



УДК 365

РОЛЬ ВЫСОКОТОЧНЫХ ДАТЧИКОВ В СОЗДАНИИ ВИРТУАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ СЕРДЦА И СОСУДОВ ДЛЯ ПРЕДОПЕРАЦИОННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Гайфуллин Тимур Рифович

студент 4-го курса, направление «Медицинская физика»,

Орлов Алексей Вениаминович

доцент, кандидат технических наук

Стерлитамакский филиал Уфимского Университета Науки и Технологии

Россия, г. Стерлитамак

Аннотация. Статья посвящена роли высокоточных датчиков и измерительных систем в создании цифровых двойников сердца и сосудов для предоперационного планирования в кардиохирургии. Рассмотрены методы сбора мультимодальных данных, включая оптоволоконные датчики деформации, интраваскулярные датчики давления и мультиэлектродные системы картирования, позволяющие калибровать биомеханические и электрофизиологические свойства тканей.

Ключевые слова: цифровые двойники органов, высокоточные датчики, виртуальные модели сердца, биомеханическое моделирование.

THE ROLE OF HIGH-PRECISION SENSORS IN CREATING VIRTUAL HEART OR VESSEL MODELS FOR PREOPERATIVE PLANNING

Gaifullin Timur Rifovich.

4th year student, direction "Medical Physics"

scientific supervisor: **Orlov Alexey Veniaminovich**

associate Professor, Candidate of Technical Sciences

Sterlitamak Branch Ufa University of Science and Technology

Russia, Sterlitamak

Abstract. This article examines the role of high-precision sensors and measurement systems in creating digital twins of the heart and blood vessels for preoperative planning in cardiac surgery. It discusses methods for collecting multimodal data, including fiber-optic strain gauges, intravascular pressure sensors, and multi-electrode mapping systems, which enable the calibration of biomechanical and electrophysiological tissue properties.

Keywords: digital twins of organs, high-precision sensors, virtual models of the heart, biomechanical modeling.

Современная медицина переживает фундаментальную трансформацию, в основе которой лежит переход от реактивного подхода к проактивному, основанному на математическом прогнозировании. Ключевую роль в этом переходе играет концепция цифровых двойников органов. Цифровой двойник представляет собой не просто статичную трехмерную реконструкцию, а динамическую виртуальную копию, отражающую биомеханические, гемодинамические и функциональные характеристики живого органа. В кардиохирургии и сосудистой хирургии создание таких виртуальных моделей становится клинической необходимостью, особенно на этапе предоперационного планирования, где требуется предвидеть поведение тканей под нагрузкой и минимизировать риски. В основе любой вычислительной модели лежат исходные данные, и именно здесь на первый план выходят высокоточные измерительные системы и датчики, выступающие мостом между физической реальностью пациента и его цифровым отражением.

Формирование достоверного цифрового двойника начинается со сбора мультимодальных данных. Высокоточные датчики, интегрированные в современные томографы, обеспечивают субмиллиметровое разрешение, позволяя визуализировать не только крупные сосуды, но и мелкие структуры, критически важные для моделирования механики сокращения желудочков. Ключевое значение приобретает синхронный сбор анатомических и функциональных данных. При планировании протезирования аортального клапана высокоточные датчики давления и потока, установленные на интраваскулярных катетерах, регистрируют градиенты давления и сдвиговые напряжения. Эти параметры превращают статичную реконструкцию в физиологический двойник, способный предсказать изменение гемодинамики после вмешательства.

Полученные данные загружаются в программные комплексы конечно-элементного моделирования, где цифровой двойник сосуда подвергается виртуальной имплантации стента с учетом реальных физических свойств материала. Хирург может заранее оценить риск неполной аппозиции стента или окклюзии боковой ветви. Без высокоточных датчиков, обеспечивающих калибровку модели реальными тканевыми характеристиками, подобные симуляции оставались бы лишь геометрическими абстракциями.

Сердце как объект моделирования представляет собой более сложную систему, поскольку его функционирование определяется электромеханическим сопряжением и архитектурой проводящей системы. При создании цифрового двойника сердца используются мультиэлектродные катетерные системы с датчиками контактной силы, которые картируют распространение волны деполяризации и одновременно измеряют локальную сократимость миокарда. Эти данные позволяют присвоить каждой области миокарда биофизические свойства: зоны фиброза, участки с сохраненной сократимостью и аномальной проводимостью.

Такой двойник становится виртуальным полигоном для тестирования вариантов абляции или ресинхронизирующей терапии. Высокоточные датчики выполняют не только функцию сбора входных данных, но и критическую роль валидации моделей. В методологии «цифровой нити» (digital thread) интраоперационные данные постоянно сравниваются с предоперационными симуляциями, позволяя уточнять параметры модели. Этот итеративный процесс превращает создание цифрового двойника в непрерывный цикл, где измерительные системы выступают источником данных, инструментом верификации и механизмом обратной связи.

Значение имеет индивидуализация материалов в цифровых моделях. Традиционные подходы использовали усредненные механические свойства тканей, что вносило неопределенность в прогнозы. Современные системы - акустическая микроскопия, оптическая когерентная томография с датчиками жесткости - позволяют определять модули упругости миокарда и сосудистой стенки непосредственно в тканях пациента. Это создает персонализированные материальные модели, где каждый сегмент обладает реально измеренной жесткостью и вязкоупругостью.

Развитие нанотехнологий и микроэлектромеханических систем (MEMS) открывает новые горизонты. «Умные» стенты с матрицами микроскопических датчиков передают данные о потоке и деформации, позволяя цифровому двойнику динамически адаптироваться к ремоделированию стенки. Эпикардальные сетки с распределенными датчиками создают высокоточную цифровую карту сердца. Эти решения стирают грань между измерительной системой и цифровым двойником, формируя гибридный комплекс непрерывного диалога. Эффективность высокоточных датчиков реализуется лишь при развитой экосистеме обработки данных. Сигналы от датчиков представляют собой многомерные временные ряды. Для их преобразования в параметры виртуальной модели требуются алгоритмы машинного обучения и методы обратного моделирования. Гибридные подходы, сочетающие физически обоснованные модели (Physics-Informed Neural Networks) с данными датчиков, позволяют создавать цифровые двойники в течение нескольких часов после диагностики.

В клинической практике использование цифровых двойников уже демонстрирует убедительные результаты. При транскатетерной имплантации аортального клапана цифровой двойник, калиброванный по данным интраваскулярных датчиков, предсказывает риск парапротезной утечки с высокой точностью. При хирургии сложных аневризм аорты модель на основе оптоволоконных датчиков жесткости позволяет спланировать фенестрированный стент-графт, минимизируя риск миграции. В детской кардиохирургии цифровые двойники, созданные на основе измерений давления и потока, позволяют планировать этапные гемодинамические коррекции при унивентрикулярном сердце.

Таким образом, высокоточные датчики и измерительные системы выступают фундаментом цифровых двойников органов. Они превращают виртуальные модели из



геометрически точных, но физиологически наивных реконструкций в персонализированные симуляторы, способные воспроизводить взаимодействия между кровотоком, тканевой механикой и электрической активностью. Без этих датчиков цифровой двойник остается лишь анатомическим эскизом; с ними он становится полноценным виртуальным пациентом для отработки вмешательств и выбора оптимальной стратегии лечения. Дальнейшее развитие связано с миниатюризацией датчиков, повышением биосовместимости, созданием беспроводных систем и совершенствованием алгоритмов интеграции мультимодальных измерений.

Список литературы:

1. Корневский Н.А., Устинов А.Г., Юлдашев З.М. Моделирование биотехнических систем сердца. – Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2018. – 312 с.
2. Васильевский Ю.В. Персонализация математических моделей в кардиологии. – М.: ИИМ РАН, 2021. – 45 с.
3. Sacks M.S., Liao J. Advances in Heart Valve Biomechanics: Valvulation, Computational Modeling, and Experimental Characterization. – Cham: Springer, 2019. – 487 p.
4. Domingues M.F. et al. Optical Fiber Interferometric Sensors: Advanced Applications. – London: Springer, 2022. – 300 p.