

Заключение

Разработана модель ФП в виде клеточного автомата на триангулированной сфере, представляющей собой неориентированный взвешенный граф. Представлены результаты моделирования ФП по изучению механизмов образования и устойчивости распространения волн возбуждения роторного типа с учетом гетерогенности скорости распространения возбуждения и рефрактерности миокарда для зон разного размера.

Для существования устойчивой вихревой структуры возбуждения в миокарде достаточно площади 14 мм^2 при уменьшении рефрактерности до 100 мс и снижении скорости проведения возбуждения до 0,1 м/с, за пределы этого участка в здоровом миокарде возбуждение от ротора распространяется так же, как от фокусного источника.

Разработана электродная система высокой плотности на основе гибко-жестких печатных плат для эпикардимального картирования, предназначенная для выполнения экспериментальных и клинических исследований по локализации источников ФП.

Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ № 13-08-01343, 13-08-98130 p_сибирь_a.

Список литературы:

1. Ashihara T., Haraguchi R., Nakazawa K. et al. The Role of Fibroblasts in Complex Fractionated Electrograms During Persistent/Permanent Atrial Fibrillation // *Circulation Research*. 2012. Vol. 110. PP. 275-284.
2. Haley C.L., Gula L.J., Miranda R. et al. Validation of a novel algorithm for quantification of the percentage of signal fractionation in atrial fibrillation // *Europace*. 2013. Vol. 15 (3). PP. 447-452.
3. Moe G.K., Rheinboldt W.C., Abildskov J.A. A computer model of atrial fibrillation // *Am. Heart J.* 1964. Vol. 67. № 2. PP. 200-220.
4. Андреев С.Ю., Кочегуров В.А. Интраоперационное моделирование возбуждения миокарда предсердий // *Сибирский журнал индустриальной математики*. 2005. Т. 8. № 2 (22). С. 3-11.

5. Narayan S.M., Krummen D.E., Shivkumar K. et al. Treatment of Atrial Fibrillation by the Ablation of Localized Sources CONFIRM (Conventional Ablation for Atrial Fibrillation with or without Focal Impulse and Rotor Odulation) Trial // *Journal of the American College of Cardiology*. 2012. Vol. 60. № 7. PP. 628-636.
6. Евсеев А.А., Нечаева О.И. Клеточно-автоматное моделирование диффузионных процессов на триангуляционных сетках // *Прикладная дискретная математика*. 2009. № 4 (6). С. 72-83.
7. Ардашев А.В. Клиническая аритмология. – М.: Медпрактика, 2009.
8. Халифе Ж., Беренфелд О. «Частотное» картирование при фибрилляции предсердий: трансформация знаний от фундаментальных исследований к клинической практике // *Вестник аритмологии*. 2006. № 45. С. 75-85.
9. Оферкин А.И., Федотов Н.М., Жарый С.В. Верифицированная топическая диагностика источников фибрилляции предсердий / Сб. тез. XI Международного конгресса «Кардиостим». – СПб.: Человек, 2014. С. 150.

Николай Михайлович Федотов,
канд. техн. наук, зав. лабораторией
безопасных биомедицинских технологий,
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники,
Александр Иванович Оферкин,
канд. мед. наук, ст. научный сотрудник,
руководитель отделения
сердечно-сосудистой хирургии,
Сибирский государственный
медицинский университет,
Сергей Викторович Жарый,
канд. техн. наук, научный сотрудник,
лаборатория безопасных
биомедицинских технологий,
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники,
г. Томск,
e-mail: n.m.fedotov@gmail.com

А.Ф. Бобрихин, А.Г. Гудков, В.Ю. Леушин, В.Н. Лемонджав, В.И. Петров, С.И. Щукин

Оборудование для тепловой обработки и хранения компонентов и препаратов крови

Аннотация

Представлена методика технологической оптимизации электронных устройств для тепловой обработки и хранения компонентов и препаратов крови. Приведены результаты разработки ряда изделий электронной медицинской техники, предназначенных для переоснащения станций и отделений переливания крови.

К компонентам крови относятся плазма, эритроцитная масса и концентрат тромбоцитов. Для повышения качества процесса размораживания криоконсервированной плазмы крови и эритроцитной массы необходимо выполнить заданный температурный режим, обеспечивающий быстрое достижение положительной температуры компонентов крови без их перегрева. В соответствии с рекомендациями ВОЗ о приготовлении, использовании и обеспечении качества компонентов крови, концентрат тромбоцитов должен храниться в специальных газопроницаемых полимерных контейнерах при температуре $+22 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (точность поддержания температуры $\pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$) и постоянном встряхивании в процессе хранения. Срок хранения тромбоцитов в таких системах составляет 5...7 дней, при отсутствии термостатирования срок хранения – 1 сутки. Регулирование температуры в камере термостатирования осуществляется с помощью электронного терморегулятора [1]-[4].

Основным показателем качества прецизионных тепловых устройств медицинской техники, предназначенных для регулируемого температурного воздействия на компоненты крови, которые можно рассматривать как биологические объекты (БО), является точность поддержания заданной температуры препарата в течение определенного времени.

При технической реализации установок, выполняющих процедуру термообработки, несмотря на различные конструктивные варианты их построения используют единый принцип. Обрабатываемый объект помещается в изолированный от внешних воздействий объем, который нагревается или температура которого поддерживается постоянной. Технические средства, реализующие этот принцип, вносят ряд погрешностей, которые необходимо учитывать для достижения заданной точности процесса термообработки. Такими погрешностями являются: колебания температуры окружающей среды; разброс

количества термообрабатываемых БО; разброс напряжения питания тепловыделяющих элементов; разброс мощности тепловыделяющих элементов; разброс параметров датчика температуры; технологический разброс геометрических и физических параметров других конструктивных элементов, влияющих на процессы теплообмена в приборе.

Для того чтобы не допустить брака в процессе термообработки, необходимо, чтобы стохастическая временная зависимость температуры БО на протяжении всего времени термообработки криоконсерванта (КК) не выходила за пределы поля допуска (рис. 1). Формализуя задачу, можно записать:

$$T_{\min}(t) \leq T(t) \leq T_{\max}(t), \text{ где } t^1 \leq t \leq t^2. \quad (1)$$

Здесь $t^1 - t^2$ – отрезок времени термообработки БО; $T_{\min}(t)$, $T_{\max}(t)$ – нижняя и верхняя границы допустимого отклонения БО от номинальной; $T(t)$ – случайный процесс (СП) изменения температуры БО во времени.

Рассмотрим сечения СП $T(t)$ в дискретные моменты времени. В каждый момент времени t^i получим одномерную плотность распределения $f(T^i)$. Для сложных технических систем, потребительские параметры которых связаны сложными функциональными и корреляционными зависимостями с параметрами конструкции и внешними воздействиями, статистические распределения потребительских параметров отличаются от гауссового и обладают существенной асимметрией. Обозначим через α уровень значимости, который ограничивает неограниченное в общем случае распределение $f(T^i)$ значениями $T^{+\alpha/2}(t^i)$ и $T^{-\alpha/2}(t^i)$ таким образом, что

$$\int_{-\infty}^{T^{-\alpha/2}(t^i)} f(T^i) dT^i = \int_{T^{+\alpha/2}(t^i)}^{+\infty} f(T^i) dT^i = \alpha/2. \quad (2)$$

Будем считать ход СП $T(t)$ оптимальным, если за время термообработки величина

$$\begin{cases} \left| T^{+\alpha/2}(t^i) - T_{\max}(t^i) \right| \\ \text{или} \\ \left| T^{-\alpha/2}(t^i) - T_{\min}(t^i) \right| \end{cases} \quad \forall t \in [t^1 - t^2] \quad (3)$$

максимальна.

Поскольку статистические распределения $f(T^i)$ связаны с математическим ожиданием $m_T(t)$ СП $T(t)$, задача максимизации расстояния между граничными точками распределений $f(T^i)$ и температурными ограничениями эквивалентна нахождению нового математического ожидания СП $m_T^{opt}(t)$.

Физически приведение математического ожидания СП $T(t)$ в положение, при котором $m_T(t) = m_T^{opt}(t)$, выполняется регулятором, который настраивается на соответствующую оптимальную температуру процесса $T^{opt}(t)$. Функция $m_T(t)$ относительно исходной номинальной температуры $T_{ном}(t)$ колеблется; таким образом, переход от $m_T(t)$ к $m_T^{opt}(t)$ эквивалентен переходу от $T_{ном}(t)$ к $T^{opt}(t) = T_{ном}(t) + \Delta T$, где $\Delta T = \text{const}$.

Формально задача оптимального проектирования прецизионных тепловых медицинских устройств ставится следующим образом: необходимо определить такую номинальную $T_{ном}(t)$ температуру БО, при расчете которой в партии приборов обеспечивается

$$\max \min \begin{cases} \left| T^{+\alpha/2}(t^i) - T_{\max}(t^i) \right| \\ \text{или} \\ \left| T^{-\alpha/2}(t^i) - T_{\min}(t^i) \right| \end{cases} \quad \forall t \in [t^1 - t^2] \quad (4)$$

при ограничениях на параметры назначения.

Сделаем важное замечание: если $T_{ном}(t)$ равно отстоит от границ поля допуска, максимальные отклонения $m_T(t)$ относительно $T_{ном}(t)$ вниз и вверх одинаковы и распределения $f(T^i)$ во всех сечениях симметричны относительно своих математических ожиданий при выполнении условия (1), то СП удовлетворяет предложенному критерию оптимальности и дополнительная оптимизация не требуется. Подобный подход позволяет повысить «запас работоспособности», или, фактически, эксплуатационную точность прибора. С другой стороны, благодаря оптимальному ходу СП термообработки осуществляется фактическое сужение пределов допустимых отклонений $T_{\min}(t)$, $T_{\max}(t)$, что ведет к повышению качества обработки БО. Оптимизации по стохастическому критерию подвергается случайная функция. Это требует применения методов статического анализа и синтеза, особенности которых обусловлены спецификой поставленной задачи [1]. Новизна и сложность задачи синтеза параметров устройств заключается в том, что в результате ее решения определяется оптимальное положение случай-

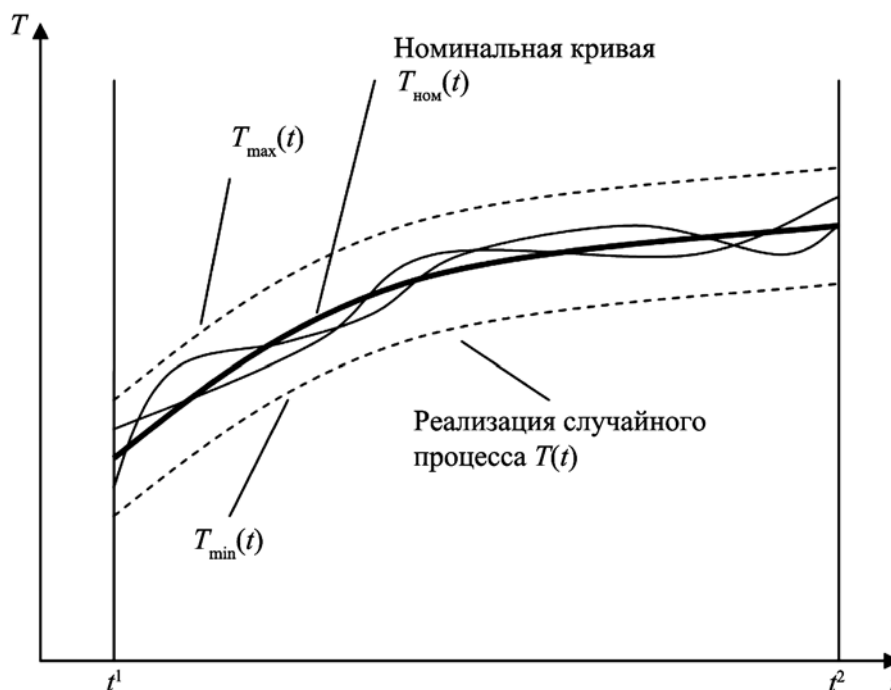


Рис. 1. Случайный процесс изменения температуры КК во времени

ной функции относительно границ, заданных детерминированной функцией. Современные программные средства, входящие в состав графических систем, позволяют выполнить так называемую операцию центрирования, т. е. расположить исследуемое тело так, чтобы зазоры между его крайними точками и заданными границами были одинаковы. Величина сдвига Δ случайного процесса в результате центрирования даст опти-

мизирующую поправку на номинальную температуру процесса.

Задача максимизации вероятности нахождения случайного процесса в пределах ограничений сложнее и требует разработки оригинального метода. Используя концепцию представления случайного процесса моментными распределениями, проведем его дискретизацию. При работе с тепловыми прибо-

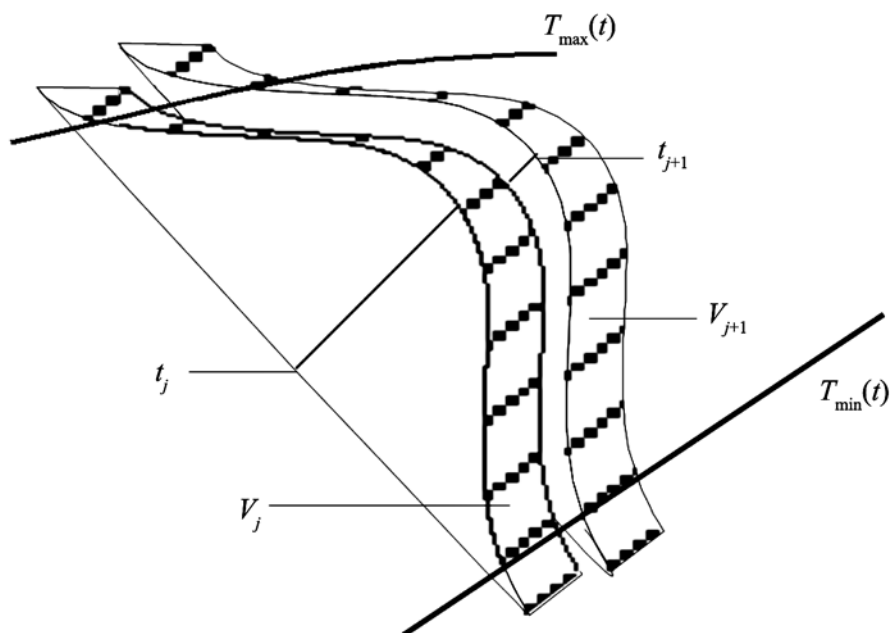


Рис. 2. Дискретизация случайного процесса $T(t)$. Показаны две временные точки



а)



б)

Рис. 3. Устройства для размораживания и хранения компонентов крови: а) «Плазмотерм-4»; б) инкубатор тромбоцитов

рами нет оснований полагать, что случайный процесс $T(t)$ является стационарным. Это означает, что в соседних временных точках меняются как дисперсия, так и форма распределения температуры. После дискретизации форма случайного процесса $T(t)$ будет выглядеть, как показано на рис. 2.

Таким образом, вводится допущение, что между соседними точками наблюдения форма и дисперсия распределения температуры постоянны. Тогда задача определения вероятности попадания случайного процесса в заданные границы сведется к нахождению объема V_j тела заданной формы в границах $[T_{\min}(t_j); T_{\max}(t_j)]$. Ограничения $T_{\min}(t)$ и $T_{\max}(t)$ в пределах между соседними точками наблюдения полагаются кусочно-постоянными.

Тогда вероятность нахождения случайного процесса в рамках ограничений выразится формулой

$$P = \frac{\sum_{j=1}^n V_j}{\sum_{j=1}^n V_{\text{общ}}}, \quad (5)$$

где V_j – объемы элементарных тел в пределах ограничений; $V_{\text{общ}}$ – общие объемы элементарных тел.

Процедура оптимизации сведется к нахождению такого положения объемного тела под функцией распределения, при котором объем в пределах ограничений максимален. Для решения этой задачи подходят любые методы одномерного поиска нулевого порядка.

На рис. 3а представлено устройство размораживания криоконсервированных продуктов крови «Плазмотерм-4», разработанное с использованием предложенного метода. На рис. 3б показан внешний вид экспериментального образца устройства для хранения концентрата тромбоцитов, обеспечивающего требования ВОЗ к режиму хранения этого важного и дорогостоящего компонента крови [5].

Результаты внедрения ряда электронных устройств для тепловой обработки и хранения компонентов и препаратов крови в медицинские учреждения РФ подтверждают высокую эффективность рассмотренной выше методики технологической оптимизации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного контракта (соглашения) № 14.577.21.0138, уникальный идентификатор прикладных научных исследований и экспериментальных разработок (проекта) RFMEFI57714XO138.

Список литературы:

1. Гудков А.Г., Лазаренко М.И., Леушин В.Ю., Четкин А.В. Технологии трансфузиологии. Монография. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2012. 272 с.
2. Городецкий В.М., Гудков А.Г., Нарайкин О.С., Попов В.В., Щукин С.И. Модернизация службы крови страны – важнейшая задача отечественного медицинского приборостроения // Биомедицинская радиоэлектроника. 2013. № 3. С. 3-9.
3. Гудков А.Г., Леушин В.Ю., Бобрихин А.Ф., Данилова А.В., Каюмова Л.И., Поздин С.В., Четкин А.В. Комплекс оборудования для фильтрации гемотрансфузионных сред // Биомедицинская радиоэлектроника. 2011. № 3. С. 60-64.
4. Гудков А.Г. Радиоаппаратура в условиях рынка. Комплексная технологическая оптимизация. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2008. 336 с.
5. Гудков А.Г., Леушин В.Ю., Поздин С.В., Бобрихин А.Ф. Термостатируемое устройство для хранения тромбоцитосодержащих сред // Медицинская техника. 2012. № 3 (273). С. 18-20.

Александр Федорович Бобрихин,
начальник отдела,
ООО «НПИ ФИРМА «ГИПЕРИОН»,
Александр Григорьевич Гудков,
д-р техн. наук, профессор,
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Виталий Юрьевич Леушин,
канд. техн. наук, технический директор,
Вахтанг Нодарович Лемонджава,
начальник отдела,
ООО «НПИ ФИРМА «ГИПЕРИОН»,
Владимир Игоревич Петров,
зам. директора,
НИИ БМТ МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Сергей Игоревич Щукин,
д-р техн. наук, профессор,
зав. кафедрой «Медико-технические
информационные технологии» (БМТ-2),
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
г. Москва,
e-mail: ooo.giperion@gmail.com

**ВНИМАНИЮ ПОДПИСЧИКОВ,
РУКОВОДИТЕЛЕЙ СЛУЖБ ИНФОРМАЦИИ И БИБЛИОТЕК!**

**ПРЕДЛАГАЕМ ПОДПИСАТЬСЯ НА ЖУРНАЛ
«МЕДИЦИНСКАЯ ТЕХНИКА»**

НА 2015 ГОД.

Индекс по каталогу «Роспечать» – 72940.

В редакции можно оформить и оплатить льготную подписку с любого месяца.

**Стоимость подписки : 950 руб. – за один номер,
2850 руб. – на первое полугодие 2015 года (3 номера), 5700 руб. – на 2015 год (6 номеров).**

Наши тел.: (495) 695-10-70, 695-10-71.