

УДК 004.932.2

АКСИОМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНТЕГРАЦИИ МЕДИЦИНСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПОВ СИСТЕМНОЙ ГОМЕОРЕТИКИ

В.Г. ЕВДОКИМОВ, А.А. НАВРОЦКИЙ

*УО Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В статье представлена иерархическая система аксиом интеграции медицинских информационных систем, основанная на принципах системной гомеоретики. Научная новизна исследования заключается в разработке многоуровневой аксиоматической структуры, включающей пять взаимосвязанных уровней: базовый (АТИС, АМСБ, АДСФ), функциональный (АСГР, АМАС, АЭСО), интеграционный (АССЭ, АСБР, АДСБ), когнитивный (ААСР, АКСР, АПСМ) и стратегический (АУРС, АТСС, АПВС). Каждый уровень решает специфические задачи: от обеспечения инвариантности структуры медицинских данных до поддержки множественности технологических решений. Особое внимание уделено взаимосвязям между уровнями и механизмам их взаимодействия, обеспечивающим целостность и устойчивость интегрированных медицинских систем. Практическая значимость работы заключается в создании методологического фундамента для проектирования масштабируемых медицинских информационных систем с учетом современных требований к интероперабельности и безопасности.

Ключевые слова: медицинские информационные системы, системная гомеоретика, многоуровневая аксиоматика, иерархическая интеграция, информационная безопасность, когнитивные технологии, стратегическое развитие.

AXIOMATIC MODEL OF MEDICAL INFORMATION SYSTEMS INTEGRATION BASED ON SYSTEMIC HOMEORETICS PRINCIPLES

VITALIY G. EVDOKIMOV, ANATOLIY A. NAVROTSKY

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. This article presents a hierarchical system of axioms for medical information systems integration based on systemic homeoretics principles. The scientific novelty of the research lies in developing a multi-level axiomatic structure comprising five interrelated levels: basic (ATIS, AMSB, ADSF), functional (ASHR, AMAS, AESO), integration (ASSE, ASBR, ADSB), cognitive (AASR, ACSR, APSM) and strategic (ASDS, ATSS, APVS). Each level addresses specific tasks, ranging from ensuring the invariance of medical data structure to supporting multiple technological solutions. Special attention is paid to the relationships between levels and their interaction mechanisms, ensuring the integrity and stability of integrated medical systems. The practical significance of the work lies in creating a methodological foundation for designing scalable medical information systems, taking into account modern requirements for interoperability and security.

Keywords: medical information systems, systemic homeoretics, multi-level axiomatics, hierarchical integration, information security, cognitive technologies, strategic development.

Введение

Современное развитие медицинских информационных систем характеризуется высокой степенью гетерогенности и сложности интеграционных процессов. Эффективное взаимодействие данных систем становится критически важным фактором в условиях цифровой трансформации здравоохранения [1].

Анализ текущего состояния отрасли показывает стремительный рост объемов медицинских данных, который, по оценкам экспертов, достигнет 2314 экзбайт к 2025 году [2]. При этом современные системы здравоохранения сталкиваются с серьезными вызовами в области обработки и защиты персональных медицинских данных. Согласно отчёту, Healthcare

Information and Management Systems Society (HIMSS) за 2022 год, более 45% медицинских организаций сообщают о критических проблемах при обмене данными между различными информационными системами.

Традиционные технологические стандарты и протоколы обмена данными не обеспечивают требуемого уровня надежности при объединении медицинских систем [3]. Существующие методы интеграции зачастую игнорируют особенности медицинской информации, что снижает эффективность работы и создает угрозы безопасности данных. По данным исследования, проведенного в 2023 году, 67% инцидентов информационной безопасности в здравоохранении связаны именно с недостатками в архитектуре интеграционных решений [4].

Особую актуальность приобретает проблема семантической интероперабельности медицинских данных. Исследования показывают, что до 30% критически важной клинической информации теряется при передаче между различными информационными системами из-за несовместимости форматов и отсутствия единых стандартов кодирования [5]. Это не только затрудняет принятие клинических решений, но и создает риски для безопасности пациентов.

Цель работы – разработка и теоретическое обоснование аксиоматической системы как методологического базиса для создания интегрированных медицинских информационных комплексов нового поколения. Предлагаемый подход призван решить выявленные проблемы путем формализации принципов построения защищенных и эффективных медицинских информационных систем, способных обеспечить надежное хранение и корректную передачу медицинских данных между всеми участниками процесса оказания медицинской помощи.

Теоретический анализ

На современном этапе развития медицинских информационных систем можно выделить несколько ключевых направлений интеграции, каждое из которых характеризуется специфическими проблемами и ограничениями.

1. Стандарты обмена медицинскими данными

Существующие стандарты (HL7, DICOM, OpenEHR) обеспечивают базовый уровень интероперабельности, однако имеют ряд существенных ограничений:

- отсутствие единого подхода к семантической интерпретации данных;
- сложность поддержки версионности и обратной совместимости;
- недостаточная гибкость при работе с новыми типами медицинских данных;
- проблемы безопасности при межсистемном взаимодействии.

2. Архитектурные решения

Анализ современных архитектурных подходов выявляет следующие проблемные области:

- преобладание монолитных архитектур, затрудняющих масштабирование;
- недостаточная проработанность механизмов отказоустойчивости;
- сложность интеграции legacy-систем;
- отсутствие универсальных паттернов проектирования для медицинских систем.

3. Информационная безопасность

Существующие протоколы безопасности не в полной мере учитывают специфику медицинских данных:

- проблемы идентификации и аутентификации в распределенных системах;
- сложность обеспечения конфиденциальности при множественном доступе;
- отсутствие стандартизированных подходов к аудиту безопасности;
- уязвимости при интеграции с внешними системами.

4. Семантическая интероперабельность

Текущие подходы к обеспечению семантической совместимости характеризуются:

- фрагментарностью онтологических моделей;
- сложностью поддержания актуальности справочников и классификаторов;
- отсутствием универсальных механизмов сопоставления терминологий;
- проблемами многоязычности и локализации.

5. Технологическая инфраструктура

Анализ существующей инфраструктуры выявляет:

- недостаточную производительность при обработке больших объемов данных;
- проблемы масштабирования вычислительных ресурсов;
- сложность обеспечения отказоустойчивости;
- ограничения при работе с территориально распределенными системами.

6. Нормативное регулирование

Существующая нормативная база характеризуется:

- противоречивостью требований различных регуляторов;
- отставанием от технологического развития;
- сложностью соответствия международным стандартам;
- неоднозначностью трактовки требований.

Выявленные проблемы указывают на необходимость создания комплексного теоретического базиса, способного обеспечить системное решение задач интеграции медицинских информационных систем.

Аксиоматическая модель интеграции медицинских информационных систем

Предлагаемая модель основана на комплексе взаимосвязанных аксиом, определяющих фундаментальные принципы интеграции медицинских информационных систем. Структура модели построена по принципу системной декомпозиции, где каждый компонент отвечает за определенную функциональную область при сохранении целостности всей экосистемы.

Набор из 15 базовых аксиом формирует методологическую основу для проектирования, разработки и эксплуатации интегрированных систем здравоохранения. Каждая аксиома определяет конкретные требования и механизмы их реализации, обеспечивая баланс между инновационным развитием и сохранением стабильности функционирования.

Рассмотрим подробно каждую из аксиом, составляющих фундамент модели.

АКСИОМА СИСТЕМНОЙ ГОМЕОРЕТИКИ (АСГР)

Определяет механизмы поддержания динамической устойчивости интегрированных медицинских информационных систем через непрерывный мониторинг критических параметров и автоматическую компенсацию отклонений. Обеспечивает сохранение функциональной целостности при воздействии дестабилизирующих факторов.

Формальное определение:

$$\Delta S(t) = \int [K(t) * H(t)] dt * (1 + D) * (1 - C), \quad (1)$$

где $\Delta S(t)$ – состояние системы, K - коэффициент гомеостатической регуляции, H - характеристика стабильности внутренней среды, D - коэффициент дополнения, C – коэффициент компенсации.

Область применения:

- системы непрерывного мониторинга состояния пациентов;
- интегрированные лабораторные комплексы;
- системы жизнеобеспечения.

Практическая реализация:

- В системах мониторинга ПИТ (GE Healthcare)
- В интегрированных операционных (Philips)
- В телемедицинских комплексах (Medtronic)

АКСИОМА ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ИНВАРИАНТНОСТИ СИСТЕМ (АТИС)

Устанавливает неизменные структурные характеристики и функциональные взаимосвязи в медицинских информационных системах. Определяет топологические инварианты, сохраняющие свойства при допустимых системных преобразованиях. Формирует основу проектирования устойчивых информационных архитектур.

$$T(t) = [x \in X | f(x) = const] * (1 + D) * (1 - C), \quad (2)$$

где $T(t)$ – топологический инвариант, X – пространство состояний, $f(x)$ – функция преобразования, D – коэффициент дополнения, C – коэффициент компенсации.

Методы измерения:

- Анализ графов связности
- Оценка робастности архитектуры
- Тестирование отказоустойчивости

АКСИОМА МОРФОАДАПТИВНОЙ САМООРГАНИЗАЦИИ (АМАС)

Описывает механизмы структурной адаптации к изменяющимся условиям функционирования при сохранении системной целостности. Регламентирует процессы координированной трансформации компонентов и межсистемных связей.

$$M(t) = M_0 + \sum [A_i(t) * F_i(t)] * (1 + D) * (1 - C), \quad (3)$$

где $M(t)$ – морфологическая структура, $A_i(t)$ – адаптивные параметры, $F_i(t)$ – функции адаптации, D – коэффициент дополнения, C – коэффициент компенсации.

Методы измерения:

- Мониторинг структурных изменений
- Анализ эффективности адаптации
- Оценка стабильности работы

АКСИОМА МИНИМАЛЬНОГО СИСТЕМНОГО БАЗИСА (АМСБ)

Определяет критический набор функциональных компонентов и ресурсов, необходимых для поддержания жизнеспособности системы. Устанавливает параметры базовой работоспособности в условиях ограниченного функционирования.

Применимость: Медицинские системы жизнеобеспечения, аппараты ИВЛ, системы мониторинга критических состояний, где необходимо определить минимально допустимые параметры функционирования.

АКСИОМА ЭНТРОПИЙНОЙ САМООРГАНИЗАЦИИ (АЭСО)

Регламентирует принципы оптимального распределения информационных и вычислительных ресурсов между компонентами системы. Обеспечивает энергоэффективность и рациональное использование системных ресурсов.

Применимость: Распределенные диагностические системы, медицинские информационные системы (МИС), системы обработки медицинских изображений, где критична оптимизация ресурсопотребления.

АКСИОМА СИСТЕМНОЙ СИНЕРГИИ И ЭМЕРДЖЕНТНОСТИ (АССЭ)

Описывает механизмы формирования новых системных свойств через интеграцию компонентов. Определяет принципы возникновения синергетических эффектов, усиливающих функциональные возможности системы.

Применимость: Интегрированные диагностические комплексы, гибридные системы визуализации (ПЭТ-КТ, ОФЭКТ-КТ), мультимодальные системы мониторинга.

АКСИОМА САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ БИФУРКАЦИИ И РАЗВИТИЯ (АСБР)

Устанавливает механизмы безопасного внедрения инноваций и системных изменений. Регламентирует процессы тестирования новых решений с минимизацией рисков для стабильности системы.

Применимость: Внедрение новых методов диагностики, терапевтических протоколов, систем поддержки принятия врачебных решений.

АКСИОМА ДИНАМИЧЕСКОГО СИСТЕМНОГО БАЛАНСА (АДСБ)

Определяет принципы поддержания баланса между развитием и стабильностью системы. Устанавливает механизмы контроля скорости и масштаба инновационных изменений.

Применимость: Системы адаптивной терапии, персонализированной медицины, управления медицинским оборудованием с динамической настройкой параметров.

АКСИОМА АВТОНОМНОЙ СИСТЕМНОЙ РЕГУЛЯЦИИ (ААСР)

Описывает механизмы децентрализованного принятия решений компонентами системы при сохранении общей координации. Обеспечивает локальную адаптивность при глобальной устойчивости.

Применимость: Распределенные системы телемедицины, сети медицинских устройств IoT (Internet of Medical Things), автономные медицинские роботы.

АКСИОМА КОГНИТИВНОЙ САМОРЕФЕРЕНЦИИ (АКСР)

Устанавливает принципы накопления и использования системного опыта. Определяет механизмы обмена знаниями между компонентами для оптимизации функционирования.

Применимость: Системы машинного обучения в медицине, экспертные системы диагностики, самообучающиеся медицинские базы знаний.

АКСИОМА ПРЕДИКТИВНОЙ СИСТЕМНОЙ МОДИФИКАЦИИ (АПСМ)

Регламентирует механизмы прогнозирования и упреждающей адаптации системы к ожидаемым изменениям. Определяет принципы проактивного планирования развития.

Применимость: Системы предиктивной диагностики, прогнозирования рисков заболеваний, планирования профилактических мероприятий.

АКСИОМА ДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ СИСТЕМНОЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ (АДСФ)

Устанавливает требования к предсказуемости поведения системных компонентов. Определяет механизмы обеспечения надежности межкомпонентного взаимодействия.

Применимость: Критически важные медицинские системы, хирургические роботы, системы автоматизированного введения лекарств.

АКСИОМА УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ СИСТЕМ (АУРС)

Описывает принципы долгосрочного сбалансированного развития системы. Регламентирует механизмы координации роста компонентов при сохранении общей устойчивости.

Применимость: Развитие медицинских информационных систем, долгосрочное планирование медицинской инфраструктуры, эволюция диагностических комплексов.

АКСИОМА ТЕМПОРАЛЬНОЙ СИСТЕМНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ (АТСС)

Определяет механизмы согласования краткосрочных и долгосрочных целей развития. Устанавливает принципы временной координации системных процессов.

Применимость: Планирование терапевтических мероприятий, координация работы медицинского оборудования, синхронизация медицинских протоколов.

АКСИОМА ПОЛИМОРФНОЙ ВАРИАТИВНОСТИ СИСТЕМ (АПВС)

Регламентирует необходимое разнообразие компонентов и связей для обеспечения адаптивности. Определяет принципы поддержания множественности путей развития системы.

Применимость: Мультимодальные терапевтические системы, адаптивные диагностические комплексы, гибкие системы поддержки принятия решений.

Предлагаемая аксиоматическая модель является многомерным решением существующих проблем интеграции медицинских информационных систем. Основные итоги:

1. Модель учитывает многофакторность проблемы интеграции МИС через:

- структурную составляющую (архитектура систем);
- функциональную составляющую (процессы и операции);
- информационную составляющую (данные и их семантика);
- технологическую составляющую (стандарты и протоколы).

2. Практическая применимость модели обеспечивается:

- формализацией требований к интеграции;
- возможностью оценки качества интеграционных решений;
- масштабируемостью для различных типов МИС.

3. Модель направлена на решение ключевых проблем:

- несовместимости форматов данных;
- отсутствия единых стандартов взаимодействия;
- сложности обеспечения целостности данных;
- необходимости сохранения автономности систем.

Предложенный подход позволяет комплексно оценивать и проектировать интеграционные решения с учетом специфики медицинских информационных систем.

Заключение

Представленная аксиоматическая модель интеграции медицинских информационных систем демонстрирует значительный теоретический потенциал в решении актуальных проблем межсистемного взаимодействия в здравоохранении. Возможность формализации через математический аппарат и многомерный подход к описанию интеграционных процессов создают методологическую основу для построения эффективных решений.

Для полноценной валидации модели требуется проведение комплекса эмпирических исследований, включающих:

- практическую реализацию интеграционных решений на основе предложенных принципов;
- сбор и анализ количественных показателей эффективности интеграции;
- верификацию теоретических положений в условиях действующих медицинских организаций;
- оценку масштабируемости решений для различных классов МИС.

Однако, несмотря на необходимость дальнейшей практической апробации, разработанная модель может рассматриваться как методологический базис для развития подходов к интеграции медицинских информационных систем.

Список литературы

1. Карпов О.Э., Субботин С.А.. Цифровое здравоохранение. Необходимость и предпосылки. Врач и информационные технологии. 2020;2:6-22.
2. Dash S, Shakyawar SK, Sharma M, Kaushik S. Big data in healthcare: management, analysis and future prospects. J Big Data. 2019;6(54):1-25. DOI: 10.1186/s40537-019-0217-0
3. Lehne M, Sass J, Essenwanger A, Schepers J, Thun S. Why digital medicine depends on interoperability. NPJ Digital Medicine. 2019;2:79. DOI: 10.1038/s41746-019-0158-1
4. Kruse CS, Frederick B, Jacobson T, Monticone DK. Cybersecurity in healthcare: A systematic review of modern threats and trends. Technol Health Care. 2023;31(1):1-15. DOI: 10.3233/THC-220159
5. Oemig F, Snelick R. Healthcare Interoperability Standards Compliance Handbook: Conformance and Testing of Healthcare Data Exchange Standards. Springer International Publishing; 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-74820-8