

С. М. Геращенко, Н. О. Голотенков

КОМБИНИРОВАННЫЙ ДЖОУЛЬМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД НА БАЗЕ РОБАСТНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ

Приводится описание джоульметрического метода контроля биологических объектов. Рассматриваются способы задания входных воздействий, применяемые при реализации метода. С целью увеличения информативных признаков и повышения воспроизводимости результатов предлагается использовать джоульметрический комбинированный ступенчатый метод задания входных воздействий с применением робастных регуляторов. Также приводятся результаты исследований тканей почки на предмет обнаружения границ резекции с применением предложенного метода.

В различных областях медицины оценка состояния биологических тканей и жидкостей является очень важной задачей. Часто приходится сталкиваться с проблемами диагностики на ранних стадиях заболеваний с целью выбора рациональной тактики лечения.

В настоящее время существует множество методов, позволяющих оценивать состояние биологических объектов (рентгенологические, радионуклидные, ультразвуковые, компьютерная томография, ядерно-магнитно-резонансная томография и др.), но возможности их ограничены из-за оказания на организм человека лучевой нагрузки, больших размеров применяемой аппаратуры, высокой стоимости, низкой чувствительности и низкой информативности, длительности реализации исследований.

В этой связи одной из основных задач, стоящих перед разработчиками медицинской аппаратуры, является создание оперативных и информативных методов контроля состояния биологических объектов. Для решения поставленной задачи стали применять электрохимические методы анализа. К достоинствам данных методов относятся простота реализации метода, низкая стоимость аппаратуры, оперативность использования и безопасность для здоровья человека.

В последнее время для оценки состояния биологических объектов применяют джоульметрический метод, обладающий высокой чувствительностью и позволяющий получить достаточное количество информативных признаков при малых временных затратах.

В основу джоульметрического метода контроля состояния биологических объектов положено соответствие между работой, совершаемой внешним источником электрической энергии, и изменением состояния исследуемого объекта [1]. Если в качестве внешнего воздействия использовать ток $I(t)$, а в качестве параметра, характеризующего состояние объекта, изменение межэлектродного напряжения $U(t)$ во времени, то затраченную работу $A(t)$ на временном интервале от t_0 до t можно определить на основании следующей зависимости:

$$A(t) = \int_{t_0}^t I(t)U(t)dt .$$

При этом наличие значений входного воздействия и отклика в виде набора выходных переменных позволяет определять передаточную функцию

исследуемой системы и идентифицировать параметры элементов принятых эквивалентных схем замещения.

Джоульметрический метод предполагает различные варианты его реализации. В основном они зависят от способа входных воздействий и обработки сигналов при получении выходных параметров.

Расширение возможностей применения джоульметрии в системах распознавания образов связано с увеличением количества формируемых информативных признаков. Один из вариантов решения этой проблемы связан с декомпозицией обобщенного значения работы на отдельные составляющие и использованием их в качестве самостоятельных признаков (рис. 1).

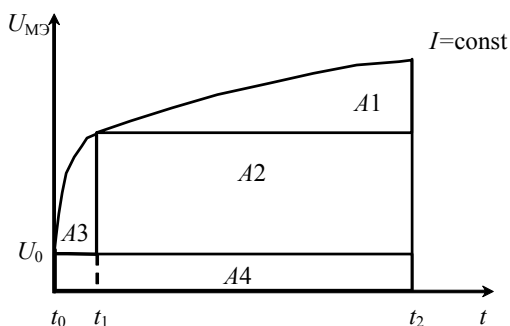


Рис. 1 Графическая интерпретация джоульметрического декомпозиционного метода

Если принять значение t_1 за момент окончания процесса заряда двойного электрического слоя, значение t_2 за момент окончания процесса электрохимических реакций и значение U_0 за падение напряжения на электрохимической ячейке в момент коммутации тока, то согласно рис. 1 общая работа, совершенная током I , складывается из следующих компонент:

- $A1$ — характеризует активность электрохимических реакций;
- $A2$ — характеризует сопротивление электрохимической реакции;
- $A3$ — характеризует емкость двойного электрического слоя;
- $A4$ — характеризует межэлектродное сопротивление.

В электродных реакциях носитель заряда (ион или электрон) переходит через ионный двойной слой из одной фазы в другую. На его переход затрачивается определенная энергия. При этом он преодолевает потенциальный барьер. В свою очередь потенциальный барьер зависит от разности потенциалов, возникающей между электродом и электролитом при пропускании через них тока. При одновременном протекании нескольких электродных реакций устанавливается некоторый смешанный потенциальный барьер, отличающийся от барьера каждой реакции в отдельности [2]. Очевидно, что наибольшей вероятностью вступления в реакции будут обладать частицы, потенциальный барьер которых не превышает значений потенциального барьера, формируемого при заданном значении тока. Такое поведение частиц создает основу для управления электрохимическими реакциями по потенциальному барьеру.

С помощью джоульметрического декомпозиционного метода со ступенчатой формой тока можно получить необходимое количество признаков для описания состояния биологических объектов. На основе проведенных исследований установлены четыре значения амплитуды тока, дающие наиболее значимые результаты: 8, 22, 47 и 104 мкА [3].

Для дальнейшего повышения информативности метода целесообразно увеличить количество энергетических уровней в диапазоне входных токов от 8 до 104 мкА. Это позволит получить более точную картину количества и распределения ионов в живой клетке и межклеточной жидкости по потенциальному барьеру. Но при увеличении количества энергетических уровней больше восьми значительной величины достигает соотношение сигнал/шум на нижних уровнях. Также из-за уменьшения величины потенциальных барьеров между соседними уровнями при таком способе задания входных воздействий из-за существенного изменения межэлектродного напряжения $U_{МЭ}$ на участке от t_1 до t_2 (рис. 1) границы соседних барьеров сливаются, в результате становится невозможным оценить количество ионов на текущем уровне.

Для устранения этого недостатка предлагается использовать джоульметрический комбинированный ступенчатый декомпозиционный метод (рис. 2), который позволяет получать от 4 до 16 энергетических уровней.

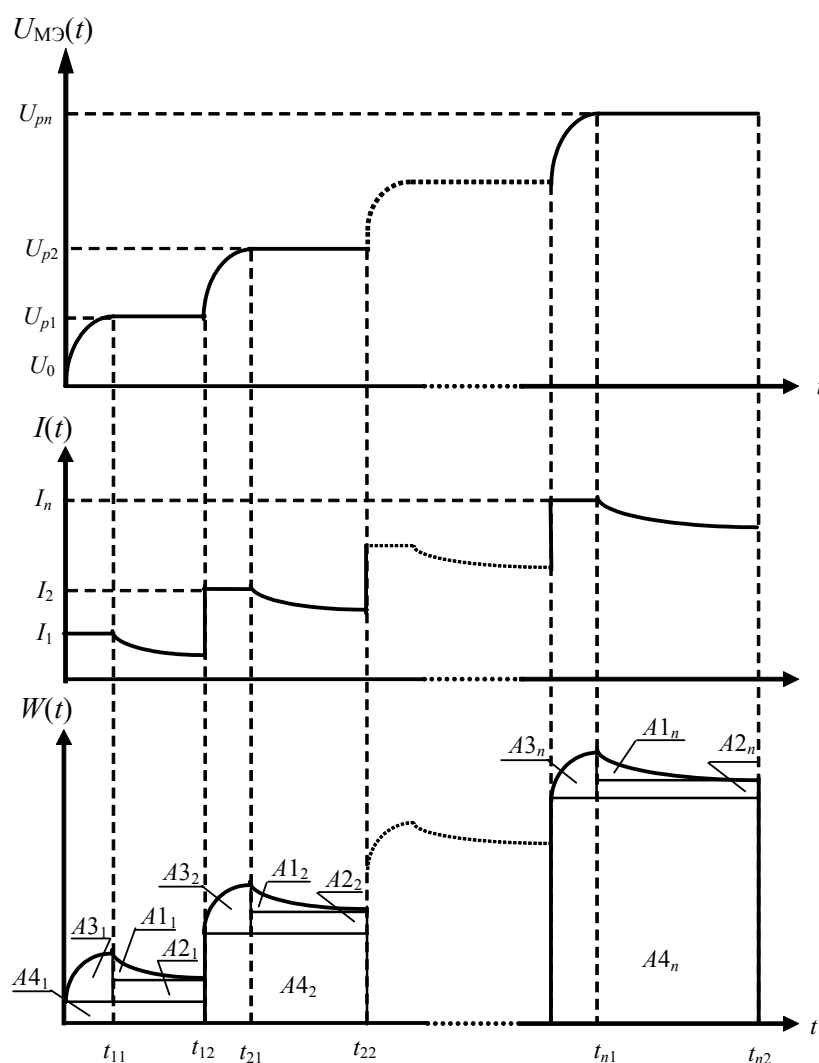


Рис. 2 Графики входных и выходных сигналов, поясняющие джоульметрический комбинированный декомпозиционный метод

Суть его заключается в следующем. Регулированием амплитуды рабочего тока достигается стабилизация временного интервала заряда двойного электрического слоя и последующее поддержание межэлектродного напряжения на заданном уровне. Значения напряжений $U_{p1} \dots U_{pn}$ задаются регулятором и для исследуемых объектов остаются неизменными. Свойства объекта проявляются в изменении значений тока $I(t)$ на участках $t_{11} \dots t_{12}, t_{21} \dots t_{22}, \dots, t_{n1} \dots t_{n2}$, обеспечивающем требуемую зависимость изменения межэлектродного напряжения $U_{МЭ}(t)$.

В начальный момент времени на датчик коммутируется ток I_1 , а затем оцениваются значения работ, затрачиваемых на заряд двойного слоя, после заряда двойного слоя $U_{МЭ}$ стабилизируется за счет изменения I_1 , тем самым исключая вступление в электрохимическую реакцию ионов более высоких потенциальных уровней. Затем процесс повторяется для следующего уровня и т.д. Из рис. 2 следует, что для любой исследуемой системы процесс заряда двойного электрического слоя и процесс протекания электрохимических реакций характеризуются определенным положением точек $t_{11}, t_{21}, \dots, t_{n1}$ и стабилизированными значениями $U_{МЭ}(t)$ на участках $t_{11} \dots t_{12}, t_{21} \dots t_{22}, \dots, t_{n1} \dots t_{n2}$.

Для реализации предложенного метода разработано устройство, структурная схема которого представлена на рис. 3.

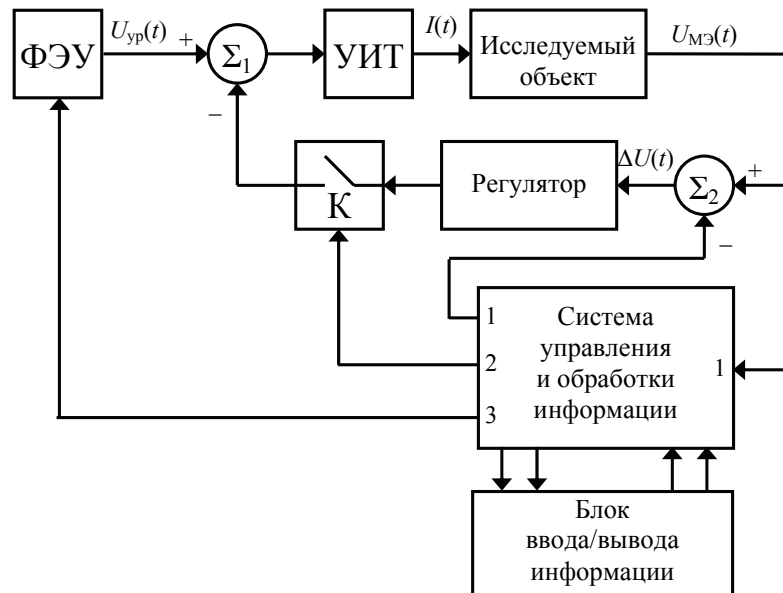


Рис. 3 Структурная схема устройства, реализующего джоульметрический комбинированный ступенчатый декомпозиционный метод

Принцип работы устройства заключается в следующем. С помощью блока ввода/вывода информации задаются нижний и верхний диапазон токов, в котором будет производиться исследование биологического объекта и количество энергетических уровней на данном диапазоне. Система управления и обработки информации (СУОИ) на выходе 3 выдает команду формирователю энергетических импульсов (ФЭУ) на выработку управляющего напряжения, соответствующего первому энергетическому уровню. Программный ключ в этот момент разомкнут, и поэтому через сумматор Σ_1 на вход управ-

ляемого источника тока (УИТ) подается все напряжение, вырабатываемое ФЭУ, в результате чего УИТ формирует на своем выходе значение тока, соответствующее первому энергетическому уровню. Напряжение $U_{мэ}(t)$, снимаемое в этот момент с исследуемого объекта, подается одновременно на сумматор Σ_2 и вход 1 СУОИ. В задачу СУОИ также входит определение момента окончания заряда двойного электрического слоя каждого уровня, характеризующегося появлением линейного участка напряжения $U_{мэ}(t)$. В тот интервал времени, когда линейный участок не определен, сигнал на выходе 1 СУОИ равен сигналу на входе 1 СУОИ, поэтому напряжение $\Delta U(t)$ на выходе сумматора Σ_2 равно 0. В момент, когда СУОИ обнаружит линейный участок, СУОИ фиксирует значение напряжения $U_{мэ}(t)$ на своем выходе 1 и будет удерживать его до прихода следующей ступени. Также в этот момент времени СУОИ сигналом с выхода 2 замкнет программный ключ, в результате чего регулятор включится в цепь обратной связи. Теперь на выходе сумматора Σ_2 появится разностный сигнал между текущим и фиксированным значениями напряжения. Задачей регулятора в этом случае является минимизация этого разностного сигнала, в результате чего стабилизируется напряжение $U_{мэ}(t)$. Стабилизация напряжения будет осуществляться до начала следующей ступени. В этот момент программный ключ разомкнется, а с выхода 1 СУОИ на вход сумматора Σ_2 снова будет поступать прямое напряжение $U_{мэ}(t)$.

Стабилизация межэлектродного потенциала позволила существенно увеличить количество энергетических уровней тока, используемых при исследованиях.

Для построения регулятора, стабилизирующего значение межэлектродного потенциала, необходимо создать математическую модель биологического объекта. Биологические объекты являются нестационарными системами и характеризуются ответной реакцией на внешнее воздействие, что приводит к определенной зависимости параметров, описывающих их состояние, от времени и влиянию предыдущих стадий эксперимента на последующие.

Моделирование биологических объектов осуществляется методами функциональной и структурной идентификации.

Функциональная идентификация позволяет определить поведение системы при наличии на ее входе стимулов. Для решения этой задачи необходимо наличие экспериментальных данных о поведении системы при различных входных воздействиях. Функциональная идентификация предусматривает определение передаточной функции системы, не давая информации относительно ее внутреннего строения.

Структурная идентификация дает возможность установления взаимодействия отдельных компонент системы в процессе формирования реакций. В этом случае полагается известной конфигурация системы или относительно ее делается предположение о классе функционального описания, а параметры, связывающие систему, считаются неизвестными. Задача идентификации сводится к поиску решений в пространстве искомых параметров системы.

Идентификация биологических звеньев позволяет определить передаточные функции, приводящие к дифференциальным уравнениям высокого порядка. Чаще всего сложная динамика процессов, происходящих в биологических системах, связана с одновременным функционированием некоторого числа биорегуляторов, обладающих различным быстродействием и степенями свободы. В таком случае для моделирования целесообразно воспользо-

ваться методом пространства состояний, позволяющим представить линейное дифференциальное уравнение высокого порядка, описывающее систему в соответствии с полученной путем функциональной идентификации передаточной функции, в виде системы уравнений первого порядка относительно некоторых вводимых переменных состояния:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu, \\ y = Cx + Du, \end{cases}$$

где x – вектор состояния; y – вектор выходных переменных; u – вектор входных воздействий; A, B, C, D – матрицы коэффициентов.

Идентификация системы в пространстве состояний позволяет представить модель биосистемы в виде функций определенных переменных состояния, имеющих, с одной стороны, формальное математическое выражение, а с другой, обладающих определенным биофизическим смыслом. Это связано с тем, что переменная состояния описывает процесс, моделируемый дифференциальным уравнением первого порядка, отражающим, как известно, большинство закономерностей элементарных биологических процессов.

При разработке регулятора учитывались особенности биологических объектов, связанные с их нестационарностью, высоким уровнем шумов в обрабатываемых сигналах и нелинейными свойствами. Сказанное существенным образом отражается на степени неопределенности исследуемой системы, выступающей в роли регулируемого объекта. В этих условиях задача проектирования регулятора заключается в синтезе закона регулировки, который сохраняет отклик системы и сигналы рассогласования в пределах допусков, несмотря на неопределенности исследуемой системы.

В этой связи решение задачи сформулировано в классе синтеза робастных систем управления многомерными объектами в условиях параметрической неопределенности [5].

Задача синтеза H^2 -оптимального регулятора состоит в нахождении того из допустимых регуляторов K_2 , который минимизирует H^2 -норму передаточной функции замкнутой системы $\|T_{zw}\|_2$. Минимум этой H^2 -нормы эквивалентен минимуму функционала качества $J(K)$ для линейной квадратичной гауссовской проблемы в установившемся режиме [4].

Блок-схема алгоритма синтеза H^2 -оптимального регулятора приведена на рис. 4.

В результате работы алгоритма были синтезированы H^2 -регуляторы, стабилизирующие значение смещенного потенциала для объектов «почка» и «желудок». Полученные матрицы H^2 -регулятора для модели тканей почки приведены ниже:

$$A = \begin{bmatrix} -0,8686 & 0,2129 & 0,3214 \\ 0,4953 & -1,6783 & -0,1785 \\ 0,4802 & -0,7524 & -4,0831 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -0,2548 & -0,7234 \\ -0,6432 & 0,9397 \\ 0,2786 & -0,4857 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 0,2857 & -0,7925 & 0,1792 \\ 0,6153 & -0,3761 & -0,1672 \end{bmatrix}, D = [0].$$

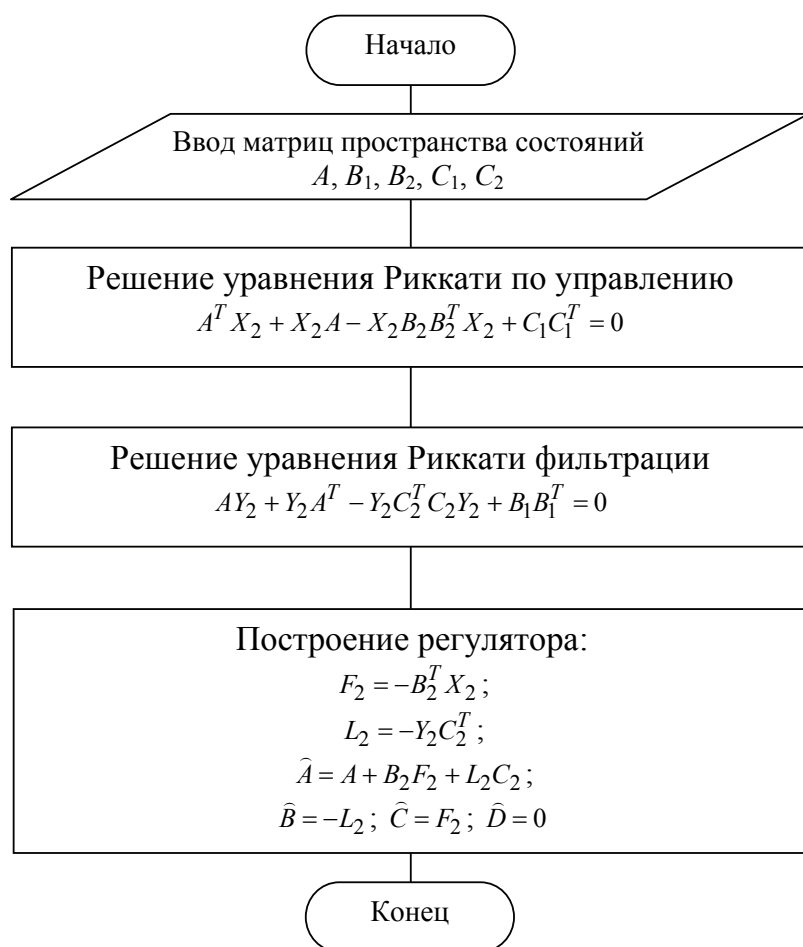


Рис. 4 Блок-схема алгоритма синтеза H^2 -оптимального регулятора

На рис. 5 показаны графики входных и выходных зависимостей тока и напряжения работы джоульметрической системы в комбинированном режиме с использованием робастной регулировки для восьми энергетических уровней.

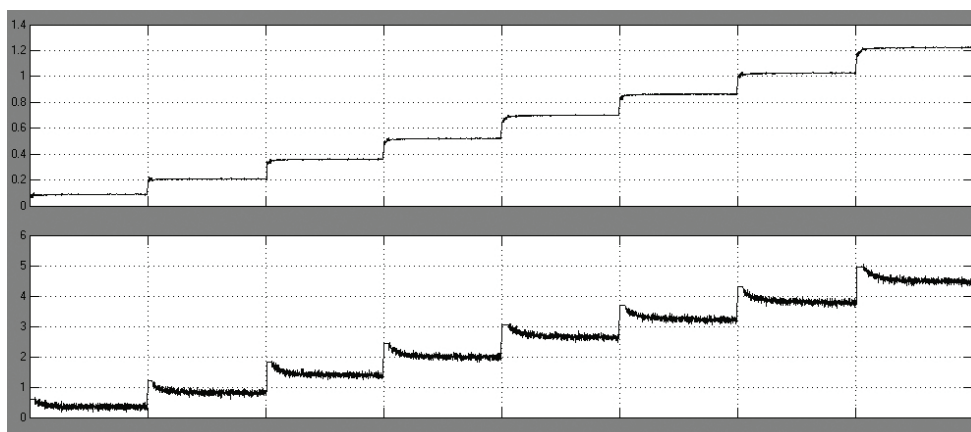


Рис. 5 Графики входных и выходных зависимостей при исследовании тканей почки в состоянии норма-патология на восьми энергетических уровнях

Практическая реализация робастной регулировки для стабилизации смещенного потенциала проводилась при решении задач определения границы норма-патология онкологически пораженных органов. Исследовались органы с ярко выраженными границами новообразования, удаленные в процессе проведения хирургических операций. При исследовании тканей желудка на предмет обнаружения границ резекции применение разработанных алгоритмов робастной регулировки позволило получить от 4 до 16 энергетических уровней. Экспериментально установлено, что при классификации тканей почки в состоянии нормы и патологии, а также границ поражения органа достаточно 12 энергетических уровней, а для тканей желудка – 16 уровней. Дальнейшее увеличение количества энергетических уровней нецелесообразно, т.к. вероятность правильного определения состояния объекта изменяется незначительно.

В результате применение ступенчатого комбинированного способа задания входных воздействий, используемого для стабилизации межэлектродного потенциала, позволило увеличить в 2–4 раза количество некоррелированных хорошо воспроизводимых информативных признаков.

Список литературы

1. Джоульметрический метод оценки состояния биологических объектов / С. М. Геращенко, В. И. Никольский, В. И. Волчихин [и др.] // Радиоэлектроника в медицинской диагностике : доклады III Междунар. конф. – М., 1999. – С. 50–51.
2. **Феттер, К.** Электрохимическая кинетика / К. Феттер. – М. : Химия, 1967. – 856 с.
3. **Янкина, Н. Н.** Джоульметрический метод контроля состояния костного регенерата при удлинении конечности / Н. Н. Янкина, С. И. Геращенко, С. М. Геращенко // Надежность и качество : труды международного симпозиума / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – С. 462–464.
4. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления : учебник / под ред. Н. Д. Егупова. – 2-е изд. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 744 с.