

# ТЕХНОЛОГІЯ АВТОНОМНИХ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ НА ОСНОВІ ІОННИХ ГРАДІЄНТІВ

Вінницький національний технічний університет

## **Анотація:**

Ця публікація присвячена аналізу джерел електричної енергії, заснованих на природних механізмах формування іонних градієнтів, для застосування у біомедичній інженерії. Розглянуто принцип функціонування електричного органа вугра як природного прототипу автономного джерела живлення. Проаналізовано сучасні підходи до створення м'яких гідрогелевих та крапельних систем генерації електричної енергії, а також оцінено перспективи їх використання в імплантованих медичних пристроях.

**Ключові слова:** джерела живлення на основі іонних градієнтів, електричний вугор, гідрогелі, крапельні мережі.

## **Abstract:**

This publication focuses on the analysis of electrical power sources based on natural mechanisms of ionic gradient formation for biomedical engineering applications. The operating principle of the electric organ of the eel is considered as a natural prototype of an autonomous power source. Modern approaches to the development of soft hydrogel- and droplet-based energy generation systems are analyzed, and the prospects for their use in implantable medical devices are evaluated.

**Keywords:** power sources based on ionic gradients, electric eel, hydrogels, droplet networks.

## **Вступ**

Сучасні темпи розвитку біомедичної інженерії потребують нових підходів до створення автономних джерел електричної енергії, що будуть біосумісними, гнучкими та придатними для інтеграції у живі системи. Традиційні електрохімічні батареї мають жорстку конструкцію та обмежений діапазон можливостей в межах біологічного середовища. У зв'язку з цим актуальним є пошук альтернативних джерел живлення, заснованих на природних механізмах генерації електричної енергії.

## **Основна частина**

Природним прикладом ефективної генерації електричної енергії в біологічних системах є електроцити вугра (*Electrophorus electricus*). Ці клітини працюють як маленькі природні батарейки: накопичують різницю іонів і при активації створюють електричний імпульс. Цей механізм став основою для створення м'яких біобатарей, які теж використовують рух іонів замість традиційної електроніки. Важливою особливістю такого механізму є відсутність металевих електродів і сумісність із біологічним середовищем, що є принципово новим підходом для науки.

На основі зазначеного природного принципу у 2017 році було запропоновано концепцію м'якого джерела живлення, у якій іонні градієнти реалізовано між мініатюрними відсіками з поліакриламідного гідрогелю, розділеними катіон- та аніон-селективними мембранами [1]. Така структура забезпечує спрямований рух іонів та формування електричної напруги. Досліджувана система відзначається механічною гнучкістю та потенційною біосумісністю. Масштабування можливе завдяки послідовному з'єднанню гідрогелевих відсіків, що зумовлює збільшення вихідної електричної напруги. Цей підхід відкриває перспективи їх використання для живлення імплантованих сенсорів, кардіостимуляторів і протезних пристроїв.

Подальший розвиток джерел живлення, заснованих на природних іонних механізмах, спрямований на зменшення розмірів елементів і підвищення керованості їх електричних характеристик. Одним із сучасних підходів є використання крапельних мереж, у яких окремі мікроскопічні краплі рідини

виконують роль функціональних елементів батареї. У таких системах генерація електричного струму відбувається за рахунок іонного транспорту через ліпідні мембрани з вбудованими мембранними білками, що виконують функцію іонних каналів [2].

Беззаперечною перевагою крапельних мереж є можливість керування вихідним струмом шляхом зміни площі мембрани, конфігурації крапель і умов формування іонних каналів. Це дозволяє адаптувати електричні параметри джерела живлення до специфічних біомедичних задач. Крім того, в таких системах електрична енергія формується не внаслідок хімічних реакцій на електродах, як у традиційних батареях, а за рахунок контрольованого іонного транспорту, що значно підвищує безпеку їх використання у біологічному середовищі.

Джерела живлення такого типу мають кілька важливих переваг. Вони можуть працювати у мікромасштабі, легко поєднуються з рідинними середовищами та мають модульну конструкцію. Завдяки цьому електричні характеристики можна змінювати без суттєвого ускладнення системи. У результаті стає значно простішою інтеграція таких джерел живлення в мікрофлюїдні платформи чи компактні біомедичні пристрої.

Гідрогелеві та крапельні системи мають спільний принцип роботи, заснований на іонних градієнтах, але відрізняються рівнем мініатюризації та способами керування вихідними характеристиками. Гідрогелеві структури забезпечують можливість створення м'яких і масштабованих джерел живлення, на відміну від крапельних мереж, які дозволяють досягти високого рівня контролю електричних параметрів у мікромасштабі. Поєднання цих сучасних підходів формує наукове підґрунтя для подальшого розвитку автономних джерел електричної енергії для біомедичних застосувань.

## Висновок

Джерела електричної енергії, засновані на природних механізмах іонного транспорту, відкривають нові можливості для створення автономних систем живлення у біомедичній інженерії. Застосування гідрогелевих і крапельних структур демонструє можливість реалізації альтернативних підходів до автономного енергозабезпечення біомедичних систем, заснованих на керованих іонних процесах.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Schroeder T. B. H., Guha A., Lamoureux A., VanRenterghem G., Sept D., Shtein M., Yang J., Mayer M. An electric-eel-inspired soft power source from stacked hydrogels // Nature. – 2017. – Vol. 552. – P. 214–218.
2. Kikuchi S., Kanno S., Shimba K., Miyamoto Y., Yagi T. Research on Electric Current Control of Power Generation Using Droplet Network // Proceedings of the 17th Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON). – IEEE, 2025. – P. 1–4.

**Попович Марія Олексіївна** — студентка групи BMI-22б, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [asyna1406@gmail.com](mailto:asyna1406@gmail.com)

Науковий керівник: **Карась Олександр Володимирович** — доцент кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [karas@vntu.edu.ua](mailto:karas@vntu.edu.ua)

**Mariia Oleksiivna Popovych** — student of the BMI-22b group, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [asyna1406@gmail.com](mailto:asyna1406@gmail.com)

Academic supervisor: **Karas Oleksandr Volodymyrovych** — Associate Professor of the Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [karas@vntu.edu.ua](mailto:karas@vntu.edu.ua)