

Лобачев М.В.

Одесский национальный политехнический университет

Мещеряков Д.В.

АО PETROSOFT

ВЛИЯНИЕ ЗАПАЗДЫВАНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ С БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Розглянуті особливості побудови управляючих біотехнічних систем з біологічним зворотнім зв'язком пов'язані з впливом запізнення на сталість системи регулювання. Проаналізовано вплив запізнення автоматичних технічних систем регулювання на сталість їх функціонування. Виявлено, що розглянуті системи передбачають незмінність часу запізнення, компенсація якого вводиться в алгоритм непараметричного регулятора. Зазначено, що основною проблемою створення управляючих систем із біологічним зворотнім зв'язком є неоднозначність і зміна затримання реакції фізіологічної системи на однаковий вхідний вплив.

Показано, що в медичних застосуваннях при проведенні фізіотерапевтичних процедур можливе використання тільки неінвазивних методів зчитування ознакової інформації. В якості автоматичної системи регулювання з біологічним зворотнім зв'язком вибрано інфрачервону камеру пелюїдотерапії, а управляючої ознаки – опір шкіряного покриву. Випромінювачі інфрачервоного випромінювання різних спектральних діапазонів мають сталі часу, які суттєво відрізняються.

Зв'язок між опором шкіряного покриву та інтенсивністю інфрачервоного випромінювання є якісним і не описується аналітичними залежностями. Змінні запізнення відгуку біологічного об'єкту, суттєвий розкид сталих часу випромінювачів, простота реалізації передбачає врахування цих обставин при розробці біотехнічних систем регулювання. Запропоновано використання розімкнутих цифрових систем автоматичного регулювання для підвищення сталості систем із біологічних зворотнім зв'язком.

Представлено варіант схеми регулювання інтенсивності інфрачервоного випромінювання по зміні опору шкіряного покриву людини, що знаходиться в полі дії випромінювання. В якості алгоритму регулювання вибрано принцип послідовного наближення, при якому час знаходження системи у замкнутому стані суттєво менше часу її знаходження в замкнутому стані.

Ключові слова: біологічний зворотній зв'язок, запізнення, сталість, системи регулювання, інтенсивність випромінювання.

Постановка проблеми. Биотехнические системы, в которых человек находится в цепи обратной связи, относятся к достаточно новому типу систем регулирования, область применения которых непрерывно расширяется. Это связано с тем, что разнотипные задачи человеком и техническими средствами решаются с различной степенью эффективности. Человек значительно лучше решает задачи принятия решений, распознавания образов, особенно в условиях недостаточной определенности, нехватки исходной информации или ее противоречивости.

Компьютерная система существенно быстрее обрабатывает данные, для нее отсутствует проблема усталости, потери внимания, характерна логичность действий и результатов. Совместное функционирование биологических и технических объектов в биотехнических системах потенциально позволяет использовать достоинства как

физиологической, так и кибернетической составляющей системы, что расширяет ее интеллектуальные возможности.

Отличающиеся описания физиологической и кибернетической систем составляют значимую проблему построения биотехнических систем. Такие фундаментальные понятия теории автоматического управления как «переходная», «весовая», «передаточная» функции предполагают повторяемость выходной реакции технического элемента на стандартное входное воздействие. Сложность и взаимосвязанность биологической системы не обеспечивает однозначность реакции на входное воздействие. Возможность описания физиологической системы понятийным аппаратом кибернетических управляющих систем в настоящее время приемлема только для сравнительно простых задач. Постоянно возрастающая потребность в таких системах, используемых

при прийнятті рішень оператором енергетических станцій, при управленні динаміческими об'єктами, управленні рухом авіаційними диспетчерами роблять цю задачу актуальною.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Можливості біотехніческих систем з біологіческої зворотної зв'яззю особливо ядро проявляються в медических приложеннях. В психології [1], де кібернетическа система активізує внутрішні резерви організму для протидії захворюванню, при підготовці професіональних спортсменів [2] для об'єктивізації можливостей організму к перенесенню нагрузок професіональними спортсменами, при реабілітаційних посттравматических [3] і постінсультних заходах [4] для відновлення рухових функцій.

Аналізу основної проблеми побудови систем з біологіческої зворотної зв'яззю, що здійснюється в узгодженні фізіологіческої і кібернетическої моделей, присвячена робота [5]. Фізіологіческа система суттєво складніша кібернетическої, вона нелінійна, однакові входні впливи дають різні відповідні реакції, що ускладнює побудову керуючих систем на відпрацьованих кібернетических принципах [6].

Наслідком цього є складність, а зазвичай і неможливість використання кібернетических принципів описання функцій людського організму, оскільки реакція виділеної підсистеми на стандартне входнє вплив не є однозначною. Математическі методи, засновані на ймовірнісних або нечітких зв'яззях, є недостатніми для адекватного описання фізіологіческої системи, що входить в структуру керуючої системи.

Відомо [7], що системи автоматического регулювання будують за двома основними структурними схемами: розімкнutoю і замкнutoю. Замкнуті структури мають більш високі можливості реалізації складних алгоритмів керування і досяжну точність регулювання. Однак замкнutoму способу регулювання притаманні і певні недоліки, найбільш важливими з яких для розглянутої задачі є більш низькі динаміческі характеристики і стійкість, що залежить від фазових характеристик складових ланок і запізнення [8].

Запитання впливу запізнення на стійкість техніческих систем автоматического регулювання присвячена робота [9]. Однак біоло-

гіческа зворотна зв'яззь вносить свої корективи, оскільки час затримки реакції біологіческого об'єкта на входнє вплив неоднорідно. Він залежить як від шляху проходження сигналу, так і пріоритетності цього сигналу по відношенню к сигналам інших призначень, забезпечуючих гомеостаз організму [10]. Враховуючи крайню складність загального рішення проблеми, автори обмежились розглядом інфрачервоної камери пеллоїдотерапії з біологіческої зворотної зв'яззю, призначеної для лікування опорно-рухового апарату людини [11].

Формулювання цілей статті. Метою роботи є зменшення впливу запізнення на стійкість біотехніческої системи регулювання інтенсивністю інфрачервоного випромінювання по вихідним ознакам біологіческого об'єкта як реакції на цє вплив. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі задачі:

1) проаналізувати існуючі методи підвищення стійкості систем регулювання з запізненням відносно їх застосовності для систем з біологіческої зворотної зв'яззю;

2) розробити стійку автоматическу систему керування інтенсивністю інфрачервоного випромінювання по фізіологіческій реакції організму, що знаходиться в ланці біологіческої зворотної зв'яззю.

Виклад основного матеріалу дослідження. Автори розглядають інфрачервону систему пеллоїдотерапії, як типову біотехніческу систему з біологіческої зворотної зв'яззю [11]. Камера є конструкцією інфрачервоних випромінювачів довгохвильового, середньохвильового і короткохвильового спектрального діапазону, розташованих всередині аналога фотометрического кулі, що забезпечує рівномірне поле випромінювання пацієнта.

Оскільки найбільша ефективність процедури лікування опорно-рухового апарату при захворюванні досягається в початковій стадії потовиділення, інтенсивність випромінювання повинна підбиратися медическим персоналом індивідуально для кожного пацієнта. Представлений підхід з біологіческої зворотної зв'яззю, що використовує дані про фізіологіческую реакцію організму на інфрачервонє вплив [12], сприяє вирішенню цієї проблеми.

Важливим властивістю біологіческої системи є підтримка гомеостазу, то єсть якісних показувачів основних

параметров в заданном диапазоне для обеспечения функционирования организма путем адаптации в допустимых пределах к внешним условиям существования [13]. Сохранение устойчивости физиологической системы к внешним воздействиям является важнейшим свойством при включении биологического объекта в цепь обратной связи биотехнической системы регулирования. Физиологическая и кибернетическая системы для их взаимодействия в биотехнической системе регулирования должны иметь зону перекрытия (Рис. 1), в которой их характеристики сопрягаются. Зона сопряжения основывается на принципах адекватности и единства информационной среды, которая существует между техническими и биологическими элементами.

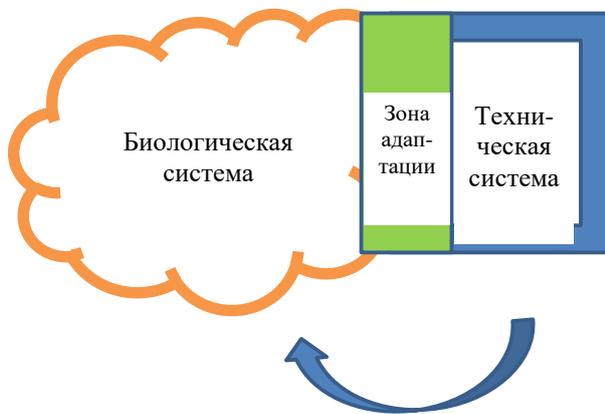


Рис. 1. Обобщенная схема биотехнической системы регулирования

Взаимодействие биологической и технической составляющих системы регулирования решается путем информационно-энергетического обмена между подсистемами. Информационная составляющая, характеризующая реакцию организма на интенсивность инфракрасного излучения (повышение температуры за счет поглощения кожным покровом человека), выражается через изменения сопротивления кожного покрова, частоты сердечных сокращений и дыхания, поверхностной температуры кожного покрова. Энергетическая составляющая ограничивается сверху допустимой интенсивностью, не допускающей ожога, или болевыми ощущениями, а снизу – температурным дискомфортом.

В цифровых системах управления признаковое пространство субъекта передается в систему переработки данных и принятия решений относительно требуемой интенсивности инфракрасного излучения через кодер, канал связи и деко-

дер, которые вносят запаздывание. Признаковое пространство, включающее данные о сопротивлении кожного покрова, потоотделении, частоте сердечных сокращений и дыхания, температуре эпидермиса, имеет различную информативную значимость для управления. Часть информации теряется вследствие конечности числа уровней квантования и дискретности считывания. Строгий анализ погрешностей квантования представлен в [14], поэтому авторы остановились на некоторых особенностях, важных для систем с биологической обратной связью. Для управляющих систем значимым фактором является влияние запаздывания, вносимое каждым элементом системы, которое сказывается на устойчивости системы.

Внешние воздействия на биологический объект могут привести к потере устойчивости системы регулирования, то есть возможности возвращения ее в состояние равновесия после прекращения возмущения. Анализ устойчивости автоматических систем управления осуществляют с помощью алгебраических и частотных критериев. Однако наиболее просто формируется критерий устойчивости Найквиста: замкнутая система устойчива, если годограф передаточной функции разомкнутой системы не охватывает на комплексной плоскости точку с координатами $(-1, j0)$ [7]. Критерий устойчивости Найквиста позволяет по устойчивости разомкнутой системы судить о качестве замкнутой, что важно для дальнейших рассуждений.

Запаздывание сигнала в элементах, передача информации по цифровым каналам связи оказывают непосредственное влияние на устойчивость системы управления. Связь между входной величиной $x(t)$ и выходной $y(t)$ имеет вид $y(t) = x(t - \tau)$, где τ – постоянная времени запаздывания, а передаточная функция звена запаздывания:

$$W_{\text{зан}}(s) = \exp(-s \tau), \quad (1)$$

Известно, что большинство объектов регулирования достаточно хорошо аппроксимируются инерционной системой второго порядка с запаздыванием. Повышение порядка обычно неоправданно, поскольку становятся значимыми внешние шумы и иные влияния. Система, состоящая из регулятора и объекта, описывается дифференциальным уравнением

$$T_2^2 x''(t) + T_1 x'(t) + x(t) = k \cdot u(t - \tau), \quad (2)$$

Или в операторной форме

$$W(p) = \frac{k \cdot \exp(-\tau p)}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}, \quad (3)$$

где k – коэффициент передачи объекта регулирования.

В упрощенном варианте керамические и трубчатые инфракрасные излучатели можно аппроксимировать динамической системой первого порядка:

$$W(p) = \frac{k \cdot \exp(-\tau p)}{T_1 p + 1}, \quad (4)$$

Для технических систем анализ передаточных функций позволяет строить оптимальные системы регулирования при известных параметрах и точном знании времени запаздывания. Однако неполнота исходной информации и неопределенность запаздывания, присущие биологическим объектам, не позволяют в настоящее время даже ставить вопрос оптимизации.

В последнее время получают распространение схемы двухконтурного управления, первый контур которых занимает обычный регулятор, а второй – непараметрический регулятор, замкнутый на первичный регулятор [15]. Чаще всего первый регулятор является аналоговым, непараметрический – всегда цифровой, поскольку на него возлагаются интеллектуальные функции, которые включают построение обратной весовой характеристики системы.

Из критерия устойчивости Найквиста следует, что амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой системы имеет такой вид [16]:

$$W(j\omega) \cdot \exp(-j\omega\tau) = A(\omega) \cdot \exp[j\phi(\omega)] \cdot \exp(-j\omega\tau) = A(\omega) \cdot \exp[j(\phi(\omega) - \omega\tau)], \quad (5)$$

Из этого выражения следует, что звено запаздывания не меняет модуль $A(\omega)$ амплитудно-фазовой частотной характеристики разомкнутой системы, а вносит лишь дополнительный фазовый сдвиг $\omega\tau$, пропорциональный частоте ω с коэффициентом пропорциональности, равным времени запаздывания τ . С ростом частоты модуль $A(\omega)$ уменьшается и $W(j\omega)$ принимает вид спирали относительно начала координат. При этом устойчивость системы ухудшается, поскольку вся $W(j\omega)$ приближается к критической точке $(-1, j0)$. Что касается замкнутой системы, то для ее устойчивости необходимо и достаточно, чтобы амплитудно-фазовая характеристика разомкну-

той системы не охватывала точку с координатами $(-1, j0)$. Для обеспечения устойчивости разомкнутой системы необходимо обеспечить время запаздывания

$$\tau < \tau_{кр} = \frac{\phi(\omega_{кр}) + \pi}{\omega_{кр}}, \quad (6)$$

Применительно к рассматриваемой задаче управления в биотехнических системах важным свойством критерия Найквиста является то, что он может быть использован для случая, когда неизвестны аналитические зависимости некоторых звеньев системы. Более того, он применим и для анализа устойчивости разомкнутой системы с запаздыванием, амплитудно-фазовая характеристика которой может быть получена экспериментально [16].

Для системы с коммутационными ограничениями связь между процессом управления и передачи признаков данных оказывает влияние на устойчивость и качество стабилизации. Аналитическое описание запаздывания реакции человека на входное воздействие крайне затруднительно, сигналы обрабатываются периферийными подсистемами, а сенсорная система человека замыкается на центральную нервную систему. Путь сигналов отклика может иметь различные каналы прохождения в зависимости от локальных целей организма и многократно трансформироваться с подключением обратных связей на предшествующие узлы преобразования.

Время скрытых рефлексных реакций человека на раздражитель лежит в пределах [10]: 0,36-0,40 сек. – на тепловое болевое раздражение, 0,50-0,80 сек. – на тепловое контактное раздражение, 0,28-1,60 сек. – результирующая реакция на тепловое раздражение. Изменение частоты пульса как ответ на дозированную физическую нагрузку составляет $1,2 \pm 0,1$ сек. Реакция потоотделения на дозированную физическую нагрузку составляет $4,3 \pm 0,2$ сек. Реакция расширения просвета сосудов составляет $7,8 \pm 1,0$ сек., а реакция сужения просвета сосудов – $8,9 \pm 0,9$ сек. Отсюда следует, что процесс реакции организма на тепловое воздействие по сопротивлению кожного покрова и частоте сердечных сокращений можно считать с периодом не менее 2 сек, потоотделения – примерно 10 сек. Очевидно, что стандартная аппаратура осуществляет усреднение показаний по нескольким измерениям для повышения повторяемости, поэтому запаздывание считывания показаний еще более возрастает.

Основным элементом запаздывания камеры пелоидотерапии являются инфракрасные

излучатели различных спектральных диапазонов, построенные на принципе излучения нагретых поверхностей. Ламповые излучатели коротковолнового спектрального диапазона имеют постоянную времени примерно 2 сек., трубчатые средневолнового спектрального диапазона – примерно 2 мин., керамические длинноволнового спектрального диапазона – примерно 6 минут.

Значительный разброс постоянных времени излучателей приводит к необходимости их подключения таким образом, чтобы влияние запаздывания было минимальным. Частным случаем такого решения может служить равное распределение интенсивности излучения источников различных спектральных диапазонов. Рабочий терапевтический диапазон интенсивностей инфракрасного излучения не превышает 30-40% от максимальной интенсивности камеры, поэтому управление излучением в этом диапазоне возможно вести практически от источника с минимальной постоянной времени. Параллельно включенные излучатели с большой постоянной времени исполняют роль стабилизирующего фактора.

На Рис. 2 представлено устройство регулирования интенсивности инфракрасного излучения, использующее в качестве первичного признака сопротивление кожного покрова человека в качестве основной первичной информации относительно воздействия на него облучения. Устройство регулирования включает биологический объект 1, систему считывания сопротивления кожного покрова 2, устройство принятия решений с задатчиком 3, драйвер 4, инфракрасные излучатели 5.

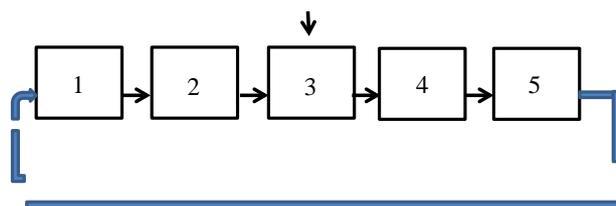


Рис. 2. Схема регулирования камеры пелоидотерапии с БОС

Основными элементами системы являются человек 1 и облучаемые его инфракрасные излучатели 5, которые являются устойчивыми звеньями в диапазоне терапевтического воздействия. Физиологическая система 1 самостоятельно поддерживает устойчивое состояние (гомеостаз) в диапазоне воздействий теплового поля. Инфракрасные излучатели выполнены в виде нагревательных элементов с различной температурой

поверхности и в соответствии с законом Вина генерируют излучение в отличающихся спектральных диапазонах. Блоки 2, 3 и 4 образуют регулятор, выполненный на принципе последовательного приближения. Выборка о сопротивлении кожного покрова, считываемая блоком 2, поступает на блок принятия решений 3, который изменяет содержимое реверсивного счетчика уровня интенсивности излучения драйвера 4 на единицу. Таким образом, в момент существования выборки система регулирования является замкнутой, а после его окончания содержимое счетчика не меняется и система регулирования становится разомкнутой.

Устойчивость разомкнутой системы при малых изменениях входного воздействия (например, 1/256) при периоде выборки, превышающем запаздывание реакции биологического объекта, высока, а заложенный принцип дельта модуляции относится к наиболее устойчивым при низком отношении сигнал / шум. Основным недостатком предложенной системы регулирования интенсивности излучения по сопротивлению кожного покрова является низкая динамика, поэтому схема рекомендуется для условий, когда физиотерапевтическая камера пелоидотерапии предварительно выведена в зону режима автоматического регулирования. Реализация схемы на основе технологии ARDUINO с широтно-импульсным управлением параллельно включенных керамических, трубчатых и ламповых инфракрасных излучателей показало, что система соответствует терапевтическим требованиям. Время выхода на активный режим при предварительно прогретой камере пелоидотерапии не превышало 3 минут при длительности процедуры 20 минут.

Для повышения динамических характеристик системы с большим запаздыванием авторы воспользовались принципом отношений, используемым в регуляторах с предиктором Смита [17]. Основным достоинством таких систем является возможность поддержания не абсолютных значений параметров, а соотношения между ними. Был выделен дополнительный информативный признак, который имеет более высокие динамические характеристики, чем изменение сопротивления кожного покрова. Таким признаком может служить температура поверхности кожного покрова, которую можно считывать бесконтактно инфракрасными термометрами. Так, время измерения температуры бесконтактным термометром Oromed ORO-T 30 BABY составляет 0,1 сек., температурный диапазон 0-60°C.

Модифицированная схема регулирования камеры пелоидотерапии с биологической обратной связью и разделением каналов с малым и большим временем запаздывания представлена на Рис. 3.

Первый канал 2-5 управления инерционными излучателями работает по структуре, аналогичной Рис. 2. В малоинерционном канале пирометр 6 считывает поверхностную температуру кожи пациента, передает данные на схему принятия решений 7 и через драйвер 8 управляет динамичными ламповыми инфракрасными излучателями 9. Распределение приоритетов по использованию каналов с различной инерционностью обеспечивает блок 11, который по сопротивлению кожного покрова определяет зону регулирования.

В начальной стадии при высоком сопротивлении кожного покрова (недостаточное количество тепла для начала потовыделения) основную нагрузку берут на себя малоинерционные излучатели. При выходе на терапевтический режим основная нагрузка ложится на инерционные керамические излучатели как наиболее стабильные и надежные. Блоки 4 и 8 синхронизированы между собой, поэтому система практически все время работает как разомкнутая, что обеспечивает ее устойчивость.

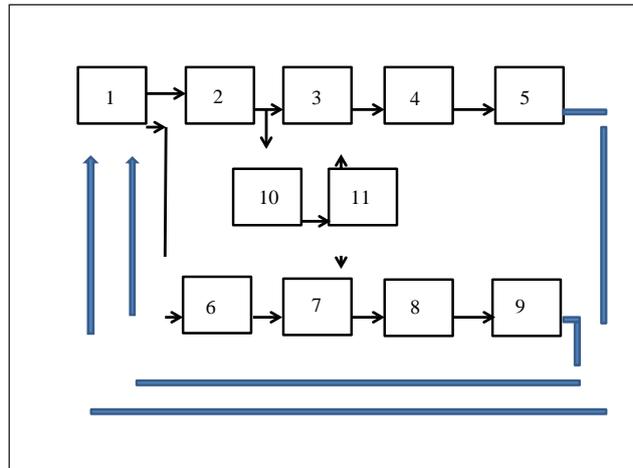


Рис. 3. Схема регулирования с управлением потоками

Выводы. Проанализированы подходы повышения устойчивости автоматических систем регулирования с биологической обратной связью применительно к инфракрасным физиотерапевтическим системам пелоидотерапии.

Разработана схема управления интенсивностью инфракрасного излучения по сопротивлению кожного покрова пациента, расположенного в цепи обратной связи, предложена ее модификация.

Список литературы:

1. Мосолов С.Н., Бирюкова Е.В., Тимофеев И.В. Применение А-Θ-Тренинга биологической обратной связи при тревожных расстройствах, резидентных к психофармакотерапии (открытое рандомизированное контролируемое исследование). *Обзорение психиатрии и медицинской психологии им. В.М. Бехтерева*. 2010. № 1. С. 15–20.
2. Сороко С.И., Трубачев В.В. Нейрофизиологические и психофизиологические основы адаптивного биоуправления. СПб : ИЭФБ РАН. 2010. 607 с.
3. Wheat A.L., Larkin K.T. Biofeedback of heart rate variability and related physiology: a critical review. *Appl. Psychophysiol. Biofeedback*. 2010. Vol. 35. № 3. P. 229–242.
4. Hallman D.M., Olsson E.M., Hallman D.M., Von Scheele D. Effects of heart rate variability biofeedback in subjects with stress – related chronic neck pain: a pilot study. *Appl. Psychophysiol. Biofeedback*. 2011. Vol. 36. № 2. P. 71–80.
5. Акулов С.А., Федотов А.А. Основы теории биотехнических систем. М. : ФИЗМАТЛИТ. 2014. 259 с.
6. Плоткин Ф.Б. Компьютерное биоуправление: прогрессивные технологии – в практику здравоохранения. Минск : Новые технологии в медицине. 2012. С. 106–110.
7. Медведев Ю.И. Курс лекций по теории автоматического управления. Часть 2 : Учебное пособие. Томск : Том. ун-т. 2006. 87 с.
8. Громов Ю.Ю., Земской Н.А., Лагутин А.В., Иванова О.Г., Тютюнник В.М. Системы автоматического управления с запаздыванием : учеб. пособие. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. 76 с.
9. Кулаков Г.Т., Кулаков А.Т., Кравченко В.В. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. Минск : Вышэйшая школа. 2017. 240 с.
10. Зайчик А.Ш., Чурилов Л.П. Патологическая физиология. Том 2. СПб : ЭЛБИ-СПб, 2007. 768 с.
11. Декларацийний патент № 58051А (Україна). Спосіб пелоїдотерапії та камера для його здійснення. Косоверов Є.О., Тишук М.М., Мещеряков В.І., Веселкова Т.О.
12. Гнатовская А.А., Мещеряков Д.В., Черепанова Е.В. Концепция преобразования данных инфракрасной системой с биологической обратной связью. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. 2018. Т. 29(68). № 2. С. 116–120.

13. Бондарева Л.А., Дунаев А.В. Биотехнические медицинские системы терапевтического назначения. Учебное пособие. Орел : ОрелГТУ, 2005. 64 с.
14. Поляк Б.Т., Хлебников М.В., Рапопорт Л.Б. Математическая теория автоматического управления. М. : Ленард, 2019. 504 с.
15. Пупков А.Н., Телешева Н.Ф., Царев Р.Ю., Чубаров А.В., Шестернева О.В. О непараметрическом двухконтурном управлении линейными динамическими системами и настройке параметров типовых регуляторов с использованием непараметрической модели ЛДС. Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=1032>.
16. Бесекаерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. М. : Профессия, 2007. 752 с.
17. Никулин Е.А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза. Учеб. пособие для вузов. СПб : БХВ-Петербург, 2004. 604 с.

Lobachov M.V., Mescheryakov D.V. INFLUENCE OF DELAY ON THE STABILITY OF A REGULATORY SYSTEM WITH BIOLOGICAL FEEDBACK

Consideration of the features of building control biotechnological systems with biological feedback related to the influence of delay on the stability of the regulatory system. The influence of the delay of automatic technical control systems on the stability of their functioning is analyzed. It was revealed that the systems considered assume that the delay time is constant, the compensation of which is laid down in the algorithm of the nonparametric controller. It is noted that the main problem of creating control systems with biological feedback is the ambiguity and change in the delay time of the response of the physiological system to the same input effect.

It is shown that in medical applications during physiotherapeutic procedures it is possible to use only non-invasive methods for reading indicative information. An infrared camera for peloid therapy was chosen as an automatic control system with biological feedback, and skin resistance was the control output feature. Infrared emitters of different spectral ranges have significantly different time constants. The relationship between the resistance of the skin and the intensity of infrared radiation is qualitative and is not described by analytical dependencies.

Variable delay in the response of a biological object, a significant scatter of the emitter time constants, the required ease of implementation, requires taking these circumstances into account when developing biotechnological control systems. The use of open digital automatic control systems to increase the stability of systems with biological feedback is proposed.

A variant of a scheme for controlling the intensity of infrared radiation by changing the resistance of the skin of a person in the field of radiation exposure is presented. As a control algorithm, the principle of successive approximation is chosen, in which the time spent by the system in the closed state is significantly less than the time spent in the open state.

Key words: *biological feedback, delay, stability, control systems, radiation intensity.*