

УДК 004.89

DOI: [10.26102/2310-6018/2022.36.1.023](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2022.36.1.023)

Адаптивное управление магнитотерапией с использованием биотехнических обратных связей по импедансу биологически активных точек в физиотерапии ишемических больных

А.В. Мирошников¹, Е.В. Петрунина², А.В. Павленко¹, З.У. Протасова¹, М.Т. Шехине³,
Л.В. Шульга¹

¹Юго-Западный государственный университет, Курск,
Российская Федерация

²Московский государственный гуманитарно-экономический университет,
Москва, Российская Федерация

³Курский государственный медицинский университет,
Курск, Российская Федерация
SFilist@gmail.com✉

Резюме: В статье исследуется биотехническая система реабилитации и лечения ишемических больных. Представлена обобщенная структурная схема реабилитации пациентов с высоким ишемическим риском посредством воздействия на них магнитными полями с управляемыми биотропными параметрами. Схема позволяет построить модель функционального состояния живой системы и осуществлять адаптивное управление магнитотерапией посредством биотехнических обратных связей по суррогатным маркерам. Разработана биотехническая система магнитотерапии пациентов с ишемической болезнью сердца. В систему введены биотехнические обратные связи, что позволило ей адаптировать программу магнитотерапии к функциональному состоянию пациента и корректировать ее в процессе терапевтического сеанса. Коррекция параметров терапевтического магнитного поля позволило повысить терапевтический эффект физиотерапевтической процедуры, снизить адаптацию и отрицательные реакции организма на магнитотерапию и планировать программы магнитотерапии. Для реализации обратной связи, обеспечивающей адаптацию биотропных параметров магнитного поля к функциональному состоянию пациента, использовались информация о импедансе биологически активных точек и классификаторы ишемического риска, дескрипторы которых определялись на основе этой информации. Представлен алгоритм управления биотропными параметрами магнитного поля посредством мультимодальных классификаторов функционального состояния пациента и модуля нечеткого логического вывода, предназначенного для коррекции биотропных параметров магнитного поля в процессе проведения сеанса магнитотерапии. В клинических условиях было показано, что применение адаптивной магнитотерапии является эффективным методом лечения больных стенокардией напряжения II (85 %) и III (77 %) функциональных классов, что на 14 % и 15 % превышает соответствующие результаты в контрольной группе.

Ключевые слова: ишемический риск, адаптивная магнитотерапия, биотехническая система, биологически активная точка, нейронная сеть, модуль нечеткого управления, база нечетких решающих правил, алгоритм.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90063.

Для цитирования: Мирошников А.В., Петрунина Е.В., Павленко А.В., Протасова З.У., Шехине М.Т., Шульга Л.В. Адаптивное управление магнитотерапией с использованием биотехнических обратных связей по импедансу биологически активных точек в физиотерапии ишемических больных. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2022;10(1). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1134> DOI: 10.26102/2310-6018/2022.36.1.023

Adaptive control of magnetotherapy by means of biotechnical feedback on the impedance of biologically active points in physiotherapy of ischemic patients

A.V. Miroshnikov¹, E.V. Petrunina², A.V. Pavlenko¹, Z.O. Protasova¹, M.T. Shekhine³, L.V. Shulga¹

¹Southwest State University, Kursk, Russian Federation

²Moscow State University for the Humanities and Economics, Moscow, Russian Federation

³Kursk State Medical University, Kursk, Russian Federation

SFilst@gmail.com✉

Abstract: The article examines a biotechnical system of rehabilitation and treatment of ischemic patients. A generalized structural diagram of rehabilitation of patients with high ischemic risk by exposing them to magnetic fields with controlled biotropic parameters is presented. The scheme allows building a model of the living system functional state and implementing adaptive control of magnetotherapy through biotechnical feedback on surrogate markers. A biotechnical system of magnetotherapy for patients with coronary heart disease has been developed. Biotechnical feedback was introduced into the system, which enabled it to adapt the magnetotherapy program to the functional state of the patient and correct it during the therapeutic session. Adjusting the therapeutic magnetic field parameters made it possible to increase the therapeutic effect of the physiotherapeutic procedure, reduce the adaptation and negative reactions of the body to magnetotherapy, and plan magnetotherapy programs. To implement the feedback, which ensures the adaptation of the magnetic field biotropic parameters to the functional state of the patient, we used information about the impedance of biologically active points and ischemic risk classifiers, the descriptors of which were determined on the basis of this information. An algorithm for controlling the biotropic parameters of the magnetic field by means of the functional state multimodal classifiers of the patient and a fuzzy inference module, designed to correct the biotropic parameters of the magnetic field in the course of a magnetic therapy session, is given. In a clinical setting, it was shown that the application of adaptive magnetic therapy is an effective method of treating patients with angina pectoris II and III of functional classes (85% and 77%, respectively), which is 14% and 15% higher than the corresponding results in the control group.

Keywords: ischemic risk, adaptive magnetotherapy, biotechnical system, biologically active point, neural network, fuzzy control module, base of fuzzy decision rules, algorithm.

Acknowledgments: The study was funded by RFBR, project number 20-38-90063.

For citation: Miroshnikov A.V., Petrunina E.V., Pavlenko A.V., Protasova Z.O., Shekhine M.T., Shulga L.V. Adaptive control of magnetotherapy by means of biotechnical feedback on the impedance of biologically active points in physiotherapy of ischemic patients. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2022;10(1). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1134> DOI: 10.26102/2310-6018/2022.36.1.023 (In Russ).

Введение

Воздействие антропогенными магнитными полями (МП) в настоящее время достаточно широко используется в лечебной практике при различных патологических состояниях. МП нашли свое применение и при лечении ишемической болезни сердца (ИБС), в том числе и при реабилитации больных, перенесших инфаркт миокарда (ИМ). Однако к этому методу реабилитации и лечения у медицинского сообщества весьма неоднозначное отношение. Это обусловлено тем, что в большинстве серийно выпускаемых магнитотерапевтических установок отсутствует возможность персонифицированного подбора биотропных параметров МП, а также возможности в режиме онлайн контролировать влияние МП на функциональное состояние пациента [1].

Под термином «биотропные параметры» понимаются физические характеристики антропогенного МП, позволяющие управлять реакциями первичного ответа как отдельных органов, так и целостного организма. Применительно к исследуемой биотехнической системе (БТС) к ним относятся: энергия, индукция, частота индукции МП и экспозиция. От каждого из параметров, а также их сочетания существенно зависит эффективность лечения.

Биологически активным является любое МП, величина которого отличается как в сторону увеличения, так и уменьшения от геомагнитного поля, составляющего десятки мкТл. В серийно выпускаемой аппаратуре, предназначенной для воздействия на биологически активные точки (БАТ), величина индукции МП составляет 100 мТл; для воздействия на локальные участки частей тела человека от 15 до 50 мТл; для воздействия на части тела и всего человека – от 0 до 5 мТл. С увеличением площади воздействия МП интенсивность терапевтического МП снижается.

Таким образом, при любом способе воздействия МП на человека возникает необходимость выбора оптимальных биотропных параметров МП. Для обеспечения этого требования необходимо контролировать текущую реакцию пациента на физиотерапевтическое воздействие, а также динамику его функционального состояния (ФС) в пространстве факторов риска (ФР) его доминирующего заболевания [2, 3, 4, 5, 6]. На Рисунке 1 представлена обобщенная схема реабилитации пациентов с высоким ишемическим риском (ИР) посредством воздействия на них МП с управляемыми биотропными параметрами, которая способна обеспечить как контроль ФР, так и управление биотропными параметрами в зависимости от реакции организма на физиотерапию.

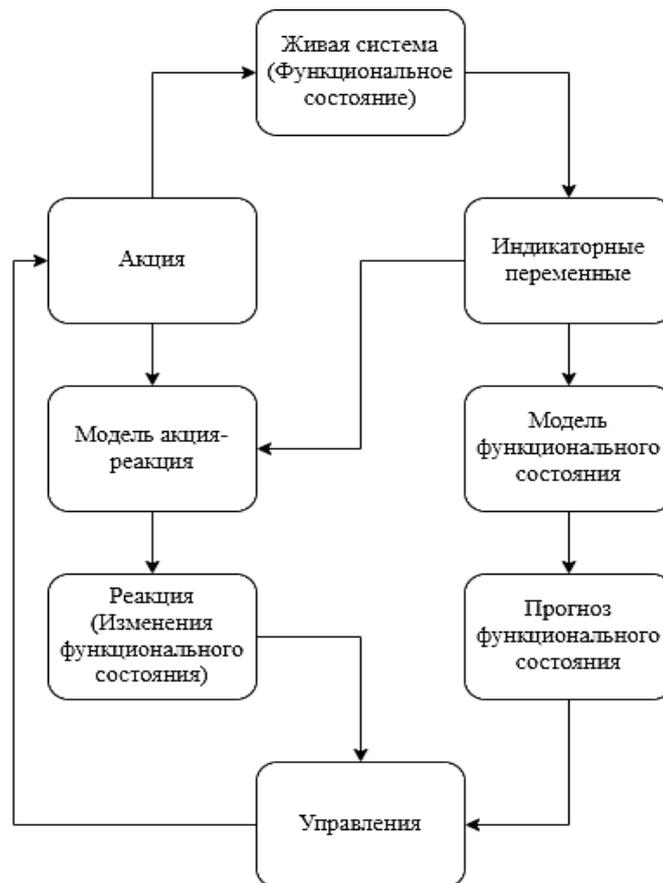


Рисунок 1 – Обобщенная схема реабилитации пациентов с высоким ишемическим риском посредством воздействия на них магнитными полями с управляемыми биотропными параметрами
 Figure 1 – Generalized scheme of patient rehabilitation with high ischemic risk by exposing them to magnetic fields with controlled biotropic parameters

Для управления биотропными параметрами МП в процессе сеанса реабилитации необходимо построить модель ФС живой системы. В данном случае ФС живой системы определяется величиной ишемического риска (ИР) [7]. Для определения ИР необходимо выбрать пространство ФР, на основе которого вычисляются дескрипторы для гетерогенных классификаторов ИР [8, 9]. На основе гетерогенных классификаторов строятся также прогностические модели ИР [10, 11, 12].

Для реализации управления магнитотерапией, позволяющего адаптировать биотропные параметры МП к ФС пациента, необходимо оценить реакцию организма человека на акцию в виде антропогенного МП. Для этого используются методы и средства, позволяющие связать величину изменения функционального состояния Δ ФС с величиной биотропного параметра МП [1, 5]. Это отношение назовем биочувствительностью. В качестве биочувствительности при магнитотерапии используют показатель магниточувствительности, один из методов определения которой изложен в [1]. При реализации управляющего воздействия, которое определяется путем сравнения результатов прогноза ИР и результатов реакции ФС на акцию (терапевтическое МП), производится коррекция биотропных параметров МП.

Таким образом, процесс адаптации биотропных параметров антропогенного МП к ФС пациента сводится к мониторингу, как ИР, так и его динамики посредством определения показателей ФР и суррогатных маркеров, позволяющему оперативно оценить изменение ФС сердечно-сосудистой системы (ССС) в процессе магнитотерапии. Для осуществления мониторинга ИР используем мультимодальные классификаторы ишемического риска [13, 14].

Методы

Структурная схема БТС, позволяющая адаптировать биотропные параметры МП к функциональному состоянию пациента, представлена на Рисунке 2.

Для адаптивного управления магнитотерапией в БТС используются биотехнические обратные связи по суррогатным маркерам, посредством которых осуществляется отрицательная обратная связь по электромагнитному воздействию на орган-мишень.

Для управления физиотерапией в литературе описаны множество суррогатных маркеров, таких как параметры межклеточных соотношений, артериальное давление, температура и т. д. При магнитотерапии по результатам мета-анализа в качестве суррогатных маркеров используем результаты мониторинга биоимпеданса БАТ [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21]. БТС включает пациента с комплектом датчиков, позволяющих контролировать его параметры жизнедеятельности, блок управления, фильтр, усилитель и индуктор. Блок управления осуществляет управление биотропными параметрами МП таким образом, чтобы оптимизировать терапевтический эффект МП.

Ядром блока управления БТС является модуль нечеткого логического вывода (МНЛВ), осуществляющий интеллектуальное управление динамическим диапазоном индукции МП и ее частотой [6]. В качестве входных данных, по анализу которых МНЛВ принимает управленческие решения, используются выходные данные классификаторов ФС ССС и магниточувствительности. Анализируя эту информацию, МНЛВ формирует соответствующие управляющие воздействия на генератор синусоидальных колебаний (частота индукции МП) и аудиоусилитель (интенсивность МП), что позволяет адаптировать терапевтическое МП и функциональное состояние пациента посредством многоканальной обратной связи.

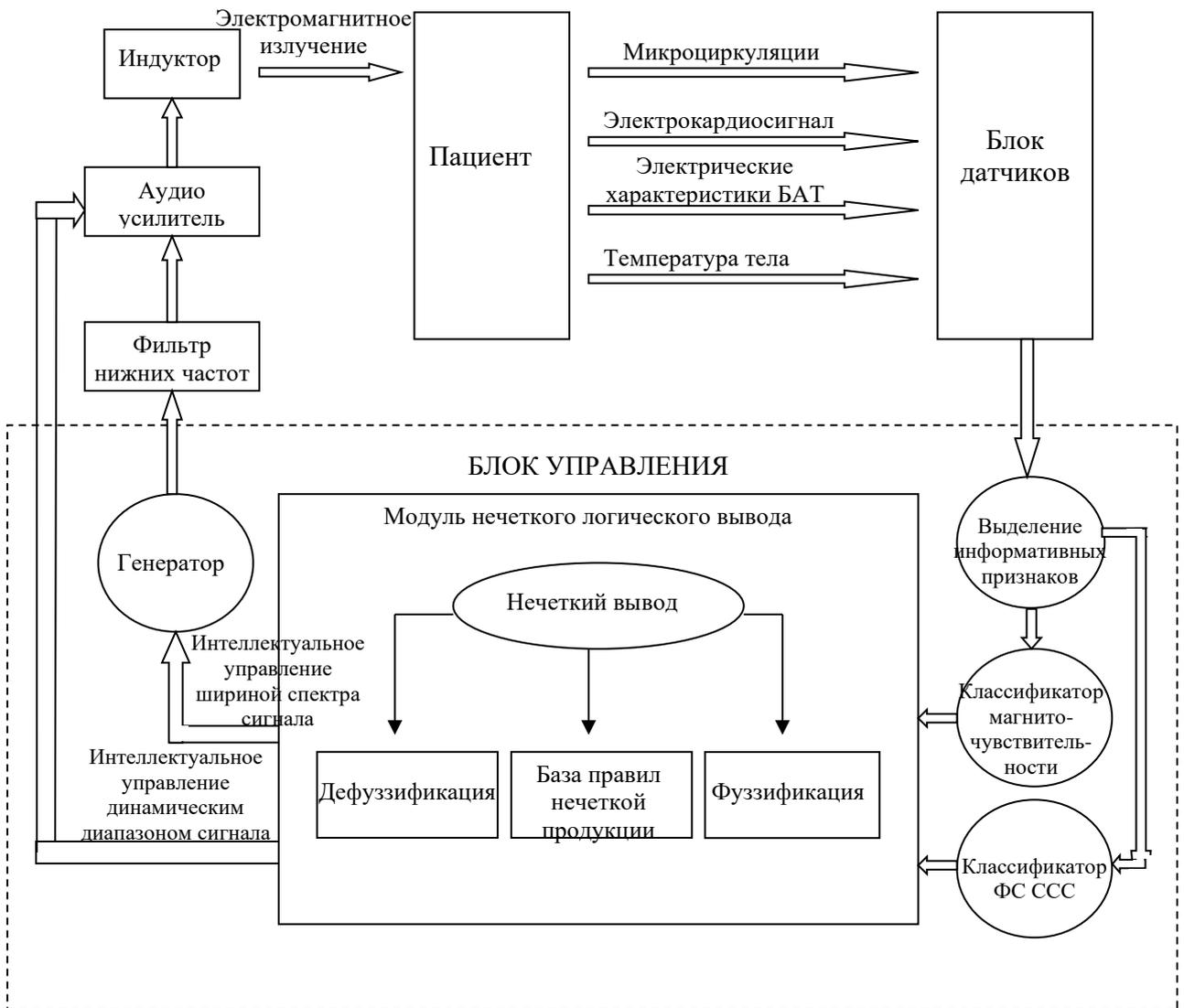


Рисунок 2 – Структурная схема биотехнической системы для адаптивного управления магнитотерапией

Figure 2 – Structural diagram of a biotechnical system for magnetotherapy adaptive control

Для реализации обратной связи по реакции БАТ использовались БАТ трех меридианов: меридиана сердца – С7, меридиана легких – Р9, меридиана перикарда – МС7 [19]. Дислокация этих БАТ показана на Рисунке 3.

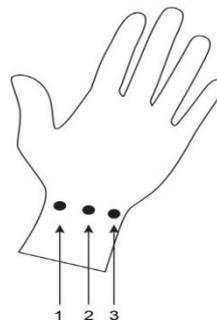


Рисунок 3 – Дислокация биологически активных точек: 1 – Р9 (Тай-юань); 2: МС7 (Да-лин); 3: Точка меридиана сердца С7 (Шэнь-мэнь)

Figure 3 – Dislocation of biologically active points: 1 – Р9 (Tai-yuan); 2: МС7 (Da-ling); 3: Heart meridian point С7 (Shenmen)

Схема нейросетевого агрегатора решений «слабых» классификаторов по этим трем БАТ представлена на Рисунке 4. Дескрипторы на входах «слабых» классификаторов формировались согласно методам и алгоритмам, изложенным в [19, 21, 22].

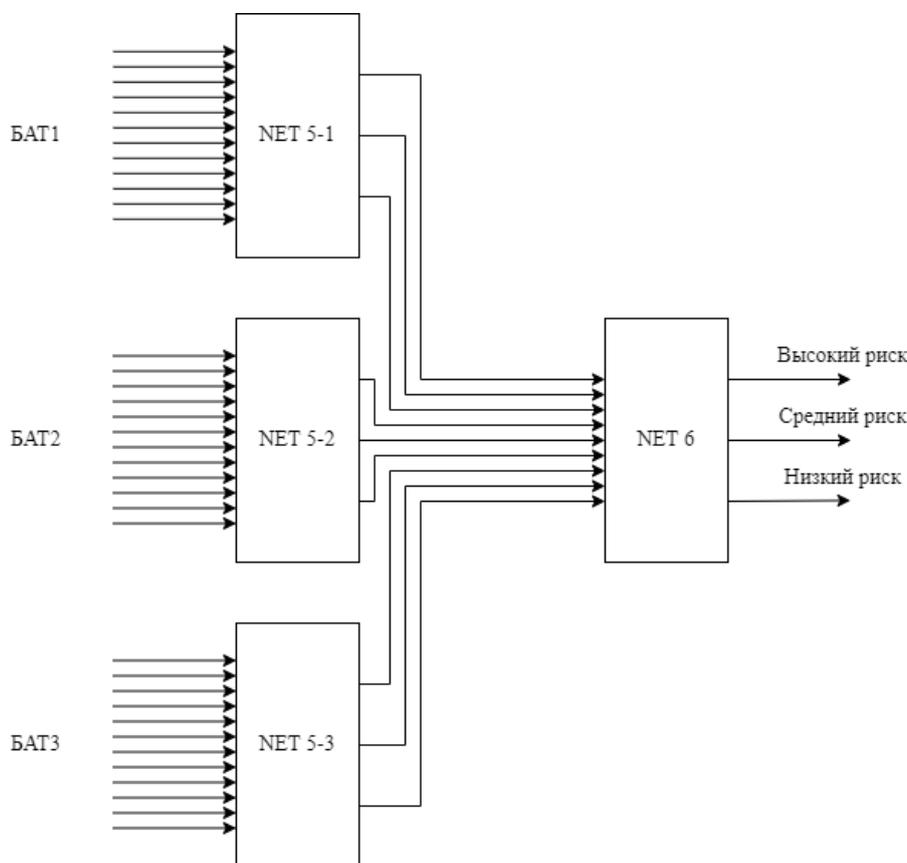


Рисунок 4 – Схема агрегатора классификаторов по трем биологически активным точкам
 Figure 4 – Scheme of the classifier aggregator for three biologically active points

На выходе классификатора Рисунок 4 имеем три числа, соответствующие уверенностям в трех классах риска ИБС: высокий риск (ВР), средний риск (СР), низкий риск (НР). Эти числа рассматриваются как значения функций принадлежности термов лингвистической переменной «Риск ИБС», графики которых показаны на Рисунке 5. Для определения четкого значения переменной «Риск ИБС» используем метод «центра тяжести». Если, в качестве примера, взять уверенности термов NET6-ВР=0,125; NET6-СР=0,25; NET6-НР=0,5, то четкое значение лингвистической переменной «Риск ИБС» определяется координатой по оси абсцисс центра тяжести заштрихованной фигуры, показанной на Рисунке 5.

Координаты центра тяжести (x_0, y_0) плоской однородной ограниченной фигуры определяются согласно формуле

$$x_0 = \frac{I_x}{S}; \quad y_0 = \frac{I_y}{S}, \quad (1)$$

где

$$S = \iint_D dx dy, \quad I_x = \iint_D x dx dy, \quad I_y = \iint_D y dx dy,$$

$$y = \{\mu_{НР}, \mu_{СР}, \mu_{ВР}, \}, \quad x \triangleq \text{риск}.$$

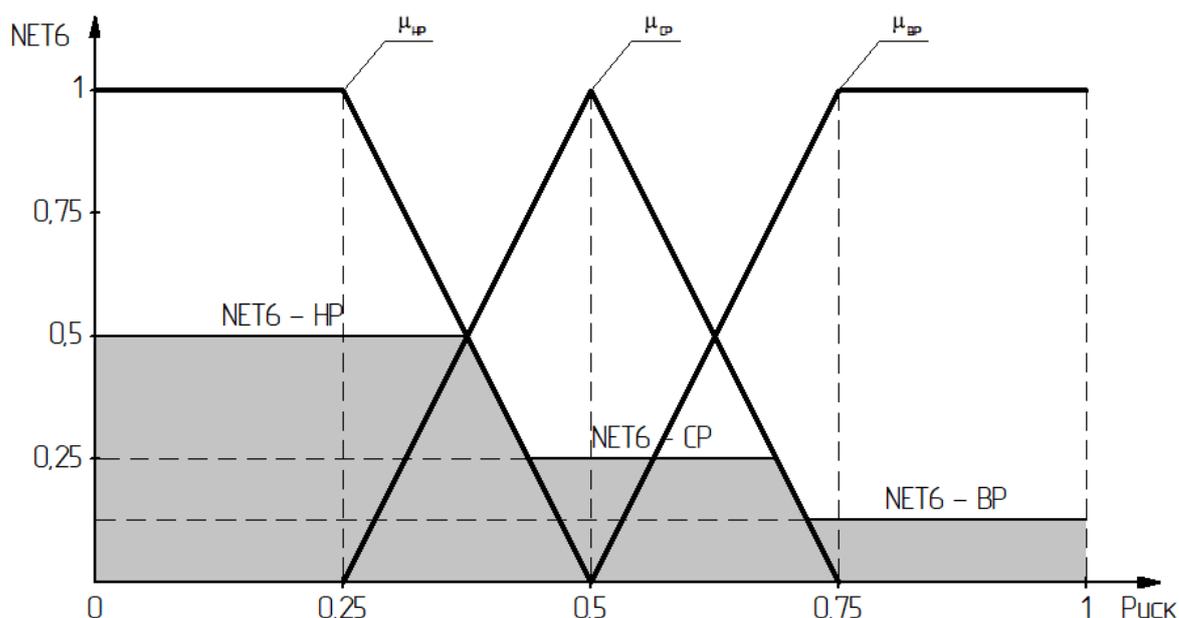


Рисунок 5 – Графики функций принадлежности термов лингвистической переменной «Риск ИБС»
Figure 5 – Membership function graphs of the terms of the linguistic variable “Risk of coronary artery disease”

Укрупненный алгоритм адаптивной магнитотерапии показан на Рисунке 6. Процесс адаптации параметров терапевтического МП к ФС пациента начинается с определения магниточувствительности пациента (блок 1). Магниточувствительность пациента λ определяется лингвистической переменной, имеющей три термина: «низкий» – L , «средний» – M и «высокий» – H . Ее величина снимается с выхода классификатора со структурой, аналогичной Рисунку 3. Для обучения этого классификатора формировались обучающие выборки пациентов с известным классом магниточувствительности. Магниточувствительность пациентов из обучающей выборки измерялась следующим образом: проводилось измерение артериального давления (АД), далее 5 минут проводилось воздействие электромагнитным полем на пятки, после чего еще раз измерялось АД. Магниточувствительность считалась низкой, если АД не менялось, средней, если АД (систолическое и диастолическое) изменялось на 5-10 мм. рт. ст., высокой – если АД изменялось более чем на 10 мм. рт. ст. [1].

После определения магниточувствительности пациента определяется ФС ССС пациента (блок 3). Так как осуществляется реабилитация пациентов, больных ИБС, то за функциональное состояние ССС принимаем риск ИБС Θ у данного пациента, который выражается в процентах и определяется классификатором, структурная схема которого показана на рисунке 4.

Риск ИБС описывается тремя терминами: L – НР, M – СР, H – ВР. Так как классификатор риска выдает риск в процентах, то термины лингвистической переменной Θ определяются в соответствии со следующим выражением:

$$\Theta = \begin{cases} L & \text{при } R \leq 25\%, \\ M & \text{при } 25\% < R < 75\%, \\ H & \text{при } R \geq 75\%, \end{cases} \quad (2)$$

где R – риск ИБС в % на выходе дефаззификатора классификатора риска ИБС.

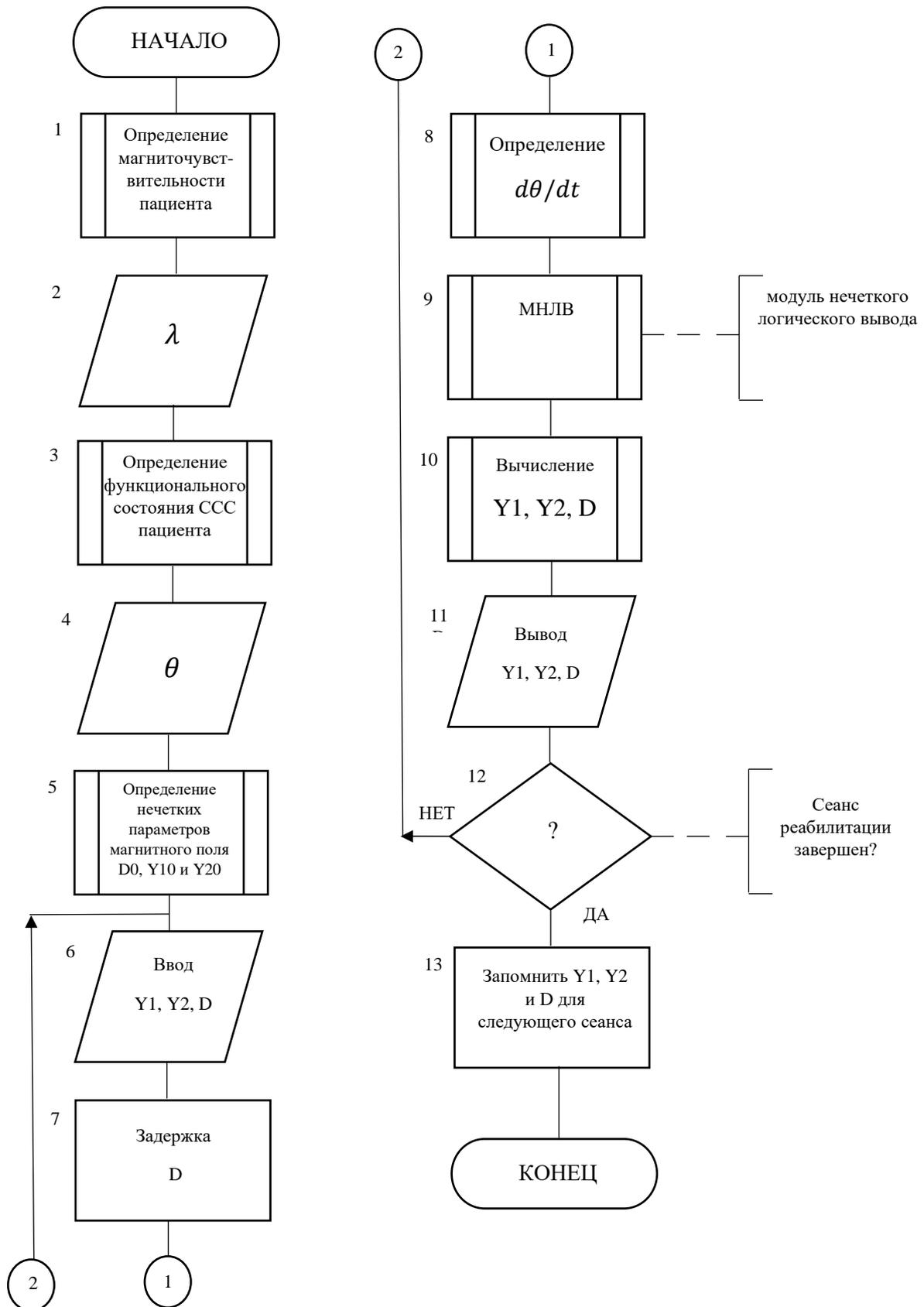


Рисунок 6 – Схема алгоритма управления биотропными параметрами магнитного поля
 Figure 6 – Scheme of the algorithm for controlling the biotropic parameters of the magnetic field

Для лингвистической переменной $d\Theta/dt$ динамический диапазон установлен от 100 % до 100 %. При этом

$$d\Theta/dt = \begin{cases} -L & \text{при } -2 \leq \Delta\Theta/D \leq 0, \\ -H & \text{при } -\infty < \Delta\Theta/D < -2, \\ L & \text{при } 0 < \Delta\Theta/D \leq 2, \\ H & \text{при } 2 < \Delta\Theta/D < +\infty. \end{cases} \quad (3)$$

При формировании условий в (3) принималось во внимание то, что D_{max} минут, а D_{min} ограничено дискретностью установки времени процедуры у магнитотерапевтического аппарата. Поэтому было принято, что при $\Delta\Theta_{max}0$ и $D = 10$, $d\Theta/dt$ принимает $|L| = 2$ при $\Delta\Theta=20$ % от максимально возможного диапазона Θ , а

$$\Delta\Theta = (Pusk \text{ ИБС}(T) - (Pusk \text{ ИБС}(T - D))), \quad (4)$$

где T – текущее время снятия контрольных параметров, D – интервал между текущим временем и предшествующим временем снятия контрольных параметров ФС.

В результате определения параметров λ и Θ задаются начальные значения параметров магнитного поля: $Y1$ – амплитуда, в мТ и $Y2$ – частота, в Гц, и D в минутах (блок 5). В МНЛВ числовые значения амплитуды и частоты преобразуются в нечеткие термы L и H , соответствующие малым и большим значениям. Величина D управляется посредством двух термов: inc (инкремент) и dec (декремент), которые либо увеличивают, либо уменьшают интервал D .

После установки начальных значений параметров терапевтического МП, пациент подвергается его воздействию в течение времени D , после чего определяется изменение его ФС по сравнению с ФС в момент $(T-D)$ (блок 5).

В зависимости от параметров λ , Θ и $d\Theta/dt$ в блоке 9 осуществляется выбор одного из решающих правил из базы нечетких решающих правил. В блоке 10 нечеткие переменные из консеквентов решающих правил преобразуются в четкие значения. В Таблице 1 представлены примеры нечетких продукций, хранящихся в базе нечетких решающих правил МНЛВ.

Новые значения биотропных параметров МП и величины задержки вычисляются МНЛВ в блоке 7. В блоке 9 проверяется условие окончания сеанса, в соответствии с которым сеанс магнитотерапии либо прекращается, либо осуществляется переход на следующий цикл с вновь вычисленными биотропными параметрами магнитотерапии. По окончании сеанса параметры магнитотерапии данного пациента запоминаются в целях использования их в качестве начальных в следующем сеансе.

Результаты

Под наблюдением в условиях стационара находилось 126 больных ИБС II и III функционального класса (ФК). Среди них 66 % мужчин в возрасте от 35 до 70 лет (средний возраст составил $56,8 \pm 1,8$ года). Давность заболевания больных составляла от 1 года до 10 лет. Пациенты основной группы (68 человек) получали базисную терапию совместно с адаптивной магнитотерапией аппаратом «Полюс 2» на шейно-воротниковую зону. Контрольную группу составили 58 человек, получавшие только базовую терапию и магнитотерапию аппаратом «Полюс 2» по типовой методике без биотехнической обратной связи.

Пациенты, вошедшие в экспериментальную и контрольную группы, были обследованы согласно протоколу клинических и специальных исследований больных ИБС. Для подтверждения ФК ИБС пациента проводилась оценка ФС миокарда с использованием функциональных проб. В качестве предикторов ФС миокарда пациента были использованы следующие показатели: частота сердечных сокращений (ЧСС), систолическое артериальное давление (АД), показатель двойного произведения (ДП), индекс производительности левого желудочка (ИПЛЖ), фракция выброса (ФВ), степень укорочения переднезаднего размера (ΔS), минутный объем крови (МОК), ударный индекс (УИ), сердечный индекс (СИ), общее периферическое сопротивление (ОПСС). У всех пациентов был проведен анализ результатов холтеровского мониторинга ЭКГ в двух модифицированных отведениях V2 и V5, который показал, что у 89 % обследованных пациентов имели место болевые и безболевые ишемические эпизоды, а у 31 % пациентов – нарушение ритма сердца.

Таблица 1 – Примеры нечетких продукций соответствия управляющих воздействий и функционального состояния пациента

Table 1 – Examples of fuzzy correspondence products between control actions and the functional state of the patient

№	ВХОД МНЛВ					ВЫХОД МНЛВ		
	θ	$d\theta/dt$	λ	Y1-D	Y2-D	Y1	Y2	ΔD
1	L_θ	$+L_\Delta$	L_S	H	H	L	H	inc
2	L_θ	$+L_\Delta$	H_S	L	H	L	H	0
3	L_θ	$-L_\Delta$	L_S	H	L	H	H	dec
4	L_θ	$-L_\Delta$	H_S	L	L	H	H	0
5	L_θ	$+H_\Delta$	L_S	H	H	H	H	0
6	L_θ	$+H_\Delta$	H_S	L	H	L	H	0
7	L_θ	$-H_\Delta$	L_S	H	L	L	H	0
8	L_θ	$-H_\Delta$	H_S	L	L	H	H	dec
9	H_θ	$+L_\Delta$	L_S	H	H	H	H	dec
10	H_θ	$+L_\Delta$	H_S	L	H	L	L	0
11	H_θ	$-L_\Delta$	L_S	H	L	L	L	dec
12	H_θ	$-L_\Delta$	H_S	L	L	H	L	dec
13	H_θ	H_Δ	L_S	H	H	L	L	inc
14	H_θ	H_Δ	H_S	L	H	L	L	0
15	H_θ	$-H_\Delta$	L_S	H	L	L	H	0
16	H_θ	$-H_\Delta$	H_S	L	L	H	L	0

Оценка клинической эффективности курсового лечения проводилась по совокупности клинических данных и результатов специальных методов исследования, с учетом непосредственных и отдаленных результатов (Рисунки 7 и 8).



Рисунок 7 – Эффективность применения магнитотерапии у больных ИБС II и III ФК в экспериментальной группе
Figure 7 – The effectiveness of the magnetic therapy use in patients with coronary artery disease II and III FC in the experimental group

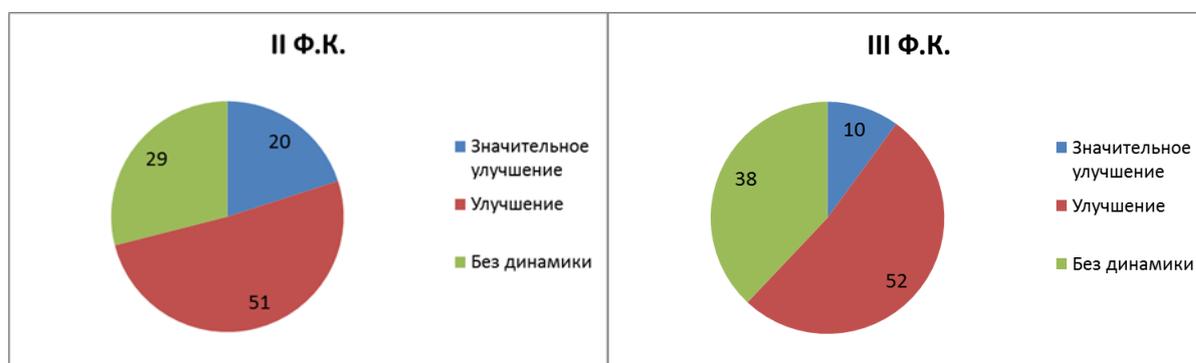


Рисунок 8 – Эффективность применения магнитотерапии у больных ИБС II и III ФК в контрольной группе
Figure 8 – The effectiveness of the magnetic therapy use in patients with coronary artery disease II and III FC in the control group

Анализ представленных диаграмм показывает, что положительный эффект адаптационной магнитотерапии в целом составил 85 % у пациентов II ФК и 77 % у пациентов III ФК. Сравнительный результат традиционной магнитотерапии (контрольная группа) и адаптационной магнитотерапии (экспериментальная группа) показал, что во II ФК в экспериментальной группе эффективность лечения выше на 14 % по сравнению с эффективностью лечения в контрольной группе, а у пациентов III ФК – на 15 %. При этом пациентов со значительным улучшением в экспериментальной группе больше, чем в контрольной на 5 % независимо от ФК ИБС. Таким образом, разработанная биотехническая система адаптивной магнитотерапии является эффективным средством лечения ИБС.

Выводы

1. Разработана биотехническая система магнитотерапии пациентов с ишемической болезнью сердца. В системе используется биотехническая обратная связь по импедансу в биологически активных точках, что позволило адаптировать программу магнитотерапии к функциональному состоянию пациента и корректировать ее в процессе терапевтического сеанса посредством биоуправления параметрами терапевтического магнитного поля. Использование биотехнической обратной связи позволило повысить терапевтический эффект реабилитационной процедуры, снизить адаптацию и отрицательные реакции организма на магнитотерапию, и планировать программы магнитотерапии.

2. Разработан алгоритм управления биотропными параметрами магнитного поля, отличающийся мультимодальным классификатором функционального состояния пациента и модулем нечеткого логического вывода, предназначенного для коррекции биотропных параметров магнитного поля в процессе проведения сеанса магнитотерапии.
3. Сформирована экспериментальная группа для оценки эффективности адаптивной магнитотерапии. Контрольная группа формировалась из пациентов, больных ишемической болезнью сердца и прошедших курс магнитотерапии на том же аппарате по стандартной методике. В клинических условиях было показано, что применение адаптивной магнитотерапии является эффективным методом лечения больных стенокардией напряжения II (85 %) и III (77 %) функциональных классов, что на 14 % и 15 % превышает соответствующие результаты в контрольной группе, и способствует уменьшению как по частоте, так и по продолжительности ангинозных приступов и эпизодов безболевой и болевой ишемии миокарда и нарушения ритма, в большей степени у пациентов со стенокардией второго функционального класса.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гостев С.С., Жулев В.И. *Способ определения степени магниточувствительности пациента*. Российская Федерация; RU2289302C1 (Патент) 2006.
2. Трифонов А.А., Петрунина Е.В., Филист С.А., Кузьмин А.А., Жилин В.В. Биотехническая система с виртуальной реальностью в реабилитационных комплексах с искусственными обратными связями. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2019;9(4):46–66.
3. Петрова Т.В., Филист С.А., Дегтярев С.В., Киселев А.В., Шаталова О.В. Предикторы синхронности системных ритмов живых систем для классификаторов их функциональных состояний. *Системный анализ и управление в биомедицинских системах*. 2018;17(3):693–700.
4. Trifonov A.A., Kuzmin A.A., Filist S. A. and Petrunina E.V. Neural network model in the exoskeleton verticalization control system. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1679(3). Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1679/3/032036/pdf>. DOI:10.1088/1742-6596/1679/3/032036 (accessed 15.08.2021).
5. Трифонов А.А., Петрунина Е.В., Кузьмин А.А., Протасова З.У., Лазурина Л.П. Методы и средства обеспечения реабилитационных процедур посредством биотехнической системы с биологической обратной связью и модулем нечеткого управления. *Системный анализ и управление в биомедицинских системах*. 2021;20(3):71–83.
6. Филист С.А., Трифонов А.А., Кузьмин А.А., Петрунина Е.В., Шехине М.Т. Адаптивная биотехническая система с роботизированным устройством для восстановления двигательных функций нижних конечностей постинсультных больных. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021; (3):4–5.
7. Шаталова О. В., Медников Д. А., Протасова З. У. Мультиагентная интеллектуальная система для прогноза риска сердечно-сосудистых осложнений с синергетическими каналами. *Системный анализ и управление в биомедицинских системах*. 2020;19(3):177–188.
8. Филист С.А., Шаталова О.В., Ефремов М.А. Гибридная нейронная сеть с макрослоями для медицинских приложений. *Нейрокомпьютеры. Разработка и применение*. 2014;6:35–39.
9. Ефремов М.А., Шаталова О.В., Федянин В.В., Шуткин А.Н. Гибридные многоагентные классификаторы в биотехнических системах диагностики заболеваний и мониторинга лекарственных назначений. *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. 2015;6:42–47.

10. Суржикова С.Е., Филист С.А., Жилин В.В., Курочкин А.Г. Использование гибридных нейросетевых моделей для многоагентных систем классификации в гетерогенном пространстве информативных признаков. *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. 2015;3:85–95.
11. Филист С.А., Томакова Р.А., Яа З.Д. Универсальные сетевые модели для задач классификации биомедицинских данных. *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2012;4(43):44–50.
12. Киселев А.В., Петрова Т.В., Дегтярев С.В., Рыбочкин А.Ф., Филист С.А., Шаталова О.В., Мишустин В.Н. Нейросетевые модули с виртуальными потоками для классификации и прогнозирования функционального состояния сложных систем. *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2018;4(79):123–134.
13. Емельянов С. Г., Рыбочкин А. Ф., Филист С. А., Халед А. Р. Нейросетевой решающий модуль для исследования живых систем. *Известия Курского государственного технического университета*. 2008;(2):77–82.
14. Филист С.А., Алексенко В.А., Кассим Кабус Гибридные информационные технологии по экспресс-диагностике инфекционных заболеваний на основе многочастотного анализа пассивных свойств биотканей. *Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск. «Медицинские информационные системы»*. 2010;8(109):12–17.
15. Кассим К.Д.А., Ключиков И.А., Шаталова О.В., Яа З.Д. Параметрические модели биоимпеданса для идентификации функционального состояния живой системы. *Биомедицинская радиоэлектроника*. 2012;4:50–56.
16. Филист С.А., Шаталова О.В., Богданов А.С. Модели биоимпеданса при нелинейной вольтамперной характеристике и обратимом пробое диэлектрической составляющей биоматериала. *Бюллетень сибирской медицины*. 2014;13(4):129–135.
17. Филист С.А., Кузьмин А.А., Кузьмина М.Н. Биотехническая система для контроля импеданса биоматериалов в экспериментах *in vivo*. *Биомедицинская радиоэлектроника*. 2014;9:38–42.
18. Мирошников А. В., Стадниченко Н. С., Шаталова О. В., Филист С. А. Модели импеданса биоматериала для формирования дескрипторов в интеллектуальных системах диагностики инфекционных заболеваний. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020;8(4),3–4.
19. Shatalova O.V., Filist S.A., Korenevskiy N.A. et al. Application of fuzzy neural network model and current-voltage analysis of biologically active points for prediction post-surgery risks. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 2021;24(13):1504–1516. Available from: <https://doi.org/10.1080/10255842.2021.1895128>. DOI: 10.1080/1895128.
20. Филист С.А., Шаталова О.В., Протасова З.У., Стадниченко Н.С. *Способ классификации биологических объектов на основе многомерного биоимпедансного анализа и устройство для его реализации*. Российская Федерация; RU2752594C1 (Патент) 2021.
21. Филист С.А., Шаталова О.В., Ефремов М.А. Гибридная нейронная сеть с макрослоями для медицинских приложений. *Нейрокомпьютеры. Разработка и применение*. 2014;6:35–39.
22. Zhilin V.V., Filist S.A., Rakhim K.A., Shatalova O.V. A method for creating fuzzy neural-network models using the MATLAB package for biomedical applications. *Biomedical Engineering*. 2008;42(2);64.

REFERENCES

1. Gostev S.S., Zhulev V.I. *A method for determining the degree of patient's magnetic sensitivity*. The Russian Federation; RU2289302C1 (Patent) 2006. (In Russ.)
2. Trifonov A.A., Petrunina E.V., Filist S.A., Kuzmin A.A., Zhilin V.V. Biotechnical system with virtual reality in rehabilitation complexes with artificial feedback. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo*

- gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoye priborostroyeniye = Proceedings of the Southwestern State University. Series: Management, computer technology, informatics. Medical instrumentation. 2019;9(4):46–66. (In Russ.)*
3. Petrova T.V., Filist S.A., Degtyarev S.V., Kiselev A.V., Shatalova O.V. Synchronicity predictors of systemic rhythms of living systems for classifiers of their functional states. *System analysis and control in biomedical systems. 2018;17(3):693–700. (In Russ.)*
 4. Trifonov A.A., Kuzmin A.A., Filist S. A. and Petrunina E.V. Neural network model in the exoskeleton verticalization control system. *Journal of Physics: Conference Series. 2020;1679(3). Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1679/3/032036/pdf>. DOI:10.1088/1742-6596/1679/3/032036 (accessed 08/15/2021).*
 5. Trifonov A.A., Petrunina E.V., Kuzmin A.A., Protasova Z.U., Lazurina L.P. Methods and means of providing rehabilitation procedures through a biotechnical system with biofeedback and a fuzzy control module. *System analysis and control in biomedical systems. 2021;20(3):71–83. (In Russ.)*
 6. Filist S.A., Trifonov A.A., Kuzmin A.A., Petrunina E.V., Shekhine M.T. Adaptive biotechnical system with a robotic device for restoring the motor functions of the lower limbs of post-stroke patients. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii = Modeling, optimization and information technology. 2021;9(3):4–5. (In Russ.)*
 7. Shatalova O. V., Mednikov D. A., Protasova Z. U. Multi-agent intelligent system for predicting the risk of cardiovascular complications with synergistic channels. *System analysis and control in biomedical systems. 2020;19(3):177–188. (In Russ.)*
 8. Filist S.A., Shatalova O.V., Efremov M.A. Hybrid neural network with macrolayers for medical applications. *Neyrokomp'yutery. Razrabotka i primeneniye = Neurocomputers. Development and application. 2014;6:35–39. (In Russ.)*
 9. Efremov M.A., Shatalova O.V., Fedyanin V.V., Shutkin A.N. Hybrid multi-agent classifiers in biotechnical systems for diagnosing diseases and monitoring drug prescriptions. *Neyrokomp'yutery: razrabotka, primeneniye = Neurocomputers: development, application. 2015;6:42–47. (In Russ.)*
 10. Surzhikova S.E., Filist S.A., Zhilin V.V., Kurochkin A.G. Using hybrid neural network models for multi-agent classification systems in a heterogeneous space of informative features. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokiye tekhnologii = Caspian journal: management and high technologies. 2015;3:85–95. (In Russ.)*
 11. Filist S.A., Tomakova R.A., Yaa Z.D. Universal network models for biomedical data classification problems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwestern State University. 2012; 4(43):44–50. (In Russ.)*
 12. Kiselev A.V., Petrova T.V., Degtyarev S.V., Rybochkin A.F., Filist S.A., Shatalova O.V., Mishustin V.N. Neural network modules with virtual flows for classifying and predicting the functional state of complex systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwestern State University. 2018;4(79):123–134. (In Russ.)*
 13. Emelyanov S. G., Rybochkin A. F., Filist S. A., Khaled A. R. Neural network decision module for the study of living systems. *Izvestiya Kurskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = News of the Kursk State Technical University. 2008;(2):77–82. (In Russ.)*
 14. Filist S.A., Aleksenko V.A., Kassim Kabus Hybrid information technologies for express diagnostics of infectious diseases based on multifrequency analysis of passive properties of biological tissues. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskkiye nauki. Tematicheskii vypusk. «Meditsinskiye informatsionnyye sistemy» = Izvestiya SFedU. Technical science. Thematic issue. "Medical Information Systems". 2010;8(109):12–17. (In Russ.)*

15. Kassim K.D.A., Klyuchikov I.A., Shatalova O.V., Yaa Z.D. Parametric models of bioimpedance for identification of the functional state of a living system. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical radioelectronics*. 2012;4:50–56. (In Russ.)
16. Filist S.A., Shatalova O.V., Bogdanov A.S. Models of bioimpedance with a nonlinear current-voltage characteristic and reversible breakdown of the dielectric component of the biomaterial. *Bulletin of Siberian medicine*. 2014;13(4):129–135. (In Russ.)
17. Filist S.A., Kuzmin A.A., Kuzmina M.N. Biotechnical system for monitoring the impedance of biomaterials in in vivo experiments. *Biomedical radioelectronics*. 2014;9:38–42. (In Russ.)
18. Miroshnikov A. V., Stadnichenko N. S., Shatalova O. V., Filist S. A. Biomaterial impedance models for the formation of descriptors in intelligent systems for diagnosing infectious diseases. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii = Modeling, optimization and information technology*. 2020;8(4):3–4. (In Russ.)
19. Shatalova O.V., Filist S.A., Korenevskiy N.A. et al. Application of fuzzy neural network model and current-voltage analysis of biologically active points for prediction of post-surgery risks. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 2021;24(13):1504–1516. Available from: <https://doi.org/10.1080/10255842.2021.1895128>. DOI: 10.1080/1895128.
20. Filist S.A., Shatalova O.V., Protasova Z.U., Stadnichenko N.S. *A method for classifying biological objects based on multidimensional bioimpedance analysis and a device for its implementation*. The Russian Federation; RU2752594C1 (Patent) 2021. (In Russ.)
21. Filist S.A., Shatalova O.V., Efremov M.A. Hybrid neural network with macrolayers for medical applications. *Neyrokomp'yutery. Razrabotka i primeneniye = Neurocomputers. Development and application*. 2014;6:35–39. (In Russ.)
22. Zhilin V.V., Filist S.A., Rakhim K.A., Shatalova O.V. A method for creating fuzzy neural-network models using the MATLAB package for biomedical applications. *Biomedical Engineering*. 2008;42(2):64.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Мирошников Андрей Валерьевич, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, Курск, Российская Федерация.
e-mail: miroshnikov2291@mail.ru

Andrey Valerievich Miroshnikov, Postgraduate Student of The Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation.

Петрунина Елена Валерьевна, кандидат технических наук, доцент, Московский государственный гуманитарно-экономический университет, Москва, Российская Федерация
e-mail: petrunina@mggeu.ru
ORCID: [0000-0003-3661-0778](https://orcid.org/0000-0003-3661-0778)

Elena Valer'evna Petrunina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Moscow State University for the Humanities and Economics, Moscow, Russian Federation.

Павленко Андрей Витальевич, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, Курск, Российская Федерация.
e-mail: Dren-x@yandex.ru

Andrey Vitalievich Pavlenko, Postgraduate Student of The Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation.

Протасова Зейнаб Усама, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, Курск, Российская Федерация.
e-mail: zeinab.zeidan@yandex.ru

Zeynab Osama Protasova, Postgraduate Student of The Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation.

Шехине Мохамад Туфик, кандидат технических наук, директор Международного медицинского института, Курский государственный медицинский университет, Курск, Российская Федерация
e-mail: mtchahine@gmail.com

Mohamad Tufik Shekhine, Candidate of Technical Sciences, Director of The International Medical Institute, Kursk State Medical University, Kursk, Russian Federation.

Шульга Леонид Васильевич, доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры охраны труда и окружающей среды, Юго-Западный государственный университет, Курск, Российская Федерация.
e-mail: asy.gnezdilova@yandex.ru

Leonid Vasilievich Shulga, Doctor of Medical Sciences, Professor, Professor of the Department of Occupational Safety and Environment, Southwestern State University, Kursk, Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 06.02.2022; одобрена после рецензирования 26.02.2022; принята к публикации 14.03.2022.

The article was submitted 06.02.2022; approved after reviewing 26.02.2022; accepted for publication 14.03.2022.