

ме траектории для обеспечения процесса реабилитации при реализации естественных движений нижних конечностей. Это позволит оптимизировать параметры системы и синтезировать алгоритмы работы и законов управления движением исполнительных звеньев. Данная информация необходима врачу для подбора индивидуальной оптимальной методики восстановления двигательной функции в коленном суставе.

Список литературы:

1. Яцун С.Ф., Тарасова Е.С. Кинематический анализ движения руки в локтевом суставе при реабилитации методами механотерапии // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4 (4). С. 1215-1220.
2. Яцун С.Ф., Тарасова Е.С., Жакин А.И. Исследование динамики движения манжеты реабилитационного устройства совместно с рукой человека // Известия ЮЗГУ. 2012. № 1 (40). С. 35-41.
3. Яцун С.Ф., Рукавицын А.Н. Определение параметров приводов биоинженерных мехатронных модулей для экзоскелета нижних конечностей человека // Известия ЮЗГУ. Серия: Техника и технологии. 2012. Ч. 1. № 2. С. 196-200.
4. Яблонский А.А., Никифорова В.М. Курс теоретической механики. Учебник для вузов. – М.: Интеграл-Пресс, 2007. 608 с.

5. Yatsun S., Rukavitsyn A. Development bioengineering mechatronic module for exoskeleton human leg // Nauka i Studia. 2013. № 17 (85). PP. 39-46.
6. Яцун С.М., Корневский Н.А., Яцун А.С. Аппаратно-программный комплекс для исследования упруго-диссипативных свойств кожного покрова // Медицинская техника. 2009. № 1. С. 39-43.

Светлана Михайловна Яцун,
д-р мед. наук, профессор,
зав. кафедрой медико-биологических дисциплин,
Курский государственный университет,
Александр Николаевич Рукавицын,
канд. техн. наук, доцент,
кафедра теоретической механики и мехатроники,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск,
e-mail: alruk75@mail.ru

Л.Я. Бухарбаева, Р.В. Насыров, И.С. Тиунов

Классификация и структура систем автоматизированного проектирования для биомедицинской инженерии

Аннотация

В данной статье предложено выделить биологические системы автоматизированного проектирования в отдельный класс САПР. Предлагается рассматривать медицинские САПР как новый класс прикладных систем. Предлагается классификация биологических и медицинских САПР, описываются особенности состава и структуры медицинских САПР.

Введение

В последние годы в России на разных уровнях управления системой здравоохранения декларируется необходимость создания медицинских информационных систем (МИС) различного назначения. Разработана Концепция создания единой государственной информационной системы в сфере здравоохранения. В целом медицинские информационные системы настоящего времени – это уже и вполне определенные практические результаты внедрений, это масса опытных и хорошо проработанных решений, имеющих многолетнюю практику работы в условиях отечественного здравоохранения [1]-[3].

Вместе с тем обзор рынка МИС показывает, что существует достаточное количество удачных разработок, часть из которых реализует технологию автоматизированного проектирования медицинских объектов и процессов. Наиболее яркими из рассмотренных систем являются система «DentCAD» британской компании «Delsam», применяемая в стоматологии [4], система «AccuShare», применяемая при пластике дефектов черепа, и другие продукты американской компании «MedCAD» [5]. Также известна программа «TinkerCell», позволяющая создавать модели сетей молекулярно-биологических взаимодействий из доступных в базах данных клеточных «частей» и наблюдать их динамику, позиционируемая как САПР для биологов [6].

В то же время существующие САПР (в том числе и медицинского назначения) реализуют принципы и технологии проектирования технических объектов. Такое положение дел приводит к фактическому сужению сферы применения технологий САПР для решения медицинских задач.

В соответствии с изложенным, в данной статье предлагаются концепция и теоретические основы биологических САПР,

отличающихся от технических САПР типом объектов проектирования, методами и моделями деятельности основных пользователей системы (в том числе моделями клинического мышления врача), принципами автоматизации работ с объектами проектирования. Также описываются особенности медицинских САПР, к которым следует отнести более узкий класс компьютерных систем – системы поддержки хирургических операций, или CAS-технологии (Computer Assisted/Aided Surgery), все чаще используемые в мировой медицинской практике в настоящее время. Кроме того, используя известную классификацию медицинской техники, предложенную в работе [1], можно рассматривать предлагаемые биологические САПР как новый объект, относящийся к классу средств автоматизации медико-биологических исследований и требующий самостоятельного исследования.

Классификация биологических и медицинских САПР

В классификации САПР по типу объекта проектирования, согласно ГОСТ 23501.108-85 [7], рассматриваются объекты и процессы машино- и приборостроения, объекты и процессы строительства, программные средства и организационные системы. САПР объектов и процессов других типов выделены в раздел «Прочие». Авторами статьи предлагается расширить эту классификацию биологическим направлением. Таким образом, можно выделить класс «САПР биологических объектов» и класс «САПР биологических процессов».

Классификацию САПР биологических объектов по разновидности объектов проектирования следует выполнять в соответствии с разделами биологии либо по царствам живых организмов. Наиболее простым делением для удобства разработки и применения САПР биологических объектов является их условное деление на медицинские, основным объектом

в которых является человек, и ветеринарные, основным объектом в которых являются представители животного мира.

Классификацию САПР биологических процессов по разновидности процессов проектирования необходимо выполнить в соответствии с принятым выделением функциональных подсистем и процессов в биологии.

Таким образом, с системных позиций предлагается следующая концептуальная точка зрения на биологические САПР, представленная на рис. 1.

В рамках концепции биологических САПР предлагается выделить и отдельно рассмотреть такой класс прикладных систем, как медицинские САПР. Они могут быть техническими, биологическими или биотехническими (смешанными) в зависимости от целей применения и основного объекта проектирования. В связи с этим предлагается различать следующие способы применения САПР:

- технические САПР при проектировании технических объектов и процессов (традиционный подход);

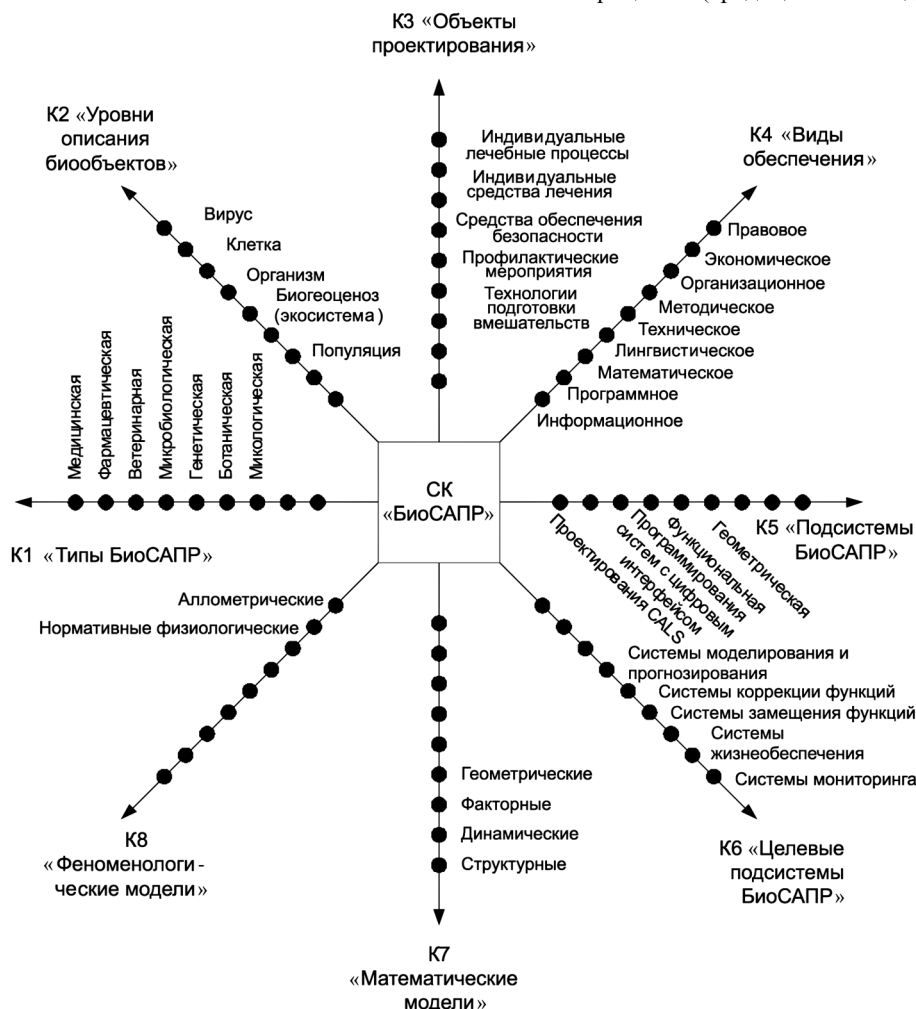


Рис. 1. Система координат БиоСАПР

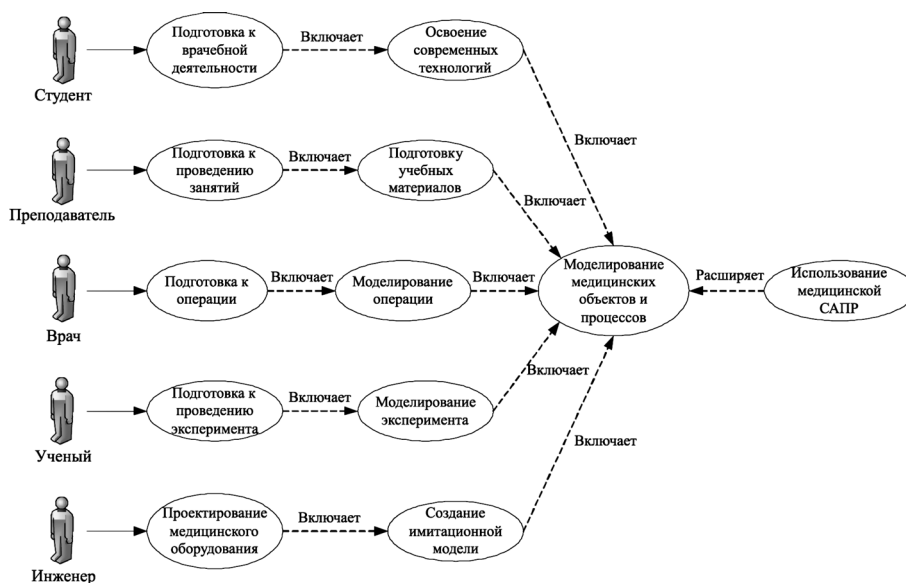


Рис. 2. Применение медицинских САПР

- технические САПР при проектировании медицинских объектов и процессов в биомедицинской инженерии и биопромышленности (современные тенденции);
- биологические САПР при прогнозировании состояния здоровья человека (медицина ближайшего будущего);
- биологические САПР для коррекции генетических дефектов в организме человека и животных (медицина будущего);
- биологические САПР при проектировании технических объектов в бионике (техника ближайшего будущего).

При рассмотрении собственно медицинских САПР как более узкого класса также можно выделять анатомические САПР, относящиеся к САПР биологических объектов, а также физиологические и психологические САПР, относящиеся к САПР биологических процессов.

Отличительная особенность предлагаемых авторами статьи медицинских САПР – создание и использование механизмов и моделей, обеспечивающих высокую степень унификации и стандартизации описания объектов и процессов в организме человека, и обусловленная этим широкая область применения. На рис. 2 представлена схема возможного использования медицинской САПР в зависимости от роли пользователя.

Особенности состава и структуры медицинских САПР

Медицинская САПР состоит из элементов разного рода, которые представлены на рис. 3.

В структуре медицинской САПР, так же как и в любой технической САПР, выделяются следующие виды обеспечения: техническое, математическое, программное, методическое, организационное, правовое, эргономическое, информационное, лингвистическое.

Далее рассмотрим особенности этих видов обеспечения в рамках концепции медицинских САПР.

Техническое обеспечение – совокупность связанных и взаимодействующих технических средств (ЭВМ, периферийные устройства, сетевое оборудование, линии связи, измерительные средства) [5].

В отличие от традиционных САПР, техническое обеспечение медицинских САПР должно включать специализированное медицинское оборудование, такое как оборудование поддержки жизни, терапевтическое оборудование, медицинские мониторы, диагностическое оборудование, хирургическое оборудование, лабораторное медицинское оборудование, оборудо-

вание для транспортировки, оборудование для вызова медицинского персонала, дезинфекционное и стерилизационное оборудование.

Следует отметить, что медицинские мониторы, диагностическое и лабораторное медицинское оборудование принципиально позволяют получать информацию о пациенте и использовать ее непосредственно в процессе моделирования его организма, что соответствует САД-технологии в международной практике САПР. В свою очередь, преобразование данных и генерация программ управления для оборудования поддержки жизни, терапевтического и хирургического оборудования (например для робота-хирурга) в медицинских САПР может рассматриваться как аналог технических САМ-систем. Совокупность указанных систем может образовывать замкнутую систему, функционирующую под управлением специалиста и решающую широкий круг задач медицинской хирургии, реанимации и реабилитации.

Таким образом, обостряется необходимость в стандартизации аппаратных и программных интерфейсов взаимодействия медицинского оборудования и медицинских информационных систем.

Математическое обеспечение традиционных САПР включает методы математического моделирования объектов и процессов проектирования, математические модели объектов и процессов проектирования, алгоритмы решения задач в процессе проектирования [8].

Медицинская САПР, также как и техническая, должна включать аппарат классической математики, а также математический аппарат создания и управления трехмерной графикой (пространственного моделирования). Отличием математического обеспечения медицинской САПР от математического обеспечения технической САПР является наличие специализированных математических моделей медицинских объектов и процессов, например, таких как модель динамики состояния пациента в зависимости от лечебного воздействия, модель Орна-Лью, модель оптимальной дозировки инъекций сильнодействующих лекарственных средств Беллмана, модель синтеза изображений в томографии и др. в зависимости от назначения медицинской САПР и объекта проектирования. Общим свойством большинства моделей, используемых при описании биологических объектов, является их отнесение к классу «мягких» [8].

Из-за сложности биологических объектов в математическом обеспечении медицинских САПР на этапе становления структурные математические модели могут превалировать над функциональными.



Рис. 3. Пример структуры медицинской САПР

Информационное обеспечение технической САПР определяется как совокупность сведений, необходимых для выполнения проектирования. Оно состоит из описания стандартных проектных процедур, типовых проектных решений, комплектующих изделий и их моделей, правил и норм проектирования [9].

В отличие от них информационное обеспечение медицинской САПР состоит из описаний анатомического строения человеческого организма, его функциональных особенностей, патологий и методов их лечения и т. д. В связи с этим к данному типу обеспечения медицинской САПР относится содержимое анатомических атласов, различных медицинских справочников, энциклопедий и других источников медицинских знаний.

Лингвистическое обеспечение – совокупность языков, используемых в САПР для представления информации о проектируемых объектах, процессе и средствах проектирования, а также для осуществления диалога проектировщик-ЭВМ и обмена данными между техническими средствами САПР. Оно включает термины, определения, правила формализации естественного языка, методы сжатия и развертывания [9].

Особенность лингвистического обеспечения медицинских САПР заключается в том, что оно позволяет организовать логическую связь профессионального тезауруса медицинских работников с описаниями и программной реализацией средств проектирования медицинской САПР.

Методическое обеспечение – описание технологии функционирования САПР, методов выбора и применения пользователями технологических приемов для получения конкретных результатов. Оно включает в себя теорию процессов, происходящих в проектируемых объектах, методы анализа, синтеза систем и их составных частей, различные методики проектирования [9].

Методическое обеспечение медицинских САПР базируется на технологиях проведения лечебного процесса, клиническом мышлении врача, а также на моделях процессов, происходящих в биологических объектах, значительно отличающихся от процессов, происходящих в объектах технических.

Организационное обеспечение – совокупность документов, определяющих состав проектной организации, связь между подразделениями, организационную структуру объекта и системы автоматизации, деятельность в условиях функционирования системы, форму представления результатов проектирования [9].

В отличие от технических, в организационное обеспечение медицинской САПР необходимо включать основы организации лечебного процесса, должностные инструкции врачей, правила эксплуатации сопрягаемого с САПР оборудования и т. д.

Эргономическое обеспечение объединяет взаимосвязанные требования, направленные на согласование психологических, психофизиологических, антропометрических характеристик и возможностей человека с техническими характеристиками средств автоматизации и параметрами рабочей среды на рабочем месте [9].

В медицинской САПР требования к эргономике принимают специфический характер, связанный с условиями и особенностями лечебной деятельности. Примером эргономического обеспечения медицинской САПР может служить система голосового управления геометрическими пространственными моделями, которое обеспечит возможность применения результатов моделирования непосредственно во время проведения врачом хирургической операции. Сюда же можно отнести возможность использования светового пера в качестве аналога скальпеля при отработке хирургической операции на компьютерном тренажере.

Правовое обеспечение – совокупность нормативных документов, приказов и инструкций, определяющих юридический статус создания и функционирования системы [10].

Этот вид обеспечения медицинской САПР имеет особую значимость из-за специфики обязанностей и ответственности медицинского персонала. Результаты работы пользователя с

медицинской САПР могут применяться в работе оборудования поддержки жизни или оборудования для проведения инвазивных процедур. Поэтому для полноценного широкого применения медицинских САПР необходимо определить и законодательно зафиксировать юридический статус самой системы, правил и результатов ее работы и т. д.

Программное обеспечение технических САПР реализует математическое обеспечение для непосредственного выполнения проектных процедур и содержит пакеты прикладных программ, предназначенные для обслуживания определенных этапов проектирования или решения групп однотипных задач внутри различных этапов.

В медицинской САПР программное обеспечение реализует положения других видов обеспечения в виде программных средств и отличается от программного обеспечения технической САПР набором прикладных программ. Примером такой программы может являться анатомический геометрический решатель.

Различные элементы могут входить в несколько видов обеспечения медицинской САПР (табл. 1).

Таблица 1

Пример соответствия «элемент – вид обеспечения САПР»

Элементы	Трёхмерный анатомический атлас	Геометрический решатель	Математический пакет	ГОСТы (по САПР, DICOM, HL7)	Законы	Аппарат МРТ	Аппарат УЗИ	Рентгеновский аппарат	Врач	Исследователь	Инженер	Программист	База данных	СУБД	Учебник	Классификатор
Техническое																
Программное		+	+	+												
Информационное		+			+	+										
Лингвистическое										+	+	+	+			
Математическое		+	+													
Методическое					+	+				+	+	+	+			
Организационное					+	+				+	+	+	+			
Эргономическое						+	+	+	+	+	+	+	+			
Правовое				+	+				+	+	+	+				

Заключение

Предлагаемая концепция биологических САПР как общего направления и, в частности, медицинских САПР как профессионально ориентированного продукта позволяет реализовать комплексный формализованный подход к их созданию и внедрению. В свою очередь, использование медицинских САПР имеет целью повышение эффективности работы медицинских организаций и предприятий медицинской промышленности. Процесс стандартизации решений в области медицинских САПР позволяет создавать с меньшими временными и финансовыми затратами более совершенные медицинские информационные системы для изучения организма человека в нормальных и патологических состояниях, а также для прогнозирования, диагностики и лечения различных заболеваний.

Список литературы:

1. http://www.eternalmind.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=2425 (дата обращения 01.08.13 г.).
2. <http://itm.consef.ru/> (дата обращения 01.08.13 г.).
3. http://www.medcad.net/?page_id=53 (дата обращения 01.08.13 г.).
4. <http://www.delcam-med.ru/content/dentcad> (дата обращения 01.08.13 г.).
5. ГОСТ 23501.101-87 САПР. Основные положения.
6. ГОСТ 23501.108-85 САПР. Классификация и обозначение.
7. Аверьянов О.И., Солдатов В.Ф. Основы проектирования и конструирования. Уч. пособие. – М.: МГИУ, 2008. 152 с.

8. Арнольд В.И. «Жесткие» и «мягкие» математические модели / Изд. 2-е, стереотип. – М.: МЦНМО, 2008. 32 с.
9. Пахарьков Г.Н. Основы маркетинга на предприятиях медико-технического профиля. Уч. пособие. – СПб.: СПГЭТУ, 1995. 80 с.
10. Информационные технологии в медицине. 2011-2012 гг. – М.: Радиотехника, 2012.

Лилия Явдатовна Бухарбаева,
канд. техн. наук, д-р эконом. наук, профессор,
кафедра экономики предпринимательства,

Рашид Вильевич Насыров,
канд. техн. наук, канд. фарм. наук, доцент,
Игорь Сергеевич Тиунов,
аспирант,
кафедра автоматизации проектирования
информационных систем,
Уфимский государственный авиационный
технический университет,
г. Уфа, Республика Башкортостан,
e-mail: buharbaeva@mail.ru

А.А. Федотов

Моделирование процессов формирования периферической артериальной пульсации крови

Аннотация

Рассмотрена математическая модель процессов формирования сигнала периферической артериальной пульсации крови в сосудах верхних конечностей. Формирование периферической артериальной пульсации крови представлено в виде композиции прямой и отраженной пульсовых волн, распространяющихся по артериальной системе человека. Предложена система аналогии между процессами распространения пульсовых волн по артериальной системе человека и распространением электрических колебаний по линиям с распределенными параметрами. Зависимости распространения пульсовых волн по артериальной системе человека были получены на основе решения одномерных уравнений Навье-Стокса для нескольких частных случаев.

Одной из самых распространенных и опасных патологий сердечно-сосудистой системы человека является дисфункция эндотелия, приводящая к возникновению таких заболеваний, как атеросклероз, артериальная гипертензия, ишемическая болезнь сердца, инсульт и инфаркт. Ранняя диагностика эндотелиальной дисфункции осуществляется на основе методик оценки показателей эластичности артериальных сосудов [1], [2].

Эластические свойства артериальных сосудов могут быть косвенно определены методами контурного анализа периферической артериальной пульсации крови, регистрируемой неинвазивно с помощью плетизмографических или сфигмографических датчиков [2]-[4]. Форма контура периферической артериальной пульсации крови определяется главным образом характеристиками большого круга кровообращения, скоростью распространения пульсовых волн давления в аорте и крупных артериях, а также тонусом мелких артерий и артериол [1], [5].

Математическое моделирование гемодинамических процессов в артериальных сосудах верхних конечностей позволит открыть новые возможности в создании эффективных методик определения показателя эластичности артериальных сосудов на основе неинвазивной регистрации и обработки биосигналов артериальной пульсации крови [6], [7]. Данная статья посвящена разработке математической модели процессов формирования периферической артериальной пульсации крови, наблюдаемой в артериальных сосудах верхних конечностей.

Для описания процессов распространения пульсовых волн давления по артериальному руслу использовались одномерные уравнения Навье-Стокса [8], [9]:

$$-\frac{\partial P}{\partial x} = Q \cdot \frac{8\mu}{\pi r^4} + \frac{\rho}{\pi r^2} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t};$$

$$-\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{3\pi r^3}{2\xi h} \cdot \frac{\partial P}{\partial t},$$

где x – осевая координата; t – время; Q – расход жидкости; P – давление; μ – вязкость крови; r – радиус артерии; ρ – плотность жидкости; ξ – модуль Юнга артериальной стенки; h – толщина стенки.

Для получения математических зависимостей изменения давления пульсовой волны от времени и координаты воспользуемся аналогией между процессом распространения пульсовых волн по артериальному руслу и распространением электрических колебаний по однородным линиям передачи с рас-

пределенными параметрами [6], [9]. Телеграфные уравнения, описывающие процесс распространения электрических возмущений в длинной линии без утечек (длинная линия типа «подземный кабель» [10]), имеют символическую формальную аналогию с одномерными уравнениями Навье-Стокса:

$$-\frac{\partial U}{\partial x} = I \cdot R + L \cdot \frac{\partial I}{\partial t};$$

$$-\frac{\partial I}{\partial x} = C \cdot \frac{\partial U}{\partial t},$$

где U – электрическое напряжение; I – электрический ток; R – электрическое сопротивление единицы длины линии; L – индуктивность единицы длины линии; C – электрическая емкость единицы длины линии.

Таким образом, используется следующая система аналогий: электрическое напряжение $U \leftrightarrow$ давление P , электрический ток $I \leftrightarrow$ расход жидкости Q . Аналогия уравнений позволяет использовать для исследования гемодинамических процессов методы анализа, разработанные для длинных электрических линий, в частности, использовать такие понятия, как импеданс, согласованная нагрузка, линия с отражением и др.

Моделью участка артериального русла является однородная электрическая длинная линия передачи. На одном конце находится источник электрического колебания, другой конец линии замкнут на обобщенное сопротивление [6], [9]. В такой модели источник электрического сигнала моделирует импульсное изменение давления, возникающее во время систолы и приводящее к выбросу крови из левого желудочка. В качестве входного сигнала был выбран импульс с экспоненциальными фронтами как наиболее близкий к наблюдаемой форме сердечного выброса во время систолы [6]:

$$P_o(t) = P_{\max} \cdot \left[1 - e^{-\frac{t}{T_1}} - \left(1 - e^{-\frac{t-t_p}{T_2}} \right) \cdot 1(t - t_p) \right],$$

где $P_{\max}$ – амплитуда импульса давления; T_1 – длительность переднего фронта импульса; t_p – длительность импульса; T_2 – длительность заднего фронта импульса; $1(t)$ – единичная функция.

Параметры такого сигнала имеют прямой физиологический смысл и определяются параметрами сердечного выброса