды разработчиков. Последний шаг (5) — разработка имитационной модели мультиагентной системы для конкретной медицинской организации. Имитационная модель поможет протестировать и проверить подход к оптимизации и даст представление о лучших стратегиях оптимизации ресурсов в медицинской организации. Имитационная модель должна быть основана на реальных данных и включать все значимые факторы, которые могут повлиять на производительность системы.

Алгоритм синтеза системы оптимизации ресурсов медицинских организаций может позволить решить задачу эффективного управления ограниченными ресурсами в секторе здравоохранения. Следуя этому алгоритму, медицинские организации могут оптимизировать свои ресурсы и повысить эффективность, что в конечном итоге может привести к улучшению обслуживания пациентов.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были представлены способы имитационного моделирования с использованием мультиагентных систем (MAC) для управления медицинскими организациями. Была предложена одна из формализаций математической задачи оптимизации набора показателей эффективности, через минимизацию весовой функции. Были представлены подходы к решению задачи оптимизации. Были представлены и сравнены существующие программные инструменты для реализации системы оптимизации ресурсов медицинских организаций.

Использование имитационного моделирования мультиагентных систем в управлении медицинскими организациями является перспективным подходом, который может помочь процессу принятия решений и в дальнейшем повысить общую эффективность медицинских организаций. Однако существует и ряд проблем, связанных с внедрением имитационного моделирования мультиагентных систем в управление медицинскими организациями. К ним относятся необходимость в точных и надежных данных, сложность разработки и проверки имитационных моделей, а также

ограниченное понимание основных поведенческих и когнитивных процессов медицинских сотрудников и пациентов. Для решения этих проблем будущие исследования должны быть направлены на разработку более сложных моделей, способных отразить сложную динамику в системе медицинской организации, а также на совершенствование процедур сбора и проверки данных.

Теоретическая значимость заключается в разработке алгоритма для определения основных инструментов и средств для синтеза системы оптимизации ресурсов медицинских организаций. Практическая значимость заключается в возможности применения разработанного алгоритма для создания работающей МАС для оптимизации ресурсов конкретных медицинских организаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Chen P. T., Lin C. L., Wu W. N. Big data management in healthcare: Adoption challenges and implications // *International Journal of Information Management*. 2020. Т. 53. С. 102078.
- [2] Drawel N. et al. Specification and automatic verification of trust-based multi-agent systems // *Future Generation Computer Systems*. 2020. Т. 107. С. 1047-1060.
- [3] Gatta R. et al. Towards a modular decision support system for radiomics: A case study on rectal cancer // *Artificial intelligence in medicine*. 2019. Т. 96. С. 145-153.
- [4] Croatti A. et al. BDI personal medical assistant agents: The case of trauma tracking and alerting // *Artificial intelligence in medicine*. 2019. Т. 96. С. 187-197.
- [5] Calvaresi D. et al. Real-time multi-agent systems for telerehabilitation scenarios // *Artificial intelligence in medicine*. 2019. Т. 96. С. 217-231.
- [6] Hassen H.B., Tounsi J., Bachouch R.B. An artificial immune algorithm for HHC planning based on multi-agent system // *Procedia Computer Science*. 2019. Т. 164. С. 251-256.
- [7] Mostafa S. A. et al. A fuzzy logic control in adjustable autonomy of a multi-agent system for an automated elderly movement monitoring application // *International journal of medical informatics*. 2018. Т. 112. С. 173-184.
- [8] Angelotti G., Díaz-Rodríguez N. Towards a more efficient computation of individual attribute and policy contribution for post-hoc explanation of cooperative multi-agent systems using Myerson values // *Knowledge-Based Systems*. 2023. Т. 260. С. 110189.
- [9] Martinsson J., Gustafsson S. Modeling the effects of telephone nursing on healthcare utilization // *International Journal of Medical Informatics*. 2018. Т. 113. С. 98-105.
- [10] Petchrompo S. et al. A review of Pareto pruning methods for multi-objective optimization // *Computers & Industrial Engineering*. 2022. С. 108022.
- [11] Rao R.V., Lakshmi R.J. Ranking of Pareto-optimal solutions and selecting the best solution in multi-and many-objective optimization problems using R-method // *Soft Computing Letters*. 2021. Т. 3. С. 100015.
- [12] Ho W., Ma X. The state-of-the-art integrations and applications of the analytic hierarchy process // *European Journal of Operational Research*. 2018. Т. 267. №. 2. С. 399-414.
- [13] Kheybari S., Rezaie F. M., Farazmand H. Analytic network process: An overview of applications // *Applied mathematics and Computation*. 2020. Т. 367. С. 124780.
- [14] Zheng Y. et al. Assessment for hierarchical medical policy proposals using hesitant fuzzy linguistic analytic network process // *Knowledge-Based Systems*. 2018. Т. 161. С. 254-267.
- [15] Doan N.A.V., De Smet Y. An alternative weight sensitivity analysis for PROMETHEE II rankings // *Omega*. 2018. Т. 80. С. 166-174.
- [16] Stoliarova, V. F. Cox regression in the problem of risky behavior parameter estimation based on the last episodes' data / V. F. Stoliarova, A. L. Tulupyev // *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 2021. Т. 14, No. 4. С. 202-217.