

# ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 621.3.015.52: 621.3.011.72

С.М. Захарченко, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ, Україна,  
e-mail: snzakhar@bk.ru

## СТАТИСТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКВІВАЛЕНТНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ ГЕТЕРОГЕННОГО СТРУМОПРОВІДНОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ ЙОГО ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНІЙ ОБРОБЦІ НА ПРИКЛАДІ ГРАНУЛ АЛЮМІНІУ У ВОДІ

S.M. Zakharchenko, Cand. Sci. (Tech.)

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of  
Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: snzakhar@bk.ru

## STATISTICAL RESEARCH OF EQUIVALENT ELECTRIC RESISTANCE OF THE HETEROGENEOUS CURRENT-CARRYING MEDIUM AT ITS ELECTROEROSIVE PROCESSING ON AN EXAMPLE OF GRANULES OF ALUMINUM IN WATER

**Мета.** Статистичні дослідження залежності еквівалентного електричного опору гетерогенних струмопровідних середовищ при їх електроерозійній обробці від напруги розрядних імпульсів для врахування стохастичної складової його зміни.

**Методика.** На лабораторному обладнанні з використанням аналого-цифрового запам'ятовуючого осцилографа NAMEG NM 1507-3 були проведені серії експериментальних досліджень залежностей еквівалентного електричного опору гранул  $Al$ , занурених у водопровідну воду, а також напруги та струму розрядних імпульсів від опорної напруги формувача. Отримані таким шляхом дані підлягали статистичній обробці, а саме: визначались їх математичне сподівання, дисперсія, параметр мінливості та відносне середнє відхилення від математичного сподівання.

**Результати.** Були отримані залежності математичного сподівання, дисперсії, параметра мінливості та відносного середнього відхилення від математичного сподівання еквівалентного електричного опору гранул  $Al$  у водопровідній воді при їх електроерозійному диспергуванні від опорної напруги формувача. Показано, що залежності математичного сподівання та дисперсії еквівалентного опору від напруги можуть бути апроксимовані гіперболічними функціями. Тобто з ростом опорної напруги їх значення зменшуються, що свідчить про підвищення стабільності процесу з ростом напруги імпульсів у дослідженому діапазоні. Отримано, що максимальні значення параметру мінливості при зміні опорної напруги спостерігаються для еквівалентного електричного опору середовища, а мінімальні – для амплітуди напруги. Це свідчить про те, що першопричиною стохастичних змін електричних параметрів системи є властивості опору гранульованих струмопровідних середовищ.

**Наукова новизна.** Уперше досліджені статистичні характеристики еквівалентного електричного опору гетерогенного струмопровідного середовища на прикладі гранул  $Al$  у водопровідній воді при їх електроерозійному диспергуванні, а також статистичні характеристики напруги та струму розрядних імпульсів.

**Практична значимість.** Запропонований підхід дозволяє підвищити ефективність аналізу нестабільності електричних параметрів у системі „генератор розрядних імпульсів – об'ємне електроерозійне навантаження“.

**Ключові слова:** *об'ємна електроерозійна обробка, електричні імпульси, еквівалентний електричний опір, статистичний аналіз*

**Вступ.** Об'ємна електроерозійна обробка гранул металів і сплавів, занурених у слабо провідну охоло-

джуючу рідину, протягом більше ніж 20 років є технологічною основою процесів виробництва дисперсних порошків тугоплавких ( $Pt-Ro$ ,  $W$ ), магнітних ( $Fe-B-Si$ ,  $Ni-Mn-Ga$ ), багатокомпонентних воденьсорбую-

чих (*Ti-Zr-Ni*, *Ti-Ni-Zr-Cu*) та інших сплавів спеціального призначення [1–3]. Останнім часом модифікація даного методу з використанням примусової механічної активації шару гранул дозволила отримати стійкі до седиментації гідрозолі біоцидних (*Ag*, *Cu*, *Zn*) та біогенних (*Fe*, *Co*, *Mn*, *Mo*) металів для подальшого їх застосування в рослинництві та тваринництві [4]. Спеціальні режими електроерозійної обробки шарів гранул *Al*, занурених у воду, реалізують процеси очищення та знезараження водних потоків [5, 6]. При цьому ерозійні дрібнодисперсні частинки *Al*, у результаті хімічної взаємодії з водою, утворюють *Al(OH)<sub>3</sub>*, який під час подальшої гідратації стає високоактивним коагулянтном – основним чинником видалення із води іонів важких металів, а також ряду органічних та неорганічних забруднень.

Параметри розрядних імпульсів і технологічні умови процесів, у значній мірі, впливають на структурно-фазовий стан та розподіл за розмірами електроерозійних частинок металів і сплавів, тобто на якість вихідної продукції. У свою чергу, є взаємна залежність еквівалентного електричного опору занурених у робочу рідину шарів металічних гранул і параметрів розрядних імпульсів, що ускладнює їх стабілізацію з метою підвищення якості вихідної продукції та зменшення матеріалоемності й енергоемності процесів. Тому дослідження електричних параметрів гранульованих струмопровідних середовищ і розрядних імпульсів є актуальною та важливою задачею. Шар металічних гранул у робочій рідині при проходженні в ньому імпульсів струму, з точки зору електротехніки, є складним нелінійно-параметричним навантаженням, опір якого може стохастично змінюватись у декілька разів навіть у рамках тривалості одного імпульсу [6].

Моделювання та оптимізація перехідних процесів в електричних ланцюгах із таким навантаженням є складною задачею, яка в певних випадках взагалі не може бути розв’язана за допомогою лише аналітичних методів. У [7] було показано представлення параметричними залежностями еквівалентного електричного опору гранул *Al* під час їх імпульсної електроерозійної обробки. Аналогічна задача у [8] була вирішена в рамках представлення даного опору як нелінійного елемента кола. Але до теперішнього часу статистичних досліджень залежності еквівалентного електричного опору гетерогенних струмопровідних середовищ при їх електроерозійній обробці від напруги розрядних імпульсів не проводилось, тобто стохастична складова його зміни взагалі не враховувалась. Виявлення та дослідження таких закономірностей і є метою роботи.

**Методика досліджень, обладнання та матеріали.** Методика полягала у проведенні прямих експериментів на лабораторному обладнанні, функціональна схема якого наведена на рис. 1, оцифруванні й запам’ятовуванні масивів синхронних осцилограм напруги на навантаженні, струму в ньому та їх статистичній обробці.

До складу установки (рис. 1) входили: генератор розрядних імпульсів (ГРІ), блок керування генератором 2, розрядна камера 6 з алюмінієвими гранулами, аналого-цифровий запам’ятовуючий осцилограф „НАМЕГ НМ 1507-3“ – 3, підключений до персонального комп’ютера. До осцилографу були підключені дільник напруги 1:10 – 5 та високочастотний вимірювальний трансформатор струму 4. До складу ГРІ входив керований випрямляч 1, підключений до однофазної мережі електроживлення напругою 220 В, що забезпечував на опорній батареї конденсаторів  $C_{оп}$  стабілізовану постійну напругу  $U_{оп}$ . Ємність робочого накопичувача  $C$  складала 100 мкФ, а еквівалентна індуктивність розрядного контуру  $L=1,5$  мкГн.

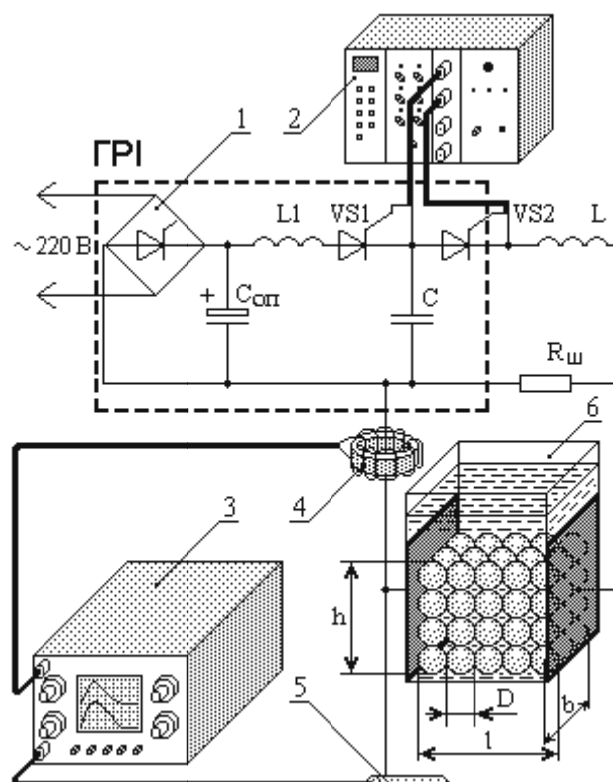


Рис. 1. Функціональна схема установки

Оскільки еквівалентний електричний опір гранульованого струмопровідного середовища під час протікання в ньому струму може стохастично змінюватись в багато разів, то без шунтуючого резистора  $R_{ш} = 3$  Ом може виникнути аварійна ситуація. Якщо опір навантаження істотно збільшиться, наприклад, коли іскрові канали відсутні або їх кількість мінімальна, то тривалість перехідного процесу розрядки конденсатора може перевищити тривалість паузи між імпульсами. Якщо в момент відпирання тиристора *VS1* тиристор *VS2* ще не закритися природним чином, виникає ланцюг замикання мережі на розрядну камеру. У такому режимі з великою ймовірністю опір на-

вантаження істотно зменшиться й виникне режим короткого замикання. Тому шунтуванням електродів розрядної камери безіндуктивним резистором  $R_{III} = 3 \text{ Ом}$  забезпечує нульові початкові умови заряду робочого накопичувача  $C$  з урахуванням зміни опору навантаження в широких межах.

В експериментах використовувалися гранули  $Al$  марки  $AE$  квазісферичної форми діаметром  $d=4 \text{ мм}$ , поверхня яких пройшла попередню іскроерозійну обробку. Довжина шару гранул між електродами була  $l=56 \text{ мм}$ , ширина  $b=22 \text{ мм}$ , висота  $h=25 \text{ мм}$ . В якості робочої рідини використовувалась водопровідна вода з питомим електричним опором на початку процесу  $\rho_F=25 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Висота води в розрядній камері була  $100 \text{ мм}$ . З метою виключення впливу гідродинамічних сил на еквівалентний електричний опір шару гранул, у процесі вимірювань її проток був відсутнім. У паузах між серіями вимірювань продукти ерозії періодично вимивались водним потоком, після чого він відключався.

При оцифруванні осцилограм на НАМЕГ НМ 1507-3 в рамках одного імпульсу число рівнів проміжків дискретизації часу становило 2048. Імпульси, частота  $f$  яких дорівнювала  $5 \text{ Гц}$ , запам'ятовувались через кожні  $5 \text{ с}$  за сигналом тригера осцилографа впродовж 5-ти хвилин для кожного значення опорної напруги. Таким чином, для кожного режиму було знято 60 осцилограм. Низьке значення частоти повторення імпульсів було вибране з метою виключення її впливу на еквівалентний електричний опір середовища.

Тривалість імпульсу визначали як проміжок часу між значеннями струму на рівні  $0,1$  від його амплітуди по передньому та задньому фронтах. За даними кожної осцилограми визначались амплітуди напруги  $U_m$ , струму  $I_m$ , а також еквівалентний активний опір навантаження впродовж тривалості одного імпульсу

$$R_E = \frac{\sum_{j=1}^m i_j \cdot u_j}{\sum_{j=1}^m i_j^2}, \quad (1)$$

де  $i_j$  – значення струму в конкретний момент часу  $t_j$ ,  $A$ ;  $u_j$  – значення напруги в дискретний момент часу  $t_j$ ,  $B$ ;  $m$  – кількість інтервалів дискретизації тривалості імпульсу.

Отримані в результаті експерименту та підрахунку значення електричного опору, напруги та струму імпульсів підлягали статистичному аналізу. Математичні сподівання опору ( $R_E$ ), амплітуд напруги ( $U_m$ ) та струму ( $I_m$ ) обраховували за формулою

$$M[x] = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j, \quad (2)$$

де  $x_j$  – елемент масиву;  $n$  – число елементів у масиві. Дисперсію цих змінних розраховували згідно з

$$D[x] = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - M[x])^2. \quad (3)$$

Параметр мінливості та відносне середнє відхилення від математичного сподівання розраховували за формулами відповідно

$$v[x] = \sqrt{D[x]} / M[x]; \quad (4)$$

$$v[x] = \frac{1}{M[x] \cdot n} \sum_{j=1}^n |d_j - M[x]|. \quad (5)$$

Оскільки похибка знаходження еквівалентного активного опору складається з великого числа похибок, кожна з яких не є великою, то на основі центральної граничної теореми за нульову гіпотезу було взято те, що  $R_E$  має нормальний розподіл.

**Результати дослідження та їх аналіз.** Залежність математичного сподівання (2) еквівалентного електричного опору шару гранул (1) від опорної напруги (рис. 2) носить гіперболічний характер, що узгоджується з даними [9]. Залежність дисперсії (3) електричного опору від опорної напруги (рис. 2) також може бути апроксимована гіперболічними функціями.

Оскільки дисперсія є моментом другого порядку випадкової змінної, то для оцінювання відносного розкиду випадкової змінної більш зручними є моменти першого порядку – параметр мінливості (4) та відносне середнє відхилення від математичного сподівання (5). Як видно на рис. 3–5, найменший розкид має амплітуда напруги, а найбільший – еквівалентний опір.

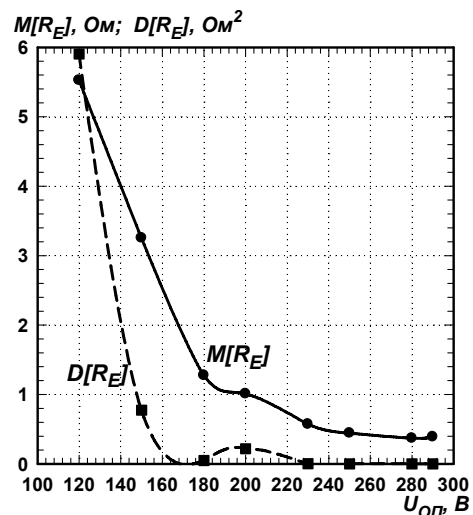


Рис. 2. Залежність математичного сподівання  $M[R_E]$  та дисперсії  $D[R_E]$  еквівалентного електричного опору навантаження  $R_E$  від опорної напруги  $U_{оп}$

Це означає, що в даних режимах вихідна характеристика генератора ближче до вихідної характеристики джерела електрорушійної сили, а не джерела струму. На всіх трьох графіках (рис. 3–5) спостерігаються локальні екстремуми  $\nu$  та  $\nu$  при опорній напрузі 200 В, що свідчить про найбільшу нестабільність даного режиму.

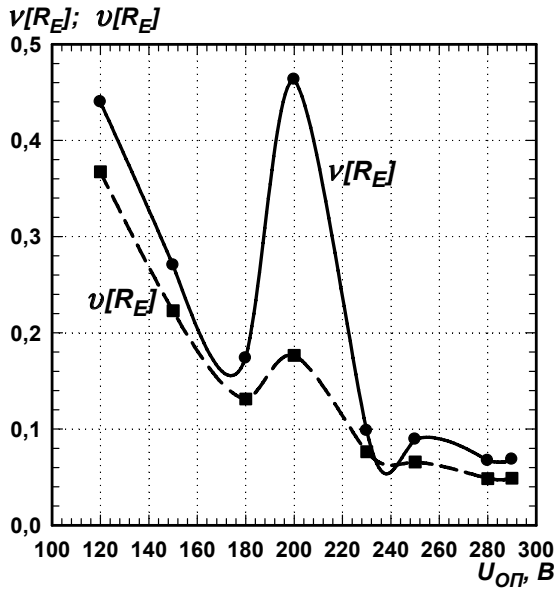


Рис. 3. Залежність параметру мінливості  $\nu[R_E]$  та відносного середнього відхилення від математичного сподівання  $\nu[R_E]$  еквівалентного електричного опору навантаження  $R_E$  від опорної напруги  $U_{\text{Оп}}$

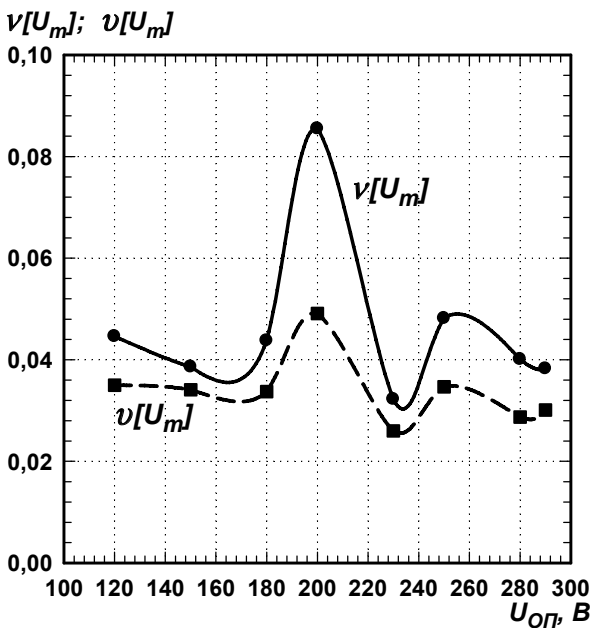


Рис. 4. Залежність параметру мінливості  $\nu[U_m]$  та відносного середнього відхилення від математичного сподівання  $\nu[U_m]$  амплітуди напруги імпульсів  $U_m$  від опорної напруги  $U_{\text{Оп}}$

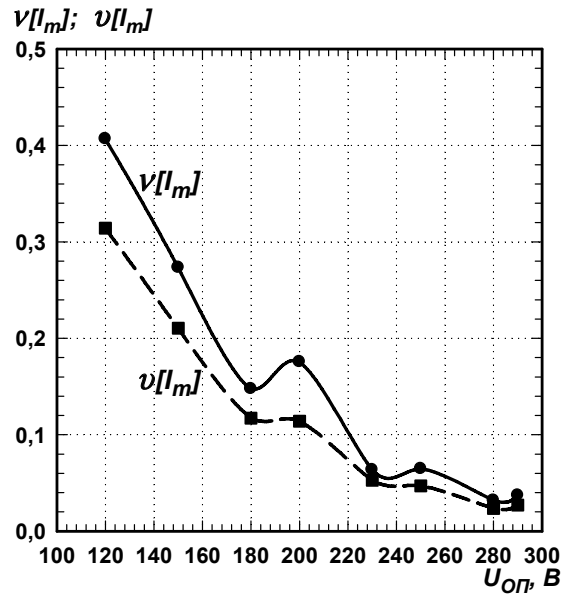


Рис. 5. Залежність параметру мінливості  $\nu[I_m]$  та відносного середнього відхилення від математичного сподівання  $\nu[I_m]$  амплітуди струму імпульсів  $I_m$  від опорної напруги  $U_{\text{Оп}}$

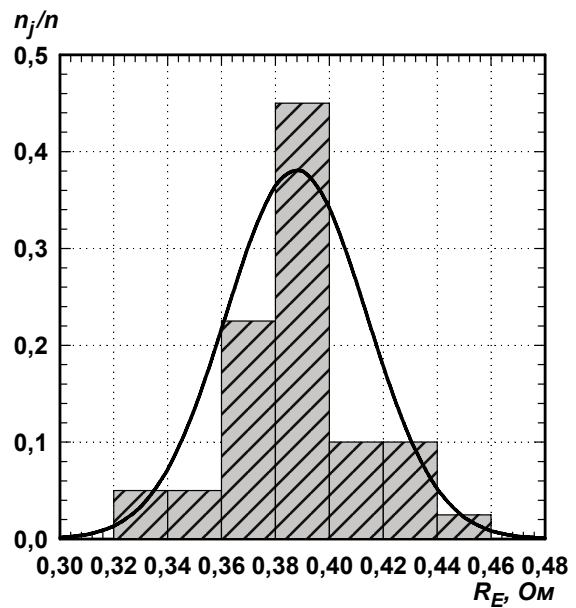


Рис. 6. Гістограма розподілу частоти попадань значень еквівалентного електричного опору навантаження  $R_E$  в задані інтервали та функція щільності нормального розподілу при  $U_{\text{Оп}}=290$  В

При перевірці нульової гіпотези про те, що розподіл еквівалентного опору є нормальним, помилка другого роду складає 0,06. Це означає, що гіпотеза вірна.

Побудована за даними експериментів гістограма розподілу відношення кількості попадань  $n_j$  значень еквівалентного електричного опору навантаження  $R_E$  в інтервал  $j$  до загальної кількості значень  $R_E$  в рамках одного режиму (при опорній напрузі 290 В)  $n=40$  наведена на рис. 6. Для порівняння на гістограму

рис. 6 накладена пронормована по  $n=40$  функція щільності нормального закону розподілу випадкової величини з параметрами  $M/R_E=0,388 \text{ Ом}$  та  $D/R_E=6,84 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^2$ , що розраховані за даними експериментів по (2) і (3) відповідно. Як видно на рис. 6, розподіл щільності значень  $R_E$  з достатньою для інженерних розрахунків точністю може бути описаний нормальним законом.

**Висновки.** 1. Показано, що, при фіксованому значенні опорної напруги, розподіл середнього за час тривалості імпульсу струму значення еквівалентного електричного опору гранульованого струмопровідного середовища опору підпорядковується нормальному закону.

2. Залежності математичного сподівання та дисперсії еквівалентного опору від напруги можуть бути апроксимовані гіперболічними функціями. Тобто, з ростом опорної напруги їх значення зменшуються, що свідчить про підвищення стабільності процесу з ростом напруги імпульсів у дослідженому діапазоні.

3. Максимальні значення параметру мінливості спостерігаються для еквівалентного електричного опору середовища, а мінімальні – для амплітуди напруги. Це свідчить про те, що в досліджених режимах вихідна характеристика генератора імпульсів була ближчою до джерела електрорушійної сили, ніж до джерела струму, а першопричиною стохастичних змін електричних параметрів системи є властивості опору гранульованих струмопровідних середовищ.

4. Режим роботи при значенні опорної напруги  $200 \text{ В}$  є найбільш нестабільним серед усіх досліджених, про що свідчать локальні екстремуми параметру мінливості та відносного середнього відхилення від математичного сподівання для електричного опору середовища, напруги та струму імпульсів.

#### Список літератури / References

1. Электроэрозионная технология соединений и порошков металлов / У.А. Асанов, А.Д. Цой, А.А. Щерба, В.И. Казекин – Фрунзе: Илим, 1990. – 256 с.  
Asanov, U.A., Tsoy, A.D., Shcherba, A.A. and Kazekin, V.I. (1990), *Elektroerozionnaya tekhnologiya soedineniy i poroshkov metallov* [Electroerosive Technology of Compounds and Powders of Metals], Ilim, Frunze, Russia.
2. Solomon, V.C., Smith, D.J., Tang, Y. and Berkowitz, A.E. (2004), “Microstructural characterization of Ni-Mn-Ga ferromagnetic shape memory alloy powders”, *J. App. Phys.*, Vol.95 (11), pp. 6954–6956.
3. Berkowitz, A.E., Hansen, M.F., Parker, F.T., Vecchio, K.S., Spada, F.E., Lavernia, E.J. and Rodriguez, R. (2003), “Amorphous soft magnetic particles produced by spark erosion”, *J. Magn. Magn. Mater.*, no.1, pp. 254–255.
4. Структура та властивості наночастинок, отриманих методом електроіскрової обробки міді та срібла / Лопатько К.Г., Афтандіянц Є.Г., Зауличний Я.В., Карпець М.В. // *Матеріалознавство та обробка металів* – 2009. – №3. – С. 57–62.
5. Lopatko K.G., Aftandilyants E.G., Zaulichniy Ya.V., Karpets M.V. (2009), “Structure and properties of nanoparticles, obtained by a method of electrospark processing of copper and silver”, *Materialoznavstvo ta obrobka metaliv*, no.3, pp. 57–62.
6. Шидловский А.К. Перспективы применения искроэрозионной коагуляции в системах водоподготовки тепловых сетей / Шидловский А.К., Щерба А.А., Захарченко С.Н. // *Энергетика и электрификация* – 2002. – №12. – С. 34–40.  
Shidlovskiy, A.K., Shcherba, A.A. and Zakharchenko, S.N. (2002), “Prospect of application spark-eroded coagulation in systems of water preparation of thermal networks”, *Energetika i elektrifikatsiya*, no.12, pp. 34–40.
7. Дезинфицирующее действие объемного электроискрового разряда в воде / [Гончарук В.В., Щерба А.А., Захарченко С.Н. и др.] // *Химия и технология воды* – 1999. – №3. – Т. 21. – С. 328–336.  
Goncharuk, V.V., Shcherba, A.A., Zakharchenko, S.N., Savluk, O.S., Potapchenko, N.G. and Kosinova, V.N. (1999), “Disinfectant action of the volume electrospark discharges in water”, *Khimiya i tekhnologiya vody*, Vol. 21, no.3, pp. 328–336.
8. Захарченко С.Н. Моделирование сопротивления гранулированных токопроводящих сред параметрическими зависимостями / Захарченко С.Н., Шидловская Н.А. // *Электронное моделирование* – 2012. – Т.34. – №5. – С. 91–102.  
Zakharchenko, S.N., Shydlovskaya, N.A. (2012), “Modeling of resistance of the granulated current-carrying medium by parametrical dependences”, *Elektronnoe modelirovanie*, Vol. 34, no.5, pp. 91–102.
9. Захарченко С.Н. Моделирование зависимости электрического сопротивления гранулированных токопроводящих сред от протекающего в них импульсного тока / Захарченко С.Н. // *Технічна електродинаміка* – 2012. – №5. – С. 17–27.  
Zakharchenko, S.N. (2012), “Modeling of dependence of electrical resistance of granulated current-carrying mediums from a pulse current proceeding in them”, *Tekhnichna elektrodynamika*, no.5, pp. 17–27.
10. Щерба А.А. Регулирование динамических параметров технологических систем объемной электроискровой обработки гетерогенных токопроводящих сред / Щерба А.А., Подольцев А.Д., Захарченко С.Н. // *Праці Ін-ту електродинаміки НАНУ. Електротехніка* 2001. – К.: Вид. Ін-ту електродинаміки НАНУ. – 2001. – С. 3–16.  
Shcherba, A.A., Podoltsev, A.D. and Zakharchenko, S.N. (2001), “Regulation of dynamic parameters of technological systems of volume electrospark treatment heterogeneous current-carrying mediums”, *Pratsi Institutu Elektrodynamiki Natsionalnoi Akademii Nauk Ukraini*, Kyiv, pp. 3–16.

**Цель.** Статистические исследования зависимости эквивалентного электрического сопротивления гетерогенных токопроводящих сред при их электроэрозионной обработке от напряжения разрядных им-

пульсов для учета стохастической составляющей его изменения.

**Методика.** На лабораторном оборудовании с использованием аналого-цифрового запоминающего осциллографа HAMEG HM 1507-3 были проведены серии экспериментальных исследований зависимостей эквивалентного электрического сопротивления гранул *Al*, погруженных в водопроводную воду, а также напряжения и тока разрядных импульсов от опорного напряжения формирователя. Полученные таким образом данные подвергались статистической обработке, а именно: определялись их математическое ожидание, дисперсия, параметр изменчивости и относительное среднее отклонение от математического ожидания.

**Результаты.** Были получены зависимости математического ожидания, дисперсии, параметра изменчивости и относительного среднего отклонения от математического ожидания эквивалентного электрического сопротивления гранул *Al* в водопроводной воде при их электроэрозионном диспергировании от опорного напряжения формирователя. Показано, что зависимости математического ожидания и дисперсии эквивалентного сопротивления от напряжения могут быть аппроксимированы гиперболическими функциями. То есть, с ростом опорного напряжения их значения уменьшаются, что свидетельствует о повышении стабильности процесса с ростом напряжения импульсов в исследованном диапазоне. Получено, что максимальные значения параметра изменчивости при изменении опорного напряжения наблюдаются для эквивалентного электрического сопротивления среды, а минимальные – для амплитуды напряжения. Это свидетельствует о том, что первопричиной стохастических изменений электрических параметров системы есть свойства сопротивления гранулированных токопроводящих сред.

**Научная новизна.** Впервые исследованы статистические характеристики эквивалентного электрического сопротивления гетерогенной токопроводящей среды на примере гранул *Al* в водопроводной воде при их электроэрозионном диспергировании, а также статистические характеристики напряжения и тока разрядных импульсов.

**Практическая значимость.** Предложенный подход позволяет повысить эффективность анализа нестабильности электрических параметров в системе „генератор разрядных импульсов – объемная электроэрозионная нагрузка“.

**Ключевые слова:** *объемная электроэрозионная обработка, электрические импульсы, эквивалентное электрическое сопротивление, статистический анализ*

**Purpose.** To carry out the statistical research of dependence of equivalent electric resistance of heterogeneous current-carrying mediums at them electroerosive processing from voltage of discharge pulses for the registration of a stochastic component of its change.

**Methodology.** On the labware with use of analogue-digital data storage oscillograph HAMEG HM 1507-3 we have carried out a series of experimental tests of dependences of equivalent electric resistance of granules *Al* submerged in tap water, and tests of voltage and current dependences of discharge pulses from reference voltage of the shaper. The data obtained was subject to statistical processing. Mathematical expectation, variance, parameter of variability and relative average deviation from expectation have been defined.

**Findings.** Dependences of the mathematical expectation, the variance, the parameter of variability and a relative average deviation from expectation of equivalent electric resistance of *Al* granules in tap water have been obtained at them electroerosive dispersion from reference voltage of the shaper. We have shown that the dependences of expectation and variance of equivalent resistance on voltage can be approximated by hyperbolic functions. The higher is the reference voltage the lower are their values. This testifies the increase of stability of process with increase of voltage of pulses in the investigated range. We have received following: maximum values of the parameter of variability by regulation of the reference voltage are observed for equivalent electric resistance of the medium, and minimum – for amplitude of voltage. This testifies that properties of resistance of the granulated current-carrying mediums naturally cause stochastic changes of the electrical parameters of the system.

**Originality.** For the first time the statistical characteristics of the equivalent electrical resistance of heterogeneous current-carrying mediums on an example of granules *Al* in tap water have been considered during electroerosive dispersion and the electrical parameters of discharge pulses have been studied.

**Practical value.** The offered approach allows raising efficiency of the analysis of instability of electric parameters in the system including the generator of discharge pulses and the volume electroerosive loading.

**Keywords:** *volume electroerosive processing, electrical pulses, equivalent electrical resistance, statistical analysis*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук Н.А. Шидловською. Дата надходження рукопису 07.12.12.*