

Global Economy. 2015. 32 p. Режим доступу: https://sainttrofee.nl/wp-content/uploads/2019/01/NoteTech_29-World-Statistics.pdf

3. Supermarket refrigeration systems, 2024. Режим доступу: <https://digitaltwins4hprs.dk/cases/supermarket-refrigeration-systems/>

4. Evaluation of Direct Energy Savings and Demand Response Potential from Phase Change Materials for Cold Storage Cooling Applications. 2021. Режим доступу: <https://www.vikingcold.com/wp-content/uploads/2022/03/Utility-Demonstration-Project-Report.pdf>

5. 30% energy savings for a potato cold storage. Режим доступу: <https://www.advansor.com/case-cold-storage-potatoes>

Abstract. *This work examines the use of digital models in refrigeration and technological systems of the agro-industrial sector to optimize operating modes, reduce energy consumption, and enhance production reliability.*

Keywords: *agro-food refrigeration systems, information technologies, digital twin*

Науковий керівник:

Круглякова О.В.

*канд. техн. наук, доцент кафедри теплотехніки
та енергоефективних технологій,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»*

УДК: 577.3:621.3.049:004.942

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ПРОВІДНОСТІ ІОННИХ КАНАЛІВ КЛІТИНИ ПІД ДІЄЮ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВІ МОДЕЛЕЙ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ВИМІРЮВАНЬ

Руденко Андрій

*асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки
Миколаївський національний аграрний університет
м. Миколаїв, Україна*

Анотація. *У роботі розглянуто механізми впливу електромагнітного поля на електрофізіологічні властивості клітинної мембрани та функціонування іонних каналів, зокрема натрієвих. На основі математичного моделювання, електрофізичних підходів та систем чисельного аналізу проведено дослідження динаміки мембранного потенціалу, пульсацій клітини та особливостей іонного транспорту. Використання моделей Нав'є–Стокса, параметричних моделей клітинної пульсації та модифікованої моделі Курамото дозволило оцінити характер синхронізації клітин та вплив зовнішнього електромагнітного поля на їхню активність. У MATLAB/Simulink реалізовано чисельне моделювання, що демонструє ефекти деполяризації та гіперполяризації клітини під дією електромагнітних коливань. Результати підтверджують можливість*

регулювання іонної провідності та збудливості клітини за допомогою слабких електромагнітних полів, що має значний потенціал для біомедичних технологій.

Ключові слова: електромагнітне поле, натрієвий канал, мембранний потенціал, пульсації клітини, математична модель, деполяризація, гіперполяризація, модель Курамото.

Розвиток біомедичних технологій потребує глибокого розуміння механізмів клітинної взаємодії, регуляції іонного транспорту та реакцій клітин на зовнішні фізичні фактори. Іонні канали, зокрема Na^+ , Ca^{2+} та K^+ , є ключовими елементами клітинної електрофізіології, забезпечуючи генерацію імпульсів, регуляцію метаболічних процесів, активацію ферментів, скорочення м'язових волокон та ініціацію апоптозу.

Пульсації клітини, які проявляються у формі електричних, механічних і метаболічних коливань, слугують важливим показником її функціонального стану. Водночас зовнішні електромагнітні поля можуть значно впливати на динаміку мембранного потенціалу, змінюючи проникність іонних каналів та створюючи умови для деполяризації або гіперполяризації мембрани.

У цьому контексті актуальним є створення математичних моделей, які б дозволили точно прогнозувати поведінку клітини під впливом електромагнітних полів та визначати умови цілеспрямованої стимуляції чи пригнічення клітинної активності.

Метою роботи є розробка та аналіз математичних і електрофізичних моделей, що описують динаміку іонного транспорту, пульсацій клітини та зміни мембранного потенціалу під дією зовнішнього електромагнітного поля, а також дослідження впливу низькочастотних електромагнітних полів на провідність натрієвих каналів.

Іонні канали Na^+ , Ca^{2+} та K^+ формують електричні імпульси, які забезпечують міжклітинну комунікацію та регулювання життєво важливих процесів. Натрій відіграє ключову роль у формуванні мембранного потенціалу, транспорті речовин і регуляції клітинної реактивності. Пульсації клітини характеризуються змінами її об'єму, тиску, іонного складу та електричного стану [1].

Для опису механічних та осциляційних властивостей клітини використано рівняння Нав'є–Стокса, а також модель об'ємно-транспортних змін клітини, які дають можливість дослідити її скоротливість і механічні коливання.

Для вивчення синхронізації клітинних осциляторів застосовано модель Курамото. Вона дозволяє оцінити взаємодію клітин та їхню здатність до синхронного коливання за наявності внутрішніх і зовнішніх збурень [2].

Модифікація моделі включає параметри зовнішнього електромагнітного поля — амплітуду A і частоту f — що дає змогу враховувати явище ентрейнменту. Отримано, що навіть слабе гармонічне поле може змінювати фазу та частоту клітинних осциляцій.

У роботі використано електрофізіологічні моделі Герца та Голдмана–Ходжкіна–Каца, які описують мембранний потенціал та провідність іонних каналів. На їх основі сформульовано рівняння балансу струмів та побудовано диференціальне рівняння, що враховує вплив електромагнітного поля [3].

Чисельне моделювання в MATLAB/Simulink продемонструвало такі ефекти:

Деполяризація (підвищення збудливості)

Під впливом поля з частотою 50 Гц та амплітудою 100 нА мембранний потенціал підвищується від -70 мВ до приблизно -56 мВ, що свідчить про зростання збудливості клітини.

Гіперполяризація (пригнічення активності)

В іншому режимі впливу відбувається зниження провідності натрієвих каналів та зменшення струму Na^+ , що призводить до гіперполяризації мембрани.

Отримані результати узгоджуються з експериментальними даними, наведеними у сучасній літературі [4].

Розглядалася ізольована клітина, однорідність клітинного середовища, стаціонарність параметрів мембрани, а також спрощена кінетика іонних каналів. Зовнішнє поле моделювалося як гармонічний сигнал сталої амплітуди. Це визначає напрям подальших досліджень з розширенням моделі.

Проведене дослідження доводить значний вплив електромагнітного поля на динаміку мембранного потенціалу та провідність іонних каналів, особливо натрієвих. Встановлено, що електромагнітний вплив може як стимулювати клітину (деполяризація), так і пригнічувати її активність (гіперполяризація), залежно від параметрів поля. Розроблені моделі та проведені чисельні експерименти підтверджують можливість цілеспрямованого керування іонним транспортом, що відкриває перспективи для створення нових підходів у біомедичній інженерії, зокрема систем електромагнітної терапії та біоелектронних імплантів.

Список використаних джерел

1. Simulation of microtubule–cytoplasm interaction revealed the importance of fluid dynamics in determining the organization of microtubules / M. Mohammad et al. *Plant direct*. 2023. Vol. 7, no. 7. P. 1–18.
2. Glimm T., Gruszka D. Modeling the interplay of oscillatory synchronization and aggregation via cell-cell adhesion. *Analysis of PDEs*. 2023. P. 17–25.
3. Kundenko M., Rudenko A., Mardziavko V. Research on the Method of Improving Fuel Quality for Heat Generators. 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 27–30 September 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/mees61502.2023.10402419>
4. Research into the influence of the electromagnetic field on cell ion channels using modeling and measurement systems / A. Rudenko et al. *Radiotekhnika*. 2025. P. 235–241.

Abstract. *The paper considers the mechanisms of the influence of the electromagnetic field on the electrophysiological properties of the cell membrane and the functioning of ion channels, in particular sodium channels. Based on mathematical modeling, electrophysical approaches and numerical analysis systems, a study of the dynamics of the membrane potential, cell pulsations and features of ion transport was conducted. The use of Navier–Stokes models, parametric models of cell pulsations and the modified Kuramoto model made it possible to assess the nature of cell*

synchronization and the influence of an external electromagnetic field on their activity. Numerical modeling was implemented in MATLAB/Simulink, demonstrating the effects of cell depolarization and hyperpolarization under the influence of electromagnetic oscillations. The results confirm the possibility of regulating ionic conductivity and cell excitability using weak electromagnetic fields, which has significant potential for biomedical technologies.

Keywords: *electromagnetic field, sodium channel, membrane potential, cell pulsations, mathematical model, depolarization, hyperpolarization, Kuramoto model.*

УДК 621.315.68:621.3.019

ПРОГНОСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕМЕНТА ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ: ЕЛЕКТРИЧНЕ КОНТАКТНЕ З'ЄДНАННЯ

Адамчук Владислав

здобувач вищої освіти спеціальності 141 Електроенергетика,
електротехніки та електромеханіка

Миколаївський національний аграрний університет
м. Миколаїв, Україна

Анотація: *Представлено підхід до дослідження та прогностичного оцінювання надійності електричного контактного з'єднання (КЗ) як типового елемента енергетичного обладнання. Підхід поєднує мультифізичне моделювання у середовищі Ansys (тепло-електричні зв'язки) з експериментальним дослідженням у кліматичній камері із контрольованими температурою та відносною вологістю. Описано експериментальний стенд (тепловізор Testo 890, датчик вологості-температури ДВТ-03.т, зволожувач), матрицю експерименту (варіювання T, RH та навантаження на КС), а також елементи автоматизації регулювання вологості. Показано, як отримані температурні поля та електричні параметри КС можуть бути використані для прогностичного розрахунку показників надійності та часу до відмови, що створює підґрунтя для системи превентивного обслуговування.*

Ключові слова: *контактне з'єднання; перехідний опір; тепловізійний контроль; Ansys Workbench; теплове поле; відносна вологість; прогноз надійності.*

Метою роботи є створення та верифікація моделі контактного з'єднання енергетичного обладнання з подальшим прогностичним розрахунком показників надійності на основі математичних моделей. Очікуваний результат – одержання даних, придатних для побудови автоматичної системи прогностичного моделювання елементів енергосистеми, що дозволяє оцінювати наближений час до відмови та завчасно вживати запобіжних заходів для зниження аварійності та витрат.