

УДК 612.08 + 004.942 + 519.179.2

# РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ РАБОТЫ СЕРДЦА

Б. Н. Еремеев

Аспирант

Отделение гибридных моделирующих и управляющих систем в энергетике Институт проблем моделирования в энергетике им. Г. Е. Пухова НАН Украины  
вул. Генерала Наумова,  
15, г. Киев, Украина, 03164  
E-mail: bmailb@rambler.ru

*У статті розкривається досвід практичного застосування мереж Петрі для моделювання роботи серця. Представлені основні підходи до розробки моделюючого комплексу для дослідження дискретних фізіологічних систем. Наводиться структура й описані основні етапи побудови комбінованої моделі роботи серця. Розглянуто динаміку взаємодії паралельних процесів та їх вплив на зміну гемодинамічних і електричних параметрів*

*Ключові слова: мережі Петрі, паралельні процеси, моделюючий комплекс, комбінована динамічна модель серця*

*В статье раскрывается опыт практического применения сетей Петри для моделирования работы сердца. Представлены основные подходы к разработке моделирующего комплекса для исследования дискретных физиологических систем. Приводится структура и описаны основные этапы построения комбинированной модели работы сердца. Рассмотрена динамика взаимодействия параллельных процессов и их влияние на изменение гемодинамических и электрических параметров*

*Ключевые слова: сети Петри, параллельные процессы, моделирующий комплекс, комбинированная динамическая модель сердца*

## 1. Введение

Мобильные системы и технологии все больше охватывают новые сферы нашей жизни, и медицина не является исключением. Широкое распространение получили мобильные диагностические системы, которые постоянно развиваются, приобретая все более компактный вид с расширенными функциональными возможностями. При этом особенно актуальной является задача повышения эффективности своевременно определения и коррекции развития патологических отклонений в работе сердца.

Существует необходимость поиска количественных закономерностей изменения гемодинамических и электрических параметров, а также анализа асинхронных параллельных процессов и характера их взаимодействия, с целью повышения эффективности диагностики сердечно-сосудистых заболеваний. Для решения задачи предложено использовать специализированный моделирующий комплекс, с применением комбинированной модели сердца. Она представляет собой графоаналитическую модель сердца, на основе аппарат сетей Петри (PN) [1–3], где определённые графические элементы описаны локальными эмпирическими моделями.

Поскольку направленность исследования связано с последующим применением в мобильных диагностических комплексах, необходимо обеспечить возможность интеграции созданной комбинированной модели сердца, с минимальными временными и экономическими затратами. Для этих целей следует разработать программный комплекс «Heart Expert» на базе готовых аппаратных решений (мини-компьютеров,

смартфонов, коммуникаторов и т. п.) с возможностью внедрение их в существующие или вновь разработанные диагностические системы, путем применения многочисленных встроенных проводных и беспроводных каналов связи.

Таким образом, решение задачи создания специализированного моделирующего комплекса, обеспечит весь цикл проведения компьютерного имитационного исследования, путем комбинирования моделей, их настройки и анализа результатов имитационного эксперимента. Безусловно, полученные результаты и подходы требуют апробации и адаптации к решению конкретных задач, при этом будет достигнута высокая эффективность, надежность, мобильность, модульность, автономность, экономичность, что создаст благоприятные условия для реализации определения и коррекции развития патологических отклонений в работе сердца.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Модели сложных медицинских систем, построенные на основе классических сетей Петри, приобретают слишком большие размеры по причине образования избыточных элементов. Для решения данной проблемы следует применять интерпретации и модификации сетей Петри [3, 4], которые учитывают класс отображаемых систем, позволяют строить и анализировать модели, в которых минимизированы избыточные элементы [4]. Развитие PN направлено на адаптацию классических сетей Петри для решения прикладных задач и устранение части критических свойств [2–4].

Моделирование работы сердца как динамической системы включает в себя отображение механизмов управления, топологию и взаимосвязь ее элементов. Для решения этой задачи могут быть использованы безопасные сети Петри с использованием накопительных элементов [3]. Эти элементы относятся к числовым (EN) и макрочисловым (MEN) сетям. Для отображения в модели влияния управляющих сигналов, применяются элементы управляющей модификации сетей Петри (SN) [4] со стохастическими временными свойствами. В вершины сети Петри встраиваются эмпирические модели элементов исследуемого объекта, которые служат для отображения законов изменения параметров сердца. Таким образом, исследование сердца осуществляется на основе комбинированной динамической модели, которая представляет собой графоаналитическую модель сердца, где определённые графические элементы описаны локальными математическими моделями.

На практике можно выделить жесткий и гибкий подходы разработки моделей [5]. Для первого характерна разработка программного обеспечения, где на уровне кода реализованы модели и взаимосвязи между ними, с наперед заданными правилами изменения параметров исследования. Несмотря на преимущество данного подхода, связанного со скоростью построения модели, используя современные языки программирования, с поддержкой ее настройки и визуализации, он обладает рядом недостатков, которые усложняют процесс построения структуры и функционирования исследуемого объекта в условиях влияния экзогенных и эндогенных факторов. Даная проблема связана с жестким определением взаимосвязей между моделями, прописанных на уровне кода, что усложняет или часто исключает процесс ее модификации сторонними исследователями.

Гибкий подход направлен на создание стандартов описания модели и обеспечение возможности их создания, используя средства моделирующего комплекса. Благодаря этому узконаправленные специалисты могут создавать модели в рамках своей области исследования, которые можно объединить в единую модель органа, системы или даже организма в целом. Среди такого вида моделирующих комплексов можно выделить: JSim [6], BioUML [7] и Simulink [8]. Благодаря использованию формализованных языков описания моделей, таких как Systems Biology Markup Language [9] и CellML [10], удалось отделить процессы моделирования и проектирования. Таким образом, внимание исследователя сосредоточено на создании и описании модели, а не на создании инструментов для моделирования. Однако гибкий подход имеет ограниченный язык описания моделей, который в большинстве случаев оптимизирован для решения конкретных задач. При этом имеющиеся формализованные языки описания моделей не позволяют представлять параллельные процессы в чистом виде и их взаимодействия во времени.

Таким образом, возникает задача исключить представленные недостатки путем сочетания обоих подходов и унификации процесса построения моделей функционирования медицинских физиологических систем, в том числе и для описания работы сердца. В качестве решения представленной проблемы может выступить графоаналитический аппарат сетей Петри, который успешно себя зарекомендовал как инструмент визуа-

лизации и исследования асинхронных параллельных процессов, связанных между собой причинно-следственными связями. Применение PN позволит не только стандартизировать процесс разработки частичных моделей функционирования медицинских систем, а также обеспечит легкость их интеграции в единую систему. При этом развитие модели может происходить в двух плоскостях. Первая «горизонтальная» плоскость связана с введением дополнительных факторов и параллельных процессов, влияющих на исследуемый объект, в пределах одного уровня детализации. К примеру, модель сердца, которая представляет собой взаимодействие гемодинамики и электрической активности, может быть дополнена параллельным процессом, который соответствует влиянию внешней среды (давления, температуры) на объект исследования. При этом состояние внешней среды и механизмов управления сердца зависит от текущего состояния (разметки) сети Петри, а также управляющих сигналов, отражающих внешнее или внутреннее воздействия. Во второй «вертикальной» плоскости реализуются свойства иерархических сетей Петри, что позволяет детализировать элементы модели для глубинного исследования объекта, не изменяя структуры верхнего уровня. В результате получаем многоуровневую иерархическую систему, количество уровней которой зависит от направленности и задач исследования.

---

### 3. Цель и задачи исследования

---

Цель работы заключается в построении специализированного комплекса для исследования взаимодействия гемодинамики и электрической активности сердца, на основе комбинированной модели сердца.

Для достижения данной цели в работе представлены и рассмотрены следующие задачи:

- разработка принципов и требований к построению комбинированной модели;
- выделение основных этапов исследования работы сердца;
- упрощение процесса построения и анализа комбинированной модели сердца, применяя иерархический подход;
- определение платформы реализации моделирующего комплекса «Heart Expert»;
- проектирование архитектуры моделирующего комплекса «Heart Expert»;
- оценка адекватности комбинированной модели сердца.

---

### 4. Разработка моделирующего комплекса

---

Моделирующий программный комплекс должен обеспечивать возможность построения комбинированных моделей физиологических систем, а также проводить на их основе исследование динамики параметров исследуемого объекта. Комбинированная модель сердца представляет собой многоуровневую структуру (рис. 1), которая включает в себя математический уровень, уровень данных и графоаналитический уровень. При этом межуровневые взаимодействия осуществляются с помощью логических и информационных связей.

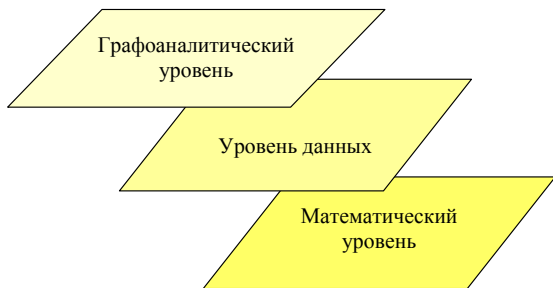


Рис. 1. Многоуровневая структура комбинированной модели сердца

Такая организация модели позволила распределить вычислительную и функциональную части модели, что обеспечило гибкость исследования и упрощение реализации. Управление процессом вычисления основных параметров гемодинамики (давление, объем, поток крови) осуществляется путем формирование запросов на вычисления и возврат значений обратно на графоаналитический уровень. При этом графические элементы описаны локальными эмпирическими моделями. Применение такого подхода позволило проводить исследования работы сердца в режиме реального времени, что связано с заменой сложной математической модели со слабо выраженными зависимостями механических и электрических процессов в условиях влияния экзогенных и эндогенных факторов, на множество локальных математических моделей, которые собираются в функциональную модель, представленную сетью Петри [1–3]. При формировании локальных моделей учитываются пространственно-временные характеристики исследуемого объекта, которые зависят от электрофизиологических и эластических свойств сердца. Таким образом, удается достичь не только максимальной гибкости настройки процесса исследования, а и возможности расширять модель на определенных уровнях детализации по мере получения новых знаний или требований к исследованию, без нарушения структуры верхнего уровня.

Процесс проведения исследования функции сердца связан с выполнением определенных этапов, представленных на рис. 2. Первая стадия связана с формированием входного сигнала, который может быть полученный в результате снятия электрокардиограммы с реального пациента или используя работу эквивалентного электрического генератора сердца с заданными параметрами. При этом выбор одного из них зависит от направленности исследования.

Обработка входного сигнала осуществляется путем определение информационных составляющих электрокардиограммы в виде зубцов и интервалов. Последующий анализ их амплитудно-частотных характеристик позволяет ассоциировать стадии работы сердца с соответствующими временными интервалами (рис. 3).

В результате этого формируется набор управляющих сигналов, которые определяют длительность выполнения функций, связанных с вершинами мест и переходов. Временные характеристики вершины места описывают длительность выполнения операции, или группы операций в случае с макропереходом. Для вершины места временной параметр определяет время обработки условия или задержки. В модели сердца с

помощью временных параметров описываются: продолжительность стадий сердечного цикла, формирования и распространения потенциала действия, момент закрытия и открытия клапанов сердца.

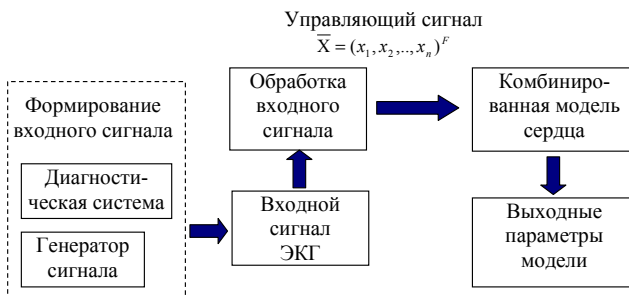
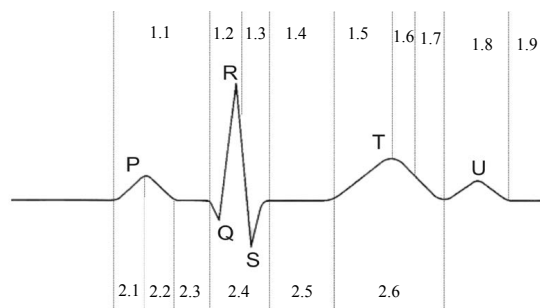


Рис. 2. Схема проведения исследования



Условные обозначения:

- |                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| 1.1 Систола предсердий              | 2.1 Деполяризация левого предсердия                            |
| 1.2 Асинхронное сокращение          | 2.2 Деполяризация правого предсердия                           |
| 1.3 Изоволюметрическое сокращение   | 2.3 Распространение потенциала по АВ-узлу                      |
| 1.4 Быстрое изгнание                | 2.4 Деполяризация желудочков и начало реполяризации предсердий |
| 1.5 Медленное изгнание              | 2.5 Полная деполяризация желудочков                            |
| 1.6 Протодиастола                   | 2.6 Реполяризация желудочков и предсердий                      |
| 1.7 Изоволюметрическое расслабление |  |
| 1.8 Быстрое наполнение              |  |
| 1.9 Медленное наполнение            |  |

Рис. 3. Последовательность и длительность стадий цикла сердца и электрических процессов [11]

Таким образом, в комплексной модели применяются как временные так и причинно-следственные зависимости параллельных процессов, что позволяет более наглядно описать логику функционирования системы.

### 5. Многоуровневая иерархическая структура комбинированной модели работы сердца

Моделирование работы сердца как динамической системы предусматривает формирование топологии, описание локализации и особенностей взаимодействия элементов, а также отображения механизмов управления. При этом возникает задача упрощения процесса построения и интерпретации параметров исследуемого объекта. Для её решения предлагается применять иерархический подход, используя при этом возможность вмещать в вершины макропереходов подчиненные модели, при этом срабатывание такого перехода характеризуется выполнением сеанса вмещенной

в него подмодели. Это позволит адаптировать общую модель к изменению уровня детализации.

Таким образом, при реализации программного обеспечения следует предоставить возможность формировать многоуровневую структуру с указанием межуровневых связей. При этом для обеспечения возможности использовать программный продукт исследователями, не вникая в особенности применения сетей Петри, предлагается реализовывать блочный вид модели. В результате пользователь будет оперировать блоками, указывая входные и выходные дуги, что позволит достичь максимального удобства в визуализации исследуемых процессов.

## 6. Выбор платформы для моделирующего комплекса «Heart Expert»

Правильный выбор платформы для моделирующего комплекса определяет эффективность компьютерного имитационного исследования и его способность решать поставленные цели и задачи. Учитывая тот факт, что необходимо обеспечить компактность, мобильность, легкость интеграции в существующие диагностические системы, было принято решения в пользу применения мобильных платформ. На сегодняшний день одной из лидирующих позиций в медицинской отрасли набирает платформа Android. Что обусловлено открытостью операционной системы на основе ядра Linux с возможностью использования ее в медицинских и бытовых устройствах. При этом поддерживается полная многозадачность, удобство использования, автономность работы и поддержка многочисленных каналов связи.

Выбранная платформа позволяет получить входные параметры из диагностических систем или датчиков, с дальнейшей их обработкой, анализом объекта исследования и визуализацией на экран, используя комбинированную модель сердца.

Текущий уровень вычислительных возможностей современных мобильных процессоров (например, 8-ядерных процессоров Cortex-A50 с 64-разрядной архитектурой), позволяет использовать их для решения задач моделирования работы сердца в режиме реального времени. А широкое распространение готовых аппаратно-программных решений в виде систем на кристалле (System-on-Chip), с установленной операционной системой Android, обеспечивает легкость их внедрения в другие системы.

## 7. Архитектура моделирующего комплекса «Heart Expert»

Исходя из требований к программному обеспечению и учитывая особенности предложенного подхода моделирования, была разработана архитектура моделирующего комплекса «Heart Expert», представленная на рис. 4.

На начальном этапе работы с программой формируется комбинированная модель работы сердца, используя блок управления моделями. С помощью средств построения моделей пользователем создается функциональная модель сердца, используя набор элементов и шаблонных конструкций, а также определяются внутренние и межуровневые связи.



Рис. 4. Архитектура моделирующего комплекса «Heart Expert»

По завершению этого процесса необходимо определить локальные эмпирические модели и сопоставить их соответствующим графическим элементам. Реализация математических моделей осуществляется, используя принцип модульности, где каждая из моделей представляет собой отдельный модуль, который доступен через определенный программный интерфейс. При этом обеспечивается независимость друг от друга настроек параметров эмпирических локальных моделей.

Использование принципа модульности в комбинированной модели позволило корректировать параметры математической модели по мере получения новых знаний, а также в зависимости от поставленных задач исследования, не нарушая при этом логику работы и структуру физиологического уровня. Такой подход позволяет комбинировать элементы математической модели с сосредоточенными и распределенными параметрами в зависимости от уровня допустимых значений точности при заданных ограничениях по времени вычисления. Этот подход особенно важен в системах реального времени. Для решения данной задачи предлагается использовать коэффициент масштабирования. Таким образом, длительность выполнения сердечного цикла будет равна сумме продолжительности систолы и диастолы сердца умноженного на коэффициент масштабирования  $k_i$ . Такой подход позволяет уменьшить зависимость от времени имитации модели сердца и длительности вычислений, и вместе с тем повысить точность получаемых результатов, применяя компоненты модели с распределенными параметрами.

## 8. Оценка адекватности комбинированной модели сердца

Оценка адекватности комбинированной модели сердца заключается в степени соответствия не только реальному объекту, сколько целям и принятым критериям исследования. При этом следует учитывать, насколько корректно она отображает структуру, логику и работу (функционирование) объекта исследования в рамках поставленной задачи. Процедура оценки адекватности основана на сравнении полученных результатов работы модели с данными действительности, учитывая текущие изменения состояния и влияния

управляющих сигналов, которое определяется работой сети Петри. Способность эффективно и адекватно отображать механизмы управления, топологию и взаимосвязь ее элементов, определяются наличием критических свойств, которые можно разделить на динамические и статические. Первый тип связан с динамикой перемещения меток, а второй с топологией самой сети. К динамическим относятся свойства живости, безопасности и отсутствия конфликтов, наличие одного из них указывает, что сеть Петри является критичной. Это свидетельствует о неоднозначности или невозможности функционирования описанных процессов, или о логических ошибках при воспроизведении требований исследования, а также вызывает потребность в локализации и устранении выявленных критических свойств [3]. Среди статических свойств сети Петри можно выделить замкнутость, суть которой заключается в том, что после конечного числа срабатываний переходов по любому из маршрутов, сеть Петри приобретает начальную разметку, что характерно для медицинских систем.

## 9. Выводы

В ходе исследования были получены следующие результаты:

Разработаны принципы и требования к построению комбинированной модели. Суть, которых заключается в использовании многоуровневой структуры, которая включает в себя математический уровень, уровень данных и графоаналитический уровень. Для реализации, которой было предложено использовать

графоаналитические аппарат сетей Петри, где определенные графические элементы описаны локальными эмпирическими моделями.

В качестве основных этапов исследования работы сердца было выделено формирование входного сигнала, его обработка, с последующим получением множества сигналов, для управления параллельными процессами в работе сердца.

Для упрощения процесса построения и анализа комбинированной модели сердца, было предложено использовать многоуровневую иерархическую структуру, на основе иерархических свойств сетей Петри.

Исходя из поставленных целей и задач для реализации моделирующего комплекса, было предложено использовать готовые аппаратные решения с установленной операционной системой Android. Применение данной платформы позволяет использовать ее для решения задач моделирования работы сердца в режиме реального времени, при этом будет достигнута высокая эффективность, надежность, мобильность, и простота интеграции в существующие диагностические комплексы.

При оценке адекватности комбинированной модели сердца необходимо сравнивать полученные результаты работы модели с данными действительности, учитывая текущие изменения состояния и влияния управляющих сигналов, которое определяется работой сети Петри.

Последующая реализация архитектуры, в виде готового аппаратно-программного комплекса «Heart Expert», обеспечит эффективность своевременного определения и коррекции развития патологических отклонений в работе сердца.

## Литература

1. Petri, C. A. *Kommunikation mit Automaten* [Text] / C. A. Petri. – Bonn: Institut für Instrumentelle Mathematik, 1962. – 89 p.
2. Кузьмук, В. В. Сети Петри, параллельные алгоритмы и модели мультипроцессорных систем [Текст] / В. В. Кузьмук, В. В. Васильев. – К.: Наукова думка, 1990. – 216 с.
3. Кузьмук, В. В. Модифицированные сети Петри и устройства моделирования параллельных процессов. [Текст]: монография / В. В. Кузьмук, О. О. Супруненко. – К.: Маклауд, 2010. – 260 с.
4. Кузьмук, В. В. Класифікація мереж Петрі та приклади їх застосування для розв'язання прикладних задач. [Текст] / В. В. Кузьмук, А. М. Парнюк, О. О. Супруненко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Т. 2, № 9(50). – С. 40–43.
5. Ліссов, П. Н. Технологія створення програмного комплексу для моделювання фізіологічних систем. [Текст] / П. Н. Ліссов // Проблеми програмування. – 2008. – № 2-3. – С. 770–776
6. Bassingthwaight, J. JSim, an open-source modeling system for data analysis and reproducibility in research (733.1). [Text] / J. Bassingthwaight, E. Butterworth, B. Jardine, G. Raymond, M. Neal // The FASEB Journal. – 2014. – Vol. 28, Issue 1. – P. 733.1. doi: 10.12688/f1000research.2-288.v1
7. Kolpakov, F. A. BioUML – framework for visual modeling and simulation of biological systems [Text] / F. A. Kolpakov // International Conference on Bioinformatics of Genome Regulation and Structure-Systems Biology: proceedings. – Novosibirsk, 2002. – Vol. 2. – P. 128–131.
8. Chen, T. A Simulink hybrid heart model for quantitative verification of cardiac pacemakers [Text] / T. Chen, M. Diciolla, M. Kwiatkowska, A. Mereacre // Proceedings of the 16th international conference on Hybrid systems: computation and control. – ACM, 2013. – P. 131–136. doi:10.1145/2461328.2461351
9. Finney, A. Software Infrastructure for Effective Communication and Reuse of Computational Models [Text] / A. Finney, M. Hucaka, B. J. Bornstein, S. M. Keating, B. E. Shapiro, J. Matthews, H. Kitano – System Modeling in Cell Biology, 2006. – P. 355–378. doi:10.7551/mitpress/9780262195485.003.00
10. Cuellar, A. An Overview of CellML 1.1, a biological model description language [Text] / A. A. Cuellar, C. M. Lloyd, P. F. Nielsen, D. P. Bullivant, D. P. Nickerson, P. J. Hunter // Simulation. – 2003. – Vol. 79, Issue 12. – P. 740–747. doi:10.1177/0037549703040939
11. Фундаментальная и клиническая физиология. [Текст] / под ред. А. Г. Камкина, А. А. Каменского. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 1072 с.