

Мещеряков Д.В.
АО Петрософт

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЗАПАЗДЫВАНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМЫ С БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Рассмотрено влияние времени запаздывания преобразования информации на устойчивость системы регулирования с биологической обратной связью. Проанализированы реакции организма на скачкообразное инфракрасное воздействие с учетом их информативности и времени формирования. Показано, что мобильные устройства дистанционного преобразования данных вносят значимую временную неопределенность, влияющую на качество управления. Предложены пути снижения и компенсации влияния запаздываний.

Ключевые слова: биологическая обратная связь, время формирования, информативные признаки, управление.

Постановка проблемы. Системы с биологической обратной связью являются сравнительно новым типом систем автоматического управления, в которых человек может выступать в роли системы принятия решений, объекта управления, обратной связи. Система инфракрасной пелоидотерапии, предназначенная для лечения опорно-двигательного аппарата человека, относится такому типу систем [1]. В ее состав входят инфракрасные излучатели различного спектрального диапазона и специальным образом сконструированные отражатели, обеспечивающие формирование бестеневого поля облучения пациента внутри камеры.

При проведении пелоидотерапии подбирается такая интенсивность инфракрасного облучения, которая наиболее способствует процессу лечения. В зависимости от характера заболевания, массы пациента, пола и возраста требуется соответствующая интенсивность облучения, поэтому дифференцируются группы с близкими показателями. С точки зрения теории автоматического управления такая система является разомкнутой.

Ситуация существенно меняется, если процедура лечения предназначена для одного пациента. В этом случае появляется потенциальная возможность по ощущению комфорта пациентом формировать присущее только ему инфракрасное поле, которое обеспечивает максимальный терапевтический эффект. Поскольку понятие комфорта является субъективным и качественным, то необходим набор некоторых количественных показателей, которые удовлетворяют принятия решения по автоматическому управлению интенсивностью излучения, обеспечивающему этот комфорт. Человек оказывается в цепи биологической обратной связи системы управления интенсивностью инфракрас-

ного облучения, а система управления становится замкнутой.

Включение человека в цепь обратной связи приводит к двум проблемам. Первая состоит в том, что необходимо выделить базовые признаки реакции человека на инфракрасное воздействие, которые бы представляли эту причинно-следственную связь. Однако в физиологической системе нет невзаимосвязанных реакций и базовых координат, которые используются в технических системах, поэтому любой признак или их набор лишь косвенно характеризует реакцию организма на интенсивность излучения. Вторая связана с влиянием запаздывания на качество управления. Реакции человеческого организма на внешние воздействия имеют достаточно большой разброс, который зависит от множества факторов, в том числе предыстории. Кроме того, запаздывание вносят и технические средства, такие как низкочастотные фильтры подавления помех, инерционность керамических излучателей, системы считывания измерительной информации, контроллеры, сети передачи сообщений.

Анализ последних достижений и публикаций. Теория систем автоматического управления достаточно глубоко проработана, в том числе вопросы устойчивости замкнутых систем [2]. Обобщая проблемы создания устойчивых автоматических систем, можно утверждать, что запаздывание является одним из основных негативных факторов [3]. Переход на цифровые системы обработки данных в системах управления усугубила эту проблему, поскольку практически были сняты проблемы сложности алгоритмов обработки, что приводит к удлинению процесса принятия решения [4]. Наличие запаздывания в контурах управления ведет к снижению устойчивости замкнутой системы даже

при небольших коэффициентах усиления регуляторов [5]. Основная трудность при этом заключается в обеспечении устойчивости и качества функционирования.

Пространственное отделение подсистемы цифровой обработки информации от датчиков и исполнительных органов приводит к дополнительной задержке, связанной с передачей информации по каналам связи [6]. Особенностью построения компьютерных сетей является то, что запаздывание приема данных относительно их поступления может достигать значительных величин. Оно зависит от загрузки сети, пропускной способности канала и при неблагоприятных условиях [7] может выходить за допустимые пределы, необходимые для процесса управления.

Вместе с тем развитие систем с биологической обратной связью и исполнительной и сенсорной частями, отделенными от подсистемы преобразования данных, приводит к новым проблемам, поскольку человек (как сложная система) выступает приемником инфракрасного излучения и источником признаков реакции на полученное воздействие [8].

Постановка задания. Целью работы является поиск путей снижения времени формирования отклика по реакции человека на интенсивность инфракрасного воздействия.

Изложение основного материала исследования. Повысить качество управления объектами с запаздыванием можно двумя способами:

- уменьшением запаздывания в объекте путем выбора показателей с меньшим запаздыванием;
- применением более сложной структуры системы управления, позволяющей уменьшить негативное влияние запаздывания.

Наибольший лечебный эффект при лечении методом инфракрасной пелоидотерапии достигается при ощущении состояния комфорта пациентом [9]. Комфорт представляет собой качественный показатель, который невозможно использовать в качестве формального признака для реализации управляющих действий. Проведенный анализ и экспериментальные исследования показывают, что наиболее значимыми выходными признаками являются сопротивление кожного покрова, частота сердечных сокращений, частота дыхания, артериальное давление, которые частично определяют состояние сердечнососудистой системы, теплоотдачу за счет поверхностного переноса и распределения теплового потока и охлаждения за счет испарения. Состояние камеры пелоидотерапии описывается теневой и радиационной температурой. Все приведенные

показатели являются измеряемыми, поэтому могут использоваться для подготовки данных управления.

Считывание данных признаков представляет не совсем тривиальную задачу, поскольку мониторинг должен производиться в реальном времени управления на подвижном пациенте. К сенсорным устройствам предъявляются и медицинские и эргономические требования: простота установки, малые габариты, масса, дешевизна. Кроме того, необходимо выбрать технологию сбора и дистанционной передачи измеряемых данных на внешнее обрабатывающее устройство.

Анализ различных технологий считывания первичной информации датчиков и преобразования данных мониторинга показал, что наиболее соответствующей поставленной задаче следует признать ARDUINO [10]. Основными ее достоинствами являются такие: согласованность с операционной системой Windows 10, проводными и беспроводными каналами связи с распространенными устройствами, малые габариты и низкое энергопотребление. Наличие в свободном доступе технологий Windows Remote Arduino и Windows Remote Arduino позволяет управлять цифровыми и аналоговыми портами для работы с датчиками и использовать смартфон в качестве виртуальной платы расширения [11].

Считывание показаний теневой и радиационных температур с помощью полупроводниковых датчиков не представляет сложности, поскольку это типичная задача для Arduino. Измерение кожного сопротивления выполняется по стандартной методике электрическими контактами, между которыми расположен участок кожного покрова. При поверхностном нагреве кожи инфракрасным излучением активизируется периферическая кровеносная система, снижающая сопротивление кожи. Генерация секрета потовых желез при поверхностном нагреве излучением приводит к росту проводимости кожи за счет ионной проводимости секрета, что сводит задачу к измерению электрического сопротивления, типичную для Arduino. В качестве измерителя частоты сердечных сокращений использован стандартный пульсоксиметр CMS50E, надеваемый на палец, который считывает показания частоты с периодом 8–10 секунд.

Аппаратная задача управления интенсивностью инфракрасного излучения решалась лишь по анализу изменения лишь одного фактора – сопротивления кожного покрова человека, который характеризует эффективность отбора тепла периферической частью сердечнососудистой системы и фазового способа охлаждения. Очевидно, что при переходе

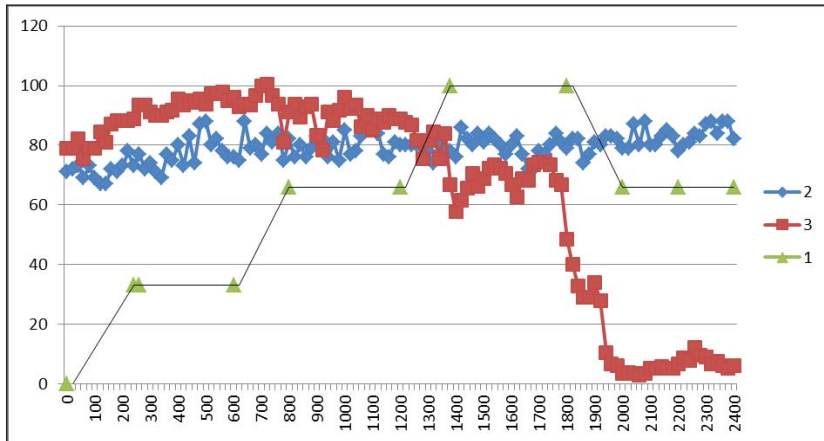


Рис. 1. Экспериментальные характеристики запаздывания реакции на ступенчатое инфракрасное излучение:
1 – интенсивность излучения, 2 – частота сердечных сокращений, 3 – сопротивление кожного покрова

к комплексу выходных признаков человека будет лишь меняться алгоритм обработки данных, а не принципы управления излучателями. Наиболее приемлемым методом управления интенсивностью излучения признана широтно-импульсная модуляция, которая может быть реализована аппаратно-программными средствами Arduino.

Поскольку пациент в камере пелоидотерапии, в соответствии с методикой лечения, перемещается в камеру пелоидотерапии, то система обработки информации по мониторингу и управлению излучателями должна быть разнесена каналом Bluetooth, что приводит к дополнительному запаздыванию за счет реализации сетевых протоколов обмена с мобильным устройством. Это запаздывание зависит от загруженности сети и в критических случаях может иметь неприемлемое значение относительно устойчивости процесса управления. На результирующее запаздывание оказывает влияние также время между квантами выборки данных, временной сдвиг низкочастотных фильтров подавления шумов, время принятия решения, нагрева или охлаждения инфракрасных нагревателей. На рис.1 приведены экспериментально полученные зависимости времени запаздывания изменения сопротивления кожного покрова и частоты сердечных сокращений от повышения и снижения интенсивности инфракрасного излучения.

Из приведенных зависимостей следует, что сопротивление кожного покрова является весьма информативным показателем, однако время запаздывания крайне велико, особенно при снижении интенсивности излучения, что связано с медленным испарением жидкости с поверхности кожи. Исходя из полученных результатов экспериментов,

становится очевидным, что ни один из приведенных признаков не может полностью характеризовать реакцию организма человека на облучение инфракрасным полем различной интенсивности. Поэтому измеряемые признаки можно разделить по информативной и временной значимости. Так, сопротивление кожного покрова является наиболее информативным, однако время запаздывания слишком велико, особенно при снижении интенсивности облучения. Результаты первичного преобразования существенно зависят от ионной проводимости жидкости поверхности кожи, которую

необходимо снижать, например, путем принудительного охлаждения по информации о начале снижения интенсивности облучения. Эта информация может быть получена от пирометра, который отслеживает поверхностную температуру кожи пациента. Частота сердечных сокращений в непосредственном виде не очень информативна, поскольку она не отражает процессы перераспределения потоков крови внутри организма, однако скорость ее изменения достаточно четко сигнализирует о таких изменениях. Изменение показателей частоты сердечных сокращений, как и частоты дыхания и артериального давления, существенно лишь при больших интенсивностях теплового потока.

Из приведенного анализа следует, что каждый показатель должен иметь свой алгоритм преобразования первичной информации. Некоторые признаки, например, радиационная температура кожного покрова, могут быть использованы как управляющие и применены для уменьшению времени запаздывания такого информативного признака как поверхностное сопротивление кожного покрова. Использование частоты сердечных сокращений предполагает определение первых производных и их последующий анализ.

Результатом разработки явилось устройство на базе технологии Arduino с программным продуктом, которое осуществляет мониторинг теневой и радиационной температуры внутри камеры инфракрасной пелоидотерапии, сопротивления кожного покрова, частоты сердечных сокращений, частоты дыхания.

Для экспериментальной проверки возможности управления интенсивностью излучения только по одному фактору (сопротивлению кожного покрова)

розроблена мобільна система дистанційного управління інтенсивністю излучення інфрачервоними нагрівачами на базі стандартного смартфона і апаратно-программних засад Arduino. Система виробляє читання даних про опір кожного покриття з зовнішнього пристрою моніторингу, здійснює фільтрацію сигналу з метою шумоподавлення, генерує графічне зображення процесу, приймає рішення стосовно поетапного змінювання інтенсивності излучення, формує сигнал широтно-імпульсного управління інфрачервоними излучачами. В якості тестуючого сигналу використано меандр прямокутних імпульсів, обробка кото-

рого дозволяє визначити ступінь шумоподавлення, запізнення реакції проміжних ланок системи на входні зміни і, як наслідок, вимоги до структури системи, що дозволяють мінімізувати їх вплив.

Висновки:

– обґрунтовано значущість запізнення реакції організму, що знаходиться в ланці біологічної зворотної зв'язки, на стійкість системи управління;

– виявлені основні вихідні ознаки позицій інформативності, часових затримок і взаємозалежності, що сприяють скороченню формування часу реакції.

Список літератури:

1. Косовров Є.О., Тишук М.М., Мещеряков В.І., Веселкова Т.О. Деклараційний патент № 58051А (Україна). Спосіб пелюдотерапії та камера для його здійснення.
2. Громов Ю.Ю., Земський Н.А., Лагутин А.В., Іванова Щ.Г. Системи автоматичного управління з запізненням. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. ун-та, 2007. 76 с.
3. Баркін А.І. Стійкість лінійних систем з запізненням. Автоматика і телемеханіка, № 3, 2006. С. 3–7.
4. Wang Q.-G. PID Control for MIMO Processes. PID Control in the Third Millennium, Advances in Industrial Control. London: Springer, 2012. P. 177–204.
5. Ільясов Б.Г., Сайтова Г.А., Сабіров І.І. Управління багатозв'язними системами з запізненням на основі логічних регуляторів. XII Всеросійське зібрання по проблемам управління. Москва: ВСПУ. 2014. С. 1370–1376.
6. Жуков І.А. Аналіз стійкості систем управління корпоративними комп'ютерними мережами при наявності затримок доставки управляючої інформації. УСИМ, № 5, 2010. С. 46–51.
7. Туманов М.П. Дослідження стійкості і якості замкнутих розподілених систем з перемінним запізненням в мережній компоненті. Матеріали 6-ї наукової конференції «Управління і інформаційні технології (УИТ–2010)». 2010. 50 с.
8. Акулов С.А., Федотов А.А. Основи теорії біотехнічних систем. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2014. 259 с.
9. Барнацький В.В. Пелюдотерапія різних температурних режимів в відновлювальному лікуванні великих серонегативними спонділоартритами. Проблеми курортології, фізіотерапії і лікувальної фізичної культури, № 2, 2007. С. 7–12
10. Бокселл Дж. Вивчаємо Arduino. 65 проєктів своїми руками. Изд. дом ПИТЕР, 2016. 400 с.
11. URL: <https://blogs.msdn.microsoft.com/sos/2015/07/09/microsoft-arduino/>

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЗАПІЗНЕННЯ НА СТІЙКІСТЬ СИСТЕМИ З БІОЛОГІЧНИМ ЗВОРОТНІМ ЗВ'ЯЗКОМ

Розглянуто вплив часу запізнення перетворення інформації на стійкість системи регулювання з біологічним зворотнім зв'язком. Проаналізовано реакції організму на ступіньовий інфрачервоний вплив з урахуванням інформативності й часу формування. Показано, що мобільні пристрої дистанційного перетворення даних вносять значущу часову невизначеність, яка впливає на якість управління. Запропоновано шляхи зниження і компенсації впливу запізнення.

Ключові слова: біологічний зворотній зв'язок, час формування, інформаційні ознаки, управління.

ANALYSIS OF LAGING INFLUENCE ON THE SYSTEM SUSTAINABILITY WITH BIOLOGICAL FEEDBACK

It was considered the influence of the time lagging of information transformation on the sustainability of the control system with biological feedback. It was analyzed organism reactions to the stepwise infrared influence due to their informativeness and time formation. It was shown that mobile remote data conversion devices introduce a significant temporary uncertainty affecting the quality of control. Ways to reduce and compensate the effects of sustainability were offered.

Key words: biological feedback, time formation, informative features, management.