

УДК 528.7: 629.78

Гнатовская А.А.

Одесский государственный экологический университет

Мещеряков Д.В.

Одесская национальная академия пищевых технологий

Черепанова Е.В.

Одесский государственный экологический университет

ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ В СИСТЕМЕ С БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

В статье рассмотрены особенности процесса принятия решений при управлении интенсивностью облучения человека в инфракрасной камере пелоидотерапии, работающей по схеме с биологической обратной связью. Показано, что принятие решений требует учета неопределенности декларируемой цели, временных интервалов реализации процедуры, зависимости признакового пространства человека не только от входных воздействий, но предыстории воздействий и состояний.

Ключевые слова: принятие решений, инфракрасное облучение, биологическая обратная связь.

Постановка проблемы. Системы управления с биологической обратной связью (БОС) относятся к специфическому виду информационных систем, в которых человек непосредственно в реальном масштабе времени участвует в выработке управляющих решений. При этом человек может выступать как в качестве средства принятия осознанных решений (управление транспортными средствами, тренажеры, системы психологического тестирования), так и канала обратной связи с использованием генерируемых внешних признаков (сигналов электроэнцефалограмм, электрокардиограмм, частоты сердечных сокращений) при восстановлении двигательных функций, протезировании и т.п. Особенностью систем с БОС является то, что модель человека является иерархической многомерной структурой, в которой локальное управление неприемлемо вследствие его низкой эффективности.

Разбиение модели человека на независимые подсистемы неосуществимо без потери смысла функциональной системы, поскольку все составляющие системы взаимосвязаны и взаимообусловлены, целевая функция не является наперед заданной, а меняется в зависимости от контекста, ситуации, предыстории процесса, достижимости предыдущей цели. Вместе с тем технико-био-

логическая система должна считывать и выявлять общие процедурные компоненты, которые должны обеспечить связи элементов и целевой функции. При этом целевая функция может служить системообразующей, поскольку и связи, и элементы биологической системы не являются однозначными и испытывают существенное влияние внешней среды. Сложность системы с БОС определяется не только сложностью связей и элементов, но и потребностью принятия решений (выбор альтернатив), формальность представления цели в которых проблематична. Математическая модель системы представляется в виде связи входных воздействий X , выходных реакций Y , собственных параметров V и оператора функционального преобразования F , т.е. $Y=F\{X, V\}$, а ее состояние набором признаков или их производных. Проблема заключается в том, что оператор функционального преобразования человека является неоднозначным, следовательно, усложняется и проблема принятия решений.

Анализ последних достижений и публикаций. Метод БОС получил широкое распространение в медицинских приложениях в качестве коррекции патологических состояний и тренировки физиологических функций организма [1]. Это обусловлено, в первую очередь, тем, что созданы технические

средства, позволяющие с требуемой точностью и оперативностью фиксировать признаки тканей и органов человека [2; 3]. В качестве информационных признаков обычно используются: показатели электромиограммы как основного метода коррекции двигательных нарушений [4]; кожно-гальванической реакции, отражающей активность потовых желез и симпатической нервной системы [5]; температуры кожи и конечностей, определяющих интенсивность периферического кровотока [5]; ритм дыхания, отражающий функциональные расстройства органов дыхания и функционального состояния мозга [7]; частоты сердечных сокращений, характеризующие состояние сердечнососудистой системы [8; 9]; электроэнцефалограммы, характеризующей активность головного мозга [10, 11]. Области использования информационно-управляющих систем с БОС включают регулирование эмоционального состояния человека при выполнении монотонных операций [12]; обучение при использовании ранее полученных данных профессионалов [13], что способствует подготовке спортсменов и операторов; использование визуальной и слуховой обратной связи для управления текущей ситуацией [14] при подготовке летчиков, водителей, военнослужащих и т.п.

Многообразие задач, решаемых с применением БОС, приводит к тому, что используемое признаковое пространство специфично для каждой задачи и непосредственно влияет на систему принятия решений. В частности, для систем инфракрасной пелоидотерапии [15] плотность мощности излучения оказывает непосредственное влияние на эффективность лечебной процедуры. Учитывая, что пациенты отличаются по массе, возрасту, характеру заболевания, восприятию температуры внешней среды, формируемый камерой пелоидотерапии инфракрасный поток должен быть индивидуален для каждого случая. Очевидно, что задачи данного класса встречаются при создании систем обеспечения работы операторов в замкнутых объемах, скафандрах, разработке одежды для функционирования при высоких и низких температурах и т.п.

Формулирование целей статьи. Целью работы является анализ подходов для создания алгоритмов принятия решений информационной системой управления плотностью мощности инфракрасного излучения, которая по реакции организма обеспечивают наиболее благоприятные условия проведения процедуры пелоидотерапии.

Изложение основного материала. В соответствии с теорией функциональной системы Анохина, принятие решений в биологических систе-

мах основано на предсказании реакции объекта на определенные раздражения. Это предполагает идентификацию функционального преобразования, учитывающую взаимосвязь биологической и технической составляющей частей системы и единообразия описания. Особая трудность при создании системы представляет биологический объект в силу ограниченности и неоднозначности информации о структуре и функционировании применительно к решаемой задаче. Важной характеристикой системы является эффективность, которая характеризует степень приспособленности составляющих элементов к достижению поставленной цели при минимизации средств ее достижения. Атрибуты системы должны быть доступны для измерения удобными и доступными средствами для не инвазивных методик. Поскольку исполнительное воздействие относится к техногенным показателям, то и целевая функция должна быть формализуемым значением, что не всегда реализуемо. В рассматриваемой задаче управления инфракрасной нагрузкой в камере пелоидотерапии целевой функцией может быть *комфортное состояние* пациента, которое зависит от многих физиологических факторов конкретного человека и предыстории процесса. Понятие комфортное состояние трудно формализуемо, поэтому необходим поиск внешних признаков обеспечения наилучшей эффективности проведения, например, инфракрасной пелоидотерапии.

Поскольку живые организмы являются открытыми системами, в которых происходит обмен информацией, энергией и веществом с окружающей средой, обычно выделяют кибернетические и метаболические функции [16]. Кибернетические функции включают сбор информации о внешней и внутренней среде, переработку информации с принятием решений и управляющими функциями, формирование исполнительных функций, внешние проявления которых могут быть использованы в качестве признакового пространства биологического объекта. Теория функциональных систем П.К. Анохина связывает воедино все перечисленные компоненты, при которых система обеспечивает полезный приспособительный результат. Функциональная система включает периферические и центральные узловы механизмы: полезный приспособительный результат, рецепторы результата, обратную афферентацию от рецепторов в центральные отделы, центральную архитектуру из объединения нервных элементов различных уровней, эффекторные компоненты включая целенаправленное поведение.

В живом організмі раціонально розподіляються функції управління між центральною нервовою системою і локальними управляючими і виконавчими підсистемами. Виділення якої-либо незалежної підсистеми практично неможливо, оскільки функціональна система для отримання пристосованого результату задіяє всі ці підсистеми, і кожна з них бере участь в процесі досягнення поточної мети функціональної системи. Якщо така функціональна система знаходиться в ланці зворотного зв'язку, важливими стають як ознакове простір, генероване цією системою в відповідь на зовнішнє подразнення, так і ступінь однозначності структури *вхідного впливу – генероване ознакове простір*.

В розглядаваній задачі використання людини, що знаходиться в камері інфрачервоної пелюидотерапії (рис. 1), таким ознаком є реакція на різну густина потужності інфрачервоного випромінювання.



Рис. 1. Камера пелюидотерапії

При проведенні процедур лікування опорно-двигального апарату людини, допустимо застосування тільки неінвазивних засобів вимірювання ознак реакції людини на густина потужності випромінювання. До таких ознак можна віднести частоту серцевих скорочень, потовиділення і поверхню температуру шкіри. Частота серцевих скорочень, яка визначає об'єм крові, що протікає в одиницю часу по судинах людини, впливає на скидання теплових потоків від перегретих поверхневих ділянок в об'ємний накопичувач, яким є людське тіло, і менш нагріті поверхневі ділянки для радіаційного охолодження. Потовиділення є найбільш ефективним способом видалення надлишку тепла за рахунок фазового переходу і може бути діагностовано шляхом вимірювання поверхневого опору шкіри. Поверхня температура шкіри, включаючи роговий шар, в якій немає інших способів скидання тепла крім теплопровідності в внутрішні шари тканин і радіаційного випромінювання. Глибина поглинання довгохвильового інфрачервоного випромінювання становить десяті частки міліметра, що порівняно з товщиною шкіри.

Вегетативні реакції при впливі інфрачервоного випромінювання на шкіру людини: регуляризація розподілу крові в тканинах, зміна ритму серця, потовиділення, тиску можуть слугувати ознаковим простором для системи з біологічною зворотним зв'язком. Гомеостатичні реакції організму можуть підтримувати

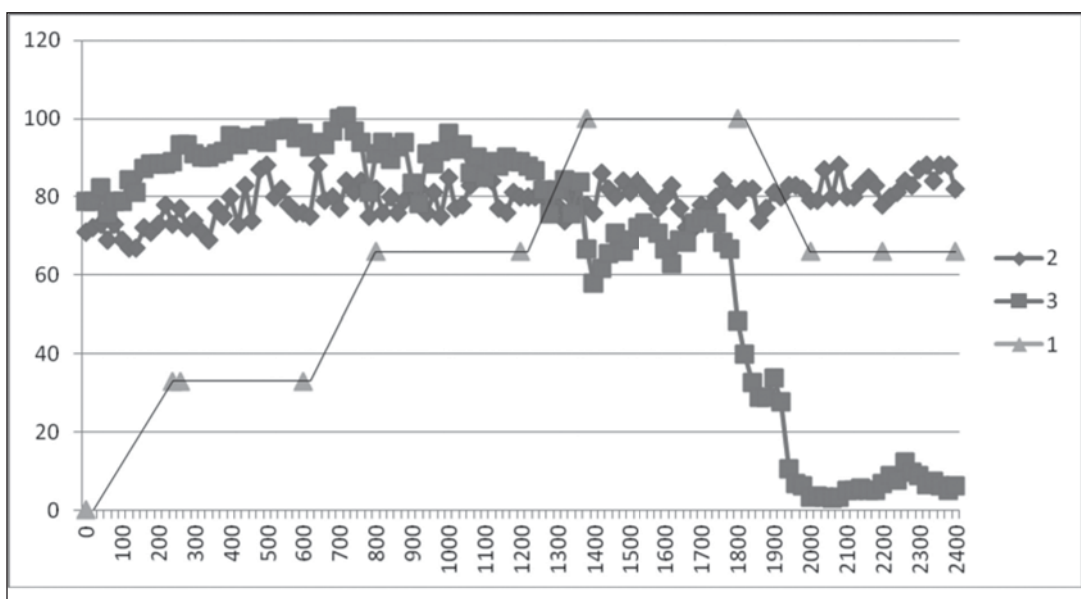


Рис. 2. Реакція на ступенчасте змінювання потужності інфрачервоного випромінювання: 1 – густина випромінювання, 2 – частота серцевих скорочень, 3 – опір шкіри

приспособительный результат на постоянном уровне. Например, перераспределение потоков крови на внешние периферические области при облучении инфракрасным облучением могут привести к тому, что частота сердечных сокращений останется практически неизменной и не может быть использована в качестве первичного признака для управления плотностью мощности обогрева пациента. Проведенные эксперименты (рис. 2 и 3) подтвердили, что в диапазоне применимости плотности мощности инфракрасного излучения перепады мощности оказывают влияние на частоту сердечных сокращений, однако в дальнейшем сколь либо заметных отклонений от предыдущего уровня мощности не наблюдалось. Это может быть связано с перераспределением потока крови в периферийные области без заметного изменения ритма сердца. Данный признак может быть рекомендован для анализа переходных процессов, чем и объясняется значительный интерес к вариабельности сердечного ритма для систем с биологической обратной связью.

Проведенные экспериментальные исследования, представленные в относительных единицах в функции времени, показывают, что для данного приложения сопротивление кожи является более информативным признаком по сравнению с частотой сердечных сокращений, однако запаздывание сигнала значительно, особенно при уменьшении уровня мощности. Из экспериментов также следует, что единственный признак не достаточен для использования в канале биологической обратной

связи регулирования мощности инфракрасных излучателей. Для принятия решения требуются дополнительные признаки, обладающие меньшей инерционностью, например поверхностная температура кожи, которую можно оперативно определять инфракрасным пирометром.

Особенностью задачи принятия решений в системе управления интенсивностью инфракрасного излучения является ограниченное время, причем это время зависит от текущей ситуации. Это предполагает некий набор алгоритмов, имеющих различное время исполнения и, соответственно, качество управления. Стандартным решением проблемы является использование самых быстрых и простых алгоритмов, т.е. исключение из рассмотрения итерационных и рекурсивных алгоритмов принятия решений. Это требует анализа подходов к разработке алгоритмов принятия решений, учитывающих корректность постановки задач относительно сложности, стратегии изменения алгоритма при его исполнении.

Вместе с тем именно итерационные алгоритмы оказываются наиболее приемлемыми для сложных систем с неопределенностью, поскольку обеспечивают пошаговую корректировку процесса при изменяющихся условиях внешней среды и неоднозначности передаточных характеристик звеньев системы, что характерно для живых организмов. В общем виде структуры сложных распределенных иерархических систем строятся по двум структурам: треугольной и даймонд [17]. Структура треугольного типа включает в каче-

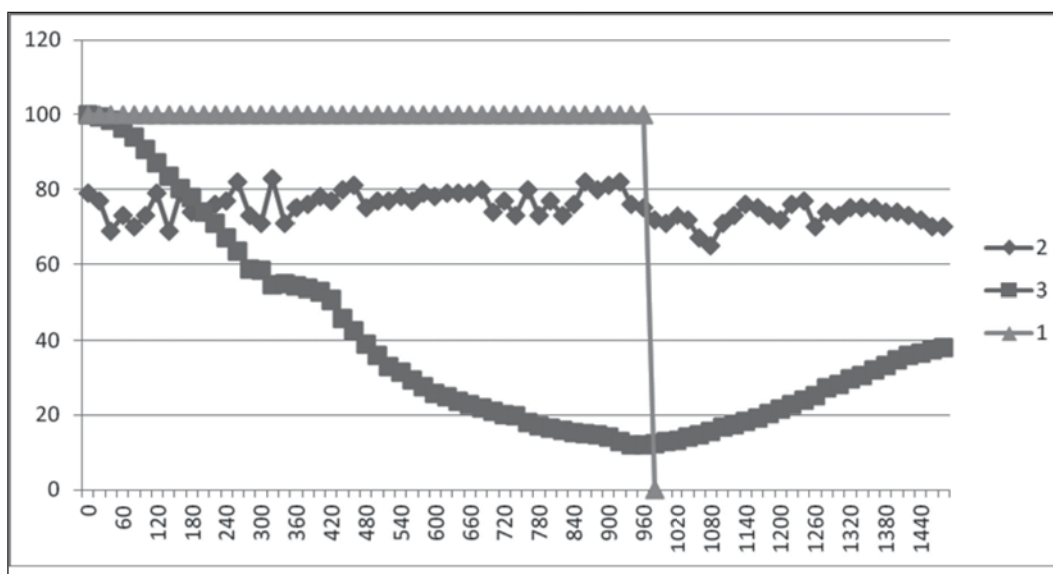


Рис. 3. Реакция на скачкообразное изменение мощности инфракрасного облучения: 1 – мощность облучения, 2 – частота сердечных сокращений, 3 – сопротивление кожного покрова

стве верхнего уровня – уровень оперативного управления и принятия решений, следующего уровня – уровень координации, следующего уровня – уровень локальной оптимизации, следующий – уровень локального автоматического регулирования, нижний уровень – объект управления. Каждый уровень структуры связан с последующим управляющим и информационным каналами, что обеспечивает локальную коррекцию принимаемых решений между уровнями. На верхнем уровне оперативного управления и принятия решений определяются цели и задачи, ограничения и управление ресурсами. На уровне координации выделяются критерии управления системы, применительно к системе пелоидотерапии – согласование алгоритмов подачи энергии и спектрального состава излучения в зависимости от характера заболевания и реакции пациента. На уровнях управления и регулирования оптимизируются подобъекты и стабилизируются значимые параметры. Учитывая только локальные обратные связи между соседними уровнями, данная система должна обладать высоким быстродействием.

Даймонд-структура характеризуется тем, что от уровня оперативного управления и принятия решений связи на более низкие уровни односторонние и представляют собой локальные регуляторы, реализующие заданные законы. После уровня объекта управления структура

уровней обратная треугольной и представляют собой информационные подсистемы оптимизаторов, перерабатывающих информацию. От каждого информационного уровня на одноименный уровень регуляторов вводится канал обратной связи. Несомненным достоинством такой системы является то, что возможно построение итерационной системы, в которой первая итерация устанавливается по усредненному уровню предыдущих экспериментов, а в дальнейшем по признакам конкретного объекта уточняются показатели. Если фиксировать текущие значения показателей системы по каждому уровню, то система может использовать промежуточные решения с последовательным их уточнением.

Выводы:

1. Представлены результаты экспериментальных исследований по выявлению значимых признаков, которые могут быть использованы при принятии решений по управлению мощностью инфракрасного излучения камеры пелоидотерапии системой с биологической обратной связью.

2. Показано, что наиболее удовлетворяющей структурой управления системой с биологической обратной связью является даймонд-структура, которая позволяет итерационно формировать решения от предполагаемого до уточненного с возможностью использования промежуточных решений.

Список литературы:

1. Плоткин, Ф.Б. Компьютерное биоуправление: прогрессивные технологии – в практику здравоохранения. Новые технологии в медицине. Минск, 2012. С. 106–110.
2. Соколов, А.В. Современные направления и перспективы развития аппаратных средств биоуправления. Биологическая обратная связь. 1999. № 1. С. 18–29.
3. Федотчев, А.И., Бондарь А.Т., Ким Е.В. Адаптационное биоуправление с обратной связью и контроль функционального состояния. Успехи физиологических наук. 2002. Т. 33. № 3. С. 79–96.
4. Федотов, А.А. Акулов С.А. Измерительные преобразователи биомедицинских сигналов систем клинического мониторинга. Москва, 2013. 250 с.
5. Кулаичев А.П. Компьютерная электрофизиология и функциональная диагностика. Москва, 2007. 640 с.
6. Ураков, А.Л. Инфракрасное тепловидение и термология как основа безопасной лучевой диагностики в медицине. Фундаментальные исследования. 2013. № 9-4. С. 747–751.
7. Сороко С. И., Трубачев В. В. Нейрофизиологические и психофизиологические основы адаптивного биоуправления. Санкт-Петербург, 2010. 607 с.
8. Hallman D. M., Olsson E. M., Von Scheele B. et al. Effects of heart rate variability biofeedback in subjects with stress – related chronic neck pain: a pilot study. Appl. Psychophysiol. Biofeedback, 2011. Vol. 36, N. 2. P. 71–80.
9. Wheat A.L., K.T. Larkin. Biofeedback of heart rate variability and related physiology: a critical review. Appl. Psychophysiol. Biofeedback, 2010. Vol. 35, N. 3. P. 229–242.
10. Каплан А. Я. ЭЭГ как управляющий сигнал: на пути к биотехнической нейрокоммуникации. Биоуправление: теория и практика. 2010. С. 7–18.
11. Evans, J.R. Handbook of neurofeedback: Dynamics and clinical applications NY, 2007. 378 p.
12. Lane A.M. , Wilson M.G., Whyte G.P., Shave Physiological correlates of emotion-regulation during prolonged cycling performance. Appl Psychophysiol Biofeedback, 2011. 36(3). P.181–4.

13. Ajemian R., D'Ausilio A., Moorman H., Bizzi E. Why professional athletes need a prolonged period of warm-up and other peculiarities of human motor learning. *J Mot Behav*, 2010. 42(6). P. 381-8.
14. Ajemian R., D'Ausilio A., Moorman H., Bizzi E. Immediate effect of visual and auditory feedback to control the running mechanics of well-trained athletes. *J Sports Sci*, 2011. 29(3). P. 253–262.
15. Деклараційний патент № 58051А (Україна). Спосіб пелюїдотерапії та камера для його здійснення / Косоверов Є.О., Тищук М.М., Мещеряков В.І., Веселкова Т.О.
16. Акулов С.А., Федотов А.А. Основы теории биотехнических систем. Москва, 2014. 259 с.
17. Егупов, Н.Д. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления. Москва, 2002. 744 с.

ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У СИСТЕМІ З БІОЛОГІЧНИМ ЗВОРОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ

У статті розглянуті особливості процесу прийняття рішень при управлінні інтенсивністю опромінювання людини в інфрачервоній камері пелюїдотерапії, що працює за схемою з біологічним зворотним зв'язком. Показано, що прийняття рішень потребує врахування невизначеності мети, яка декларується, часових інтервалів реалізації процедури, залежності ознакового простору людини не тільки від вхідних впливів, але і передісторії впливів і станів.

Ключові слова: прийняття рішень, інфрачервоне випромінювання, біологічний зворотній зв'язок.

TAKING A DECISION IN THE SYSTEM WITH BIOLOGICAL FEEDBACK

The peculiarities of the decision taking process working according to a scheme with biological feedback in controlling of a human radiation intensity in an infrared chamber of peloidotherapy are considered in the article. It is shown that the decision-taking requires taking into account the uncertainty of the declared goal, the time intervals for the procedure implementation, the dependence of the human feature space not only on the input effects, but on the prehistory of impacts and states.

Key words: decision taking, infrared radiation, biological feedback.