

УДК: 62.001.57:576.75:612.014.4

Электрофизиологическая модель сердца (виртуальное сердце)

И. И. Хаимзон, Е. П. Бондарчук

Винницкий национальный медицинский университет

им. Н. И. Пирогова, Украина

Резюме

В рамках существующей технологии компьютерного моделирования процессов жизнедеятельности органов и систем организма человека PureMedSim разработана электрофизиологическая модель сердца (виртуальное сердце). Данная модель сердца дает возможность наблюдать и изучать картину сердечных сокращений в реальном масштабе времени, включая все необходимые клеточные механизмы: генерацию биопотенциалов действия отдельными клетками различных отделов сердца; изменение ионного содержимого конкретной клетки конкретного отдела и соответствующее этому состояние ионных каналов данной клетки; генерацию электрокардиограммы в реальном масштабе времени; механизмы возникновения нарушений ритма.

Ключевые слова: компьютерное моделирование в медицине, медицинские симуляторы, электрофизиология.

Клин. информат. и Телемед.
2011. Т.7. Вып.8. с.10–15

Введение

Биология и медицина изучают в различных аспектах законы функционирования живых объектов — самых сложных из существующих в природе. Одним из наиболее эффективных путей их познания является метод моделирования [1]. В современной медицине широко используются программно-технические средства и технологии, которые позволяют моделировать различные процессы жизнедеятельности органов и систем организма, а также работу медицинской аппаратуры. Простейшими моделями в медицине являются, например, общеизвестные манекены, предназначенные для обучения медперсонала навыкам проведения различных лечебных манипуляций (уколы, капельницы, катетеры, реанимационные мероприятия и т.п.). В настоящее время также очень популярны программно-технические комплексы (тренажерные системы обучения), которые имитируют работу соответствующего медицинского оборудования: анестезиологической аппаратуры, искусственной почки, искусственного кровообращения, ангиографической техники и др. Известны компьютерные системы моделирования работы отдельных органов и систем человека: биомембран, сердца, легких, опорно-двигательного аппарата и др. Новое направление медицинской информатики, в котором разрабатываются такие средства и технологии называют медицинской симуляцией.

В большинстве случаев медицинские симуляторы используются для обучения медицинского персонала методам, средствам и навыкам решения различных задач, возникающих в ходе лечебно-диагностического процесса. Актуальность этого в значительной

мере связана с большой проблемой доступа обучаемого контингента (студентов, молодых специалистов и т.п.) к пациентам в условиях страховой медицины. В том или в ином виде эта проблема существует везде и эффективного решения ее сегодня нет. Например, иногда для обучения нанимают актеров, которые играют патологические состояния. Те симуляторы, которые применяются в обучении сегодня решают эту проблему только частично и только в отдельных областях медицины — в основном критические состояния, реанимационные мероприятия, анестезиология и т.п. (причем только в плане приобретения навыков реанимационных мероприятий или навыков работы с определенной медицинской аппаратурой).

Такая ограниченность использования медицинских симуляторов связана, прежде всего, с отсутствием высокого уровня моделей процессов жизнедеятельности органов и систем человека. Для качественного прорыва в области медицинской симуляции создание таких моделей — задача первостепенной важности. Если она будет решена успешно, возможности внедрения — неограниченные.

Материалы и методы

Основной задачей медицинской симуляции является возможность получения такого ответа модели, лежащей в основе данного симулятора, который будет максимально приближен к поведению реального объекта при заданных входных воздействиях.

Решение данной задачи зависит от используемой технологии моделирования, а соответствие результатов реально происходящим процессам, прямо пропорционально глубине моделирования (учету максимально возможного количества факторов, влияющих на конечный результат).

В подавляющем большинстве случаев существующие модели медико-биологических процессов формализованы в виде различного вида сложных систем уравнений или неравенств (дифференциальных, регрессионных, нелинейных, стохастических и т.п.) с нечетко определенными коэффициентами для учета разных факторов влияния на данный моделируемый процесс [2]. Отдельные элементы модели при этом могут представляться, например, в виде механических узлов или электрических схем [3]. Недостатки таких моделей очевидны — трудность восприятия, узкое и одностороннее отображение свойств и поведения реального объекта, невозможность исследования всего многообразия связей и т.п. Как следствие этого — ограниченные возможности и невысокая точность результатов моделирования, что в свою очередь делает невозможным использование таких симуляторов в практической медицине и различных видах исследований, например, в фармации.

Нами разработана принципиально новая технология моделирования [4], максимально приближенная к реальным процессам, происходящим в организме человека, которая базируется на принципе построения модели «снизу-вверх»: клетки—органы—системы—организм. Данная технология получила зарегистрированное название PureMedSim (в дословном переводе — чистые медицинские симуляторы). Технологические принципы, методы, описание продуктов, демо-версии можно найти на сайте puremedsim.com.

Последним разработанным элементом данной технологии является электрофизиологическая модель сердца (виртуальное сердце), которую мы представляем в настоящей работе.

Уникальная электрофизиологическая модель сердца дает возможность наблюдать и изучать картину сердечных сокращений в реальном масштабе времени, включая все необходимые клеточные механизмы: генерацию биопотенциалов действия отдельными клетками различных отделов сердца по ходу распространения волны возбуждения; изменение ионного содержания конкретной клетки конкретного отдела и соответствующее этому состояние ионных каналов данной клетки при генерации биопотенциала действия;

генерацию электрокардиограммы в реальном масштабе времени; механизмы возникновения нарушений ритма.

Общая картина при запуске данной модели показана на рис. 1.

1 — Изображение виртуального сердца экранного симулятора. Сердце сокращается в реальном масштабе времени в полном соответствии с реальной физиологической схемой сокращения различных участков [5], с заданной частотой сердечных сокращений.

2 — Окно с графиками генерации биопотенциалов действия отдельными клетками отдельных участков в реальном масштабе времени.

3 — Названия соответствующих участков путей проводимости и основные характеристики импульса на данном участке.

4 — Электрокардиограмма в реальном масштабе времени.

5 — Квадратами показаны точки на каждом участке пути проводимости, воздействуя на которые, в интерактивном режиме можно изучать механизмы возникновения одиночных экстрасистол из различных отделов сердца. Более сложные нарушения ритма будут задаваться в виде определенных сценариев (эти сценарии будут представлять собой специально заданные алгоритмы воздействия на эти же точки).

В процессе работы модели можно изучать клеточные механизмы генерации потенциала действия отдельными клетками различных участков сердца (рис. 2).

6 — Состояние соответствующей клетки в процессе генерации потенциала действия в реальном масштабе времени.

7 — Состояние ионных каналов соответствующей клетки в реальном масштабе времени.

Результаты и обсуждение

Как показывает анализ всех доступных источников информации, подобных моделей сегодня не существует. Представленная модель уникальна тем, что электрокардиограмма генерируется собственно виртуальным сердцем и ее точки вычисляются в каждый момент времени как мгновенные геометрические суммы биопотенциалов всех клеток всех соответствующих участков (это чрезвычайно сложная математическая задача, методология

вычислений и вычислительные алгоритмы представляют собой абсолютное ноу-хау и здесь не приводятся). Так работает реальное сердце. Отличие состоит только в том, что в связи с недостаточными вычислительными мощностями обычных компьютеров, здесь использовано только ограниченное число клеток (пропорциональное на каждом участке) и все вычисления производятся относительно плоскости, которая вертикально разрезает сердце (в реальном случае генез ЭКГ производится по всему объему сердца). Поэтому кардиограмма у нас имеет не идеальную форму. По мере увеличения компьютерных мощностей (на суперкомпьютерах это можно сделать и сейчас) возможно максимальное приближение модели к реальности. Отметим, что для задач, которые будет решать наш симулятор в целом, указанные ограничения не играют роли.

Все количественные показатели ионного содержимого клеток в процессе генерации потенциала действия, а также временные интервалы полностью соответствуют реальным показателям в живой клетке. Доказательством этому служит полное совпадение параметров генерируемых импульсов с литературными данными [6]. Также идентичны реальным, показанные электрические параметры и временные интервалы, описывающие состояние соответствующих ионных каналов.

Данная модель также дает возможность изучения механизма нарушений ритма в интерактивном режиме (рис. 3).

8 — Импульс возбуждения, задаваемый пользователем на выбранном участке сердца в определенном интервале времени. При этом мы вынужденно возбуждаем заданный участок сердца, что приводит к появлению соответствующей экстрасистолы (см. на ЭКГ). Кроме того, в реальном масштабе времени происходит соответствующее нарушение соотношения на изображении виртуального сердца. В реальной жизни такие же импульсы могут возникать в этих же отделах сердца в силу множества причин, иногда известных, иногда случайных, а иногда неизвестных.

В некоторых случаях заданный импульс возбуждения может не вызвать никаких изменений в работе модели (все зависит от того в каком интервале времени задан импульс возбуждения). Как и в реально работающем сердце, это означает, что мы попали в период рефрактерности, когда данный участок сердца не может возбуждаться в течение определенного времени.

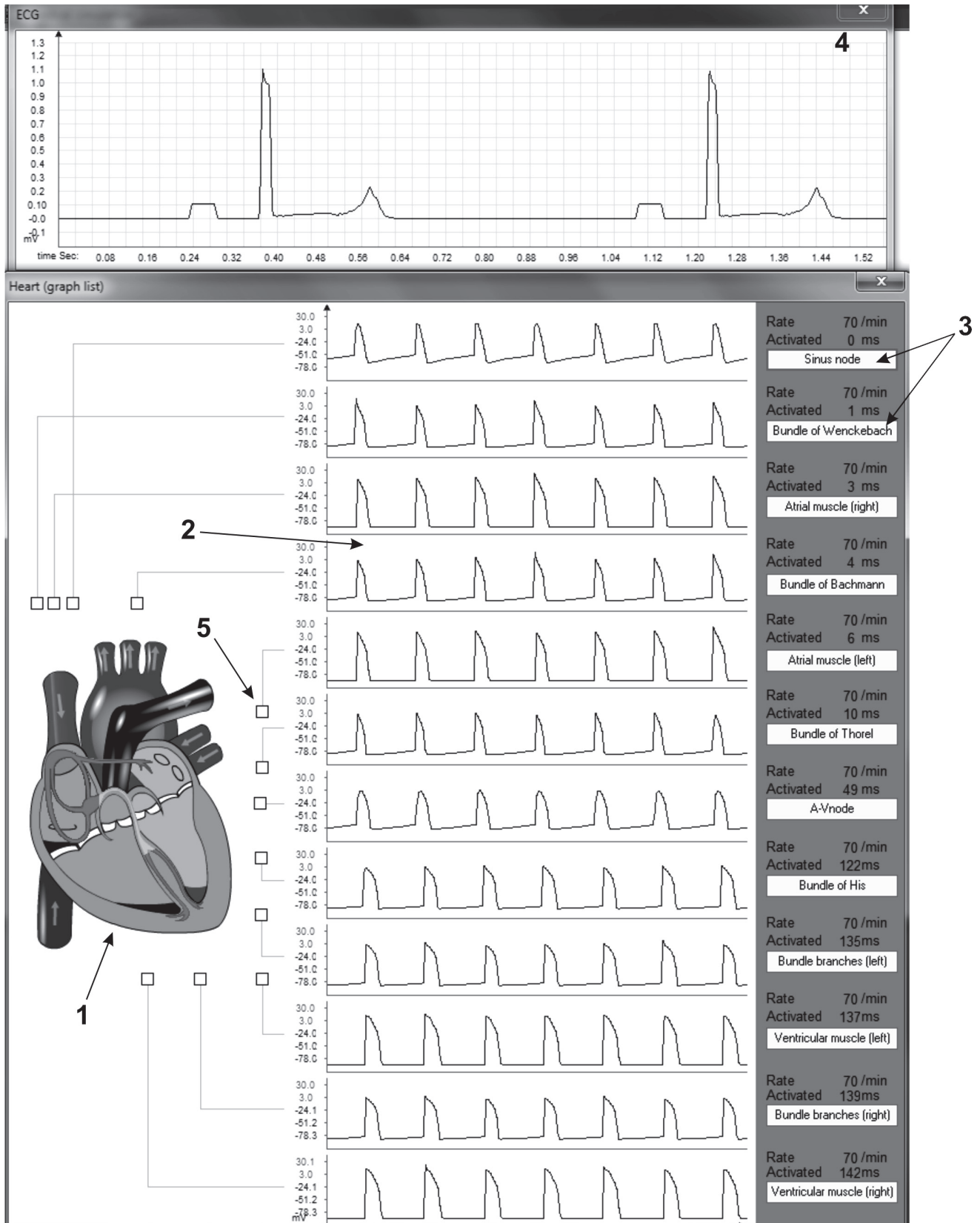


Рис. 1. Электрофизиологическая модель сердца.

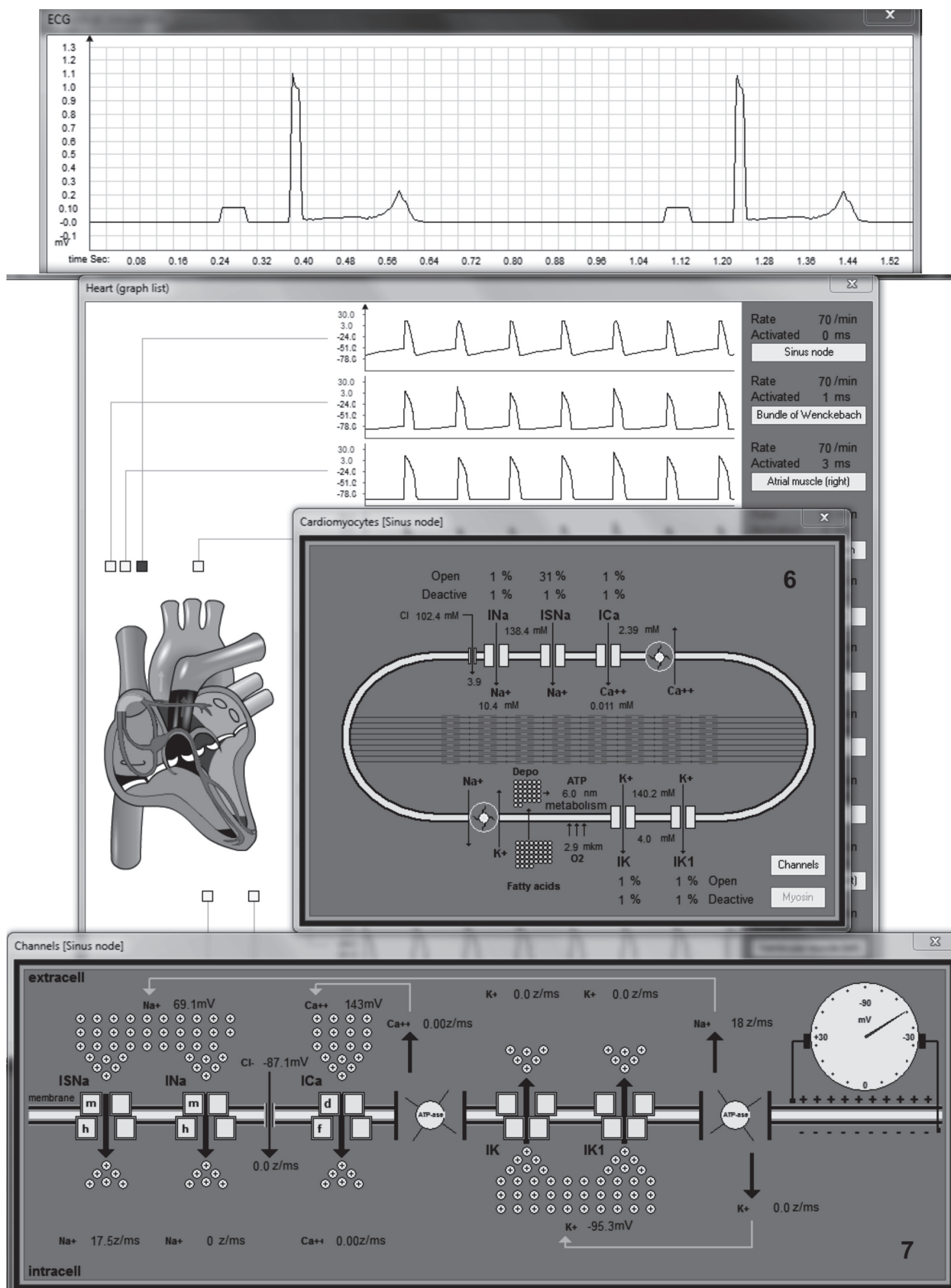


Рис. 2. Фрагмент работы электрофизиологической модели сердца — состояние клетки и состояние ионных каналов в процессе генерации потенциала действия.

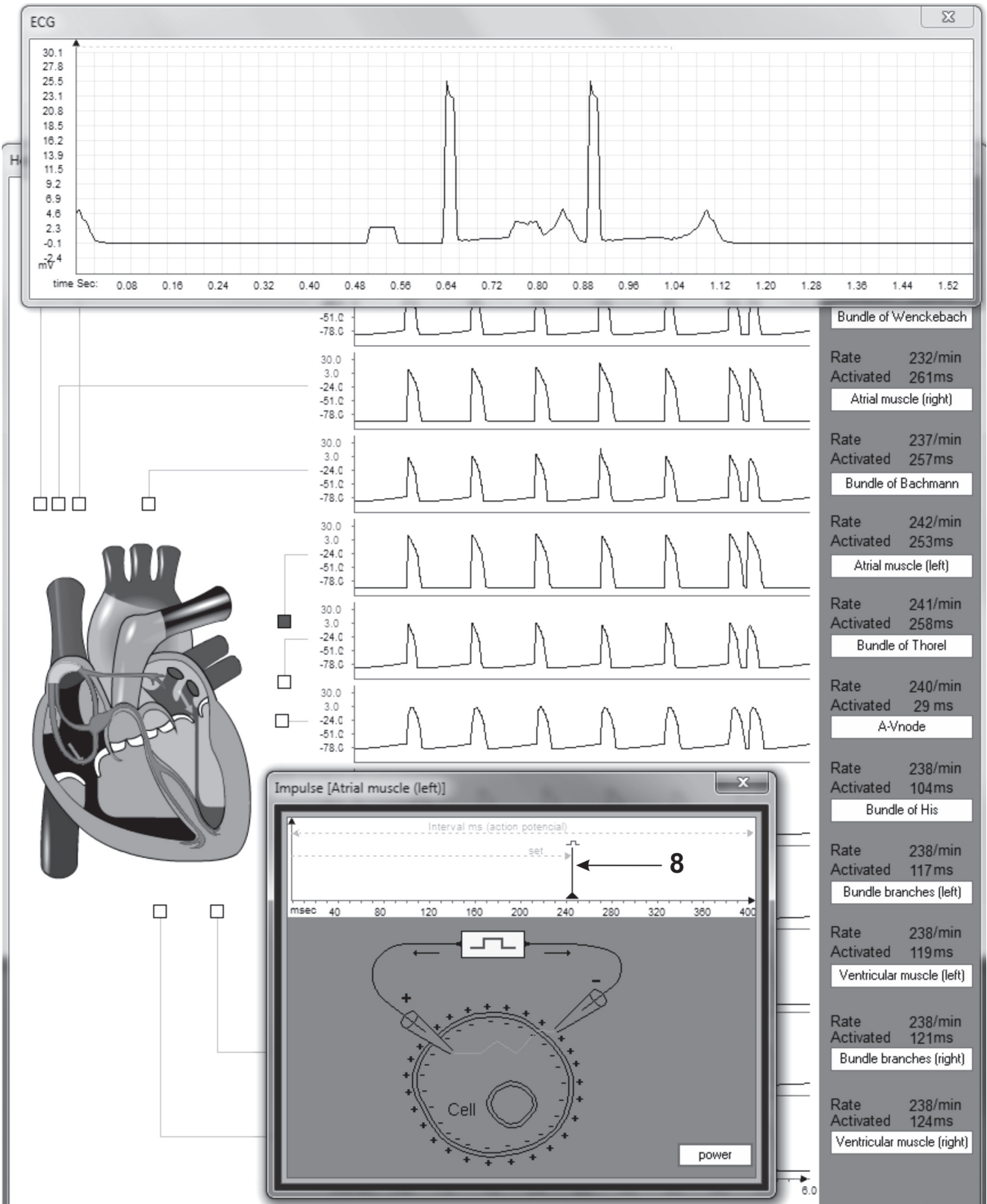


Рис. 3. Фрагмент работы электрофизиологической модели сердца — возникновение одиночных экстрасистол.

Выводы

В рамках технологии PureMedSim разработана электрофизиологическая модель сердца (виртуальное сердце). По своим функциональным возможностям модель не имеет аналогов в соответствующем классе медицинских симуляторов и может найти широкое использование в учебном процессе медицинских вузов, практической деятельности врача и медико-биологических исследованиях. Сегодня пока это отдельный фрагмент, который позже будет включен в общую технологическую схему PureMedSim. Так как наше виртуальное сердце еще не подключено к системам гемодинамики и биохимии, то мы пока просто задали определенный уровень АТФ для функционирования клеток сердца. Как только этот уровень будет исчерпан, виртуальное сердце остановится, причем так как это происходило бы в реальном случае.

Литература

1. Слевин М. Б. Практика системного моделирования в медицине / Слевин М. Б. – Москва : Медицина, 2002. – 167 с.
2. Edvard H. Shotliffe, Leslie E. Perreault Medical Informatics. Computer applications in health care / H. Edvard Shotliffe, E. Leslie // Addison Wesley. – 2002. – 720 p.
3. Гельман В. Я. Медицинская информатика / Гельман В. Я. – Санкт-Петербург, 2002. – 468 с.
4. Мороз В. М. Система компьютерного моделирования процессов жизнедеятельности органов и систем организма людини / В. М. Мороз, І. І. Хаїмзон, Є. П. Бондарчук // Клиническая информатика и телемедицина. – 2004. – №2. – С. 249–253.
5. Stuart Ira Fox. Human Physiology / Stuart Ira Fox. – New-York : McGraw-Hill, 2004. – 726 p.
6. Thomas Fischer Weiss. Cellular biophysics / Thomas Fischer Weiss // The MIT Press Cambridge. – 2006. – 680 p.

The electrophysiological model of the heart (virtual heart)

*I. Khayimzon, E. Bondarchuck
Vinnitsia National Pyrogov Memorial
Medical University, Ukraine*

Abstract

An electrophysiological model of the heart (virtual heart) was developed by PureMedSim, the existing technology of computer simulation of vital processes in human organs and systems. This model of the heart provides an opportunity to observe and study the heartbeat pattern in real time, including all necessary cellular mechanisms: generation of bio-potential actions of individual cells in different sections of the heart; changes in the ion content of specific cells in specific sections of the heart and the corresponding state of the ion channels of this cell; generation of the real time electrocardiogram; mechanisms of emergence of rhythm disturbances.

Key words: computer modelling in medicine, medical simulators, electrophysiology.

Електрофізіологічна модель серця (віртуальне серце)

*І. Хаїмзон, Є. Бондарчук
Вінницький національний медичний
університет ім. М. І. Пирогова, Україна*

Резюме

У рамках існуючої технології комп'ютерного моделювання процесів життєдіяльності органів і систем організму людини PureMedSim розроблена електрофізіологічна модель серця (віртуальне серце). Дана модель серця дає можливість спостерігати і вивчати картину серцевих скорочень в реальному масштабі часу, включаючи всі необхідні клітинні механізми: генерацію біопотенціалів дії окремими клітинами різних відділів серця; зміну іонного вмісту конкретної клітини конкретного відділу і відповідний цьому стан іонних каналів даної клітини; генерацію електрокардіограми у реальному масштабі часу; механізми виникнення порушень ритму.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання в медицині, медичні симулятори, електрофізіологія.

Переписка

д.т.н., професор **І. І. Хаїмзон**
кафедра біофізики, інформатики
и медаппаратури
Вінницький національний
медичинський університет
ім. Н. І. Пирогова
ул. Пирогова, 56
Вінниця, 21018, Україна
тел. (0432) 520 065
ел. почта: igorkh@vsnu.vinnica.ua