

ТЕОРИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ

Е.П. Попечителев

Проблемы синтеза биотехнических систем

Аннотация

В статье рассмотрено современное состояние синтеза биотехнических систем, в которых биологические и технические элементы объединены для выполнения заданных целевых функций. К таким системам отнесены, кроме общепринятых систем управления человеком сложными техническими комплексами, все системы, в которых технические средства используются для исследования или изучения биологического объекта: организма, биологического материала любого происхождения, окружающей среды. Выделен особый класс специальных технических устройств – каналов взаимодействия, учитывающих различия в характеристиках соединяемых разнородных элементов. Определены основные проблемы, связанные с их разработкой с учетом свойств биообъекта.

В 1975 году профессор В.М. Ахутин предложил термин «биотехнические системы» (БТС) для выделения «...особого класса больших систем, представляющих собой совокупность биологических и технических элементов, связанных между собой в едином контуре управления» [1], [2]. Основные преимущества БТС перед чисто техническими системами должны состоять «...в сочетании положительных качеств этих систем при взаимной компенсации их недостатков». Эти преимущества могут быть достигнуты за счет выполнения двух основных принципов синтеза БТС:

- адекватности согласования управленческих характеристик технических и биологических элементов системы;
- идентификации информационной среды, требующей оптимизации информационных потоков и формы предъявления информации, которой обмениваются между собой биологические и технические звенья системы.

В концепции биотехнических систем не заостряется внимание только на человеке; предполагается включение в их структуру любых биологических объектов, в том числе являющихся объектами изучения или исследования с помощью технических систем. К этому классу были отнесены все системы медицинского назначения [2].

К биотехническим системам были отнесены также:

- вычислительные комплексы по обработке информации в интерактивном режиме, в котором сам человек определяет направления обработки данных на каждом последующем шаге на основании анализа результатов на предыдущем этапе [3];
- системы обучения, в которых применяются технические средства: тестовые комплексы, мультимедийные системы, тренажеры, имитаторы и др. [2], [4];

- средства массовой информации, позволяющие представить любые информационные материалы в наилучшем для восприятия виде, и многое другое [5].

При создании БТС требуется учет свойств живых систем, к которым они подключаются. При этом способы подключения технических средств к биологическому объекту (БО) зависят от роли и задач, решаемых этим объектом. В то же время существуют общие принципы соединения живого с неживым – принципы, руководствуясь которыми, следует подключать технические (искусственные) устройства к биологическим объектам.

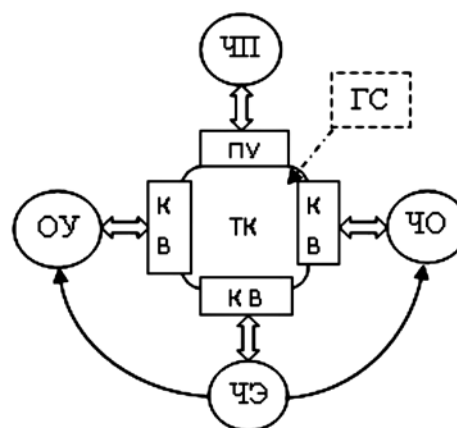


Рис. 1. Положение человека в структуре БТС

На рис. 1 показаны возможные положения биологических объектов по отношению к техническим комплексам (ТК). Конечно, главным объектом является человек, поэтому на рисунке указано несколько положений человека при взаимодействии с ТК:

- ЧП – человек-пользователь, основными его функциями является включение ТК, установка режимов и контроль работы;
- ЧЭ – человек-эксперт, анализирующий качество работы всей системы, включая не только работу ТК, но и поведение остальных участников;
- ЧО – человек-оператор, который управляет работой ТК в реальном масштабе времени, определяя программу работы, выбирая принципиальные операции, исходя из поставленных перед БТС задач;
- ГС – группа совместно работающих специалистов разных специальностей: исследователи, разработчики, конструкторы, испытатели и др.

Деятельность человека связана с его взаимодействием с внешними по отношению к БТС объектами. Так как большинство задач такого взаимодействия имеет отношение к управлению его состоянием, определим такой внешний объект как объект управления (ОУ). Объектом управления может являться человек (пациент, ученик и т. п.), биологический объект (в том числе макро- и микроорганизмы, биоматериалы), а также технические, экономические или информационные объекты.

Роль ГС особенно велика при создании ТК, так как для этого необходимо вложение их знаний и опыта по поиску и оптимизации решений, подбору материалов и комплектующих изделий, конструированию и выпуску технических средств. В связи с этим человеческий фактор присутствует в любых технических изделиях. Если ГС непосредственно не применяет на практике продукт своего труда, но создает его, то остальные варианты подключения технических комплексов к ОУ относятся к их использованию для решения конкретных практических задач.

Человек-пользователь должен соблюдать определенные правила управления, знать инструкции по эксплуатации ТК, может иметь опыт ликвидации предаварийных ситуаций и даже осуществлять обслуживание, а при необходимости проводить мелкий ремонт. Пользователь должен быть обучен приемам работы с ТК, а при разработке самого комплекса должны быть предусмотрены средства, позволяющие ЧП разобраться в органах управления ТК, выполнять командные функции, понять возникающие ситуации, чтобы вовремя предотвратить возможные аварии. Обычно минимальные требования к пользователю излагаются в инструкциях по эксплуатации ТК. Средства для подключения человека к ТК в других его ролях требуют более сложного оборудования, при разработке которого должны учитываться не только существующие технические возможности, но и свойства человека, который будет пользоваться этими средствами.

Человек-эксперт должен оценить качество не только ТК, но и БТС в целом. При этом должны учитываться такие факторы, как объем и наглядность отображения осведомительной информации, простота и доступность органов управления, затраты энергии на управляющие движения, требуемый уровень подготовки ЧО и т. п. Эксперт ставит задачи для ЧО, анализирует принятые им решения, изменяет условия работы, может изменять состав группы и т. п. для выявления достоинств и недостатков БТС. Часто такая работа поручается группе экспертов, которая выносит согласованное заключение о перспективности разработки.

Наиболее затратной по отношению к использованию ресурсов организма человека представляется работа че-

ловека-оператора, так как он несет полную ответственность за выполнение поставленной задачи и от его состояния и знаний в значительной степени зависит качество работы БТС в целом. Для оптимизации работы ЧО требуется тщательная проработка взаимосвязей человека с техникой (рис. 2).

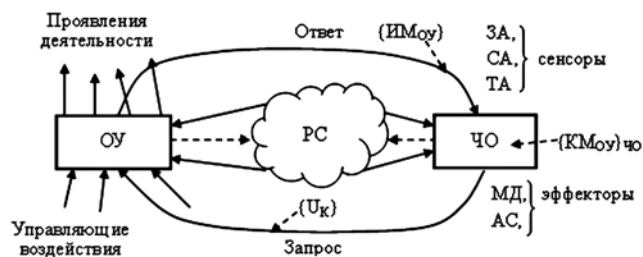


Рис. 2. Модель взаимодействия человека-оператора (ЧО) с объектом управления

Исследователь (ЧО) должен иметь связи с объектами мира (ОУ), по которым он отправляет «запрос» на интересующее свойство и получает «ответ» об этом свойстве. Запросы и ответы реализуются разными способами. Связи должны быть приспособлены к передаче вещества, энергии или информации. Для передачи информации необходим ее носитель, который может быть вещественным или энергетическим [6], [7]. Само взаимодействие осуществляется через ту часть окружающей среды (реальную среду – РС), которая находится в ближнем окружении человека и ОУ. Эта среда активна и оказывает влияние на все биологические и технические объекты, находящиеся в ней, но и эти объекты, в том числе и БТС, также изменяют параметры РС.

Объекты интереса человека в РС проявляют себя в разных физических полях [8], [9]. Человек непосредственно реагирует только на сигналы, которые воспринимаются его органами чувств. При непосредственном контакте ЧО с ОУ он может подключить все свои сенсорные и эффекторные образования, чтобы получить так называемый оперативный образ ОУ – информационную модель {ИМ_{ОУ}} (совокупность всех представлений об объекте управления), и в соответствии со своими представлениями формирует суждения о состоянии объекта – концептуальную модель {КМ_{ОУ}} ЧО, а также команды {U_к} для изменения оперативного образа, перестраивая {ИМ_{ОУ}} к оптимальному (на его взгляд) виду. Следует иметь в виду, что для разных ЧО концептуальные представления {КМ_{ОУ}} ЧО могут сильно отличаться даже для одного и того же вида {ИМ_{ОУ}} [7], [10].

Существуют естественные ограничения возможностей человека как по восприятию поступающей информации, так и по передаче команд на ОУ. Для восприятия информации о параметрах ОУ лучше других приспособлены зрительный (ЗА), слуховой (СА) и тактильный (ТА) анализаторы – сенсорные модальности. Для передачи команд от ЧО в ТК пригодны моторная деятельность (МД) и акустический сигнал (АС) – эффекторные модальности. Остальные анализаторы пока трудно приспособить для этих целей, хотя известны варианты их ограниченного использования; такая же ситуация характерна и для эффекторов человека. Подобные ограничения характерны для всех представителей биологического мира, причем их свойства настолько разнообразны [11], что подключение к ним технических систем носит весьма специфический характер.

Чтобы получать информацию о свойствах ОУ в физических полях, которые не воспринимаются сенсорными системами, и расширить возможности воздействия на ОУ, человек вынужден создавать специальные *средства познания* (СП) (рис. 3). Они включают в себя технические средства съема информации и воздействия на ТК (на рис. 3 это множество обозначено как $\{\lambda\}$). Человек должен управлять данными средствами, но для этого он может использовать эффекторные модальности в основном механического типа – моторное поле или акустический сигнал. Для восприятия информации у него есть тоже только три канала: оптический, акустический и тактильный. Подключение СП к человеку возможно только при использовании преобразователей физических форм носителя информации в одну из сенсорных или эффекторных модальностей. Таким образом, средства познания представляют собой *средства опосредованного изучения ОУ*. И хотя такие средства предоставляют новые возможности, все равно они не позволяют получить всестороннее суждение об ОУ, улучшая только его модель (МО), формируемую в сознании конкретного ЧО. Эта модель отражает объект управления (субъект познания), но с тех сторон, которые нужны в данный момент и в сильной степени зависят от подготовки и уровня знаний человека (*субъекта познания*). В БТС человек-оператор взаимодействует не с самим объектом познания, а с его моделью, которую сам и строит на основании собственных представлений (см. рис. 3).

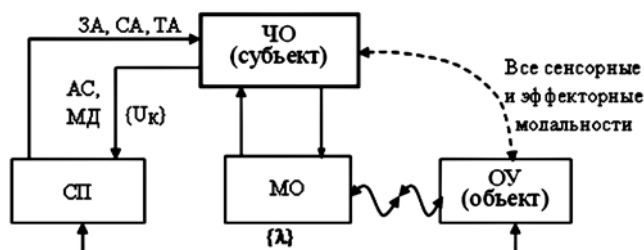


Рис. 3. Место и роль средств познания в диалоге «Исс-Оби»

Это очень важное соображение об ограниченности знаний человека и индивидуальности действий ЧО по управлению ТК. Расширение возможностей средств познания, создание новых средств, методов и технологий для изучения внешнего объекта способствуют более глубокому его изучению, но такие процессы только улучшают качество модели, оставляя за ее пределами непознанное. Из вышесказанного следует важный вывод: *все, что делает человек, создавая различные технические средства, подчинено его интересам и отражает его индивидуальные свойства как разработчика, изготовителя или пользователя.*

Следует обратить внимание еще на одну проблему, связанную с синтезом БТС, – она связана с изменениями в технологиях работы с этими системами. Под термином «**технология**» понимается сочетание *квалификационных навыков, оборудования, инфраструктуры, инструментов и технических знаний*, необходимых для осуществления желаемых преобразований в материалах, информации или людях. Сами преобразования представляют собой операции над этими объектами, выполняемые с помощью указанных инструментов, следовательно, технология тоже представляет собой систему, но **систему-процесс**. Среди известных технологий выделяется особый класс, определяемый как «**биотехнические технологии**», обеспечивающие «...разнообразные потребности живых систем,

а также включающие операции с любыми биологическими объектами с применением технических средств» [6]. Именно на этот класс технологий следует обратить внимание, потому что в технологии использования БТС необходимо включать операции, связанные с наличием в их структуре биологических объектов. В технологических схемах должны предусматриваться условия по поддержанию жизнедеятельности такого объекта.

Следует иметь в виду также, что в состав ТК вместо одного могут быть включены несколько человек. Это создает дополнительные проблемы в организации деятельности группы, и, как следствие, возникают задачи обучения всей группы совместной работе и поддержания их работоспособности [10], [11]. В качестве ОУ может быть группа таких объектов (популяция), при этом необходимо давать оценку характеристик группы в целом.

Профессор В.М. Ахутин высказал идею о наличии у БТС свойства суперадаптации, которое связано с наличием внешнего и внутреннего контуров адаптации [2], [12]. Внешний контур связан с приспособлением системы к изменяющимся внешним условиям работы ТК, а внутренний отражает взаимную адаптацию технических средств и ЧО. Оптимальная организация этих двух контуров позволяет достигать высокого качества функционирования всей системы в целом. Для учета проблемы, связанной с подключением к биологическим объектам технических средств, им был предложен метод поэтапного моделирования, позволяющий учесть многие особенности элементов при их соединении и отразить возможности материально-технического обеспечения разработки в целом [12], [13]. На сегодня разработана общая концепция этого метода, но для ее детальной отработки требуется время.

В информационно-технологическом мире большая часть функций, выполняемых человеком, связана с его участием в информационных процессах. Здесь роль человека невозможно преувеличить, так как он обладает рядом преимуществ перед техническими элементами [9], [14], [15]. При этом невозможно обойтись без создания технических средств, позволяющих подключить к человеку искусственные комплексы, которые могли бы обеспечивать выполнение двух вышеупомянутых принципов. Здесь и возникает проблема сочетания положительных качеств биологических и технических элементов при взаимной компенсации их недостатков. Поэтому необходимы специальные преобразователи, встраиваемые в КИВ₁ и КИВ₂, которыми являются устройства для:

- съема параметров и характеристик ОУ в электрические сигналы;
- непосредственного воздействия на ОУ;
- представления $\{ИМ_{ОУ}\}$ для восприятия ЧО;
- передачи команд от ЧО в ТК в соответствии с $\{КМ_{ОУ}\}_{ЧО}$.

Такие средства названы В.М. Ахутиным «логическими фильтрами-преобразователями» [2], но, на наш взгляд, их правильно было бы назвать «**каналами информационного взаимодействия**» (КИВ) [6], [7], [15] (рис. 4). Это специальные технические средства, позволяющие подключить к биологическому объекту внешние технические устройства. На рис. 4 показаны два типа каналов для ОУ и для ЧО – КИВ₁ и КИВ₂.

КИВ₁ включает в себя объект управления; для каждого его типа применяется свой блок измерительных преобразователей (БИП), с помощью которых оцениваются параметры ОУ и устройства воздействия (УВ) – око-

нечные технические устройства, через которые воздействие поступает непосредственно на ОУ. Для разных вариантов БТС состав БИП и УВ существенно различается. Особое внимание к составу этого блока уделяется, если в качестве ОУ выступает биологический объект [16]-[18].

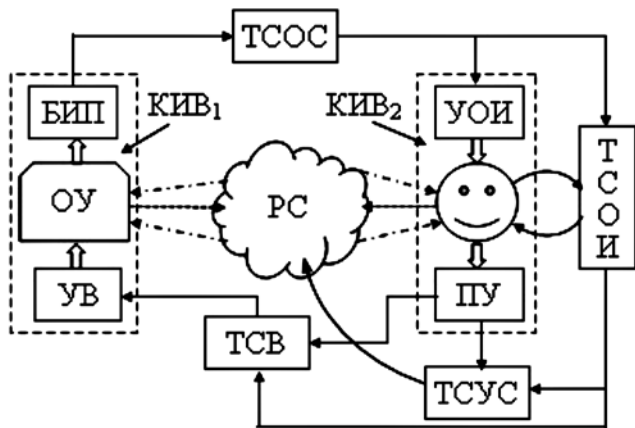


Рис. 4. Место КИВ в структуре БТС

Данные о состоянии ОУ после обработки электрических сигналов с БИП в технических средствах оценки состояния (ТСОС) поступают в технические средства обработки информации (ТСОИ) и напрямую через устройства отображения информации (УОИ) к ЧО. Поток разнородных данных, поступающих к ЧО из ТСОС, может быть настолько большим, что человек не справляется с его анализом за отведенное для этого время. Возникает проблема оптимизации таких потоков за счет:

- сокращения объемов информации (удаление ненужной в конкретный момент информации), сокращения индикаторов в поле зрения ЧО, отображения интегральных показателей и т. п.;
- оптимизации способов представления информации человеку (например, в виде двумерных картин, в которых отдельные параметры информационных моделей отражены в категориях визуального кодирования);
- оптимального подбора категорий визуального кодирования.

КИВ₂ предназначен для включения ЧО в структуру управления в качестве управляющего звена БТС. Набор технических средств, которыми должен управлять ЧО, может быть разнообразным – это зависит от назначения БТС. Поэтому пульт управления (ПУ) в общем случае представляет собой сложное техническое устройство, включающее в себя разнообразные средства передачи команд (кнопки, переключатели, штурвалы, рычаги, громкоговорители и т. п.) в исполнительные устройства – технические средства воздействия (ТСВ) на УО и управления средой (ТСУС). Эти устройства часто совмещаются с индикаторами, подтверждающими принятые решения и отображающими состояние УО.

Еще один пульт управления (не показан на рис. 4, на его местоположение указывают полукруглые стрелки от ЧО к ТСОИ) требуется для управления работой ТСОИ. Несмотря на то что данные о состоянии ОУ поступают на ТСОИ непосредственно от ТСОС, работа средств обработки должна осуществляться под контролем ЧО. Он выбирает программы обработки, часто используя интерактивный режим анализа, способы детального или интегрального представления результатов на мониторах и в зависимости от этого принимает командные решения по выбору программ обработки информации [2], [8], [13].

Каналы КИВ₁ и КИВ₂ сами по себе уже являются биотехническими устройствами, так как включают в себя дополнительные узлы технического типа и элементы подсистем организма человека – его сенсорные и эффекторные подсистемы, если ОУ тоже относится к объектам биологического типа. Характеристики этих подсистем организма человека и ОУ определяют структуру и параметры КИВ. Кроме того, следует учесть, что кроме каналов информационного взаимодействия возможны каналы вещественного и энергетического взаимодействия с внешними системами, которые нашли свое место в БТС других типов [1].

На качество ее работы влияют многие функциональные характеристики человека, такие как: восприятие информации через сенсорные системы, память, моторные движения, процессы мышления и особенности принятия решений и их качество, многие другие свойства личности человека, определяющие его работоспособность [2], [10], [19]. И здесь не обойтись без обеспечения оптимальных условий для его работы и жизнедеятельности, а, следовательно, без использования систем диагностики и управления состоянием, обучения, профориентации и профотбора, тестирования и т. п. Вот несколько задач, которые необходимо выполнить и при разработке самих КИВ:

- обеспечить восприятие информации через сенсорные системы человека, т. е. при синтезе КИВ₁ должны быть использованы знания о свойствах этих типов сенсорных систем;
- обеспечить возможность передачи решений ЧО по выбору методов и способов управления ТК, т. е. при синтезе КИВ₂ должны быть использованы знания о свойствах эффекторных систем человека;
- подготовить ЧО к выполнению всех работ: он должен обладать необходимыми навыками, техническими знаниями и соответствующими функциональными характеристиками; здесь большое значение приобретают профотбор, профориентация и подготовка человека к работе с ТК, т. е. необходимы системы обучения и тестирования;
- иметь системы контроля состояния ЧО в реальном масштабе времени и своевременного вывода его из контура управления, когда накапливается усталость и его функциональное состояние не соответствует рабочим режимам; решать проблемы организации труда – периодов работы и отдыха.

Это перечисление можно было бы продолжить, включая все новые и новые задачи, цель которых – оптимальная организация взаимодействия объектов разной природы в единую согласованную систему целенаправленного поведения.

Высказанные выше соображения позволяют выделить самостоятельный круг научных и прикладных проблем синтеза биотехнических систем, которые до настоящего времени еще не рассматривались как единая концепция взаимодействия живых систем с техническими системами во всем их разнообразии. В этот круг проблем следует включить не только технические реализации самих каналов информационного взаимодействия, но и многие задачи по изучению возможностей человека как элемента, к которому подключаются технические средства:

- методы и средства оценки функциональных возможностей человека, включая исследование зрительных функций, психологических характеристик, параметров двигательной активности и т. п.;

- методы оценки, формирования и тренировки профессиональных навыков, необходимых для управления соответствующими ТК;
- методы и средства уменьшения напряженности труда, поддержки функциональных характеристик в процессе работы;
- методы научной организации труда человека, создания условий быстрого восстановления человека после трудовых вахт;
- методы синтеза биотехнических систем и технологий различного назначения, приспособленных к различным видам внешних объектов управления с целью их диагностики и практического использования, и многие другие.

Для отражения уровня приспособленности ТК к работе с человеком целесообразно ввести некий показатель *уровня биотехничности* θ [6], определяющий степень согласования характеристик двух взаимодействующих элементов разной физической природы. Уровень θ должен быть очень высоким, чтобы учесть все факторы, которые могут влиять на качество БТС. Можно предположить, что этот показатель для разных вариантов систем различен, хотя, конечно, всегда нужно стремиться к максимальному его значению. Но это зависит от многих трудно учитываемых обстоятельств: важности задач, решаемых БТС, уровня использования человека, материально-технической базы, развития технологического и информационного обеспечения, экономических показателей и т. п. [7]. От реализации КИВ зависит качество работы ЧО и достоверность всех информационных процессов в единой биотехнической системе.

Изложенные представления о проблемах объединения в одной системе биологических и технических элементов позволяют с иных позиций рассматривать взаимодействие этих объектов. Известно несколько научных направлений, связанных с объединением биологических объектов в технические системы. Однако, на наш взгляд, они, имея большое прикладное значение, отражают лишь частные вопросы фундаментальной проблемы, о которой шла речь в данной статье. Возможности такого включения постоянно изменяются по мере развития технологических потенциалов, а это позволяет расширять возможности человека по изучению, освоению и приспособлению окружающего мира к своим потребностям. Все более важными становятся представления о свойствах биологических объектов, включаемых в биотехническую систему, и возрастают возможности техники и технологий на конкретном этапе развития человечества. Изучение и раскрытие новых возможностей биотехнических систем дает основание для формулировки нового направления исследований – **биотехтоники** [19]. Этот термин объединяет в себе два хорошо известных термина – бионика и техника и наилучшим образом отражает смысл нового направления. Предметом изучения биотехтоники становится уже упомянутая выше проблема оптимизации взаимосвязи живого с неживым с учетом характеристик и параметров взаимодействующих элементов, а результатом – синтез оптимизированных биотехнических систем целенаправленного поведения.

Высказанные выше соображения привели к введению в Перечень направлений высшего технического профессионального образования нового направления «Биотехнические системы и технологии» [20], которое объединяет несколько известных ранее направлений подготовки бакалавров и магистров. По этому направлению подго-

товлен новый стандарт ГОСЗ, в котором среди обязательных дисциплин предусматривается несколько пограничных дисциплин медико-биологического цикла, таких как «Системный анализ медико-биологических исследований», «Биофизические и биохимические основы жизнедеятельности», «Технические методы диагностических исследований и лечебных воздействий» и ряд других. Основное назначение этих дисциплин – дать техническому специалисту представление о свойствах биологического объекта как объекта изучения и управления, к которому подключаются технические устройства. На наш взгляд, определенный объем таких знаний необходим любому специалисту по любому техническому направлению образования, так как все они разрабатывают и создают технические системы и комплексы, которыми управляет человек. Такая дисциплина с условным названием «Биотехнические проблемы инженерной деятельности» может быть включена, например, как обязательная в гуманитарный или общинженерный цикл подготовки.

Список литературы:

1. Ахутин В.М. Бионические аспекты синтеза биотехнических систем / В кн.: Информационные материалы: кибернетика. 1976. № 4 (82). С. 3-26.
2. Ахутин В.М. и др. Биотехнические системы. Теория и проектирование / Под общ. ред. проф. В.М. Ахутина. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981.
3. Попечителев Е.П., Романов С.В. Анализ числовых таблиц в биотехнических системах обработки экспериментальных данных. – Л.: Изд-во «Наука», Ленингр. отд-ние, 1985.
4. Ахлаков М.К., Болсунов К.Н., Попечителев Е.П. Тестовые системы в медико-биологических исследованиях. – СПб.: СПб ГЭТУ «ЛЭТИ», 2003.
5. Попечителев Е.П. Биотехнические системы и технологии на их основе / В сб.: Биотехнические системы в медицине и биологии. – СПб: Изд-во «Политехника», 2002. С. 5-12.
6. Попечителев Е.П. Системный анализ медико-биологических исследований. – Саратов: Научная книга, 2009.
7. Падерно П.И., Попечителев Е.П. Надежность и эргономика биотехнических систем / Под общ. ред. проф. Е.П. Попечителева. – СПб.: ООО «Техномедиа», Изд-во «Элмор», 2007.
8. Попечителев Е.П. «Функциональная система» медико-биологических исследований // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2009. Т. 8. № 4. С. 806-818.
9. Попечителев Е.П. Система технических методов управления состоянием человека // Вестник Костромского государственного университета им. Н.А. Некрасова. Системный анализ. Теория и практика. 2010. Т. 16. № 2. С. 29-34.
10. Червинская К.Р., Щелкова О.Ю. Медицинская психодиагностика и инженерия знаний / Под ред. проф. Л.И. Вассермана. – СПб.: Изд-во Ювента; М.: Издательский центр «Академия», 2002.
11. Гуткин В.И., Серегин С.П., Долженков С.Д., Корневский Н.А. Общая физиология сенсорных систем. Руководство по биологии и биофизике. – Курск: ОАО «Курск», 2009.
12. Ахутин В.М. Поэтапное моделирование и синтез адаптивных биотехнических и эргатических систем / В кн.: Инженерная психология. – М., 1977. С. 149-180.
13. Попечителев Е.П. Задачи поэтапного моделирования при синтезе биотехнических систем // Известия СПбГЭТУ. 2008. Вып. 4. С. 67-73.
14. Организация взаимодействия человека с техническими средствами АСУ. В 7 т. / Под ред. В.Н. Четверикова. – М.: Высшая школа, 1990.
15. Попечителев Е.П. Человек в биотехнической системе. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2006.

16. Корневский Н.А., Попечителев Е.П., Серегин С.П. Медицинские приборы, аппараты, системы и комплексы. Учебник. – Курск: ОАО «ИПП «Курск», 2009.
17. Гусев В.Г. Получение информации о параметрах и характеристиках организма и физические методы воздействия на них. – М.: Машиностроение, 2004.
18. Попечителев Е.П. Технические методы диагностики биоматериалов. Учебное издание. – СПб.: Изд-во «Технолит», 2011.
19. Попечителев Е.П. Биотехника – наука о синтезе биотехнических систем / В кн.: Многоконцептуальность в науке. – Екатеринбург: Изд-во УМЦ-УПИ, 2011. С. 404-412.
20. Попечителев Е.П. Становление медико-технического образования в России // Медицинская техника. 2009. № 2. С. 1-8.

Евгений Парфирович Попечителев,
д-р техн. наук, профессор,
кафедра биотехнических систем,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»,
г. С.-Петербург,
e-mail: eugeny_p@mail.ru

В.А. Востриков, Б.Б. Горбунов, А.Н. Гусев, С.В. Селищев

Определение пороговой энергии монополярных дефибрилирующих импульсов с использованием модели кардиомиоцита Luo-Rudy

Аннотация

Проведено сравнение воздействия дефибрилирующих импульсов различной формы на модель кардиомиоцита Luo-Rudy в среде моделирования Cell Electrophysiology Simulation Environment (CESE). Установлено, что полусинусоидальный импульс обладает минимальной пороговой энергией возбуждения клетки, а экспоненциальный спадающий – максимальной (на 22 % больше, чем у полусинусоидального). Пороговая энергия трапецеидального импульса с пологими фронтами и срезом (форма первой фазы биполярного импульса автоматических наружных дефибрилляторов «imPulse АНД-П» при дозах энергии 150 и 180 Дж) лишь незначительно, на 4 %, превышает пороговую энергию полусинусоидального импульса. Пороговые энергии трапецеидальных импульсов, широко используемых в современных дефибрилляторах, в зависимости от величины спада вершины превышают пороговую энергию полусинусоидального импульса на 10...14 %. Результаты, полученные на модели Luo-Rudy, существенно отличаются от результатов, ранее полученных методом характеристической энергии на модели Блэра.

Наиболее простой физической моделью для исследования воздействия дефибрилирующих импульсов на кардиомиоцит является RC-модель мембраны кардиомиоцита (модели Блэра) [1]. С помощью этой модели было исследовано воздействие различных форм монополярных дефибрилирующих импульсов на кардиомиоцит [2]. Однако модель мембраны кардиомиоцита со статической постоянной времени τ_m , не зависящей от значения трансмембранного потенциала, является достаточно грубым упрощением реакции объекта моделирования на внешнее воздействие [3]. Это побудило сравнить воздействие дефибрилирующих импульсов на модель Luo-Rudy, отражающую электрофизиологию кардиомиоцита желудочков млекопитающих, с воздействием на физическую модель Блэра [4].

Материалы и методы

Для моделирования была использована свободно расширяемая среда моделирования Cell Electrophysiology Simulation Environment (CESE) OSS 1.4.7 [5], в состав программного обеспечения которой входит базовая модель кардиомиоцита морской свинки Luo-Rudy Mammalian Ventricular Model II (dynamic), 1994-2000, которая использовалась в исследовании. Воздействие дефибрилирующих импульсов на модель Luo-Rudy осуществлялось путем клэмпирования параметра *st* (stimulus amplitude) модели – плотности тока, выраженной в микроамперах на квадратный сантиметр. Для клэмпирования использовали текстовый файл записи (record) с расширением .rec. В этом файле указывается клэмпируемый параметр модели и задаются значения переменных для сигнала, воздействующего вместо клэмпируемого параметра, а также дается ссылка на тексто-

вый файл описания этого сигнала (signal), имеющего расширение .xml. Описание сигнала состоит из сегментов. Для описания формы полусинусоидального импульса был использован сегмент синусоидального сигнала sine, остальные формы дефибрилирующих импульсов были составлены из сегментов трапецеидального сигнала ramp. В данном исследовании сравнивали импульсы, представленные в работе [2], за исключением параболических 2-го и 3-го порядков, и импульс трапецеидальной формы с пологим фронтом и срезом, являющимся формой первой фазы биполярного импульса, используемого в автоматических наружных дефибрилляторах

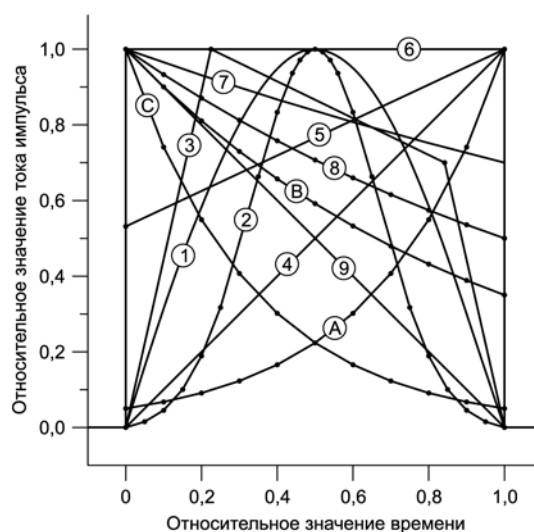


Рис. 1. Нормализованные модели дефибрилирующих импульсов, использованные в эксперименте (черные точки отмечают места излома кусочно-линейных функций)