



DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-4-405-412

УДК 681.5

EDN: ADVUUU

Научная статья / Research article

Исследование математической модели биоискусственной печени с использованием ПИД-регулятора

А.С. Ганьшин^{ORCID}, Д.А. Андриков^{ORCID}✉

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

✉ andrikov-da@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 12 мая 2024 г.

Доработана: 21 июля 2024 г.

Принята к публикации: 25 июля 2024 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Цель данного исследования — разработка и анализ математической модели биоискусственной печени с использованием пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора для управления ключевыми процессами. Биоискусственная печень представляет собой сложную систему, задача которой заключается в выполнении основных функций печени, что критически важно для развития альтернативных методов лечения пациентов с печеночной недостаточностью. В работе описано строение и функциональность модели биоискусственной печени, основываясь на обзоре анатомии человеческой печени, а также на изучении биотехнологических аспектов создания искусственных органов. Рассматривается применение ПИД-регулятора, который позволяет точно и адаптивно контролировать процессы внутри модели, такие как подача питательных веществ и удаление токсинов. Методология исследования охватывает создание математической модели, ее компьютерное моделирование и анализ полученных данных. Экспериментальная часть работы заключается в выявлении оптимальных параметров ПИД-регулятора для различных условий эксплуатации биоискусственной печени. Результаты данного исследования могут способствовать повышению эффективности биоискусственных систем поддержки печеночных функций, с их помощью возможно появление и новых подходов к использованию искусственных органов, что обладает значительным потенциалом для сферы трансплантологии и лечения заболеваний печени.

Ключевые слова: пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор, моделирование, глюкоза, биоискусственная поддержка печени, дифференциальные уравнения

Вклад авторов

Ганьшин А.С. — участие в разработке программ и их реализации; написание и доработка текста; Андриков Д.А. — научное руководство, концепция исследования; развитие методологии.



Для цитирования

Ганшин А.С., Андриков Д.А. Исследование математической модели биоискусственной печени с использованием ПИД-регулятора // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2024. Т. 25. № 4. С. 405–412. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-405-412>

Investigation of a mathematical model of a bio-artificial liver using a PID-controller

Alexey S. Ganshin^{ORCID}, Denis A. Andrikov^{ORCID}✉

RUDN University, Moscow, Russia

✉ andrikov-da@rudn.ru

Article history

Received: May 12, 2024

Revised: July 21, 2024

Accepted: July 25, 2024

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest

Abstract. The objective of this study is to develop and analyze a mathematical model of a bio-artificial liver using proportional-integral-differential a controller for managing key processes. The bio-artificial liver is a complex system that performs the fundamental functions of the liver, which is of critical importance for the development of alternative treatments for patients with liver failure. The paper describes the structure and functionality of the bio-artificial liver model, based on a review of the anatomy of the human liver, as well as on the study of biotechnological aspects of the creation of artificial organs. The application of a PID-controller is considered, which allows precise and adaptive control of processes within the model, such as the supply of nutrients and the removal of toxins. The research methodology covers the creation of a mathematical model, its computer modeling and analysis of the data obtained. The experimental part of the work is to identify the optimal parameters of the PID-controller for various operating conditions of the bio-artificial liver. The results of this study can contribute to improving the effectiveness of bio-artificial systems for supporting liver functions and offer new approaches to the implementation of artificial organs, which has significant potential for the field of transplantation and treatment of liver diseases.

Keywords: proportional-integral-differential controller, modeling, glucose, bio-artificial liver support, differential equations

Authors' contribution

Ganshin A.S. — participation in the development of programs and their implementation; writing and revision of the text; *Andrikov D.A.* — scientific management; research concept; methodology development

For citation

Ganshin AS, Andrikov DA. Investigation of a mathematical model of a bio-artificial liver using a PID-controller. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(4):405–412. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-405-412>

Введение

Биоискусственная печень — это инновационное устройство, предназначенное для замены функций печени у людей с печеночной недостаточностью. Это технологическое чудо представляет собой набор клеток печени, размещен-

ных в специальном биореакторе, который способен эффективно функционировать в организме пациента и выполнять основные задачи печени, такие как фильтрация крови, утилизация токсинов и синтез важных белков.

Исследование математической модели биоискусственной печени с использованием — регу-

лятора — это актуальная задача в области биомедицинской инженерии. ПИД-регулятор (пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор) — это алгоритм управления, который обеспечивает стабильность и точность работы системы путем сравнения заданного значения с текущим и корректировки управления в соответствии с разницей.

В контексте биоискусственной печени математическая модель является инструментом для оценки и управления ее функционированием. Использование ПИД-регулятора в данном исследовании позволяет оптимизировать работу биоискусственной печени и улучшить результаты ее функционирования в организме пациента [1].

Для проведения исследования математической модели биоискусственной печени с использованием ПИД-регулятора необходимо выполнить следующие шаги:

1. Сбор данных о физиологических параметрах человека с печеночной недостаточностью и о работе реальной печени.

2. Создание математической модели биоискусственной печени, учитывающей основные процессы, происходящие в ней.

3. Программирование ПИД-регулятора для управления биоискусственной печенью и интеграции его с математической моделью.

4. Проведение численных экспериментов с математической моделью и анализ результатов работы ПИД-регулятора.

5. Оптимизация параметров ПИД-регулятора для достижения максимальной эффективности и стабильности работы биоискусственной печени [2].

Интеграция математической модели биоискусственной печени с использованием ПИД-регулятора открывает новые перспективы в области разработки биомедицинских устройств и позволяет улучшить качество жизни пациентов с печеночной недостаточностью. Дальнейшие исследования в этой области могут привести к созданию более эффективных и надежных биоискусственных органов, способных полностью заменить функции естественных органов человека [3].

1. Методы и материалы

1.1. ПИД-регулятор

ПИД-регулятор (пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор) — это тип устройства управления, который используется для регулирования процессов и систем с целью поддержания определенного уровня или значения выходного сигнала. ПИД-регулятор состоит из трех основных компонентов — пропорциональной (P), интегральной (I) и дифференциальной (D) составляющих, которые работают вместе для обеспечения стабильности и точности управления [4].

Пропорциональная составляющая отвечает за реакцию системы на текущую ошибку между желаемым и реальным значением, пропорционально этой ошибке. Интегральная составляющая добавляет компенсацию за кумулятивную ошибку во времени, что помогает устранить постоянную ошибку и достичь точного управления в долгосрочной перспективе. Дифференциальная составляющая предназначена для подавления колебаний и установления быстрого и стабильного отклика системы [5].

ПИД-регулятор широко применяется в различных отраслях промышленности, автоматизации и робототехники для управления различными системами, такими как электромоторы, тепловые системы, гидравлические системы, автопилоты, обработка сигналов и др. В современных технологиях он играет важную роль в обеспечении точности, стабильности и оптимальной производительности различных устройств и механизмов [6].

1.2. Использование ПИД-регулятора для математической модели

Математическая модель на основе ПИД-регулятора представляет собой алгоритмическое описание системы управления, который использует пропорционально-интегрально-дифференциальные компоненты для стабилизации и управления процессом или системой. Эта модель включает в себя уравнения и соотношения,

которые связывают входные и выходные переменные системы [7].

Классическое выражение для ПИД-регулятора представляет собой сумму трех компонент:

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt},$$

где $U(t)$ — управляющий сигнал на момент времени (t) ; $e(t)$ — ошибка управления на момент времени (t) ; K_p , K_i , K_d — коэффициенты пропорциональной, интегральной и дифференциальной компонент соответственно; (t) — текущий момент времени; (τ) — дополнительная переменная, используемая в интегральной компоненте для указания пределов интегрирования.

Пропорциональная компонента $K_p e(t)$ реагирует на текущую ошибку управления и пропорционально этой ошибке выдает сигнал управления.

Интегральная компонента $K_i e(\tau) d\tau$ вносит корректировку на суммарную ошибку управления за все предыдущие моменты времени, что позволяет устранить постоянную ошибку.

Дифференциальная компонента $K_d \frac{de(t)}{dt}$

учитывает скорость изменения ошибки и позволяет предотвратить резкие скачки и колебания [8; 9].

С использованием этих компонент и их коэффициентов ПИД-регулятор обеспечивает стабильное и точное управление системой или процессом, подстраиваясь под изменения и компенсируя возможные погрешности [9].

Используя данное уравнение, можно провести моделирование и анализ поведения системы при различных значениях коэффициентов ПИД-регулятора. Оптимальная настройка коэффициентов позволяет добиться быстрой реакции системы на изменения входного сигнала, подавления колебаний, уменьшения переходных процессов и повышения стабильности системы [10].

Математическая модель на основе ПИД-регулятора широко применяется в различных областях, таких как промышленная автоматизация, робототехника, электроника, авиация и др., для управления различными процессами и системами. Ее использование позволяет оптимизировать работу устройств, улучшить качество производства, увеличить эффективность и точность управления [11].

1.3. Использование ПИД-регулятора в биоискусственной печени

ПИД-регулятор может быть использован для управления процессами в биоискусственной печени с целью улучшения ее эффективности и стабильности работы. Биоискусственная печень представляет собой устройство, способное заменить функции естественной печени у пациентов с печеночной недостаточностью. Она выполняет задачи фильтрации крови, удаления токсинов и синтеза важных белков [12].

ПИД-регулятор может быть интегрирован в систему управления биоискусственной печенью для автоматической регулировки ее работы. Например, пропорциональная компонента ПИД-регулятора может реагировать на текущий уровень токсинов в крови пациента и корректировать процессы фильтрации и очистки. Интегральная компонента поможет учесть кумулятивную ошибку и выполнить дополнительные регулировки в процессе работы биоискусственной печени. Дифференциальная компонента сможет предотвратить резкие изменения и колебания в процессе функционирования устройства [13].

Использование ПИД-регулятора для биоискусственной печени позволит достичь оптимального управления этим важным медицинским устройством. Автоматическое контролирование процессов в биоискусственной печени с помощью ПИД-регулятора может улучшить качество работы устройства, повысить эффективность его функционирования и обеспечить надежность и стабильность в работе.

1.4. Построение математической модели биоискусственной печени с использованием ПИД-регулятора

Приведенный код (Приложение) представляет собой модель управления уровнем глюкозы в биоискусственной печени с использованием ПИД-регулятора [14].

В этом коде реализуется модель управления уровнем глюкозы в биоискусственной печени с применением ПИД-регулятора. Вначале определяются параметры ПИД-регулятора (пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты), желаемый уровень глюкозы, текущий уровень глюкозы и другие исходные данные [15].

Затем происходит инициализация переменных и запуск цикла моделирования на промежутке времени от 0 до T с заданным шагом интегрирования dt . На каждой итерации цикла рассчитывается ошибка между желаемым и текущим уровнями глюкозы, а затем вычисляются значения пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих управления.

Далее формируется общий выход управления с учетом всех трех составляющих и дозы инсулина. Кроме того, в коде присутствует меха-

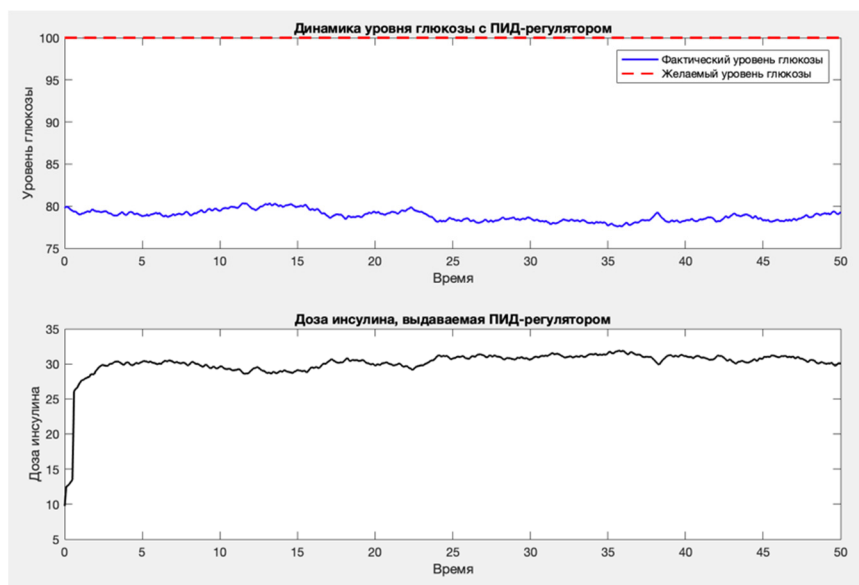
низм обратной связи, который базируется на текущем уровне глюкозы и применяет корректирующую дозу инсулина для улучшения регулирования [16].

Результаты моделирования, такие как значения выхода управления и уровня глюкозы, сохраняются на каждом шаге итерации для последующей визуализации. Таким образом, этот код реализует довольно сложную модель контроля уровня глюкозы с использованием ПИД-регулятора и обратной связи.

Данный код на MATLAB представляет собой модель управления уровнем глюкозы в биоискусственной печени с использованием ПИД-регулятора. Далее более подробно разберем, что происходит в этом коде, а затем рассмотрим, что отображается на графиках (см. рис.).

1. *Параметры ПИД-регулятора*: в начале кода задаются параметры ПИД-регулятора — пропорциональный коэффициент K_p , интегральный коэффициент K_i и дифференциальный коэффициент K_d .

2. *Параметры биоискусственной печени*: задаются параметры, такие как желаемый уровень глюкозы, текущий уровень глюкозы, предыдущий уровень глюкозы и доза инсулина.



Динамика изменения уровня глюкозы, реакция на изменения дозы инсулина

И с т о ч н и к: выполнено А.С. Ганьшиным

Dynamics of changes in glucose levels, reaction to changes in insulin dose

S o u r c e: done by A.S.Ganshin

3. *Исходные данные и переменные*: устанавливаются шаг интегрирования (dt), время моделирования (T) и другие переменные.

4. *Цикл моделирования*: запускается цикл моделирования на заданном временном промежутке. На каждой итерации вычисляется ошибка между желаемым и текущим уровнями глюкозы, а затем рассчитываются значения пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих управления.

5. *Формирование управления и дозы инсулина*: по полученным значениям составляющих управления и дозы инсулина рассчитывается общий выход управления.

6. *Обратная связь*: применяется механизм обратной связи на основе текущего уровня глюкозы для корректировки дозы инсулина.

7. *Графики*: на них отображается динамика изменения уровня глюкозы, выхода управления и других переменных в зависимости от времени, что позволит визуализировать процесс регулирования глюкозы биоискусственной печени.

Поэтому результаты моделирования на графиках дают возможность визуально оценить работу системы управления уровнем глюкозы и ее реакцию на различные параметры и воздействия [17].

Для того чтобы более детально проанализировать графики (см. рис.), следует обратить внимание на следующие аспекты:

1. *Динамика изменения уровня глюкозы*: на графике уровня глюкозы можно увидеть, как ее показатели изменяются в течение времени под воздействием управляющего сигнала ПИД-регулятора. Будет интересно наблюдать, как быстро достигается желаемый уровень глюкозы и как стабильно система удерживает его.

2. *Реакция на изменения дозы инсулина*: при изменении дозы инсулина можно увидеть, как быстро и насколько система реагирует на это изменение. Важно оценить, насколько быстро система достигает нового равновесного состояния после изменения дозы инсулина.

3. *Значения пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих*: на графиках можно посмотреть, какие значения при-

нимают пропорциональная, интегральная и дифференциальная составляющие управления в течение времени. Это позволит понять, как каждая из составляющих влияет на общее управление системой.

4. *Интегральная составляющая и компенсация ошибки управления*: отслеживание изменения интегральной составляющей дает возможность оценить, как система компенсирует накопленную ошибку управления в течение времени.

5. *Скорость реакции системы*: по временной динамике заметно, насколько быстро система реагирует на изменения и корректирует уровень глюкозы путем регулировки дозы инсулина.

Исследование графиков помогает лучше понять работу системы регулирования уровнем глюкозы и оценить ее эффективность и стабильность в контексте различных условий и настроек ПИД-регулятора [18; 19].

Заключение

В ходе настоящего исследования была представлена математическая модель биоискусственной печени, включающая в себя уровень глюкозы и использование ПИД-регулятора для управления этим уровнем. Анализ динамики изменения уровня глюкозы под воздействием управления ПИД-регулятора позволил оценить эффективность и стабильность системы регулирования.

Было выявлено, что настройка параметров ПИД-регулятора имеет значительное влияние на скорость реакции системы, компенсацию ошибки управления и общее качество регулирования. Анализ графиков динамики изменения уровня глюкозы, пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих управления позволил выявить особенности работы системы при различных условиях.

Этот эксперимент подтверждает актуальность использования ПИД-регуляторов в системах биоискусственной печени для поддержания стабильного уровня глюкозы. Дальнейшее исследование может быть направлено на оптимизацию параметров ПИД-регулятора, учет раз-

личных факторов, влияющих на уровень глюкозы, и адаптацию модели к реальным биологическим процессам для более точного моделирования и разработки систем управления.

Исследования и разработки в данном направлении могут привести к созданию более совершенных и жизнеспособных заменителей органов, способных значительно улучшить качество жизни пациентов и повысить эффективность медицинского обслуживания.

Приложение. Параметры ПИД-регулятора

```
% Параметры ПИД-регулятора
Kp = 0.6; % Пропорциональный коэффициент;
Ki = 0.1; % Интегральный коэффициент;
Kd = 0.05; % Дифференциальный коэффициент

% Параметры биосинтетической печени
desired_glucose = 100; % Желаемый уровень глюкозы;
glucose_actual = 80; % Текущий уровень глюкозы;
previous_glucose = 85; % Предыдущий уровень глюкозы;
insulin_dose = 0; % Доза инсулина

% Исходные данные
dt = 0.1; % Шаг интегрирования;
T = 50; % Время моделирования

% Инициализация переменных
error_integral = 0;
output = 0;
feedback_time = 5; % Время для отклика на обратную связь
time_steps = 0:dt:T;
output_values = zeros(size(time_steps));
glucose_values = zeros(size(time_steps));
for idx = 1:length(time_steps)
    % Расчет ошибки
    glucose_actual = glucose_actual + 0.5 * (rand() - 0.5);
    % Моделирование изменения уровня глюкозы
    error = desired_glucose - glucose_actual;
    % Пропорциональная составляющая
    P = Kp * error;
    % Интегральная составляющая с ограничением на накопление ошибки
    error_integral = error_integral + error * dt;
    error_integral = min(max(-50, error_integral), 50);
    % Ограничение на накопление ошибки
    I = Ki * error_integral;
    % Дифференциальная составляющая
    D = Kd * (glucose_actual - previous_glucose) / dt;
    % Выход управления с добавлением обратной связи
    output = P + I + D + insulin_dose;
    output = max(0, output);
    % Не допускаем отрицательной дозы инсулина
    % Фиксация дозы инсулина для обратной связи
    if idx > feedback_time
```

```
insulin_dose = Kp * (desired_glucose - glucose_actual);
% Обратная связь по пропорциональной составляющей
end

output_values(idx) = output;
glucose_values(idx) = glucose_actual;

% Сохранение предыдущего уровня глюкозы
previous_glucose = glucose_actual;
end

% Визуализация результатов
figure;
subplot(2,1,1);
plot(time_steps, glucose_values, 'b-', 'LineWidth', 1.5);
hold on;
plot(time_steps, desired_glucose*ones(size(time_steps)), 'r--', 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Время');
ylabel('Уровень глюкозы');
legend('Фактический уровень глюкозы', 'Желаемый уровень глюкозы');
title('Динамика уровня глюкозы с ПИД-регулятором');
hold off;
grid on;

subplot(2,1,2);
plot(time_steps, output_values, 'k-', 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Время');
ylabel('Доза инсулина');
title('Доза инсулина, выдаваемая ПИД-регулятором');
grid on
```

References / Список литературы

- Pereira DS, Pinto JOP. Genetic algorithm based system identification and PID tuning for optimum adaptive control. *Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. 2005; 801–806. <https://doi.org/10.1109/AIM.2005.1511081>
- Kato M, Yamamoto T, Fujisawa S. A skill based PID controller using artificial neural networks. *International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce (CIMCA-IAWTIC'06)*, Vienna, Austria, 2005. P. 702–707. <https://doi.org/10.1109/CIMCA.2005.1631346>
- Balis UJ, Yarmush ML, Toner M. Bioartificial Liver Process Monitoring and Control Systems with Integrated Systems Capability. *Tissue Engineering*. 2002;8(3):483–98. <https://doi.org/10.1089/1076327027601847>
- Wu C, Li K, Zhang C, Zhang G, Huo X. Implementation of Signal Detection and Control of Bioartificial Liver Support System. *BIBE2021: The Fifth International Conference on Biological Information and Biomedical Engineering*. 2021. Article No. 25. <https://doi.org/10.1145/3469678.3469703>
- He Y-T, Qi Y-N, Zhang B-Q, Li J-B, Bao J. Bioartificial liver support systems for acute liver failure:

A systematic review and meta-analysis of the clinical and preclinical literature. *World Journal of Gastroenterology*. 2019;25(27):3634–3648. <https://doi.org/10.3748/wjg.v25.i27.3634>

6. Dolgikh MS. The modern technologies for creation of implanted bioartificial liver. *Biochemistry (Moscow), Supplement Series B: Biomedical Chemistry*. 2010;4(2):150–160. <https://doi.org/10.1134/S1990750810020058>

Долгих М.С. Современные технологии создания имплантируемой биоискусственной печени // Биомедицинская химия. 2010. Т. 56. № 4. С. 425–442. (In Russ.) <https://doi.org/10.18097/pbmc20105604425>

7. Pankratov LV. Modeling and optimization of the PID controller. *Science and technology of transport*. 2017; (2):73–78. (In Russ.) EDN: YSPHYB

Панкратов Л.В. Моделирование и оптимизация ПИД-регулятора // Наука и техника транспорта. 2017. № 2. С. 73–78. (In Russ.) EDN: YSPHYB

8. Alexandrov AG, Palenov MV. Adaptive PID controllers: state of the art and development prospects. *Automation and Remote Control*. 2014;75(2):188–199. <https://doi.org/10.1134/S0005117914020027>

Александров А.Г., Паленов М.В. Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД-регуляторов // Автоматика и телематика. 2014. № 2. С. 16–30. (In Russ.)

9. Detry O, Arkadopoulos N, Ting P, Kahaku E, Watanabe FD, Rozga J, Demetriou AA. Clinical use of a bioartificial liver in the treatment of acetaminophen-induced fulminant hepatic failure. *American surgeon*. 1999;65(10):934–938. EDN: DEOHDD

10. Ding YT, Shi XL. Bioartificial liver devices: Perspectives on the state of the art. *Frontiers of Medicine*. 2011;5:15–19. <https://doi.org/10.1007/s11684-010-0110-x>

11. Park JK, Lee DH. Bioartificial Liver Systems: Current Status and Future Perspective. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 2005;99(4):311–319. <https://doi.org/10.1263/jbb.99.311>

12. Bañares R, Catalina MV, Vaquero J. Molecular adsorbent recirculating system and bioartificial devices for

liver failure. *Clin Liver Dis*. 2014;18(4):945–956. <https://doi.org/10.1016/j.cld.2014.07.011>

13. Cisneros-Garza LE, del Rosario Muñoz-Ramírez M, Muñoz-Espinoza LE. The molecular adsorbent recirculating system as a liver support system: summary of Mexican experience. *Ann Hepatol*. 2014;13(2):240–247. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24552866/>

14. Kanjo A, Ocskay K, Gede N. Efficacy and safety of liver support devices in acute and hyperacute liver failure: a systematic review and network meta-analysis. *Sci Rep*. 2021;11(1):1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598021-83292-z>

15. Hanish SI, Stein DM, Scalea JR. Molecular Adsorbent Recirculating System Effectively Replaces Hepatic Function in Severe Acute Liver Failure. *Ann Surg*. 2017; 266(4):677–684. <https://doi.org/10.1097/sla.0000000000002361>

16. Salman GA, Jafar AS, Ismael AI. Application of artificial intelligence techniques for LFC and AVR systems using PID controller. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2019;10(3):1694. <http://dx.doi.org/10.11591/ijpeds.v10.i3.pp1694-1704>

17. Kouba NY, Mena M, Hasni M, Boudour M. Optimal Control of Frequency and Voltage Variations Using PID Controller Based on Particle Swarm Optimization. *Proceedings of the 4th International Conference on Systems and Control*. 2015:424–429. <http://dx.doi.org/10.1109/ICoSC.2015.7152777>

18. Tan HK. Molecular adsorbent recirculating system (MARS). *Ann Acad Med Singap*. 2004;33(3):329–335. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15175774/>

19. Khuroo MS, Khuroo MS, Farahat KLC. Molecular adsorbent recirculating system for acute and acute-on-chronic liver failure: a meta-analysis. *Liver Transpl*. 2004; 10(9):1099–1106. <https://doi.org/10.1002/lt.20139>

20. Tandon R, Froghi S. Artificial liver support systems. *J Gastroenterol Hepatol*. 2021;36(5):1164–1179. <https://doi.org/10.1111/jgh.15255>

Сведения об авторах

Ганшин Алексей Сергеевич, аспирант кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; ORCID: 0000-0003-3582-4889; e-mail: 1042210064@pfur.ru

Андриков Денис Анатольевич, кандидат технических наук, доцент департамента механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 8247-7310; ORCID: 0000-0003-0359-0897; e-mail: andrikovdenis@mail.ru

About the authors

Alexey S. Ganshin, Postgraduate student of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; ORCID: 0000-0003-3582-4889; e-mail: 1042210064@pfur.ru

Denis A. Andrikov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 8247-7310; ORCID: 0000-0003-0359-0897; e-mail: andrikovdenis@mail.ru