

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ РЕАБИЛИТАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

УДК 004.021

Кирилл Алексеевич Каляшин, аспирант кафедры Информационных систем и измерительных технологий, Московский государственный открытый университет им. В.С. Черномырдина (МГОУ)
Тел.: 8 (916) 075-07-55
Эл. почта: kakaljaschin@yandex.ru

С целью увеличения эффективности и безопасности реабилитации опорно-двигательного аппарата человека разработана математическая модель и алгоритм взаимодействия пациента с автоматизированной реабилитационной системой с биологической обратной связью, основанные на регистрации и управлении второго функционального параметра, предотвращающего риск перегрузки от интенсивных физических упражнений.

Ключевые слова: мультипараметрическое биоуправление, математическая модель, биологическая обратная связь, автоматизированные реабилитационные системы.

Kirill A. Kalyashin, Post-graduate student, the Department of Information Systems and Measurement Technologies, Chernomyrdin Moscow State Open University
Tel.: 8 (916) 075-0755
E-mail: kakaljaschin@yandex.ru

MATHEMATICAL MODEL OF AUTOMATED REHABILITATION SYSTEM WITH BIOLOGICAL FEEDBACK FOR REHABILITATION AND DEVELOPMENT OF MUSCULOSKELETAL SYSTEM

In order to increase the efficiency and safety of rehabilitation of musculoskeletal system, the model and the algorithm for patient interaction with automated rehabilitation system with biological feedback was developed, based on registration and management of the second functional parameter, which prevents risks of overwork while intensive exercises.

Keywords: multiparameter biocontrol, mathematical model, biological feedback, automated rehabilitation system.

1. Введение

Актуальность работы. Автоматизированные реабилитационные тренажеры (АРТ) с биологической обратной связью (БОС) являются техническими устройствами, работающими совместно с компьютерной техникой. Они позволяют решать ряд проблем в медицинской практике, связанных с комплексом исследовательских, профилактических, реабилитационных и физиологических процедур, в ходе которых, больному посредством биологической обратной связи, организованной преимущественно с помощью микропроцессорной или компьютерной техники, предъявляется информация о состоянии и изменении тех или иных собственных физиологических процессов.

Исходя из анализа литературы, в зависимости от функциональных показателей, можно выделить два класса компьютерных тренажеров с биологической обратной связью: однопараметрические и мультипараметрические [1].

Мультипараметрическая биологическая обратная связь имеет ряд преимуществ над однопараметрической, так как управляет несколькими функциональными показателями или их соотношением и в результате позволяет создать стимулирующее воздействие на пациента.

Из существующих игровых компьютерных тренажеров с биоуправлением, направленных на восстановление и коррекцию утраченных вследствие болезни, травмы, различных паралитических состояний и поражений центральной нервной системы двигательных навыков, известны следующие системы:

- компьютерные реабилитационные системы «Стабилотренажер» [2] и «Тренажер дыхания с БОС» [3], являющиеся однопараметрическими системами, управляющими единственным функциональным показателем. В первом случае – усилием, направленным на поддержание и изменения позы человека. Во втором — частоты сердечных сокращений человека;
 - силовая тренажерная система Proxomed Intelligent Training [4] и компьютерная лечебно-диагностическая система TERGUMED [5] регистрирующие и управляющие несколькими параметрами – амплитудой движения и силой, относящиеся к мультипараметрическим биосистемам. К мультипараметрическим системам также относится и система биологической обратной связи «Кинезис» [6], служащая для восстановления опорно-двигательного аппарата.
- Недостатком данных систем является отсутствие регистрации и управления второго функционального параметра, направленного на регулирование нагрузок на организм человека, предотвращающего от перегрузок физических тренировочных упражнений.

Исходя из вышесказанного ясно, что научно-техническая задача, направленная на всестороннюю регистрацию и регулирование нагрузок на процесс сокращения мышц, при реабилитации и развитии опорно-двигательного аппарата, является актуальной. Решение данной проблемы, достигается введением в автоматизированные тренажерные системы мультипараметрической биологической обратной связи, способствующей одновременно регистрировать два и более параметров, один из которых регулирует нагрузку на организм человека.

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка общей математической модели и алгоритма системы автоматизированных реабилитационных тренажеров, с биологической обратной связью, способных регулировать нагрузки на организм человека, используя мультипараметрическую систему регистрации функциональных показателей пациента. Для достижения поставленной цели разработана математическую модель взаимодействия пациента с автоматизированной реабилитационной системой (АРС) с БОС.

2. Математическая модель

Тренинг на АРТ с БОС происходит только в определенном интервале времени $(0, T_{\text{раб}})$, в течение этого времени и рассматривается работа всей системы, которая разбивается на интервалы фиксированной длины. В пределах каждого интервала

последовательно вычисляются приращения всех процессов, протекающих в модели, и производится, если это нужно, изменение состояния отдельных элементов модели. При достаточно малых приращениях в точках $i (i = 0, 1, \dots)$ получается хорошее приближение моделируемых процессов к процессам в «идеальной» непрерывной модели.

В АРС с БОС экран монитора и звуковые динамики является источником начального стимулирующего сигнала S_n , передающегося на сетчатку глаза и на наружное ухо пациента, который в свою очередь (рис.1) воздействует на физический регистратор реабилитационного тренажера, передавая ему механическую энергию, выраженную физической величиной X , с некоторой силой F и частотой мышечных сокращений T_f [7]:

$$X = \{F; T_f\}.$$

Высокоинтенсивное физическое воздействие человека на регистратор может вызвать мышечный кровоток, застой и уменьшение притока крови к сердцу, что крайне нежелательно для пациента. Поэтому, при взаимодействии пациента с АРС с БОС необходимо регистрировать не только воздействия пациента на физический тренажер, но и функциональное состояние сердечно-сосудистой системы пациента, определяющего его максимально возможную физическую нагрузку.

Физическая величина, зафиксированная датчиком сердечно-сосудистой системы и выражающая ее состояние, можно записать, как Y :

$$Y = \{Z_T, Z_C, Z_{Cn}, Z_H\}.$$

где: Z_T – топологические, Z_C – статистические, Z_{Cn} – спектральные и Z_H – нелинейные данные состояния сердца [8].

Физическая величина Y , зарегистрированная датчиком состояния сердечно-сосудистой системы, передается на компаратор, где сравнивается с максимально возможным значением Y_{max} , представляющим величину начального критического состояния сердечно-сосудистой системы пациента.

Если значение $Y > Y_{max}$, тогда происходит уменьшение значения величины S на минимально возможное недельное значение S_{min} :

$$S_y = S - S_{min},$$

до тех пор, пока Y не станет меньше Y_{max} .

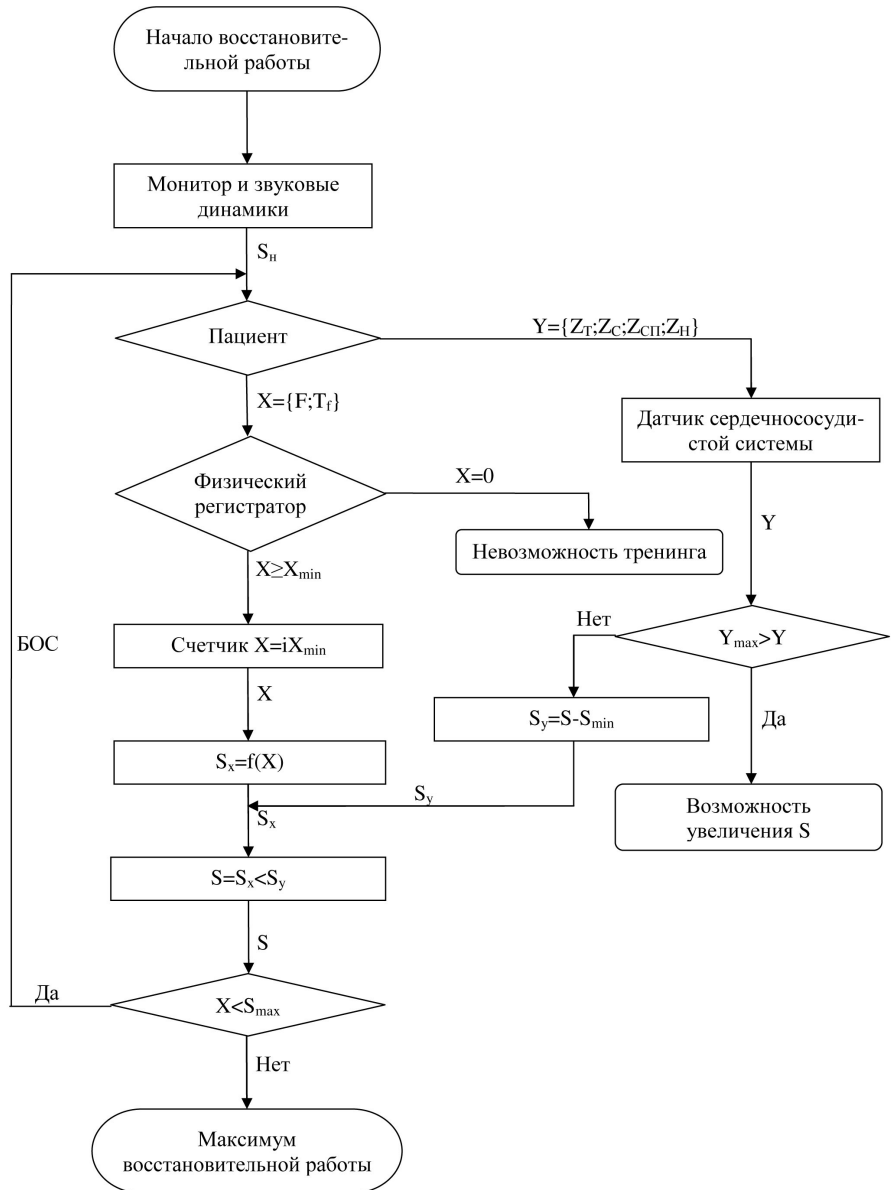


Рис. 1. Алгоритм взаимодействия пациента и АРС с БОС

При значении $Y < Y_{max}$ открывается возможность наращивания интенсивности физических упражнений, т.к. стимулирующий фактор может увеличиваться до максимальной отметки технической возможности АРТ.

Пациент, воздействуя на физический регистратор, передает ему механическую энергию $X = \{F; T_f\}$, для которой с самого начала моделирования выбираются шаги квантования F_{min} и T_{fmin} , являющиеся минимально возможными значениями величин F и T_f .

Если в результате воздействия пациента на физический регистратор реабилитационного тренажера значения величин F и T_f окажутся меньше значения величин F_{min} и T_{fmin} , то работа АРС, направленная на восстановление тех частей человеческого организма,

которые находятся в неработоспособном состоянии, станет невозможной, т.к. значения величин F_{min} и T_{fmin} , являются минимальным порогом суммарной механической энергии X_{min} , которую пациент передает на физический регистратор. Следовательно, минимальная, суммарная механическая энергия X_{min} равна:

$$X_{min} = \{F_{min}; T_{fmin}\}.$$

Для определения значения величины X , служит счетчик, выполняющий роль сумматора минимально возможных величин X_{min} :

$$X = iX_{min},$$

где i – целое число, взятое по модулю и определяющее количество X_{min} в X и равное:

$$|i| = \lfloor X/X_{min} \rfloor.$$

В дальнейшем, значение величины X непосредственно влияет на стимулирующий фактор, выраженный величиной S_x , который отражает суммарную эффективность работы программы игрового тренинга. Стимулирующий фактор S_x равен функции от значения величины механической энергии X :

$$S_x = f(X).$$

Значение величины S_x не должно превышать значение величины S_y , иначе возникает риск перегрузки организма пациента и вместо реабилитации опорно-двигательного аппарата человека, возможно его осложнение.

Рассмотрим подробнее влияние стимулирующего фактора S . Цифровая информация, обрабатываемая в электронно-вычислительном блоке, передается на экран монитора, который в нашем случае является источником стимулирующего фактора. В зависимости от времени смены состояния и качества предоставляемой информации на экране монитора, передающейся на сетчатку глаза человека, формируется стимулирующий фактор S , зависящий в основном от двух главных показателей – качества предоставляемой информации и скорости ее изменения на экране.

Программа, содержащая игровой тренинг, выполняющий роль стимулирующего фактора, функционирует только на определенном отрезке рабочего времени $T_{\text{раб}}$. Так как электронно-вычислительный блок АРС работает с цифровой информацией и является по отношению к перерабатываемым данным дискретно функционирующей системой, то и ход времени в данном блоке отображается дискретно с определенным шагом. Взаимосвязь между предыдущим T_j и последующим T_{j+1} моментами времени можно представить как:

$$T_{j+1} = T_j + t_k,$$

где t_k – это шаг дискретизации, т.е. величина кванта времени.

Значение величины S напрямую зависит от значения величин X и Y . Она имеет еще и свое предельное значение S_{max} , являющееся максимумом технической возможности АРС с БОС, при достижении которого, величина X уже

не будет воздействовать на величину S . Этот момент, наступивший в реабилитационном процессе, приводит к максимуму дальнейшую эффективность восстановительной работы по отношению к нефункционирующим частям организма пациента. Если X меньше S_{max} , то по БОС стимулирующий фактор, вызывает у человека состояние, при котором человек увеличивает свое воздействие (увеличение силы F и частоты мышечных сокращений T_f) на регистратор реабилитационного тренажера.

3. Вывод

Разработанная математическая модель взаимодействия пациента с АРС с БОС, позволяет создавать реабилитационные системы, регистрирующие и управляющие двумя функциональными параметрами. Важной чертой является то, что второй параметр направлен на регулирование нагрузок на организм пациента, и призван не допускать риск его перегрузки от физических тренировочных упражнений.

Данная модель описывает измерение и регистрацию силы, частоты мышечных сокращений и состояние сердечнососудистой системы пациента. Сила и частота мышечных сокращений в дальнейшем выражаются через суммарную механическую энергию, состоящую из дискретных (минимальных) значений, которые передаются на сумматор для определения фактического значения данной энергии. Состояние сердечнососудистой системы выражается суммарной величиной Y , которая при критическом значении задерживает стимулирующий фактор, на который воздействует механическая энергия силы и частоты мышечных сокращений, преобразованная в цифровой сигнал. Стимулирующий фактор в свою очередь воздействует через зрительные и слуховые органы на пациента.

Литература

1. Пятокович Ф.А., Сурушкин М.А. Мультипараметрическая одноканальная система управления в игровом модуле «Xonix» с биологической обратной связью // Фундаментальные исследования. – 2011. – №4. – С. 139 – 144.

2. Руководство пользователя программным обеспечением производства ООО Мера-ТСП для управления стабилометрическим устройством ST-150. – М.: «ООО Мера-ТСП», 2011.

3. <http://www.all-pribors.ru/si/pulsotakhometry-kompyuterizirovannye-s-biologicheskoy-obratnoy-svyazyu-pk-bos-trenazher-dykhaniya-s-bos-37018> (дата обращения: 30.01.2013).

4. <http://proxomed.ru/powerwell.him> (дата обращения: 23.12.2011).

5. <http://trg-med.ru/php/content.php?id=323> (дата обращения: 30.01.2013).

6. <http://www.neurotech.ru/product.aspx?prd=7> (дата обращения: 30.01.2013).

7. Каляшин К.А., Тарасенко А.П. Автоматизированные реабилитационные модели с биологической обратной связью // Технологические проблемы прочности. Материалы международного семинара. Часть 2. – 2012. – С. 284 – 289.

8. <http://ilab.xmedtest.net/?q=node/41> (дата обращения: 30.01.2013).

References

1. Pyatakovich F.A., Surushkin M.A. Multiparametrical single-channel control system in game unit «XONIX» with biodfeedback // Fundamental research. – 2011. – №4. – P. 139 – 144.

2. The users guide the software of production of open company of Mer-TSP for management of the stabilometric device ST-150. – М.: «Mer-TSP open company», 2011.

3. <http://www.all-pribors.ru/si/pulsotakhometry-kompyuterizirovannye-s-biologicheskoy-obratnoy-svyazyu-pk-bos-trenazher-dykhaniya-s-bos-37018> (address date: 30.01.2013).

4. <http://proxomed.ru/powerwell.him> (address date: 23.12.2011).

5. <http://trg-med.ru/php/content.php?id=323> (address date: 30.01.2013).

6. <http://www.neurotech.ru/product.aspx?prd=7> (address date: 30.01.2013).

7. Kalyashin K.A., Tarasenko A.P. The automated rehabilitation models with biological feedback // Technological problems of durability. Materials of the international seminar. Part 2. – 2012. – P. 284 – 289.

8. <http://ilab.xmedtest.net/?q=node/41> (address date: 30.01.2013).