

УДК 577.352.53::621.313.12

М. В. ЧАШКО¹ (канд. техн. наук), **О. Ю. КОЛЛАРОВ²** (канд. техн. наук),
Т.В. АЛТУХОВА¹

markchashko@rambler.ru, kollarov@ukr.net, tanvalt1@rambler.ru

БІОГЕННИЙ ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОР

Робота присвячена генерації електричної енергії біологічним способом – за допомогою фізичних процесів, що відбуваються в живій клітині. Розглянуті деякі аспекти створення біоелектрики в мембрані клітини та описаний сам спосіб генерації електричної енергії. Розроблена математична модель біологічного електрогенератора та встановлені його головні енергетичні параметри. Виявлені деякі недоліки при створенні даного пристрою і розглянуті можливі їх варіанти вирішення.

Ключові слова: генерація, математична модель, біоелектрика, мембрана, жива клітина, електричний генератор, концентрація іонів, магнітне поле, накопичувальний конденсатор.

Постановка проблеми. Земля отримує від сонця приблизно 10^{17} одиниць енергії. Промисловість споживає, а в кінцевому рахунку, розсіює у вигляді тепла, 10^{15} , близько 1%. Але промисловість переводить енергію вугілля, нафти, газу, накопичену за час існування планети протягом мільярдів років, в тепло і віддає її в навколишнє середовище, додаючи до одержуваної від сонця. Негативні наслідки цього помітні вже на побутовому рівні. Перехід на атомну енергетику не змінює сутність того, що відбувається, тобто в природне середовище буде додаватися така кількість енергії, до якої вона не пристосована.

Актуальність даної теми обумовлена необхідністю задовільняти потреби людей в електричній енергії без руйнування природного середовища їх існування. Тому для того, щоб поєднати задоволення потреб в електроенергії з вимогами екології необхідне перетворення в електричну енергію, джерелом якої є Сонце, безпосередньо або опосередковано через енергію потоків вітру, води, органічних речовин.

Сучасна біоенергетика йде шляхом опосередкованого перетворення сонячної енергії, через тепло: біомаса спалюється або перетворюється в паливо, яке спалюється, тоді як в електричну енергію перетворюється теплова енергія. Це потенційно безпечний для навколишнього середовища спосіб, але існує альтернатива, створена природою для живих організмів.

Генератором електроенергії є кожна жива клітина, в її мембрані енергія різниці концентрацій, квантів світла або окислення перетворюється в електричну енергію при температурі навколишнього середовища і з високим коефіцієнтом корисної дії. Ця обставина була відома і раніше. На даний час біоелектрика використовується для отримання інформації про стан і функціонування живих органів – наприклад, кардіограма. Але все ж представляється цікавим оцінити його як джерело енергії, для якого-небудь апарата або машини.

Аналіз попередніх досліджень. Аналіз вітчизняних і закордонних публікацій виявив, що питанню генерації електричної енергії різноманітними біологічними способами присвячено багато наукових праць і досліджень [1-7], втім питання створення джерела живлення для електричних машин та апаратів не висвітлено в достатній мірі.

Мета статті. Головна мета даної статті полягає в тому, щоб дати енергетичну оцінку біологічного джерела електричної енергії.

Викладення основного матеріалу дослідження. Генерація електроенергії відбувається в мембрані клітини, яка відокремлює внутрішню рідину клітини від зовнішньої [1, 2, 3]. Мембрана складається з жирних молекул і пронизана порами (каналами) з білкових молекул (рис. 1, а).

Рідина всередині і зовні мембрани містить іони (позитивно заряджені частини молекул) в різних концентраціях. Якщо кількість іонів всередині і зовні однакова, то мембрана електрично нейтральна (рис. 1, б). Під дією механічних сил, обумовлених різницею концентрацій, іони крізь пори перетинають мембрану і зосереджуються на поверхні з однієї її сторони, створюючи електричний потенціал (рис.1, в). Перехід іонів припиняється, коли сила, обумовлена електричним потенціалом, врівноважує силу, обумовлену різницею концентрацій. В результаті мембрана являє собою заряджений конденсатор.

Електрична енергія, яка утворена описаним способом, має наступні особливості:

1. Утворення потенціалу відбувається майже без витрат енергії, заряди переміщуються по градієнту концентрації і без опору каналу. Канал діє як ключ: він або відкритий в даний час для іона даного розміру, тоді іон проходить без тертя, або закритий, тоді він не проникає через мембрану, тобто трансмембранний струм відсутній.

2. По електричному сигналу потенціал може бути реалізованим як електричний струм зовнішнього ланцюга. Струм являє собою потік позитивних іонів, а не електронів, як в металевому провіднику. При цьому потенціал у часі змінюється (рис. 2). На графіку позначено:

$u = \varphi_{НАР} - \varphi_{ВН}$ - різниця потенціалів зовнішньої і внутрішньої поверхонь мембрани,

t_p, t_B - тривалість зниження потенціалу (розряду) і його відновлення.

© Чашко М. В., Колларов О. Ю., Алтухова Т.В., 2015

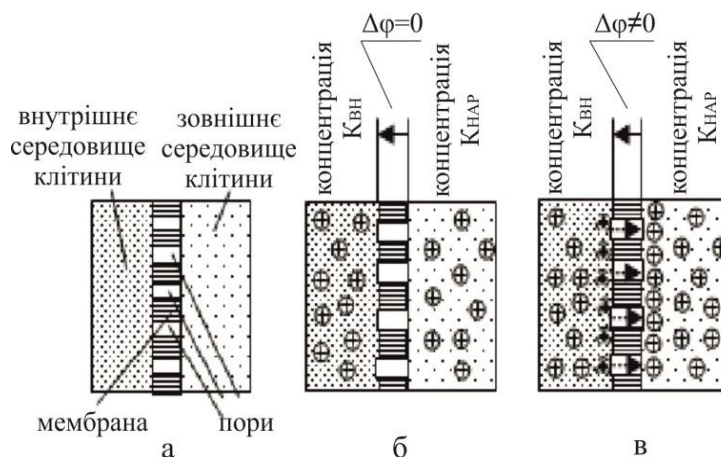


Рисунок 1 – Склад мембрани

Наявність імпульсів, що запускаються, не впливає на зміну потенціалу в часі до закінчення циклу розряду - відновлення.

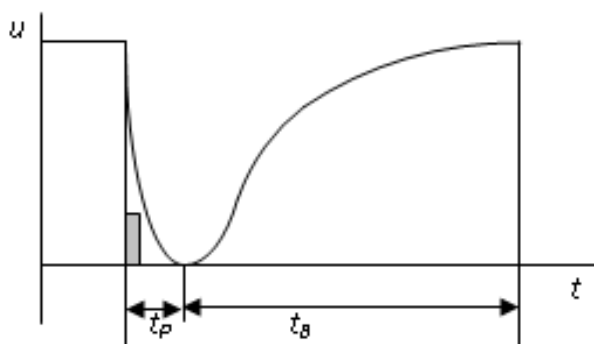


Рисунок 2 – Залежність потенціалу від часу

3. Створення потенціалу практично не змінює концентрацію іонів по обидві сторони мембрани, тобто концентрація змінюється на величину порядку $10^{-4}\%$.

4. Потенціал може мати протилежні полярності по відношенню до мембрани. Концентрація іонів калію вище всередині клітини, так що коли канали, через які проникають іони калію, відкриті, то зовнішня поверхня мембрани має позитивний потенціал. Концентрація іонів натрію вище зовнішньої поверхні клітини, так що коли канали, через які проникають іони натрію, відкриті, то внутрішня поверхня мембрани набуває позитивного потенціалу.

Кількісна оцінка енергетичних параметрів мембранної електрики виконана з точністю до порядку значення величини. В якості вихідних даних для розрахунку прийняті значення, що опубліковані в літературі з біофізики та біохімії: різниця потенціалів на мембрані $u \approx 0,1\text{В}$, електрична ємність мембрани $C \approx 10^{-2} \text{ Ф/м}^2$ [1, с.71], тривалість циклу заряду - розряду мембрани-конденсатора, мінімально допустима мембраною $T = 10^{-6} \text{ с}$.

Тоді енергія, збережена в електричному полі конденсатора, набуває значення

$$w = \frac{Cu^2}{2} = 10^{-2} \cdot 0,1^2 / 2 = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/м}^2.$$

А вектор Пойнтінга - щільність потоку потужності

$$p = \frac{w}{T} = \frac{0,5 \cdot 10^{-4}}{10^{-6}} = 50 \text{ Вт/м}^2.$$

Для порівняння щільність потоку потужності сучасного сонячного елемента становить приблизно 100 Вт/м^2 , потік вітру при швидкості 10 м/с має таку ж щільність потужності.

Щільність потужності теплової або атомної станції як потужність, яка розділена на площу поверхні, що займає станція, на порядок вище.

Товщина біоелектричного елемента, здатного підтримувати потенціал без значної зміни концентрації протягом доби, складає $0,05 \text{ мм}$. Можна розрахувати, що обсяг, необхідний для вироблення потужності 1 кВт становить приблизно 1 літр , питома потужність 1 кВт/кг . У турбогенераторів порядок цієї величини - $0,1 \text{ кВт/кг}$.

Потужність на одиницю обсягу складає 10^3 кВт/м³, у турбогенераторів порядок цієї величини - 10 кВт/м³. Математична модель створюється для схеми рис.3.

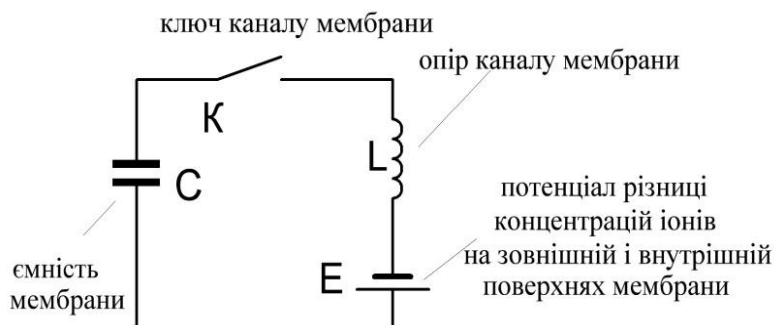


Рисунок 3 – Схема імітації пристрою і технології

Схема імітує пристрій і технологію, якими мембрана перетворює різницю концентрацій в електричний потенціал. Вона містить ємність C, що має місце між внутрішньою й зовнішньою поверхнями мембрани, ключ K, що забезпечує режим заряду ємності C такий же, як у живій клітині: коли ключ замкнутий, по кожній з пор мембрани протікає струм, коли ключ розімкнутий - струм відсутній. У клітині ключем є білкова молекула. Індуктивність L імітує інертність позитивних іонів, потік яких через пору і є електричним струмом. Джерело ЕРС E імітує різницю концентрацій іонів натрію, калію або водню (протонів) з обох сторін мембрани.

Вихідний стан - різниця електричних потенціалів між поверхнями мембрани відсутня. Замикається ключ K та позитивно заряджені іони переходять через канал з області з більшою концентрацією в область із меншою. Вони розташовуються біля поверхні мембрани й створюють електричний потенціал, який через деякий час врівноважує різницю концентрацій. Коли електричний струм зникає, то мембрана стає конденсатором, зарядженим до напруги порядку 0,1 В. Коли зникає електричний потенціал (конденсатор розряджається на якість навантаження), тоді знову виникає струм через пори, що заряджає конденсатор.

Істотно наступне: 1) процес генерації імпульсний, тобто під час заряду конденсатора, при замкнутому K, відбір енергії від нього неможливий; 2) іони проходять по порі без витрат енергії - по градієнту концентрації. Ці особливості враховані при створенні моделі.

Струм заряду при замкнутому ключі

$$i = \frac{E}{\rho} e^{-2\pi \frac{t}{T}} \sin 2\pi \frac{t}{T}, \quad (1)$$

Потенціал, обумовлений різницею концентрацій іонів,

$$E = 0.061g \frac{K_{НАР}}{K_{ВН}}, \quad (2)$$

де $K_{НАР}$, $K_{ВН}$ - концентрації іонів на зовнішній і внутрішній сторонах мембрани.

Постійна часу заряду мембрани або період коливання напруги біля сталого значення

$$T = 2\pi\sqrt{LC}, \quad (3)$$

Хвильовий опір мембрани

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (4)$$

Напруга на мембрані через N періодів T, $t=NT$, В,

$$u = C \int_0^{NT} i dt = E(1 - e^{-2\pi N}). \quad (5)$$

Середнє значення напруги за один період

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T E(1 - e^{-2\pi \frac{t}{T}}) dt = 0,84E. \quad (6)$$

Середнє за N періодів

$$\bar{u} = \frac{1}{NT} \int_0^{NT} E(1 - e^{-2\pi \frac{t}{T}}) dt = E(1 + \frac{e^{-2\pi N} - 1}{2\pi N}), \quad (7)$$

Можна показати, що середнє значення струму за період

$$\bar{i}_1 = \frac{1}{T} \int_0^T i dt = -\frac{CE}{T} (e^{-2\pi} - 1). \quad (8)$$

Середнє за N періодів

$$\bar{i}_n = \frac{\bar{i}_1}{N} \frac{e^{-2\pi N} - 1}{e^{-2\pi} - 1}. \quad (9)$$

Максимальне значення струму, що може бути отримане від 1 м² мембрани визначається з експериментів біофізиків: середнє значення струму однієї пори (каналу) під час замкнутого ключа 4·10⁻¹² А [2, с. 215], кількість пор – (3 ÷ 75)·10¹² 1/м² [1, с. 86]. Отже, порядок щільності струму, що генерується мембраною, $j \cong 10 \div 300$ А/м².

Залежності напруги та щільності потужності, що впливають із наведених вище формул, представлені на рисунку 4.

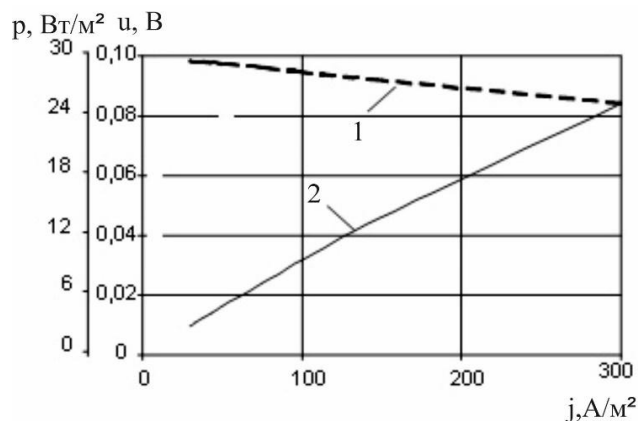


Рисунок 4 - Залежності напруги та щільності потужності: 1 – напруга мембрани; 2 – щільність потужності, що генерується мембраною

На графіках видні основні характеристики мембрани як електрогенератора: напруга короткого замикання складає близько 15%, щільність потужності - до 30 Вт/м².

У клітині порядок відносини концентрацій 100, так що різниця потенціалів має порядок $E \cong 10^{-1}$ В.

Ця напруга мала для промислового застосування, пропонується наступний спосіб його підвищення й нагромадження енергії. Енергія електричного поля мембрани перетворюється індуктивністю в енергію магнітного поля, а енергія магнітного поля індуктивності, в свою чергу, перетворюється в енергію електричного поля накопичувального конденсатора. Схема представлена рисунку 5.

Перетворювач містить мембранний генератор 1, ємність якого містить енергію у вигляді електричного потенціалу; індуктивність 2, що перетворює електричний потенціал в енергію магнітного поля; ключ 3, який поперемінно з'єднує індуктивність із мембранним генератором і ємністю-накопичувачем; ємність-накопичувач 4, що перетворює енергію магнітного поля індуктивності в енергію електричного поля.

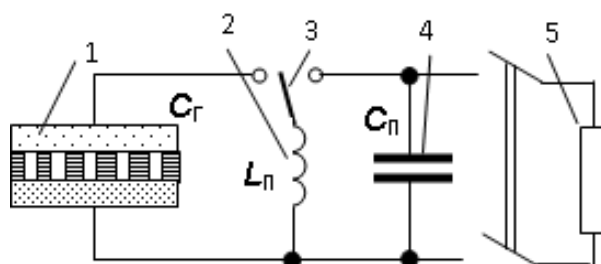


Рисунок 5 – Схема перетворювача

Ключ 3 спочатку з'єднує індуктивність 2 з мембранним генератором 1. Електричний потенціал генератора створює в індуктивності струм і магнітне поле. Після зниження електричного потенціалу до нуля ключ 3 з'єднує індуктивність із ємністю-накопичувачем 4, тоді енергія магнітного поля індуктивності перетвориться в енергію електричного поля ємності-накопичувача. Навантаження 5 споживає цю енергію, перетворюючи її в тепло, механічну й т.д.

Під час з'єднання індуктивності з генератором струм в індуктивності зростає до наступної величини

$$i_1 = u_G \sqrt{\frac{C_G}{L_{II}}}, \quad (10)$$

де C_G і L_{II} - ємність генератора й індуктивність перетворювача.

Тривалість розряду генератора на індуктивність становить чверть періоду коливань контуру $L_{II}C_G$:

$$t_1 = \frac{\pi}{2} \sqrt{L_{II}C_G}. \quad (11)$$

Потім індуктивність з'єднується з ємністю-накопичувачем на час

$$t_2 = \frac{\pi}{2} \sqrt{L_{II}C_{II}}. \quad (12)$$

Після зниження струму в індуктивності до нуля напруга на ємності підвищується на

$$\Delta u_H = \frac{1}{C_{II}} \int_0^{i_2} i_2 dt \quad (13)$$

Коефіцієнт перетворення напруги визначається як відношення напруги на навантаженні до напруги генератора. У сталому режимі потужність, що віддається навантаженню, дорівнює потужності, яка виходить з біогенератора. Потужність біогенератора

$$P_G = \frac{C_G u_G^2}{2T}, \quad (14)$$

Потужність, що віддається конденсатором-накопичувачем у навантаження

$$P_H = \frac{C_{II}}{2T} (u_0^2 - u_T^2), \quad (15)$$

де u_0 і u_T - напруга на конденсаторі C_{II} на початку й наприкінці періоду T .

$$\frac{u_0^2 - u_T^2}{2} = \frac{u_0 + u_T}{2} (u_0 - u_T) = u_{CP} \Delta u, \quad (16)$$

де u_{CP} - середня за період напруга на конденсаторі C_{II} ,

Δu - варіація за період напруги на конденсаторі C_{II} .

Якщо прийняти, що варіація напруги $\Delta u = u_{CP}$, і потужність, передана в навантаження, дорівнює потужності генератора,

$$P_H = P_G, \quad (17)$$

то можна показати, що напруга на навантаженні

$$u_{CP} = u_G \sqrt{\frac{C_G}{2vC_{II}}}. \quad (18)$$

Потік потужності може регулюватися періодом імпульсів передачі енергії від генератора в навантаження:

$$P_H = P_{G \max} \frac{T_{\min}}{T}, \quad (19)$$

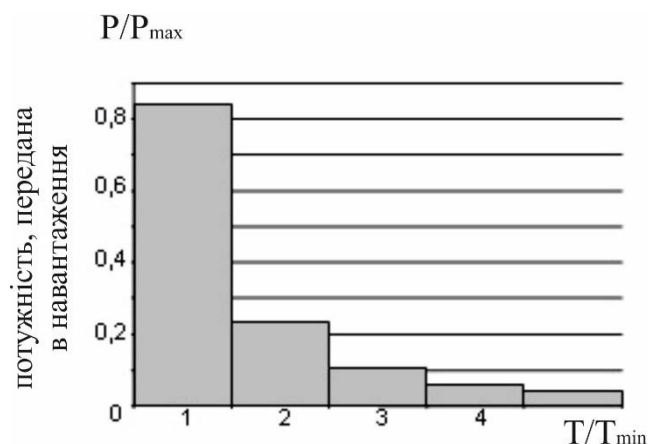
де

$$P_{G \max} = \frac{C_G u_G^2}{2T_{\min}}, \quad (20)$$

$$T_{\min} = \frac{\pi}{2} (\sqrt{L_{II}C_G} + \sqrt{L_{II}C_{II}}), \quad (21)$$

$T = NT_{\min}$ - період імпульсів передачі енергії від генератора в навантаження.

На рисунку 6 представлена регульовальна характеристика біогенератора як залежність переданої в навантаження потужності від тривалості періоду імпульсів передачі.



тривалість періодів відбору потужності

Рисунок 6 – Регульовальна характеристика біогенератора

Із графіка видно, що потік потужності може змінюватися тільки дискретно. Це обумовлено особливістю функціонування біологічної мембрани: віддача зарядів з її поверхні не відбувається перш, ніж завершиться процес поляризації.

Висновки. Генерація електричної енергії в живій клітині відбувається за рахунок перетворення різниці концентрацій іонів в електричне поле - подібно тому, як це відбувається при утворенні потенційного бар'єра p-n переходу в напівпровідниках.

Електричне поле створюється позитивними зарядами й електричний струм, обумовлений цим полем, є потоком протонів, а не електронів.

Спосіб створення електричного поля полягає в перерозподілі зарядів на границі між розчинами з різною об'ємною концентрацією іонів.

Пристроєм, що генерує електричний потенціал, є ліпідна (жирова) мембрана з каналами (порами) діаметрами приблизно рівними діаметру іона. Істотні для генерації властивості каналу наступні: по ньому іон переміщується без опору; канал має «ворота», що працюють у режимі ключа; струм, що протікає по каналу під час відкритих «воріт», має незмінне в часі значення.

Можлива генерація електроенергії в об'ємах і густинах, прийнятних для електротехнічних пристроїв, так як електричний скат створює в процесі життєдіяльності розряди струму до 60 А напругою 600В тривалістю мілісекунди.

На підставі теоретичної моделі встановлені властивості біоелектричного генератора: високий ККД (до 100%); потужність на одиницю маси на два порядки більша, ніж промислових генераторів; щільність потоку потужності на одиницю площі на порядок менша, чим в електротехнічних пристроях; велика напруга короткого замикання (близько 15%); дискретність регулювання потоку потужності.

При створенні електрогенератора на принципі живої клітини повинні бути вирішені такі проблеми.

1. Створення мембрани товщиною порядку з 10^{-8} м керованими каналами діаметром порядку 10^{-9} м. Проблема може бути вирішена вирощуванням живого біогенератора або штучним виробництвом мембрани із зазначеними властивостями.

2. Відвід електричного струму від непровідної поверхні мембрани. Ця проблема вирішена для сонячних елементів, де має місце аналогічна ситуація.

3. Локалізація електроенергії, яка розсіяна по поверхні електрогенератора із щільністю $5 \cdot 10^{-5}$ Дж/м², до густин потоку порядку $10^3 - 10^6$ Вт/м², які необхідні для існуючих електротехнічних пристроїв. Прототипом рішення можуть бути конденсатори, у яких діелектрик має товщину декількох молекул.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Антонов В.Ф., Черныш А.М., Пасечник В.И., Вознесенский С.А., Козлова Е.К., Биофизика: Учебник для вузов. - М.: ВЛАДОС, 2000. - 288 с.
2. Плонси Р., Барр Р., Биоэлектричество: Количественный подход. - М.: Мир, 199. - 366 с.
3. Mitcheson J. and Stanfield P. (2013), Bioelectricity, Ionic Basis of Membrane Potentials and Propagation of Voltage Signals. *Encyclopedia of Biophysics*. pp 189-192. ISBN978-3-642-16711-9
4. Aidley D.J. (1998), The physiology of excitable cells, Cambridge: Cambridge University Press.
5. Aidley D.J., Stanfield P.R., Ion channels Molecules in action, Cambridge: Cambridge University Press.
6. Hille B (2001), Ion channels of excitable membranes. 3rd ed. Sunderland: Sinauer.
7. Koester J. and Siegelbaum S. (2000), Local signaling: passive electrical properties of the neuron and propagated signaling: the action potential, In: Kandel ER, Schwartz JH, Jessell TM, editors. Principles of neural science. 4th ed. New York: McGraw-Hill. pp. 140-149.

REFERENCES

1. Antonov V. F., Chernysh A. M., Pasechnik V. I., Voznesenskiy A. S. and Kozlova E. K. (2000), *Biofizika* [Biophysics], VLADOS.
2. Plane R. and Barr R. (1992), *Bioelektrichestvo: Kolichestvennyi podkhod*, [Bioelectricity: the executives approach], Mir.
3. Mitcheson J. and Stanfield P. (2013), Bioelectricity, Ionic Basis of Membrane Potentials and Propagation of Voltage Signals, *Encyclopedia of Biophysics*, pp 189-192, ISBN978-3-642-16711-9.
4. Aidley D.J. (1998), *The physiology of excitable cells*, Cambridge University Press, Cambridge.
5. Aidley D.J. and Stanfield P.R., *Ion channels (1996). Molecules in action*. Cambridge: Cambridge University Press.
6. Hille B.(2001) *Ion channels of excitable membranes*. 3rd ed. Sunderland: Sinauer.
7. Koester J, Siegelbaum SA (2000). Local signaling: passive electrical properties of the neuron and propagated signaling: the action potential. In: Kandel ER, Schwartz JH, Jessell TM, editors. *Principles of neural science*. 4th ed. New York: McGraw-Hill. pp. 140–149.

Надійшла до редколегії 01.12.2015

Рецензент: Синков В.Г.

M. CHASHKO¹, O. KOLLAROV², T. ALTUKHOVA¹

¹Krasnoarmeysky industrial institute of State Institution of Higher Education «Donetsk National Technical University»

²State Institution of Higher Education «Donetsk National Technical University»

Biogenic electric generator

The work is devoted to electricity generation in a biological way - through physical processes occurring in living cells. Some aspects of creating bioelectrics in the cell membrane are considered and the way of generating electricity is described. The mathematical model of a biological generator is developed and its main energy parameters are defined. Some shortcomings in the creation of this unit were revealed and possible solutions to them were discussed.

Key words: *generation, mathematical model, bioelectronics, membrane, living cell, electric generator, ion concentration, magnetic field, storage capacitor.*