

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-64-81>



УДК 004.5:004.8

Гибридный метод контроля мышечной усталости в робототехнической системе

А. А. Кузьмин¹ ✉, Р. А. Томакова¹, Е. В. Петрунина²,
Д. А. Ермаков¹, С. Кадырова¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

² Московский политехнический университет
ул. Большая Семёновская д. 38, г. Москва 107023, Российская Федерация

✉ e-mail: Ku3bmin@gmail.com

Резюме

Цель исследования – разработка метода контроля мышечной усталости в робототехнических устройствах, работающих в комбинированном режиме.

Методы. Для вычисления экзогенного момента сил робототехнического устройства предложен дешифратор поверхностного электромиосигнала, который учитывает эффект мышечной усталости оператора. Путем дешифрации электромиосигнала определяется ассистирующий момент на серводвигатели робототехнического устройства. При расчете ассистирующего момента принимается во внимание степень мышечной усталости. Метод оценки мышечной усталости заключается в оценке показателя синхронности электромиосигналов на мышцах-синергистах и основан на гибридном подходе формирования модуля принятия решений. Первый модуль принятия решения построен на основе нейросетевого классификатора, дескрипторы для которого формируются на основе анализа спектров электромиосигналов мышц-синергистов. Второй модуль принятия решения включает два канала синергии на каждый электромиографический канал. Первый канал синергии получают посредством амплитудной демодуляции электромиосигнала, а второй – посредством его частотной демодуляции. В результате получаем два классификатора мышечной усталости, решения которых интегрируются агрегатором.

Результаты. Проведены экспериментальные исследования зависимости электромиосигнала от величины мышечного усилия и от его длительности, которые показали, что относительное изменение усредненного показателя RMS при статичной нагрузке может служить объективным показателем степени усталости мышцы.

Заключение. Разработанный метод позволяет управлять механическими моментами на серводвигателях робототехнического устройства адекватно тестовой мышечной нагрузке и функциональному состоянию мышц пользователя. Метод позволяет осуществлять индивидуальную настройку блока нейросетевого классификатора и блока нечеткого логического вывода с последующей агрегацией их решений и таким образом оптимизировать комбинированный режим работы робототехнического устройства.

Ключевые слова: робототехническое устройство; электромиосигнал; эффект мышечной усталости; нечеткая модель принятия решений; нейросетевой классификатор.

© Кузьмин А. А., Томакова Р. А., Петрунина Е. В., Ермаков Д. А., Кадырова С., 2023

Финансирование: Исследования выполнены в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Для цитирования: Гибридный метод контроля мышечной усталости в робототехнической системе / А. А. Кузьмин, Р. А. Томакова, Е. В. Петрунина, Д. А. Ермаков, С. Кадырова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 3. С. 64–81. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-64-81>.

Поступила в редакцию 11.07.2023

Подписана в печать 10.08.2023

Опубликована 29.09.2023

Hybrid Method for Controlling Muscle Fatigue in the Robotic System

Aleksandr A. Kuzmin¹ ✉, Rimma A. Tomakova¹, Elena V. Petrunina²,
Dmitriy A. Ermakov¹, Sofia Kadyrova¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

² Moscow Polytechnic University
38 Bol'shaya Semyonovskaya Str., Moscow 107023, Russian Federation

✉ e-mail: Ku3bmin@gmail.com

Abstract

The purpose of research is development of a method for controlling muscle fatigue in robotic devices operating in a combined mode.

Methods. To calculate the exogenous moment of forces of a robotic device, a surface electromyosignal decoder is proposed, which takes into account the effect of the operator's muscle fatigue. By decoding the electromyosignal, the assisting torque on the servomotors of the robotic device is determined. When calculating the assisting moment, the degree of muscle fatigue is taken into account. The method for assessing muscle fatigue consists in assessing the indicator of synchronism of electromyosignals on synergistic muscles and is based on a hybrid approach to the formation of a decision-making module. The first decision-making module is built on the basis of a neural network classifier, the descriptors for which are formed based on the analysis of the spectra of electromyosignals of synergistic muscles. The second decision module includes two synergy channels per electromyographic channel. The first synergy channel is obtained by amplitude demodulation of the electromyosignal, and the second - by its frequency demodulation. As a result, we obtain two muscle fatigue classifiers, the solutions of which are integrated by the aggregator.

Results. Experimental studies of the dependence of the electromyosignal on the magnitude of muscle effort and its duration were carried out, which showed that the relative change in the average RMS index under static load can serve as an objective indicator of the degree of muscle fatigue.

Conclusion. The developed method makes it possible to control the mechanical moments on the servomotors of a robotic device adequately to the test muscle load and the functional state of the user's muscles. The method allows for individual adjustment of the neural network classifier block and the fuzzy inference block with subsequent aggregation of their solutions and thus optimize the combined operation mode of the robotic device.

Keywords: probability of making the right decision; diagnostics; reliability of control; information description; quantitative parameters; error of the first and second kind; completeness of control; complex technical object; technical condition; expert assessments of qualitative signs; efficiency.

Funding: The research was carried out within the framework of the implementation of the development program of the Southwest State University of the strategic academic leadership program "Priority-2030".

Conflict of interest: The authors declares no conflict of interest related to the publication of this article.

For citation: Kuzmin A. A., Tomakova R. A., Petrunina E. V., Ermakov D. A., Kadyrova S. Hybrid Method for Controlling Muscle Fatigue in the Robotic System. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2023; 13(3): 64–81. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-64-81>.

Received 11.07.2023

Accepted 10.08.2023

Published 29.09.2023

Введение

В последние годы в робототехнической технике все шире используются устройства, выполняющие функции ассистента при выполнении оператором тяжелой физической работы или нагрузочных пробах при прохождении пациентом курса реабилитации [1; 2; 3; 4]. Как в том, так и другом случае робототехническому устройству необходимо оценить размеры физической помощи, необходимой оператору для выполнения заданного физического упражнения. Если на робототехническое устройство перекладывается вся физическая нагрузка пользователя, то оценить размер помощи не представляет труда, для этого необходимо измерить моменты на соответствующих серводвигателях. Однако в ряде случаев в процесс выполнения работы необходимо задействовать оператора, поделив выполняемую физическую работу между пользователем и

робототехническим устройством в некоторой пропорции [5; 6; 7; 8]. Для вычисления этого соотношения необходима информация как о физических возможностях оператора, так и о его функциональном состоянии, которую в физиологических и клинических исследованиях получают посредством дешифрации поверхностной электромиограммы¹ (пЭМГ) или/и электроэнцефалограммы [6; 9; 10; 11].

Мышцы человека даже при внешней помощи могут утомиться, и работоспособность человека или его физические возможности при этом значительно снизятся. Механизмы развития этого процесса зависят от индивидуальных особенностей человека, от характера его деятельности, уровня профессиональной и физической подготовки. Регуляция в таких случаях осуществляется как нервным, так и гуморальным путем. Вопрос о роли гуморальных и периферических

¹ Трифонов А. А. Биотехническая система нейрофизиологической реабилитации с робототехническим устройством, управля-

мым посредством дешифрации электромиосигналов: дис. ... канд. техн. наук, Курск, 2021. 150 с.

изменений в развитии утомления при работе различных групп мышц является дискуссионным. Таким образом, информация об утомлении мышц может быть полезна для улучшения управления робототехническим устройством, а также для обеспечения безопасности пациента во время реабилитации или снижения нагрузки на мышцы оператора при подъеме тяжелых предметов [11; 12; 13; 14].

Материалы и методы

В представленном методе оценки мышечной усталости, а следовательно, и

для коррекции экзогенного момента используется пЭМГ. Метод основан на анализе двух паттернов мышечной синергии и передачи результатов этого анализа в процессор робототехнического устройства [3; 15; 16]. В качестве исходной информации о мышечном утомлении используются показатели синхронности двух паттернов мышечной синергии, из которых формируются два показателя синхронности – $Z1$ и $Z2$. Структурная схема их формирования представлена ниже (рис. 1).

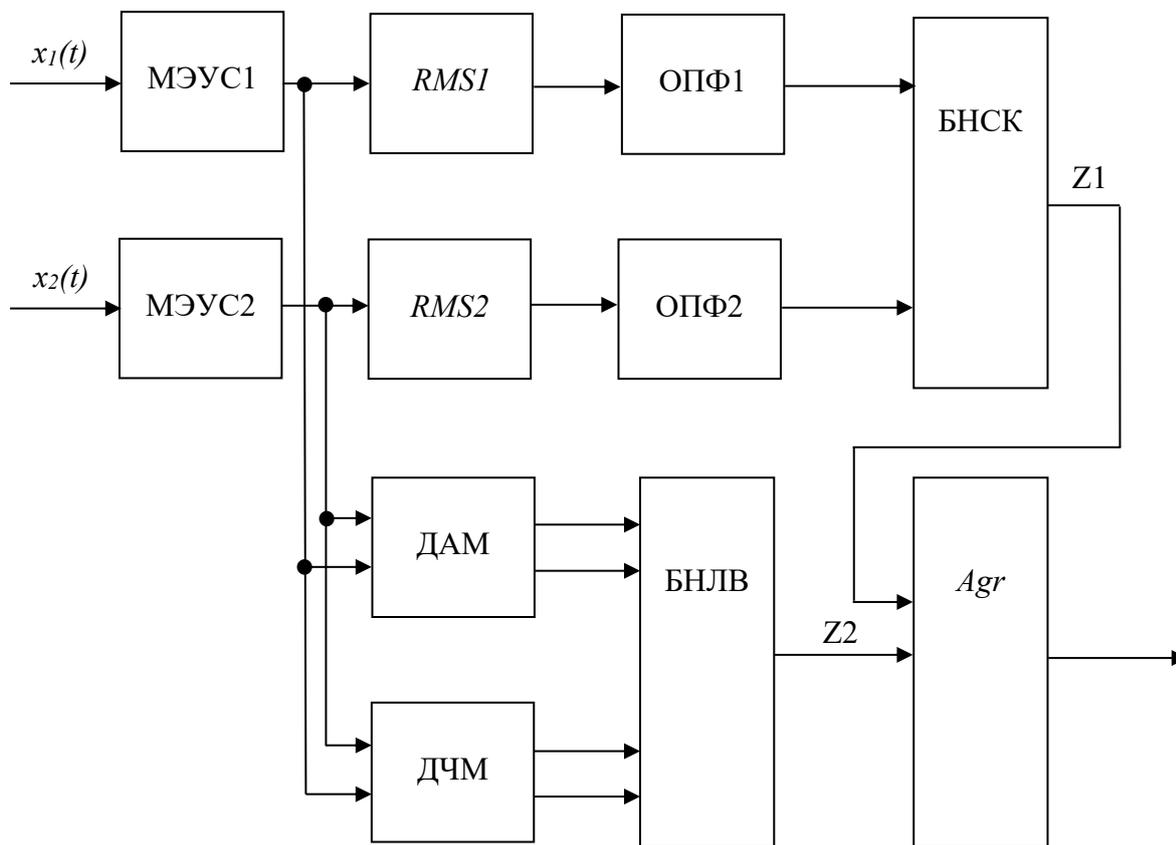


Рис. 1. Структурная схема формирования показателей синхронности паттернов пЭМГ

Fig. 1. Block diagram of the formation of indicators of synchrony of sEMG patterns

Электроды миоэлектронных устройств считывания (МЭУС) устанавливаются на мышцы-агонисты и мышцы-синергисты,

или на мышцы-антагонисты и мышцы-синергисты. В результате получаем два паттерна мышечной синергии – $x_1(t)$ и $x_2(t)$.

Паттерны анализируются, и результат их анализа используется бортовым процессором робототехнического устройства для коррекции экзогенного момента. С этой целью используется не менее двух МЭУС. Сигналы в двух каналах пЭМГ усиливаются усилителями биопотенциалов МЭУС [9; 10; 17; 18].

Для формирования показателя синхронности $Z1$ отчеты пЭМГ $x_1(t)$ и $x_2(t)$

преобразуются в отчеты RMS по формуле

$$RMS[m] = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=m-n}^m x_k^2}, \quad (1)$$

где n – число дискретных отсчетов x_k пЭМГ, которые накапливаются в микроконтроллере до текущего отсчета m .

Рассмотрим пример установки шести электродов для формирования двух паттернов – $x_1(t)$ и $x_2(t)$ (рис. 2).

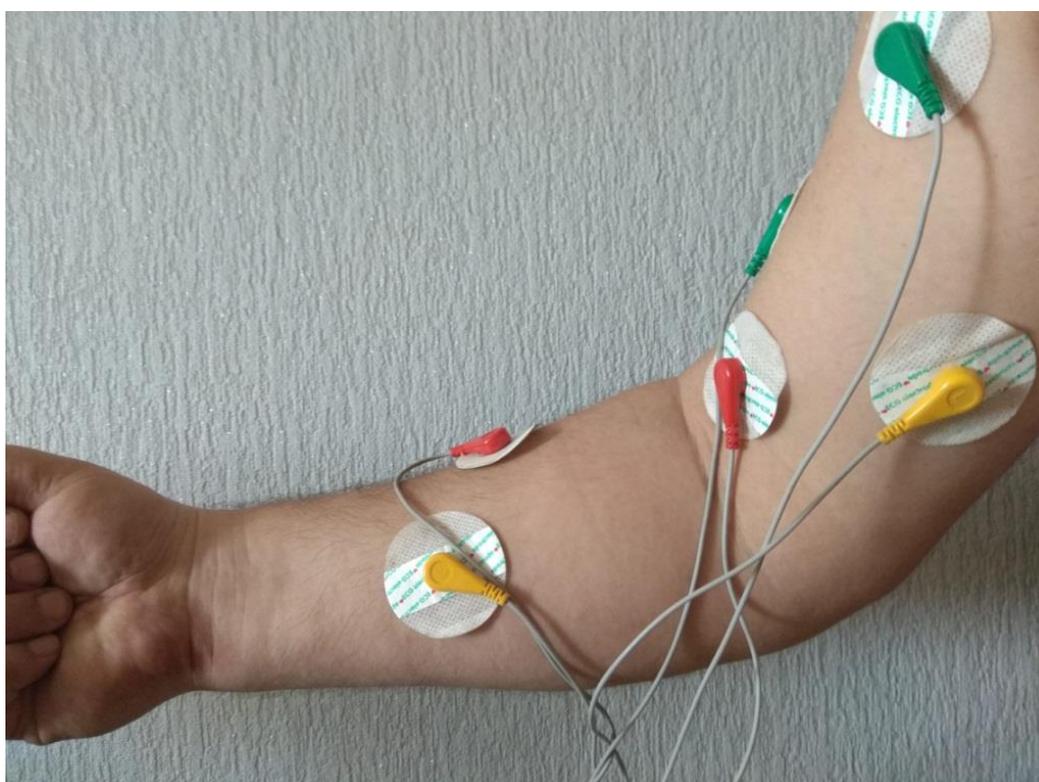


Рис. 2. Фотография расположения электродов на двуглавой мышце плеча и на плечелучевой мышце для организации двухканальной записи пЭМГ

Fig. 2. Photograph of the location of the electrodes on the biceps muscle of the shoulder and on the brachioradialis muscle for organizing a two-channel sEMG recording.

Для получения исходных данных для формирования дескрипторов в блоке нейросетевого классификатора (БНСК) используются спектральные коэффициенты RMS , вычисляемые в модулях оконного преобразования Фурье (ОПФ).

Для определения показателя синхронности и на его основе дескрипторов нейронной сети БНСК используется взаимный спектр RMS в двух каналах пЭМГ, определяемый по формуле

$$W_{x_1, x_2} = \frac{1}{N \cdot \Delta t} RMS1(f) \cdot RMS2^*(f), \quad (2)$$

где N – число отсчетов в каналах пЭМГ при дискретизации сигналов $x_1(t)$ и $x_2(t)$; Δt – шаг дискретизации пЭМГ, с;

$$RMS1(f) = \Delta t \cdot \sum_{n=0}^{N-1} RMS1[n] \times \exp(-j \cdot 2 \cdot \pi f \cdot n \cdot \Delta t);$$

$$RMS2(f) = \Delta t \cdot \sum_{n=0}^{N-1} RMS2[n] \times \exp(-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot n \cdot \Delta t).$$

Для формирования показателя Z2 используется блок нечеткого логического вывода (БНЧВ), структурно-функциональная схема которого представ-

лена ниже (рис. 3). На его входе образуются два подканала пЭМГ. Сигнал в первом подканале получают в результате амплитудного детектирования пЭМГ в блоке ДАМ ($x_{a1}[t_i]$ и $x_{a2}[t_i]$), а сигнал во втором подканале – в результате частотного детектирования пЭМГ в блоке ДЧМ ($x_{u1}[t_i]$ и $x_{u2}[t_i]$). В результате амплитудного и частотного детектирования канальных пЭМГ образуются четыре подканала, сигналы которых передаются в бортовой процессор робототехнического устройства, который осуществляет их программную обработку в БНЛВ.

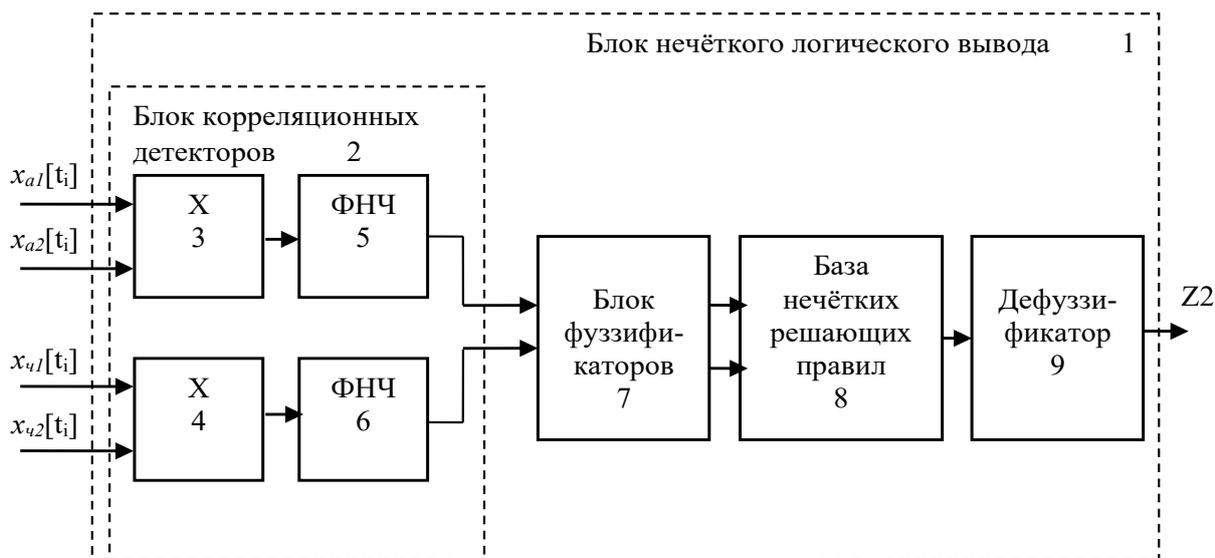


Рис. 3. Структурная схема блока нечёткого логического вывода

Fig. 3. Structural diagram of the fuzzy inference block

Цифровые сигналы $x_{a1}[t_i]$ и $x_{a2}[t_i]$ с подканалов ДАМ и цифровые сигналы $x_{u1}[t_i]$ и $x_{u2}[t_i]$ с подканалов ДЧМ поступают на соответствующие входы блока корреляционных детекторов 2 БНЛВ 1, включающего умножители 3 и 4 и фильтры нижних частот 5 и 6. В результате на

выходе блока корреляционных детекторов формируются два паттерна сигналов синергии:

$$y_1[t_n] = \frac{1}{N} \sum_{i=n}^{n+N-1} x_{a1}[t_i] \cdot x_{a2}[t_i], \quad (3)$$

$$y_2[t_n] = \frac{1}{N} \sum_{i=n}^{n+N-1} x_{u1}[t_i] \cdot x_{u2}[t_i], \quad (4)$$

где N – ширина окна ФНЧ; n – текущий отсчет времени; i – апостериорные отсчеты времени.

Сигналы (3) и (4) поступают на вход блоков фуззификаторов, где они преоб-

разуются, согласно нелинейным преобразованиям, представленным на рисунке 4. Число нелинейных преобразований в блоке фуззификаторов определяется числом термов для паттернов синергии [19; 20].

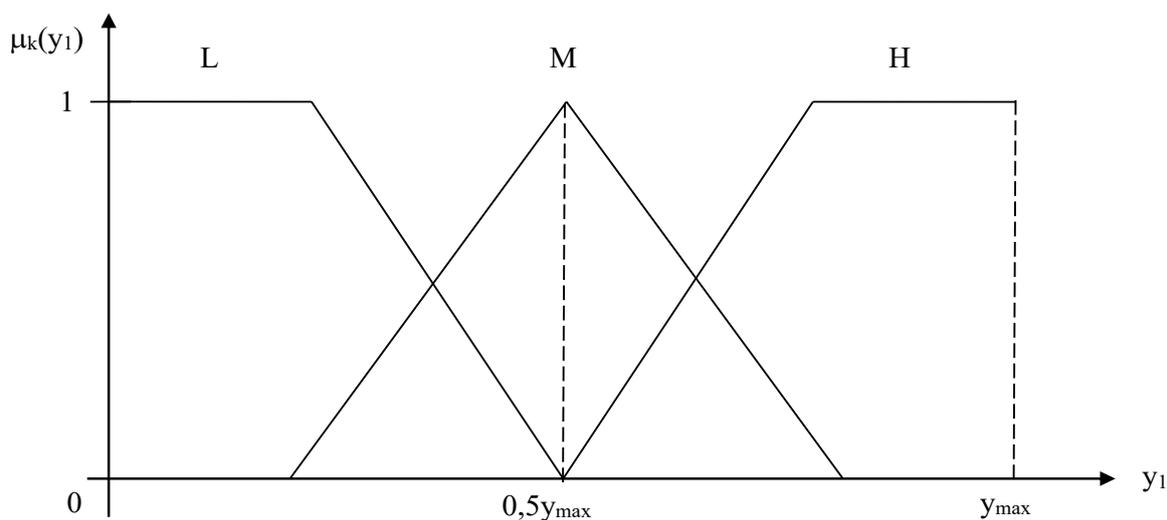


Рис. 4. Функции принадлежности для первого паттерна синергии

Fig. 4. Membership functions for the first synergy pattern

На рисунке 4 представлены функции принадлежности для трех термов паттернов синергии: L, M и H, что соответствует низкому, среднему и высокому уровням корреляции синергистов. Для второго синергетического паттерна строятся аналогичные функции принадлежности.

Выходы фуззификаторов $\mu(y_1)$ и $\mu(y_2)$, полученные согласно нелинейным преобразованиям (рис. 4), поступают в базу нечетких решающих правил (БНРП). В БНРП они выступают как предпосылки (антецеденты). Предпосылки в БНРП объединяются по нечетким функциям. При наличии трех тер-

мов и двух лингвистических переменных следствия (консеквенты) в решающих правилах могут быть сформированы посредством таблицы, строки и столбцы которой соответствуют используемым термам, а в ячейках таблицы записывается терм выходной переменной Z. Если положить, что у выходной лингвистической переменной тоже три терма, то получим таблицу, представленную ниже (рис. 5).

Нумерации столбцов и строк этой таблицы формируют антецеденты решающих правил, а в ячейках эксперты формируют соответствующие консеквенты. Для вычисления четких значений пере-

менной Z_2 , которые поступают в бортовой процессор экзоскелета (рис. 3), необходима дефuzziфикация нечетких термов в соответствии с функциями принадлежности для термов этой перемен-

ной. Эти значения определяют синергетику мышц оператора экзоскелета. На основе ее анализа бортовой процессор управляет серводвигателями робототехнического устройства.

y_2	L	M	H	
y_1				
L	H	M	M	
M	H	M	M	$\mu(Z)$
H	M	L	L	

Рис. 5. Таблица консеквентов решающих правил для блока нечеткого логического вывода

Fig. 5. Table of consequential decision rules for a block of fuzzy inference

Для агрегации решений БНСК и БНЛВ использовались агрегаторы, методы, модели и алгоритмы, построения которых представлены в работах [14; 17; 18]. При низком или среднем уровне синергии необходимо сформировать экзогенный момент на соответствующий сустав, синергисты которого подключены к соответствующим каналам ЭМГ.

Результаты и их обсуждение

Так как пЭМГ отражает реакцию мышцы на предъявление нагрузки определенного уровня, то для контроля амплитуды и формы сил, действующих на исследуемую мышцу, а следовательно,

для формирования дескрипторов для первого канала Z_1 и для формирования базы нечетких импликаций для второго канала Z_2 необходимо экспериментальным путем определить соответствие между приложенной нагрузкой на мышцы синергисты и параметрами пЭМГ. Для этого нагрузку необходимо прикладывать через измерительный датчик, закрепленный на специальном держателе, вместе они образуют подсистему контроля амплитуды и формы нагрузки. Это позволит формировать обучающие выборки для нейронных сетей БНСК, а также корректировать функции принадлежности в БНЛВ.

Процесс формирования стимулирующего пЭМГ усилия иллюстрирует кинематическая схема, представленная на рисунке 6. Кинематическое звено 1 (модель конечности) жестко связана с консолью 2, в середине которой закреплен тензодатчик 3. К свободному концу консоли 3 прикреплена тарированная пружина 4, на которую подвешивается груз 5.

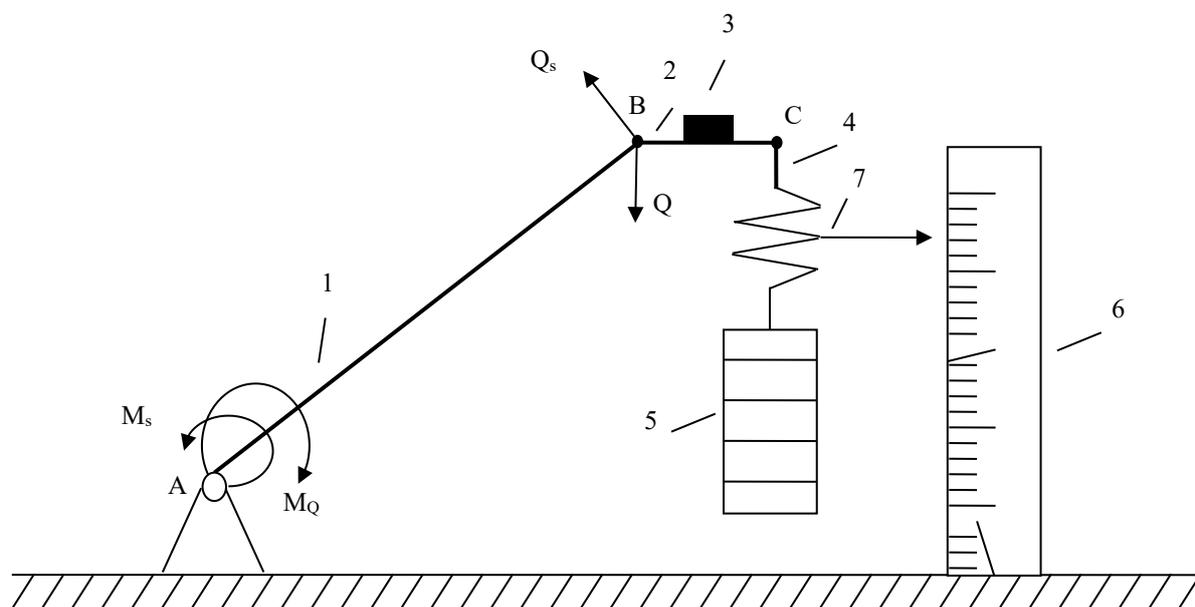


Рис. 6. Кинематическая модель тарирования пЭМГ по мышечной нагрузке

Fig. 6. Kinematic model of taring sEMG according to muscle load

Сила Q уравновешивает эталонную нагрузку, которой соответствует момент

$$M_Q = Q \cdot AB \cdot \sin \varphi, \quad (5)$$

где $Q \cdot \sin \varphi$ – проекция Q на направление, перпендикулярное AB .

Момент M_s (рис. 6) – это сумма моментов мышц и экзогенных моментов, получаемых посредством серводвигателей робототехнического устройства. В процессе экспериментальных исследований были изучены зависимости пара-

5. Посредством шкалы 6 и указателя 7 величина груза может быть измерена. Учитывая, что одновременно ведется мониторинг пЭМГ, путем ее дешифрации может быть определена величина нагрузки, что позволяет вычислить соответствующую функцию преобразования и определить силомоментные характеристики на соответствующей конечности.

метров пЭМГ, используемых при построении модулей принятия решений, от величины статических мышечных усилий и их длительности. Как было показано ранее, пЭМГ отражает электрическую активность мышц, а амплитуда такого показателя, как (1), определяет стимулирование мышц для выполнения определенной работы.

В эксперименте для исследования характера этой зависимости пЭМГ снималась в зоне предплечья, где находятся

такие мышцы, как поверхностный сгибатель пальцев, длинная ладонная мышца, лучевой сгибатель запястья и др. Одной из главных функций этих мышц является сгибание кисти. Для контроля величины нагрузки на кисть использовался динамометр электронного медицинского типа ДМЭР. Испытуемому ставилась задача с такой силой сжимать

динамометр, чтобы на экране отображалось определенное значение: 5, 10, 15 и т. д. дан ($\cdot 10$ Ньютон). Таким образом, замыкалась биологическая обратная связь (БОС), которая позволяет связать регистрируемый параметр RMS с усилием динамометра. Рассмотрим общий вид кисти с динамометром и присоединенными электродами (рис. 7).

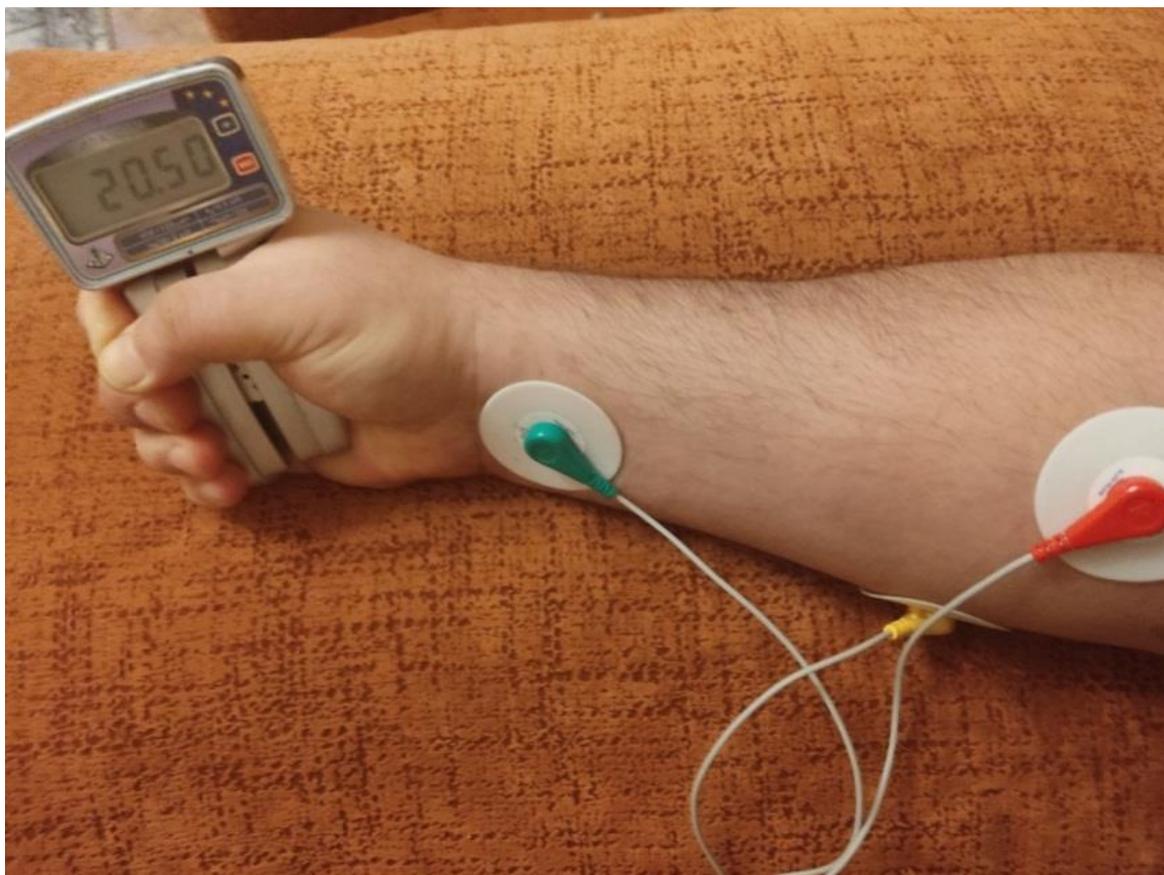


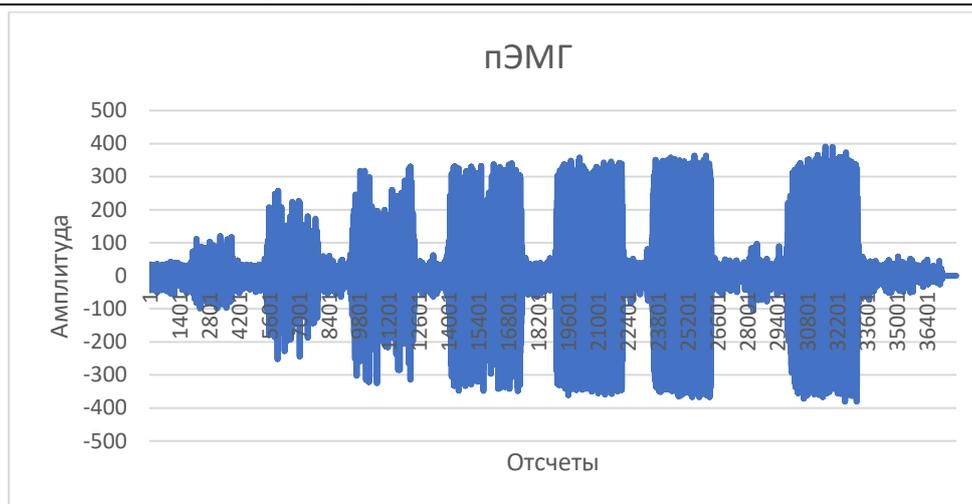
Рис. 7. Общий вид кисти с динамометром и присоединенными электродами

Fig. 7. General view of the hand with a dynamometer and attached electrodes

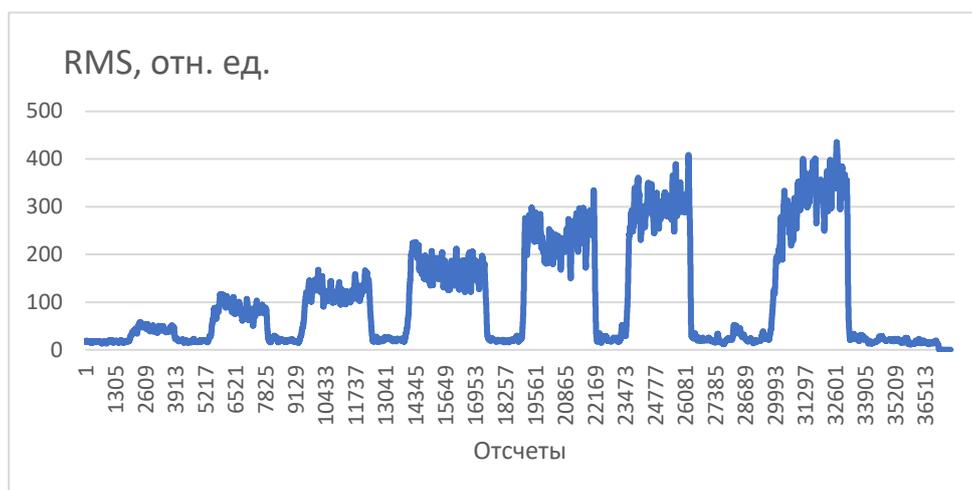
Для начала испытуемому предлагалось повышать показания динамометра «лесенкой»: сначала необходимо было установить на определенное время (около 4-5 секунд) значение в 5 дан (50 Н), затем несколько секунд отдых,

затем в 10 дан, потом отдых, потом в 15 и т. д. до 35 дан.

Результаты зарегистрированной пЭМГ и вычисленной RMS при такой нагрузке приведены ниже (рис. 8).



а



б

Рис. 8. Результаты зарегистрированной пЭМГ (а) и соответствующей RMS (б) при ступенчатой нагрузке в 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35·10Н. Частота дискретизации отсчетов 600 Гц

Fig. 8. The results of the registered sEMG (а) and the corresponding RMS (б) at a stepped load of 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35·10N. Sample rate 600 Hz

Анализ рисунка 8 свидетельствует о том, что значения RMS хоть и характеризуются достаточно большим разбросом (величина которого напрямую зависит от аперттуры окна, в котором вычисляется RMS), но в среднем достаточно хорошо отражают величину усилия, прикладываемую к мышцам, для формирования определенной силы сжатия кисти.

Для исследования возможности применения RMS в качестве одного из дескрипторов для определения степени утомления мышц был проведен эксперимент, когда испытуемому предлагали сжимать динамометр с достаточно большим усилием продолжительное время. Рассмотрим типичный пример из серии экспериментов (рис. 9).

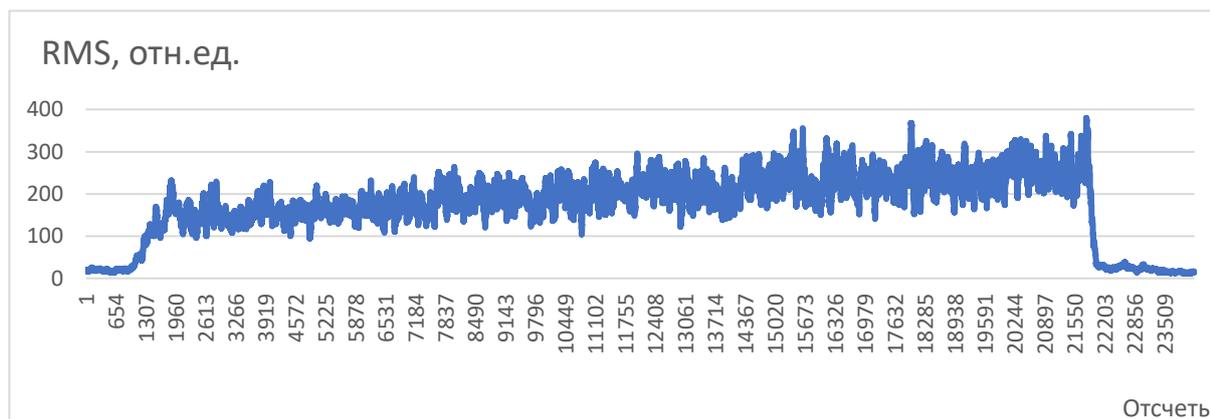


Рис. 9. Изменения RMS при длительной нагрузке в 200 Н. Частота дискретизации отсчетов 600 Гц

Fig. 9. Changes in RMS at a continuous load of 200 N. Sampling frequency of samples 600 Hz

В этом эксперименте испытуемый старался сжимать динамометр с силой 20 дан (200 Н) в течение около 40 секунд. В начале процесса сжатия кисти видны всплески, вызванные перерегулированием и излишним сжатием средства измерения. Такую особенность формирования усилия в начале нагрузки (перерегулирование или недорегулирование) можно заметить и на рисунке 8. Но в результате БОС параметр RMS стабилизируется около определенной величины, и с течением времени эта величина начинает заметно дрейфовать в сторону увеличения. Заканчивается эксперимент усталостью мышц и дальнейшей невозможностью выдерживать заданную нагрузку. Перед окончанием снятия усилия регистрируется максимальный всплеск RMS, который отражает максимальные усилия, прикладываемые испытуемым для поддержания необходимой силы сжатия динамометра.

Таким образом, относительное изменение усредненного показателя RMS при статичной нагрузке может служить

объективным показателем степени усталости мышцы.

Выводы

Разработан метод оценки мышечной усталости, основанный на гибридном подходе формирования модуля принятия решений, заключающийся в использовании двух классификаторов синхронности электромиосигналов пациента с мышц-синергистов, принимающих участие в процедуре выполнения физического упражнения. Первый классификатор является обучаемым классификатором, и для его обучения используется набор данных, полученный в результате тарирования пЭМГ. Второй классификатор мышечного утомления построен на основе нечеткой логики принятия решений и использует два паттерна мышечной синергии, которые формируются посредством образования в каждом канале электромиосигнала частотного и амплитудного подканалов. В качестве информативных признаков во втором класси-

фикаторе используются показатели корреляции сигналов в частотных подканалах и показатели корреляции сигналов в амплитудных подканалах. По результатам классификации полученных паттернов синергии принимается решение о включении соответствующих серводвигателей робототехнического устройства с целью оказания помощи пользователю при выполнении физических упражнений, в частности, при использовании промышленных и медицинских экзоскелетов.

Разработанный метод позволяет управлять механическими моментами на серводвигателях робототехнического устройства адекватно тестовой мышечной нагрузки и функциональному состоянию мышц оператора. Метод позволяет осуществлять индивидуальную настройку блока нейросетевого классификатора и блока нечеткого логического вывода с последующей агрегацией их решений и таким образом оптимизировать комбинированный режим работы робототехнического устройства.

Список литературы

1. Подъем груза в экзоскелете с гравитационной компенсацией / С. Ф. Яцун, В. М. Антипов, А. Е. Карлов, Х. Х. М. Аль Манджи // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23, № 2. С. 8–17. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-2-8-17>.
2. Human-Machine Interface of Rehabilitation Exoskeletons with Redundant Electromyographic Channels / A. Trifonov, S. Filist, S. Degtyarev, V. Serebrovsky, O. Shatalova // Zavalishin's Readings. Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics. Ufa, 2020. P. 237–247.
3. Петрунина Е. В., Томакова Р. А., Филист С. А. Гибридные методы и модели для биотехнических систем с адаптивным управлением диагностическими и реабилитационными процессами / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2022. 249 с.
4. ЭМГ-анализ утомления разных групп инспираторных мышц человека при тяжелых физических нагрузках / М. О. Сегизбаева, Н. П. Александрова, Н. Н. Тимофеев, Е. Н. Курьянович // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 6. С. 898–902.
5. Метод и алгоритмы локализации кластеров адаптационного потенциала в биотехнических системах реабилитации лиц с ограниченными возможностями здоровья / А. В. Бутусов, А. В. Киселев, Е. В. Петрунина, А. Х. А. Хайдер [и др.] // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2023. Т. 11, № 2. С. 1–20. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.41.2.012>.
6. Яцун С. Ф., Антипов В. М., Карлов А. Е. Моделирование подъема груза с помощью промышленного экзоскелета // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 6 (81). С. 14–20.

7. Classification of the Functional State of the Respiratory System Based on the Spectral Analysis of the Electrocardio Signal / М. В. Myasnyankin, А. А. Kuzmin, S. А. Filist, L. V. Shulga // Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems: 2021 International Scientific and Practical Conference. Moscow, 2021. Vol. 2843. P. 10.

8. Пат. 2766764 Российская Федерация, МПК А61В 5/313. Способ оценки мышечной усталости на основе контроля паттернов синергии и устройство для его осуществления / Филист С. А., Трифонов А. А., Кузьмин А. А., Сафронов Р. И., Петрунина Е. В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет». Заявл. 04.03.21; опубл. 15.03.22.

9. Кодовые образы сигналов электроэнцефалограммы для управления робототехническими устройствами посредством интерфейса «мозг-компьютер» / С. А. Филист, Е. В. Петрунина, А. А. Трифонов, А. В. Серебровский // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. Научный журнал. 2019. Т. 7, № 1. С. 67–79. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.24.1.025>.

10. Двухуровневая нейросетевая модель дешифратора электромиосигнала в системе управления вертикализацией экзоскелета / А. А. Трифонов, С. А. Филист, А. А. Кузьмин, В. В. Жилин, Е. В. Петрунина // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2020. № 4 (52). С. 99–111.

11. Trifonov A. A., Kuzmin A. A., Filist S. A. Biotechnical System for Control to the Exoskeleton Limb Based on Surface Myosignals for Rehabilitation Complexes // IEEE 14th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). Tashkent, Uzbekistan, 2020. <https://doi.org/10.1109/AICT50176.2020.9368588>.

12. Биотехническая система с виртуальной реальностью в реабилитационных комплексах с искусственными обратными связями / А. А. Трифонов, Е. В. Петрунина, С. А. Филист, А. А. Кузьмин, В. В. Жилин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 4. С. 46–66.

13. Myasnyankin M. B., Kuzmin A. A., Filist S. A. Neural network classifiers with descriptors obtained on the basis of analysis of the system rhythms in intellectual prediction systems for non-hospital pneumonia // Journal of Physics: Conference Series. 2021. N 1801. P. 012046. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1801/1/012046>.

14. Коряк Ю. А. Нейромышечные изменения под влиянием семисуточной механической разгрузки мышечного аппарата человека // Фундаментальные исследования. 2008. № 9. С. 8–21.

15. Филист С. А., Томакова Р. А., Яа Зар До. Универсальные сетевые модели для задач классификации биомедицинских данных // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 4-2(43). С. 44–50.

16. Аль-Бареда А. Я. С., Томакова Р. А., Брежнева А. Н. Алгоритмы синтеза оптимального управления в биотехнических системах реабилитационного типа на основе технологии нейронных сетей // Системный анализ и управление в биотехнических системах. 2018. Т. 17, № 3. С. 718–725.

17. Multimodal neural network classifier of the functional state of the respiratory system / S. A. Filist, M. B. Myasnyankin, R. I. Safronov, A. A. Kuzmin // Journal of Physics: Conference Series. 2021. N 2094. P. 03264. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2094/3/032064>.

18. Biotechnical neural network system for predicting cardiovascular health state using processing of bio-signals / S. Filist, Riad Taha Al-Kasasbeh, O. V. Shatalova, Mohammad Hjouj Btoush, Manafaddin Namazov, Ashraf Adel Shaqadan, Mahdi Alshamasin, N. Korenevskiy, Saleh Aloqeili, M. B. Myasnyankin // International Journal of Medical Engineering and Informatics. 2021. N 1(1). P. 1. <https://doi.org/10.1504/IJMEI.2022.10047451>.

19. Томакова Р. А., Филист С. А., Насер А. А. Нечеткие нейросетевые технологии для выделения сегментов с патологическими образованиями и морфологическими структурами на медицинских изображениях // Биомедицинская радиоэлектроника. 2012. № 4. С. 43–49.

20. Метод классификации рентгенограмм на основе использования глобальной информации / Р. А. Томакова, М. В. Томаков, И. В. Дураков, В. В. Жилин // Биомедицинская радиоэлектроника. 2016. № 94 (11). С. 45–51.

References

1. Yatsun S. F., Antipov V. M., Karlov A. E., Al Manji H. H. M. Pod'em gruzha v ekzoskelete s gravitacionnoj kompensaciej [Load Lifting in the Exoskeleton with Gravity Compensation]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2019, vol. 23, no. 2, pp. 8–17. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-2-8-17>

2. Trifonov A., Filist S., Degtyarev S., Serebrovsky V., Shatalova O. Human-Machine Interface of Rehabilitation Exoskeletons with Redundant Electromyographic Channels. Zavalishin's Readings. Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics. Ufa, 2020, pp. 237–247.

3. Petrunina E. V., Tomakova R. A., Filist S. A. Gibridnye metody i modeli dlya biotekhnicheskikh sistem s adaptivnym upravleniem diagnosticheskimi i reabilitacionnymi processami [Hybrid methods and models for biotechnical systems with adaptive control of diagnostic and rehabilitation processes]. Kursk, Southwest State University Publ., 2022. 249 p.

4. Segizbaeva M. O., Alexandrova N. P., Timofeev N. N., Kuryanovich E. N. EMG-analiz utomleniya raznyh grupp inspiratornyh myshc cheloveka pri tyazhelyh fizicheskikh nagruzkah [EMG-analysis of fatigue of different groups of inspiratory muscles of a person under heavy

physical exertion]. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij = International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2016, no. 6, pp. 898–902.

5. Butusov A. V., Kiselev A. V., Petrunina E. V., Haider A. H. A., eds. Metod i algoritmy lokalizacii klasterov adaptacionnogo potenciala v biotekhnicheskikh sistemah rehabilitacii lic s ogranicennymi vozmozhnostyami zdorov'ya [Method and algorithms of localization of clusters of adaptive potential in biotechnical systems of rehabilitation of persons with disabilities]. *Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technologies*, 2023, vol. 11, no. 2, pp. 1–20. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.41.2.012>

6. Yatsun S. F., Antipov V. M., Karlov A. E. Modelirovanie pod"ema gruzha s pomoshch'yu promyshlennogo ekzoskeleta [Modeling of cargo lifting using an industrial exoskeleton]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2018, vol. 22, no. 6 (81), pp. 14–20.

7. Myasnyankin M. B., Kuzmin A. A., Filist S. A., Shulga L. V. Classification of the Functional State of the Respiratory System Based on the Spectral Analysis of the Electrocardio Signal. *Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems: 2021 International Scientific and Practical Conference. Moscow, 2021*, vol. 2843, p. 10.

8. Filist S. A., Trifonov A. A., Kuzmin A. A., Safronov R. I., Petrunina E. V. Sposob ocenki myshechnoj ustalosti na osnove kontrolya patternov sinergii i ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya [A method for assessing muscle fatigue based on the control of synergy patterns and a device for its implementation]. Patent RF, no. 2766764, 2022.

9. Filist S. A., Petrunina E. V., Trifonov A. A., Serebrovsky A. V. Kodovye obrazy signalov elektroencefalogrammy dlya upravleniya roboto-tekhnicheskimi ustrojstvami posredstvom interfejsa "mozgkomp'yuter" [Code images of electroencephalogram signals for controlling robotic-technical devices through the "brain-computer interface"]. *Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tekhnologii. Nauchnyj zhurnal = Modeling, Optimization and Information Technologies. Scientific Journal*, 2019, vol. 7, no. 1, pp. 67–79. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.24.1.025>

10. Trifonov A. A., Filist S. A., Kuzmin A. A., Zhilin V. V., Petrunina E. V. Dvuhurovnevaya nejrosetevaya model' deshifatora elektromiosignala v sisteme upravleniya vertikalizaciej ekzoskeleta [A two-level neural network model of an electromyosignal decoder in an exoskeleton verticalization control system]. *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*, 2020, no. 4 (52), pp. 99–111.

11. Trifonov A. A., Kuzmin A. A., Filist S. A. Biotechnical System for Control to the Exoskeleton Limb Based on Surface Myosignals for Rehabilitation Complexes. *IEEE 14th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). Tashkent, Uzbekistan, 2020*. <https://doi.org/10.1109/AICT50176.2020.9368588>

12. Trifonov A. A., Petrunina E. V., Filist S. A., Kuzmin A. A., Zhilin V. V. Biotekhnicheskaya sistema s virtual'noj real'nost'yu v reabilitacionnyh kompleksah s iskusstvennymi obratnymi svyazyami [Biotechnical system with virtual reality in rehabilitation complexes with artificial feedback]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2019, vol. 9, no. 4, pp. 46–66.

13. Myasnyankin M. B., Kuzmin A. A., Filist S. A. Neural network classifiers with descriptors obtained on the basis of analysis of the system rhythms in intellectual prediction systems for non-hospital pneumonia. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, no. 1801, p. 012046. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1801/1/012046>

14. Koryak Yu. A. Nejromyshechnye izmeneniya pod vliyaniem semisutochnoj mekhanicheskoj razgruzki myshechnogo apparata cheloveka [Neuromuscular changes under the influence of seven-day mechanical unloading of the human muscular apparatus]. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*, 2008, no. 9, pp. 8–21.

15. Filist S. A., Tomakova R. A., Yaa Zar Do. Universal'nye setevye modeli dlya zadach klassifikacii biomedicinskih dannyh [Universal network models for classification tasks of biomedical data]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 4-2(43), pp. 44–50.

16. Al-Bareda A. Ya. S., Tomakova R. A., Brezhneva A. N. Algoritmy sinteza optimal'nogo upravleniya v biotekhnicheskikh sistemah reabilitacionnogo tipa na os-nove tekhnologii nejronnyh setej [Algorithms for the synthesis of optimal control in biotechnical rehabilitation-type systems based on neural network technology]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biotekhnicheskikh sistemah = System Analysis and Management in Biotechnical Systems*, 2018, vol. 17, no. 3, pp. 718–725.

17. Filist S. A., Myasnyankin M. B., Safronov R. I., Kuzmin A. A. Multimodal neural network classifier of the functional state of the respiratory system. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, no. 2094, p. 03264. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2094/3/032064>

18. Filist S., Riad Taha Al-Kasasbeh, Shatalova O. V., Mohammad Hjoug Btoush, Manafaddin Namazov, Ashraf Adel Shaqadan, Mahdi Alshamasin, Korenevskiy N., Saleh Aloqeili, Myasnyankin M. B. Biotechnical neural network system for predicting cardiovascular health state using processing of bio-signals. *International Journal of Medical Engineering and Informatics*, 2021, no. 1(1), p. 1. <https://doi.org/10.1504/IJMEI.2022.10047451>

19. Tomakova R. A., Filist S. A., Nasser A. A. Nechetkie nejrosetevye tekhnologii dlya vydeleniya segmentov s patologicheskimi obrazovaniyami i morfologicheskimi strukturami na medicinskih izobrazheniyah [Fuzzy neural network technologies for the allocation of segments with pathological formations and morphological structures in medical images]. *Biomedicinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2012, no. 4, pp. 43–49.

20. Tomakova R. A., Tomakov M. V., Durakov I. V., Zhilin V. V. Metod klassifikacii rentgenogramm na osnove ispol'zovaniya global'noj informacii [Method of classification of radiographs based on the use of global information]. *Biomedicinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2016, no. 94 (11), pp. 45–51.

Информация об авторах / Information about the Authors

Кузьмин Александр Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: Ku3bmin@gmail.com

Alexander A. Kuzmin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Computer Science, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: Ku3bmin@gmail.com

Томакова Римма Александровна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация e-mail: rtomakova@mail.ru, Researcher ID: O-6164-2015, ORCID: 0000-0003-152-4714

Rimma A. Tomakova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: rtomakova@mail.ru, Researcher ID: O-6164-2015, ORCID: 0000-0003-152-4714

Петрунина Елена Валерьевна, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой SMART-технологий, Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: isu@mospolytech.ru

Elena V. Petrunina, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of SMART Technologies, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation, e-mail: isu@mospolytech.ru

Ермаков Дмитрий Андреевич, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: dmitriyermakov98@yandex.ru

Dmitry A. Ermakov, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: dmitriyermakov98@yandex.r

Кадырова София, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: SFilist@gmail.com

Sofia Kadyrova, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: SFilist@gmail.com