

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ПРЕДСТАВЛЕННЯ КЛІТИННИХ МЕМБРАН ЗА ДОПОМОГОЮ ЕЛЕКТРОННИХ МОДЕЛЕЙ

Вінницький національний технічний університет

Анотація. У роботі розглянуто інженерний підхід до опису біологічної мембрани за допомогою електронних моделей. Показано, що ліпідний бішар доцільно інтерпретувати як ємнісний елемент, а іонні канали - як керовані провідності. Узагальнено можливості *conductance-based*, кінетичних, гібридних та електродифузійних моделей для аналізу біоелектричних процесів і оцінено їх роль у моделюванні мембранного потенціалу.

Ключові слова: біологічна мембрана, електронна модель, мембранний потенціал, іонні канали, провіднісна модель, модель Ходжкіна-Хакслі.

Modern Approaches to Representing Cell Membranes Using Electronic Models

Abstract. *The paper considers an engineering approach to describing the biological membrane using electrical models. It is shown that the lipid bilayer can be interpreted as a capacitive element, whereas ion channels act as controlled conductances. The possibilities of conductance-based, kinetic, hybrid, and electrodiffusion models for analyzing bioelectrical processes are summarized, and their role in membrane potential modeling is assessed.*

Keywords: biological membrane, electrical model, membrane potential, ion channels, conductance-based model, Hodgkin-Huxley model.

Біологічна мембрана є базовим елементом клітини, який не лише відокремлює внутрішнє середовище від зовнішнього, а й забезпечує вибірковий транспорт речовин, формування мембранного потенціалу та передачу біоелектричних сигналів. Для біомедичної інженерії важливим є не лише біохімічний опис мембрани, а й формалізована інженерна модель, придатна для розрахунків, моделювання та верифікації експериментальними даними.

Найпростішим рівнем такого опису є еквівалентна електрична схема. Ліпідний бішар має діелектричні властивості, тому в електронній моделі його подають як ємність. Іонні канали та транспортні механізми забезпечують проходження струму, тому їх описують через провідність або опір. У підсумку мембрану можна представити як поєднання ємнісного компонента, іонних струмів і керованих провідностей. Такий підхід узгоджується з моделями на основі провідності (*conductance-based models*), у яких динаміка мембранного потенціалу пов'язується з параметрами каналів та електричною відповіддю клітини [1].

Більш розвиненим класом є моделі з керованими іонними провідностями. Модель Ходжкіна-Хакслі залишається базовою рамкою для опису потенціалу дії, оскільки подає електричні явища в збудженій клітині як систему взаємопов'язаних параметрів: мембранної ємності, іонних струмів, рівноважних потенціалів і змінних стану іонних каналів. Саме на цій основі розвиваються сучасні нелінійні нейронні моделі та підходи до уточнення механізмів генерації імпульсів [2].

Окремим напрямом є моделювання кінетики іонних каналів. Марковські та інші структурні моделі дають змогу описувати переходи каналів між станами, що важливо для пояснення їх відкриття, закривання та інактивації. Такі підходи підвищують деталізацію електронної моделі мембрани, оскільки пов'язують макроскопічний струм із мікроскопічними станами мембранних білків [3].

Сучасний розвиток електронних моделей мембрани пов'язаний також із гібридними та електродифузійними підходами. Гібридні моделі поєднують механістичний опис збудливої клітини з експериментальними даними для уточнення параметрів моделі [4]. Електродифузійні моделі, своєю чергою, покликані описувати мембранні струми з урахуванням фізичних характеристик руху іонів, що зменшує залежність від суто емпіричних параметрів [5].

Практична цінність електронних моделей мембрани полягає в тому, що вони переводять складний біологічний процес у керовану систему параметрів. Це створює основу для порівняння експериментальних сигналів, оцінювання чутливості моделі, прогнозування реакції клітини на стимул і проектування медичних електронних систем. Водночас якість такої моделі залежить від

коректного вибору параметрів, правильного вибору меж застосування та валідації результатів на експериментальних даних.

Отже, електронні моделі мембрани є важливим інструментом біофізики та біомедичної інженерії. Підхід, що побудований на електричних опорах і ємностях, забезпечує базове розуміння ємнісно-провідникових властивостей мембрани, моделі на основі провідності описують генерацію потенціалу дії, а сучасні гібридні, кінетичні та електродифузійні моделі розширюють можливості аналізу біоелектричних систем, підвищуючи точність і верифікованість результатів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Brandoit J., Ernst D., Drion G., Fyon A. Fast reconstruction of degenerate populations of conductance-based neuron models from spike times // *PLoS Computational Biology*. 2026. Vol. 22, No. 5. Art. e1014337. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1014337>.
2. Wang Y., Ding G., Yao W. Dynamic Analysis of Neuron Models // *AppliedMath*. 2023. Vol. 3, No. 4. P. 758–770. DOI: <https://doi.org/10.3390/appliedmath3040041>.
3. Mangold K. E., Wang W., Johnson E. K., Bhagavan D., Moreno J. D. et al. Identification of structures for ion channel kinetic models // *PLoS Computational Biology*. 2021. Vol. 17, No. 8. Art. e1008932. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1008932>.
4. Estienne L. Towards an Hybrid Hodgkin-Huxley Action Potential Generation Model. arXiv preprint. 2023. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.01346>.
5. Patel V., Priosoetanto J. D., Mistry A., Newman J., Balsara N. P. A Primitive Model for Predicting Membrane Currents in Excitable Cells Based Only on Ion Diffusion Coefficients. arXiv preprint. 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.09474>.

Романенко Олександр Володимирович - студент групи БМІ-246, Факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: 06-24-009.stud@vntu.edu.ua.

Науковий керівник: Штофель Дмитро Хуанович - канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Romanenko Oleksandr Volodymyrovych - student of group BMI-246, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: 06-24-009.stud@vntu.edu.ua.

Scientific supervisor: Shtofel Dmytro Khuanovych - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.