

УДК 616.12-07:004.94
doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-7

РАЗРАБОТКА БАЗЫ МОДЕЛЕЙ ИОННЫХ ТОКОВ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

О. Н. Бодин¹, Н. А. Сержантова², М. В. Едемский³, Н. Э. Кручинина⁴

^{1,2,4} Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

³ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹bodin_o@inbox.ru, ²itmmbspgta@yandex.ru, ³misha.f.2015@mail.ru, ⁴kruchininane@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Повышение качества ранней диагностики сердечно-сосудистых заболеваний можно обеспечить в том числе внедрением медицинских информационных систем (МИС), позволяющих осуществлять сбор и анализ информации и обеспечивать снижение количества ошибок и повышение качества диагностики, особенно на ранних этапах в условиях дефицита времени и доступных технических средств проведения обследования. По мнению авторов, подобные МИС должны содержать расширенную базу моделей ионных токов. *Материалы и методы.* Рассмотрена модель Нобла, которая может применяться в составе МИС для количественного описания процессов работы сердца в норме и при различных патологиях и сравнения расчетных величин с данными натурных экспериментов. *Результаты.* Создана база ионных токов, содержащая результаты моделирования токов калия, натрия, кальция, токов через натриево-калиевый и натриево-кальциевый насосы, токов утечки, плато и фоновых токов. *Выводы.* Наличие моделей всех составляющих уравнения Нобла позволит повысить точность работы МИС. При необходимости в базе моделей можно отключать некоторые источники для оценки вклада соответствующих составляющих в итоговую сумму токов, а также методическую погрешность, возникающую в случае, если той или иной составляющей решено пренебречь.

Ключевые слова: сердечно-сосудистые заболевания, медицинская информационная система, база моделей, ионные токи, модель Нобла, трансмембранный потенциал

Для цитирования: Бодин О. Н., Сержантова Н. А., Едемский М. В., Кручинина Н. Э. Разработка базы моделей ионных токов для медицинской информационной системы диагностики сердечно-сосудистых заболеваний // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 3. С. 59–69. doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-7

DEVELOPMENT OF IONIC CURRENT MODEL BASE FOR MEDICAL INFORMATION SYSTEM OF CARDIOVASCULAR DISEASES DIAGNOSTICS

O.N. Bodin¹, N.A. Serzhantova², M.V. Edemsky³, N.E. Kruchinina⁴

^{1,2,4} Penza State Technological University, Penza, Russia

³ Penza State University, Penza, Russia

¹bodin_o@inbox.ru, ²itmmbspgta@yandex.ru, ³misha.f.2015@mail.ru, ⁴kruchininane@gmail.com

Abstract. *Background.* Improving the quality of early cardiovascular disease diagnostics can be provided, among other things, by the introduction of medical information systems (MIS), which allow to collect and analyze information and to reduce the number of errors and improve the quality of diagnostics especially at early stages in the conditions of time deficit and available technical means of examination. According to the authors, such MIS should contain an extended base of ionic current models. *Materials and methods.* The article considers the Noble model, which can be used as a part of MIS for quantitative description of heart work processes in norm and at different pathologies and comparison of calculated values with the data of natural experiments. *Results.* The database of ionic currents containing the results of modeling of potassium, sodium, calcium currents, currents through sodium-potassium and sodium-calcium pumps, leakage currents, plateau and background currents was created. *Conclusions.* The availability the models of all components in the Noble equation will improve the accuracy of the MIS. If necessary, in the base of models it is possible to disable some sources to estimate the contribution of the corresponding components to the final sum of currents, as well as the methodological error arising if one or another component is neglected.

Keywords: cardiovascular diseases, medical information system, model database, ionic currents, Noble model, transmembrane potential

For citation: Bodin O.N., Serzhantova N.A., Edemsky M.V., Kruchinina N.E. Development of ionic current model base for medical information system of cardiovascular diseases diagnostics. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(3):59–69. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-7

Введение

С 2020 г. наблюдается сокращение регистрируемых показателей выявления первичных болезней системы кровообращения (БСК) и сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ), что отражает напряженную ситуацию, сложившуюся в системе здравоохранения после пандемии новой коронавирусной инфекции [1]. При этом ощущается дефицит врачей некоторых специальностей, а также врачей, работающих в амбулаторно-поликлинических организациях [2].

Совершенствование системы оказания первичной медико-санитарной помощи пациентам связано с внедрением алгоритмов, направленных на раннее выявление лиц из группы высокого риска по развитию инсульта и инфаркта миокарда, пациентов с хронической сердечной недостаточностью [3], пациентов с тромбозом глубоких вен и высоким риском тромбоэмболии легочной артерии. В связи с этим актуальной задачей является разработка и внедрение систем, обеспечивающих информационную поддержку специалистов первичного звена здравоохранения, обработку и анализ сигналов и данных пациента, а также скрининговую диагностику ССЗ. Информационную поддержку медицинских работников можно обеспечить в том числе внедрением медицинских информационных систем (МИС), позволяющих осуществлять сбор и анализ информации и обеспечивать снижение количества ошибок и повышение качества диагностики социально значимых заболеваний особенно на ранних этапах в условиях дефицита времени и доступных технических средств проведения обследования [4–7].

Повышение качества диагностики с применением МИС может достигаться разными способами:

1) за счет накапливания большого количества клинических случаев, на основе которых затем производится прецедентный вывод;

2) за счет совершенствования методов, алгоритмов и средств предварительной обработки входных данных МИС и/или решающих правил, что позволяет извлекать данные с большей диагностической ценностью.

Одной из разновидностей МИС является система поддержки принятия решений (СППР). Анализ литературных источников [8–13] показал, что в настоящее время в СППР чаще реализуется первый подход. Однако, по мнению авторов, для большей эффективности МИС в целом и СППР в частности необходимо использовать сочетание обоих подходов, опираясь не только на базу кардиограмм, но и на базу моделей, отражающих изменение электрической активности сердца (ЭАС). Целью статьи является подготовка базы моделей ионных токов для медицинской информационной системы диагностики сердечно-сосудистых заболеваний.

Материалы и методы

В настоящее время существует большое количество МИС, основным назначением которых является поддержка принятия врачебных решений врача-кардиолога. Примеры некоторых МИС для этих целей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Примеры медицинских информационных систем, используемых для информационной поддержки врача-кардиолога при диагностике сердечно-сосудистых заболеваний

МИС	Источники данных	Назначение	Область применения	Показатели эффективности диагностики
1	2	3	4	5
2Talk4Cardiology, Сколково, Научный центр сердечно-сосудистой хирургии им. А. Н. Бакулева РФ [8]	Электронные библиотеки, базы диссертаций, истории болезней, внутренняя АИС, справочники и классификаторы медицинской информации	Формирование кардиологической онтологии, поиск прецедентов, информационная поддержка при диагностике	Отделения кардиологии, сердечно-сосудистой хирургии, реанимации и интенсивной терапии	Нет данных

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
СППР для классификации аритмий [9]	Данные с устройства для амбулаторного мониторинга ЭКГ с одним отведением	Классификация 12 классов ритмов ЭКГ (10 аритмий, шум, синусовый ритм)	Амбулаторная диагностика	[AUC] = 0,97, Se = 0,83
Decision support system for interpretation of myocardial perfusion gated SPECT [10]	Данные перфузионной сцинтиграфии миокарда	Диагностика ишемии и инфаркта миокарда	Отделения кардиологии	Se = 0,83, Sp = 0,83
A Deep Learning-Enabled Electrocardiogram Model for the Identification of a Rare Inherited Arrhythmia: Brugada Syndrome [11]	Данные ЭКГ	Диагностика синдрома Бругада	Отделения кардиологии	[AUC] = 0,96, Se = 0,88, Sp = 0,89
Interpretable deep learning for automatic diagnosis of 12-lead electrocardiogram [12]	Данные ЭКГ в 12 отведениях	Диагностика нарушений сердечного ритма и проводимости на электрокардиограммах	Отделения кардиологии	[AUC] = 0,81
Fuzzy based expert system for diagnosis of coronary artery disease in Nigeria [13]	Данные ЭКГ, данные анализа крови	Диагностика ишемической болезни сердца	Отделения кардиологии	Se = 0,95, Sp = 0,95

Большинство рассмотренных систем предназначены для использования в клинической практике и не подходит для скрининга в условиях первичного звена здравоохранения, так как либо являются узкопрофильными (ориентированы на выявление лишь одного заболевания с высокой точностью), либо требуют уточняющих методов исследования для формирования входного набора исследуемых данных. Следовательно, для повышения качества скрининговой диагностики широкого спектра сердечно-сосудистых заболеваний необходимо разработать МИС, способную извлекать больше диагностической информации из данных, полученных скрининговыми методами исследований. По мнению авторов, этого можно достичь за счет применения расширенной базы моделей в составе МИС.

Типовая структура МИС для информационной поддержки врача представлена на рис. 1 и включает базу данных, базу моделей и программную подсистему, которая состоит из системы управления базой данных (СУБД), системы управления базой моделей (СУБМ) и системы управления интерфейсом между пользователем и компьютером [14].

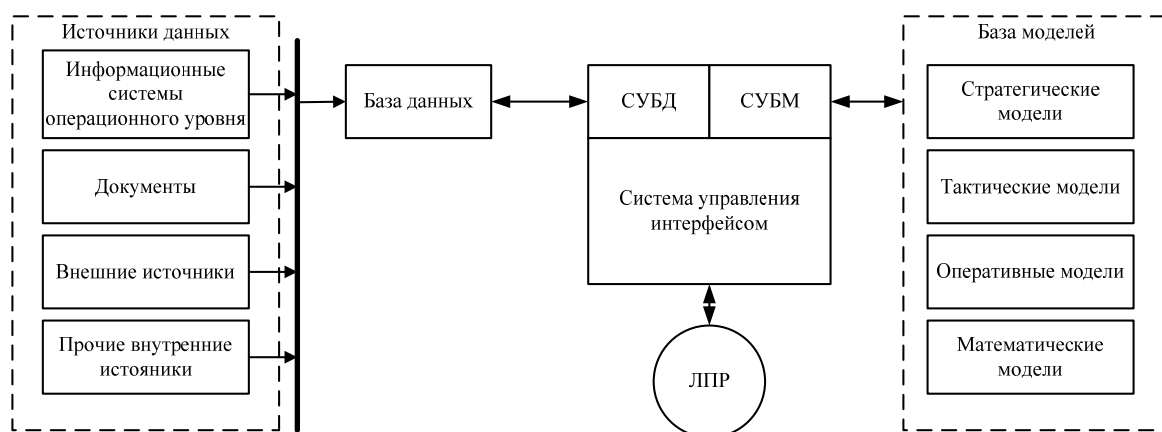


Рис. 1. Типовая структура МИС для информационной поддержки врача

Такая структура позволяет реализовать модель задачи принятия решений (ЗПР), которая в общем виде записывается следующим образом:

$$\text{ЗПР} = \langle T, A, K, X, F, G, D \rangle,$$

где T – постановка задачи; A – множество допустимых альтернатив; K – множество критериев оценки эффективности вариантов решения; X – множество методов принятия решения; F – характеристики внешних условий принятия решений; G – система предпочтений экспертов; D – решающее правило, отражающее систему предпочтения экспертов [15].

В рамках исследования задача принятия решения T формулируется как «диагностика сердечно-сосудистых заболеваний». Задача решается в условиях неопределенности (F) и по системе предпочтений экспертов (G) является индивидуальной.

При реализации методов принятия решений (X) и решающего правила (D) авторами предлагается использовать следующие модели:

- цифровой двойник сердца (ЦДС);
- компьютерная модель сердца (КМС);
- модель электрической активности сердца.

Задачей моделирования электрической активности сердца является установление взаимосвязей между основными закономерностями изменения кардиопотенциалов, известными в электрофизиологии и в электрокардиографии. Развитие компьютерной техники позволило использовать модели сердца, учитывающие анизотропию волокон, особенности потенциала действия кардиомиоцитов в миокарде [16].

Для количественного описания процессов работы сердца в норме и при различных патологиях предъявляются высокие требования к качеству моделирования и требуется сравнивать расчетные величины с данными натурных экспериментов. Для этих целей используют детальные модели. Необходимость учитывать изменение различного состава мембранных токов привело к большому разнообразию современных математических моделей кардиомиоцитов. Одной из детальных моделей является модель Нобла, согласно которой потенциал кардиомиоцита определяется суммой ионных токов dE/dt [16, 17]:

$$dE/dt = -(i_{Na} + i_{CaL} + i_{to} + i_{Kr} + i_{Ks} + i_{K1} + i_{NaCa} + i_{NaK} + i_{b,Ca} + i_{p,Na} + i_{b,Ca} + i_{b,Na} + i_{Stim})/Capacitance),$$

где i_{Na} – быстрый натриевый ток; i_{CaL} – ток ионов кальция через каналы L -типа; i_{to} – переходный ток утечки; i_{Kr} – ток калия быстрого выпрямления; i_{Ks} – ток калия медленного выпрямления; i_{K1} – ток калия внутреннего выпрямления; i_{NaCa} – ток натриево-кальциевого насоса; i_{NaK} – ток натриево-калиевого насоса; $i_{b,Ca}$ – ток плато кальция; $i_{p,Na}$ – ток плато натрия; $i_{b,Ca}$ – фоновый ток кальция; $i_{b,Na}$ – фоновый ток натрия; i_{Stim} – стимулирующий ток; $Capacitance$ – емкость мембраны.

База моделей МИС для информационной поддержки врача-кардиолога предполагает наличие эталонных моделей сравнения всех ионных токов, входящих в состав детальной модели Нобла. Таким образом, при разработке МИС необходимо формирование имитационных моделей ионных токов. В качестве среды моделирования выбран Simulink пакета MATLAB.

Результаты

Согласно модели Нобла трансмембранный потенциал (ТМПД) находится как интеграл отношения суммы ионных токов к емкости мембраны кардиомиоцита. В среде Simulink пакета MATLAB разработана обобщенная модель формирования ТМПД (рис. 2), включающая подсистему, вычисляющую общее значение ионного тока в мембране кардиомиоцита, постоянное значение емкости мембраны, интегратор и осциллографы для вывода сигнала ТМПД.

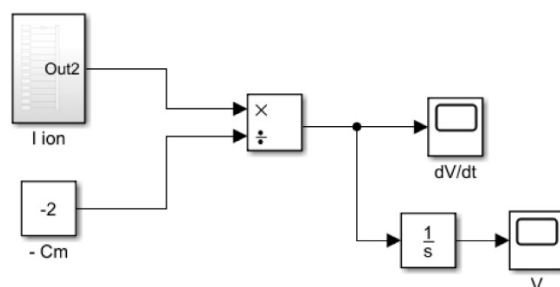


Рис. 2. Модель трансмембранного потенциала

Подсистема, вычисляющая общее значение ионного тока в мембране кардиомиоцита, представлена на рис. 3 и состоит из тринадцати источников ионного тока.

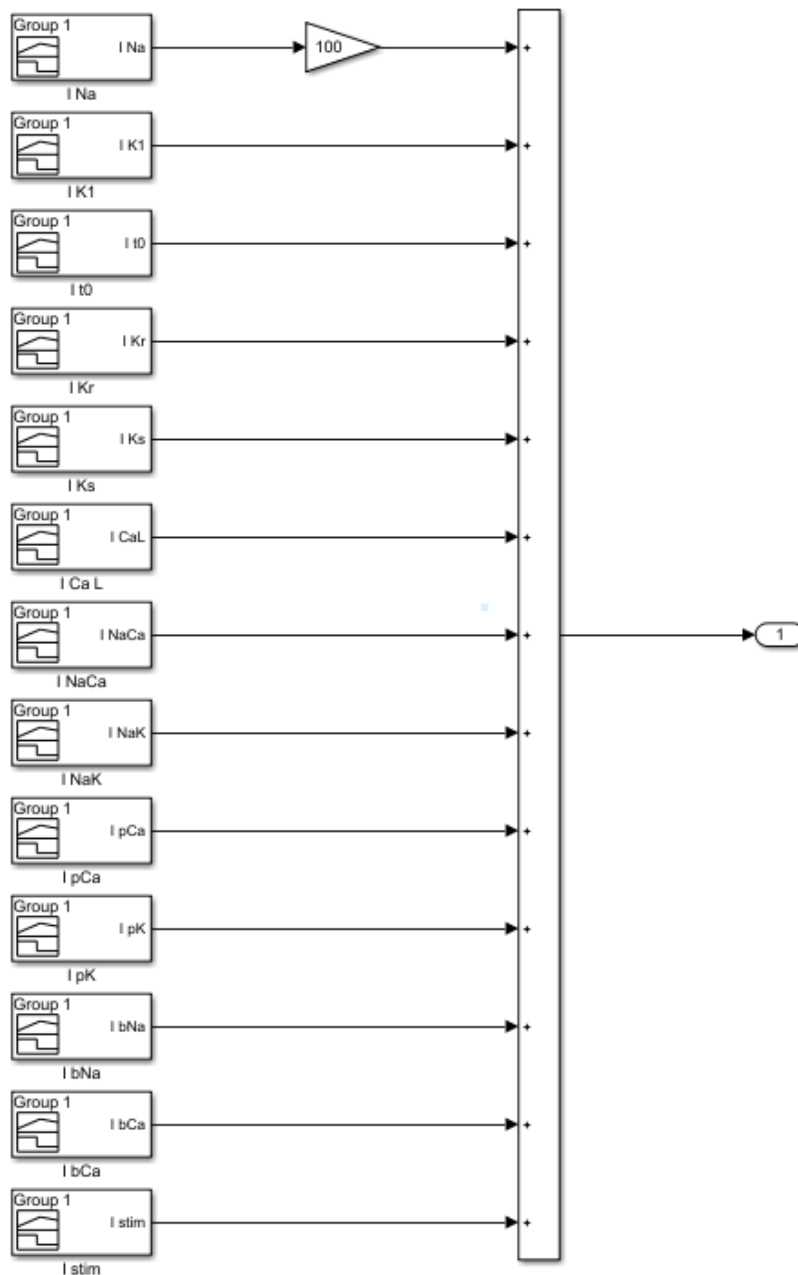


Рис. 3. Подсистема, вычисляющая общее значение ионного тока в мембране кардиомиоцита

Часто при построении систем, при расчете суммы ионных токов, некоторыми значениями пренебрегают как незначительными. Однако авторы считают необходимым при моделировании использовать весь набор источников, отражающих ионные токи уравнения Нобла.

Наибольший вклад в общую сумму ионных токов вносят токи калия. На рис. 4 приведены результаты моделирования для тока калия быстрого выпрямления i_{Kr} , тока калия медленного выпрямления i_{Ks} и тока калия внутреннего выпрямления i_{K1} .

Центральную роль в проведении сердечного импульса в кардиомиоцитах предсердий и желудочков и в клетках системы Гиса играет натриевый канал. Натриевый канал обеспечивает быстрый поток ионов натрия внутрь клетки в фазу 0 трансмембранного потенциала действия, в результате чего происходит деполяризация мембраны кардиомиоцита [18]. Результат моделирования тока натрия представлен на рис. 5.

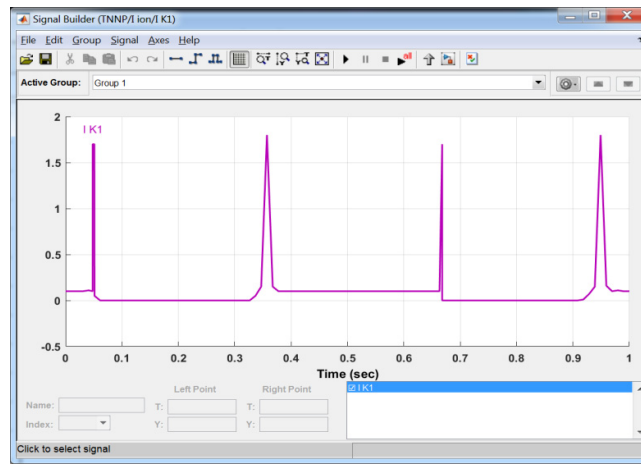
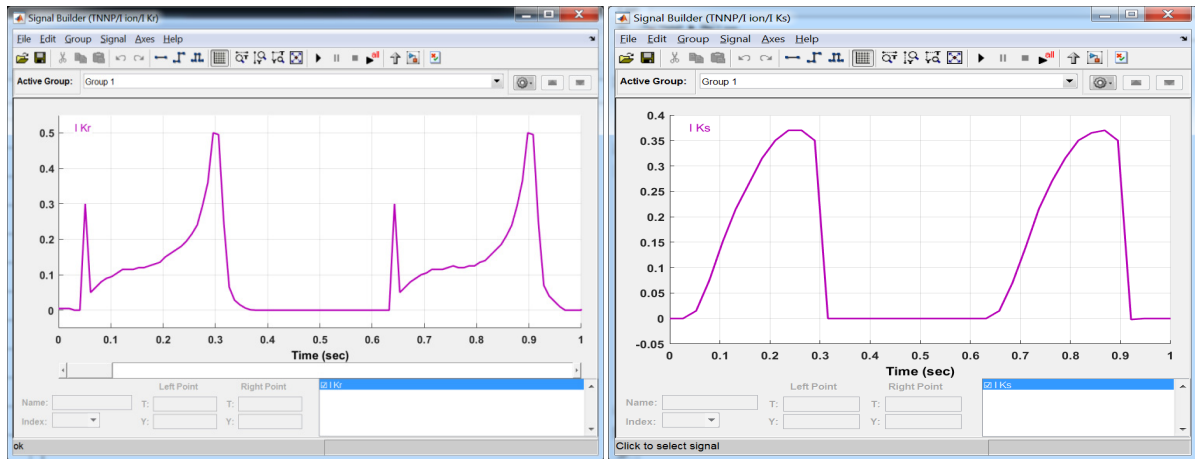


Рис. 4. Результаты моделирования тока калия быстрого выпрямления i_{Kr} , тока калия медленного выпрямления i_{Ks} и тока калия внутреннего выпрямления i_{K1}

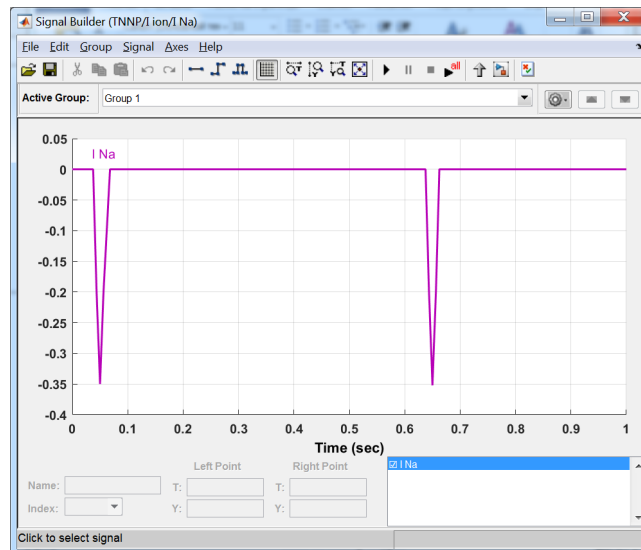


Рис. 5. Результаты моделирования тока калия быстрого выпрямления i_{Kr} , тока калия медленного выпрямления i_{Ks} и тока калия внутреннего выпрямления i_{K1}

Моделирование тока кальция через каналы L -типа чаще всего выполняют при исследовании состояний, связанных с перегрузкой кардиомиоцита кальцием. При построении МИС для диагностики широкого спектра ССЗ, наличие подобных моделей, по мнению авторов, является обязательным. Результат моделирования тока ионов кальция через каналы L -типа представлен на рис. 6.

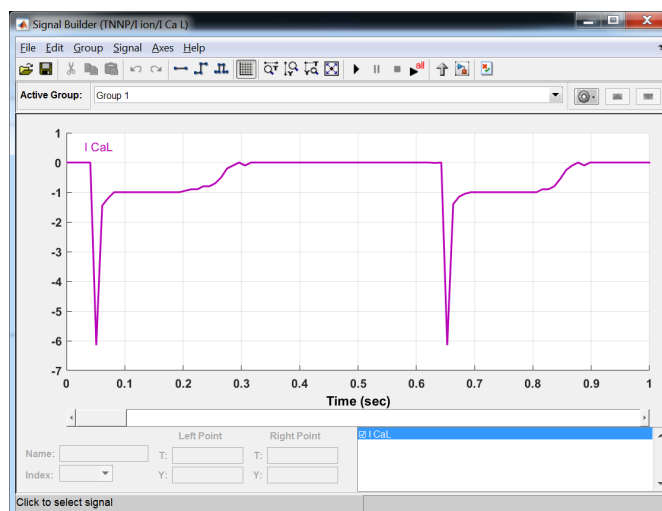


Рис. 6. Результаты моделирования тока ионов кальция через каналы L -типа

Кроме того, различные патологические состояния могут оказывать существенное влияние на активный транспорт через мембрану и работу натрий-калиевого и натрий-кальциевого насосов. Результат моделирования тока через натриево-кальциевый насос и через натриево-калиевый насос представлен на рис. 7.

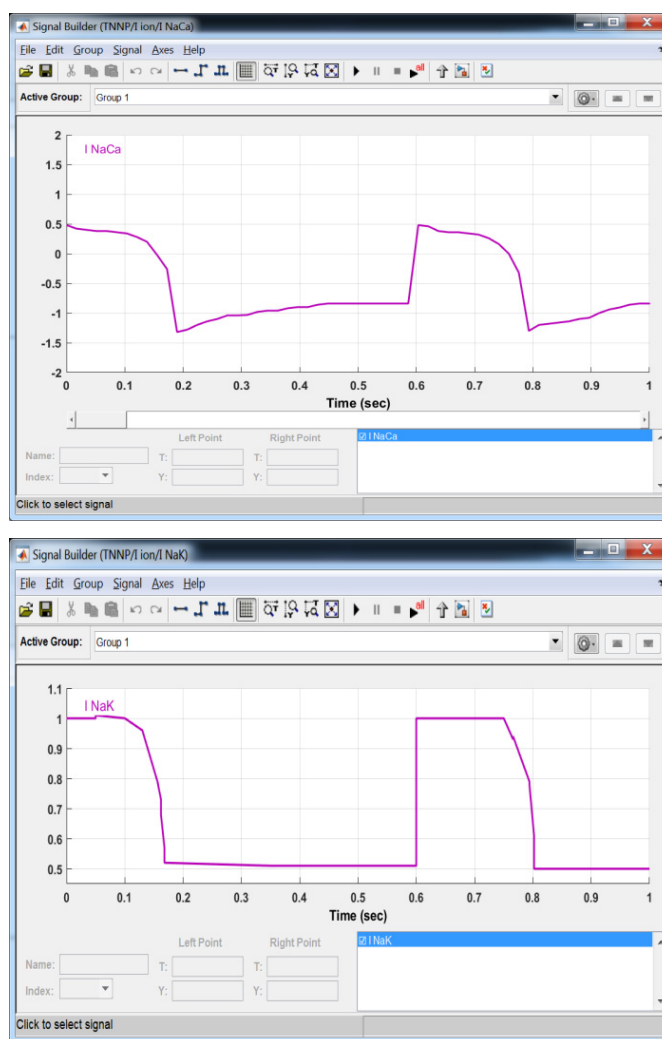


Рис. 7. Результаты моделирования тока через натриево-кальциевый насос и через натриево-калиевый насос

В дополнение к перечисленному на рис. 8 приведены результаты моделирования фоновых токов и токов плато (которыми при построении моделей ТМПД часто пренебрегают), но которые следует учитывать для повышения качества работы МИС и расширения ее функциональных возможностей.

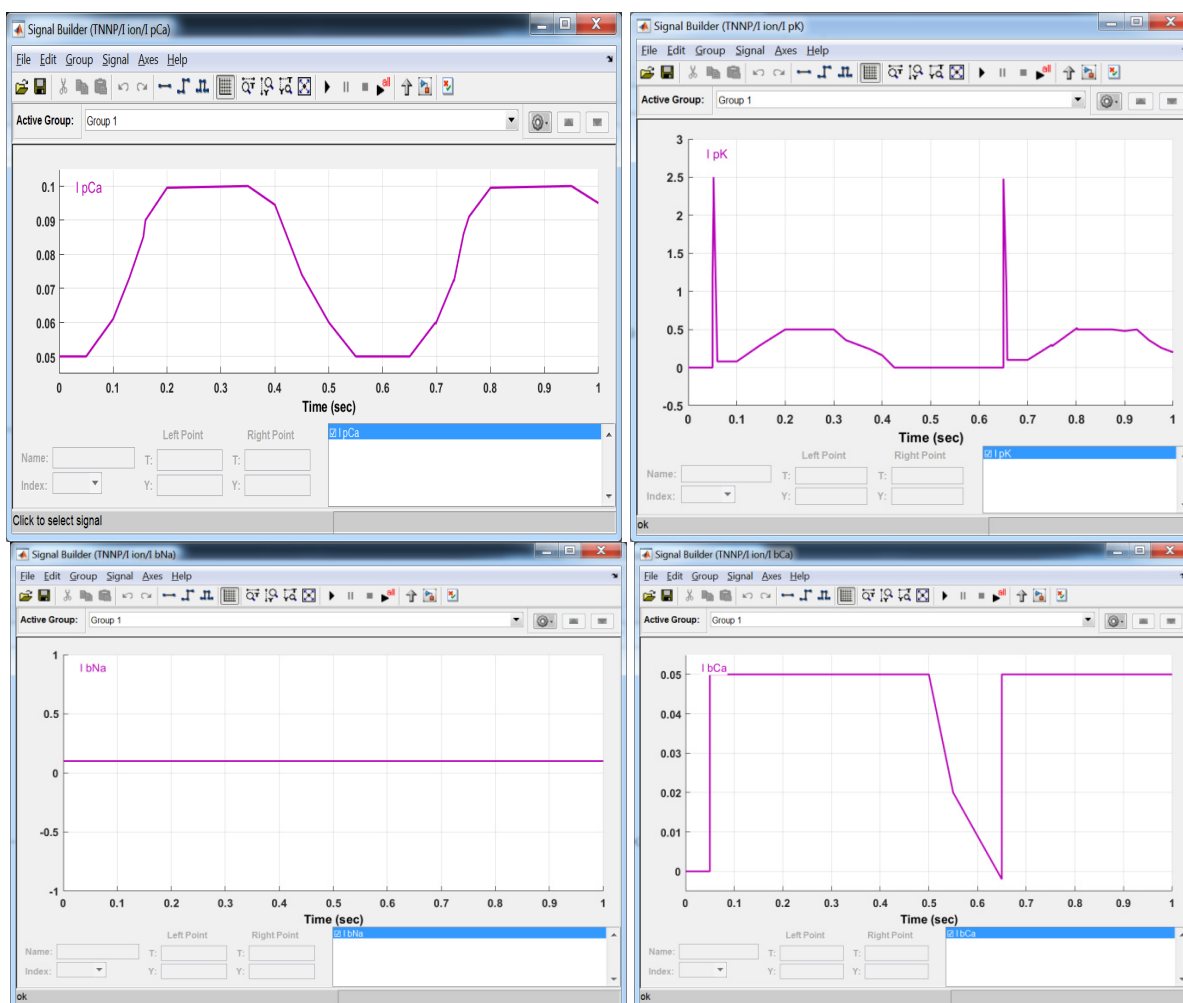


Рис. 8. Результаты моделирования фоновых токов и токов плато

Учитывая высокие требования к качеству моделирования и необходимость сравнения расчетных величин с данными натуральных экспериментов, наличие моделей всех составляющих уравнения Нобла позволит повысить точность работы МИС. При необходимости в базе моделей можно отключать некоторые источники для оценки вклада соответствующих составляющих в итоговую сумму токов, а также методическую погрешность, возникающую в случае, если той или иной составляющей решено пренебречь.

Заключение

Таким образом, для большей эффективности МИС необходимо использовать базу моделей, отражающих корректное изменение электрической активности сердца. Разработанные модели в составе базы моделей МИС позволят расширить функциональные возможности системы и выполнять качественную диагностику большого количества ССЗ.

Список литературы

1. Сон И. М., Стародубов В. И., Маношкина Е. М., Ступак В. С. Тенденции показателей заболеваемости и больничной летальности от болезней системы кровообращения на фоне новой коронавирусной инфекции COVID-19 // Профилактическая медицина. 2021. № 24. С. 7–14.

2. Барбаш О. Л., Кузнецова Т. Ю. Подготовка высокопрофессионального врача специалиста кардиолога в современных условиях: миф или реальность? К вопросу о новом федеральном государственном образовательном стандарте высшего образования по специальности «Кардиология» // Российский кардиологический журнал. 2022. № 27. С. 63–68.
3. Региональная программа «Борьба с сердечно-сосудистыми заболеваниями в Пензенской области» : постановление Правительства Пензенской области. Пенза, 2019.
4. Гусев А. В., Зарубина Т. В. Поддержка принятия врачебных решений в медицинских информационных системах медицинской организации // Врач и информационные технологии. 2017. № 2. С. 60–72.
5. Gusynina Y. S., Shornikova T. A. Using the neural network in clinical systems // Journal of Physics: Conference Series. 2021. № 1. P. 42131.
6. Istomina T. V., Petrunina E. V., Istomin V. V., Trub N. V. IOT intelligent system for medical control of the state of operators during their professional activity in extreme situations // AIP Conference Proceedings. 2021. № 1. P. 2389.
7. Спиркин А. Н., Авдеева Н. В. Выявление патологических состояний по анализу биоэлектрической активности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 1. С. 75–84.
8. Система поддержки принятия медицинских решений в кардиологии, сердечно-сосудистой хирургии и анестезиологии-реаниматологии с использованием технологий интеллектуального анализа текста и извлечения знаний // 2Talk4Cardiology, Научный центр сердечно-сосудистой хирургии имени А. Н. Бакулева. URL: <https://files.runet-id.com/2016/iri-forum-med16/24nov.iri-forum-med16-3-12-30-14-00--fartyshny.pdf>
9. Hannun A. Y., Rajpurkar P., Haghpanahi M. et al. Cardiologist-level arrhythmia detection and classification in ambulatory electrocardiograms using a deep neural network // Nature Medicine. 2019. Vol. 25. P. 65–69.
10. Lomsky M., Gjerthsson P., Johansson L. et al. Evaluation of a decision support system for interpretation of myocardial perfusion gated SPECT // European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging. 2008. Vol. 35. P. 1523–1529. doi: 10.1007/s00259-008-0746-9
11. Liu C. M., Liu C. L., Hu K. W. et al. A Deep Learning-Enabled Electrocardiogram Model for the Identification of a Rare Inherited Arrhythmia: Brugada Syndrome // Canadian Journal of Cardiology. 2022. Vol. 38. P. 152–159. doi: 10.1016/j.cjca.2021.08.014
12. Zhang D., Yang S., Yuan X., Zhang P. Interpretable deep learning for automatic diagnosis of 12-lead electrocardiogram // iScience. 2021. Vol. 24. P. 102373. doi: 10.1016/j.isci.2021.102373
13. Muhammad L. J., Algehyne E. A. Fuzzy based expert system for diagnosis of coronary artery disease in Nigeria // Health Technol (Berl). 2021. Vol. 11. P. 319–329. doi: 10.1007/s12553-021-00531-z
14. Adewole K. S., Mojeed H. A., Ogunmodede J. A. et al. Expert System and Decision Support System for Electrocardiogram Interpretation and Diagnosis: Review, Challenges and Research Directions // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. P. 12342. doi: 10.3390/app122312342
15. Халин В. Г. Системы поддержки принятия решений : учебник и практикум для вузов. М. : Юрайт, 2023. С. 494.
16. Салтыкова М. М. Современные модели электрической активности сердца и их значение в электрокардиографической диагностике // Вестник новых медицинских технологий. 2008. № 2. С. 70–73.
17. Бодин О. Н., Ломтев Е. А., Полосин Е. Г., Рахматуллоев Ф. К. Вычислительные методы электрокардиологии. Пенза : Изд-во ПГУ, 2017.
18. Полосин В. Г., Бодин О. Н., Иванчуков А. Г. Анализ ионных токов эпикарда в период рефрактерности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2015. № 3. С. 54–63.
19. Андерсон А. Г. Первичные (генетически детерминированные) заболевания проводящей системы сердца и их взаимосвязь с нарушениями функции натриевого канала // Анналы аритмологии. 2005. № 2. С. 50–55.

References

1. Son I. M., Starodubov V.I., Manoshkina E.M., Stupak V.S. Trends in morbidity and hospital mortality from diseases of the circulatory system against the background of a new coronavirus infection COVID-19. *Profilakticheskaya meditsina = Preventive medicine*. 2021;(24):7–14. (In Russ.)
2. Barbash O.L., Kuznetsova T.Yu. Training of a highly professional cardiologist specialist in modern conditions: myth or reality? On the issue of the new federal state educational standard of higher education in the specialty "Cardiology". *Rossiyskiy kardiologicheskiy zhurnal = Russian Journal of Cardiology*. 2022;(27): 63–68. (In Russ.)
3. *Regional'naya programma «Bor'ba s serdechno-sosudistymi zabolevaniyami v Penzenskoy oblasti»: postanovlenie Pravitel'stva Penzenskoy oblasti = Regional program "Fight against cardiovascular diseases in the Penza region": resolution of the Government of the Penza region*. Penza, 2019. (In Russ.)

4. Gusev A.V., Zarubina T.V. Support for medical decision-making in medical information systems of a medical organization. *Vrach i informatsionnye tekhnologii = Doctor and information technologies*. 2017;(2):60–72. (In Russ.)
5. Gusynina Y.S., Shornikova T.A. Using the neural network in clinical systems. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;(1):42131.
6. Istomina T.V., Petrunina E.V., Istomin V.V., Trub N.V. IOT intelligent system for medical control of the state of operators during their professional activity in extreme situations. *AIP Conference Proceedings*. 2021;(1):2389.
7. Spirkin A.N., Avdeeva N.V. Identification of pathological conditions by analysis of bioelectric activity. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2018;(1): 75–84. (In Russ.)
8. *Sistema podderzhki prinyatiya meditsinskikh resheniy v kardiologii, serdechno-sosudistoy khirurgii i anesteziologii-reanimatologii s ispol'zovaniem tekhnologiy intellektual'nogo analiza teksta i izvlecheniya znaniy = The system of support for medical decision-making in cardiology, cardiovascular surgery and anesthesiology-resuscitation using technologies of intelligent text analysis and knowledge extraction*. 2Talk4Cardiology, Scientific Center of Cardiovascular Surgery named after A.N. Bakulev. (In Russ.). Available at: <https://files.runet-id.com/2016/iri-forum-med16/24nov.iri-forum-med16-3-12-30-14-00--fartyshny.pdf>
9. Hannun A.Y. Rajpurkar P., Haghpanahi M. et al. Cardiologist-level arrhythmia detection and classification in ambulatory electrocardiograms using a deep neural network. *Nature Medicine*. 2019;25:65–69.
10. Lomsky M., Gjerdtsson P., Johansson L. et al. Evaluation of a decision support system for interpretation of myocardial perfusion gated SPECT. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2008;35:1523–1529. doi: 10.1007/s00259-008-0746-9
11. Liu C.M., Liu C.L., Hu K.W. et al. A Deep Learning-Enabled Electrocardiogram Model for the Identification of a Rare Inherited Arrhythmia: Brugada Syndrome. *Canadian Journal of Cardiology*. 2022;38:152–159. doi: 10.1016/j.cjca.2021.08.014
12. Zhang D., Yang S., Yuan X., Zhang P. Interpretable deep learning for automatic diagnosis of 12-lead electrocardiogram. *iScience*. 2021;24:102373. doi: 10.1016/j.isci.2021.102373
13. Muhammad L.J., Algehyne E.A. Fuzzy based expert system for diagnosis of coronary artery disease in Nigeria. *Health Technol (Berl)*. 2021;11:319–329. doi: 10.1007/s12553-021-00531-z
14. Adewole K.S., Mojeed H.A., Ogunmodede J.A. et al. Expert System and Decision Support System for Electrocardiogram Interpretation and Diagnosis: Review, Challenges and Research Directions. *Applied Sciences*. 2022;12:12342. doi: 10.3390/app122312342
15. Khalin V.G. *Sistemy podderzhki prinyatiya resheniy: uchebnik i praktikum dlya vuzov = Decision support systems : textbook and workshop for universities*. Moscow: Yurayt, 2023:494. (In Russ.)
16. Saltykova M.M. Modern models of electrical activity of the heart and their significance in electrocardiographic diagnostics. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy = Bulletin of new medical technologies*. 2008;(2):70–73. (In Russ.)
17. Bodin O.N., Lomtev E.A., Polosin E.G., Rakhmatullof F.K. *Vychislitel'nye metody elektrokardiologii = Computational methods of electrocardiology*. Penza: Izd-vo PGU, 2017. (In Russ.)
18. Polosin V.G., Bodin O.N., Ivanchukov A.G. Analysis of ion currents of the epicardium during the refractory period. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2015;(3):54–63. (In Russ.)
19. Anderson A.G. Primary (genetically determined) diseases of the conduction system of the heart and their relationship with impaired function of the sodium channel. *Annaly aritmologii = Annals of arrhythmology*. 2005;(2):50–55. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Олег Николаевич Бодин

доктор технических наук, профессор,
 профессор кафедры технического
 управления качеством,
 Пензенский государственный
 технологический университет
 (Россия, г. Пенза, проезд Байдукова/
 ул. Гагарина, 1а/11)
 E-mail: bodin_o@inbox.ru

Oleg N. Bodin

Doctor of technical sciences, professor,
 professor of the sub-department
 of technical quality management,
 Penza State Technological University
 (1a / 11 Baidukova passage/ Gagarina street,
 Penza, Russia)

Наталья Александровна Сержантова

кандидат технических наук,
доцент кафедры биомедицинской инженерии,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, проезд Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: itmmbbsphta@yandex.ru

Natalya A. Serzhantova

Candidate of technical sciences, associate professor
of the sub-department of biomedical technology,
Penza State Technological University
(1a / 11 Baidukova passage/ Gagarina street,
Penza, Russia)

Михаил Вячеславович Едемский

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: misha.f.2015@mail.ru

Mikhail V. Edemskiy

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Наталья Эдуардовна Кручинина

аспирант,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, проезд Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: kruchininane@gmail.com

Natalya E. Kruchinina

Postgraduate student,
Penza State Technological University
(1a / 11 Baidukova passage/ Gagarina street,
Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 14.06.2023

Поступила после рецензирования/Revised 17.06.2023

Принята к публикации/Accepted 15.08.2023