

СТРЕЛЬЧУК Р. М., ШЕЛКОВИЙ О. М.

МОДЕЛЮВАННЯ МІЖЕЛЕКТРОДНОГО ЗАЗОРУ ПРИ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОМУ ШЛІФУВАННІ ЗІ ЗМІНОЮ ПОЛЯРНІСТІ ЕЛЕКТРОДІВ

У роботі проведено експериментальне дослідження та моделювання в графічному середовищі Simulink міжелектродного зазору при електроерозійному шліфуванні зі змінною полярністю електродів важкооброблюваних матеріалів. По експериментально отриманим осцилограмам струмів і напруг у зоні різання розроблена імітаційна модель міжелектродного зазору. Модель реалізує нелінійну залежність активного опору міжелектродного зазору від його величини, що дозволяє враховувати вплив міжелектродного середовища на параметри електророзрядних імпульсів. В результаті аналізу експериментальних осцилограм струмів робочих імпульсів було встановлено, що електричні процеси, що протікають у міжелектродному зазорі при електроерозійному шліфуванні мають коливальний характер. Середовище, в якому протікають ці процеси може бути з достатньою точністю представлена у вигляді Т-подібної схеми заміщення, що включає активні опори, індуктивності та ємність. Встановлено, що активний опір міжелектродного проміжку нелінійно залежить від його величини. Середньоквадратичне відхилення між розрахунковими та експериментальними імпульсами струму і напруги, віднесене до його значення, не перевищує 12-15%. Знайдені значення параметрів схеми заміщення дозволили отримати Simulink-модель міжелектродного проміжку при електроерозійному шліфуванні. Добрий збіг розрахункових осцилограм, отриманих у Simulink-моделі, з експериментальними, показало, що розроблена модель міжелектродного зазору при електроерозійному шліфуванні досить адекватно відображає реальні електричні процеси, що протікають у міжелектродному зазорі.

Ключові слова: міжелектродний зазор, осцилограма струму і напруги, схема заміщення, електричні процеси, імітаційна модель.

СТРЕЛЬЧУК Р. М., ШЕЛКОВОЙ А. Н.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖЭЛЕКТРОДНОГО ЗАЗОРА ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОМ ШЛИФОВАНИИ С ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ПОЛЯРНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОДОВ

В работе проведено экспериментальное исследование и моделирование в графической среде Simulink межэлектродного зазора при электроэрозионном шлифовании с изменяющейся полярностью электродов труднообрабатываемых материалов. По экспериментально полученным осциллограммам токов и напряжений в зоне резания разработана имитационная модель межэлектродного зазора. Модель реализует нелинейную зависимость активного сопротивления межэлектродного промежутка от его величины, которая позволяет учитывать влияние межэлектродной среды на параметры электроразрядных импульсов. В результате анализа экспериментальных осциллограмм токов рабочих импульсов было установлено, что электрические процессы, протекающие в межэлектродном зазоре при электроэрозионном шлифовании носят колебательный характер. Среда, в которой протекают эти процессы может быть с достаточной точностью представлена в виде Т-образной схемы замещения, включающей в себя активные сопротивления, индуктивности и емкость. Установлено, что активное сопротивление межэлектродного зазора нелинейно зависит от его величины. Среднеквадратичное отклонение между расчетными и экспериментальными импульсами тока и напряжения, отнесенное к его установившемуся значению, не превышает 12-15%. Найденные значения параметров схемы замещения позволили получить Simulink-модель межэлектродного зазора при электроэрозионном шлифовании. Хорошее совпадение расчетных осциллограмм, полученных в Simulink-модели, с экспериментальными, показало что разработанная модель межэлектродного зазора при электроэрозионном шлифовании достаточно адекватно отражает реальные электрические процессы, протекающие в межэлектродном зазоре.

Ключевые слова: межэлектродный зазор, осциллограмма тока и напряжения, схема замещения, электрические процессы, имитационная модель.

STRELCHUK R.M., SHELKOVYI O. M.

SIMULATION OF THE INTERELECTRODE GAP IN ELECTRICAL DISCHARGE GRINDING WITH CHANGING ELECTRODE POLARITY

In this paper, an experimental study and simulation in the Simulink graphical environment of the interelectrode gap during electroerosive grinding with changing polarity of electrodes of difficult-to-machine materials was carried out. Based on the experimentally obtained oscillograms of currents and voltages in the cutting zone, a simulation model of the interelectrode gap has been developed. The model implements a nonlinear dependence of the active resistance of the interelectrode gap on its value, which makes it possible to take into account the influence of the interelectrode medium on the parameters of electric discharge pulses. As a result of the analysis of the experimental oscillograms of the currents of the working pulses, it was found that the electrical processes occurring in the interelectrode gap during electroerosive grinding are oscillatory. The environment in which these processes take place can be represented with sufficient accuracy in the form of a T-shaped equivalent circuit, which includes active resistances, inductances and capacitance. It has been established that the active resistance of the interelectrode gap depends nonlinearly on its value. The root-mean-square deviation between the calculated and experimental current and voltage pulses, referred to its steady-state value, does not exceed 12-15%. The found values of the equivalent circuit parameters made it possible to obtain a Simulink model of the interelectrode gap in electroerosive grinding. A good agreement between the calculated oscillograms obtained in the Simulink model and the experimental ones showed that the developed model of the interelectrode gap during electroerosive grinding quite adequately reflects the real electrical processes occurring in the interelectrode gap.

Keywords: interelectrode gap, current and voltage waveform, equivalent circuit, electrical processes, simulation model.

1. Вступ. У зоні різання в умовах електроерозійного шліфування діють електричні розряди, що виникають при пробіі міжелектродного середовища між стружкою або поверхнею матеріалу і зв'язкою круга, при ковзанні стружки по зв'язці, електричні розряди, що ініціюються вибуховою електроерозією перемикаючих елементів. Процес взаємодії різального інструменту з поверхнею оброблюваного матеріалу в умовах електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів не досліджений, а зона різання комбінованої обробки не вивчена [1,2]. У зв'язку з цим у роботі зроблено моделювання процесу, що відбувається в зоні різання, та встановлені особливості та закономірності взаємодії різального інструменту з поверхнею оброблюваного матеріалу.

2. Аналіз літератури. Зона обробки при електроерозійному алмазному шліфуванні є складною електрофізичною системою [3,4]. Вона є одночасно місцем мікрорізання та дії електричних розрядів у міжелектродному проміжку. При додатку напруги в цій зоні виникає електричний струм, який проходить через перемикаючі міжелектродний проміжок струмопровідні містки, робочу рідину, що володіє деякою електропровідністю, і через канал розряду, що виникає, в період його дії.

Розмір зони обробки визначається шириною фронту роботи шліфувального круга та величиною міжелектродного зазору, тобто. відстанню між зв'язкою круга і поверхнею оброблюваного матеріалу деталі. У зоні обробки, поряд зі стружкоутворенням та дією розрядів, відбуваються складні механічні та електрофізичні процеси: контактні-фрикційні, термічні, електричні, плазмохімічні та електрогідравлічні; мають місце високочастотні коливання та кавітація рідкого середовища.

Основне, що домінує дію електричної енергії в зоні обробки проявляється в електроерозійних процесах та явищах комбінованого характеру, різної тривалості та інтенсивності. Вони мають місце на ділянках контактної та безконтактної взаємодії круга зі зрізаною стружкою та оброблюваним матеріалом, де поверхні цих електродів впритул наближаються один до одного і де можливий дотик, утворення переривчастих або щільних контактів та їх розрив. Таким чином, зона електроерозійного алмазного шліфування характеризується контактною та безконтактною електроерозією [5].

3. Методи дослідження. Модель межелектродного зазору характеризує електродинамічні процеси, котрі виникають у ньому, і визначаються типом і параметрами схеми заміщення. З метою обґрунтованого вибору типу та параметрів моделі міжелектродного зазору експериментально були отримані осцилограми струмів технологічних імпульсів при різних величинах цього зазору (рис. 1).

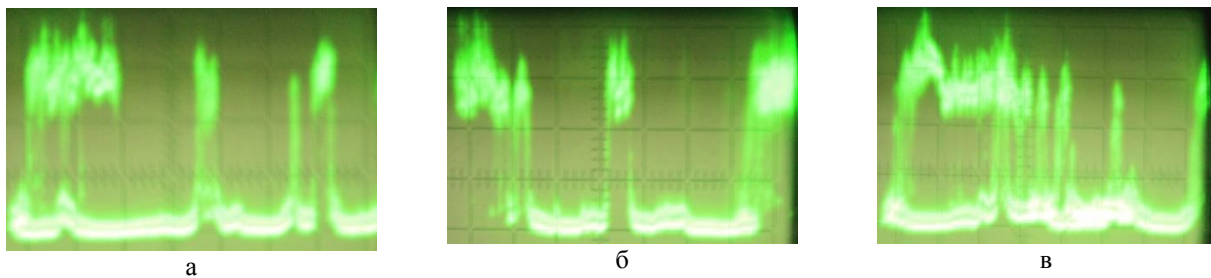


Рис. 1 – Осцилограми струмів у міжелектродному зазорі величиною: а – 7 мкм; б – 14 мкм; в – при короткому замиканні.

Експериментальні дослідження проводилися на базі верстата моделі 3Д642Е. Додаткова енергія в зону різання вводилася від генератора імпульсів НО 6506, що перетворює змінний струм напругою 380В уніполярний імпульсний струм. Регулювання напруги, амплітуди розрядного струму, частоти та шпаруватості проводилося від генератора імпульсів. Застосовувалася торцева схема шліфування, яка здійснювалася чашковими колами конічної форми 12А2-45° 150×10×3×32 на зв'язці М1-01 з алмазними зернами АС6 з зернистістю 100/80 і концентрацією 4. Перед експериментами алмазні круги попередньо правились і прироблялись на протязі 5-10 хвилин. В якості оброблюваного матеріалу деталі використовувалися твердосплавні пластини марки ВК6 з розмірами 14×14×5 мм. Пристрій для здійснення способу електроерозійного алмазного шліфування зі зміною полярністю електродів наведено на рис.2.



Рис. 2 – Пристрій для здійснення електроерозійного способу шліфування зі змінною полярністю електродів

Електричні режими генератора технологічних імпульсів: амплітуда імпульсів напруги – 50 В, частота технологічних імпульсів – 44 КГц, шпаруватість імпульсів – 1. Осцилограми реєструвалися осцилографом моделі С1-101, підключення якого здійснювалося згідно зі схемою представленою на рис. 3. Величина міжелектродного проміжку фіксувалася індикатором годинникового типу з ціною розподілу 1 мкм.

Аналіз електричної схеми генератора імпульсів НО 6506 та осцилограм струмів при різних величинах міжелектродного зазору (рис.1) дозволяє з достатньою точністю обмежитися Т-подібною схемою заміщення, що враховує реактивні опори генератора технологічних імпульсів та міжелектродного зазору.

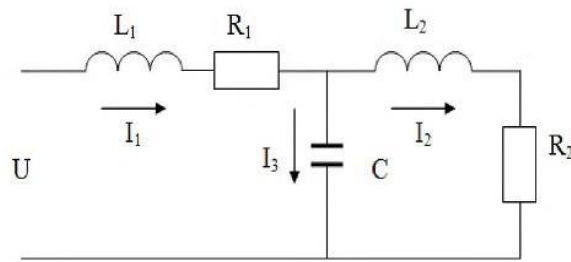


Рис. 3 – Схема заміщення міжелектродного зазору.

Оскільки струм у міжелектродному зазорі має яскраво виражену коливальну складову, то схема заміщення включає коливальний RLC-контур, представлений на рис. 3. Активні опір генератора технологічних імпульсів R_1 і навантаження (міжелектродного проміжку) R_2 можуть бути знайдені за значеннями падіння напруги U_2 , що встановилася, на опір R_2 і струму I_2 при відомій величині амплітуди імпульсів холостого ходу генератора U :

$$R = \frac{U - U_2}{I_1}, \quad (1)$$

$$R_2 = \frac{U_2}{I_2}. \quad (2)$$

4. Результати дослідження. В результаті обробки осцилограм було отримано значення активних опір R_1 і R_2 для різних значень міжелектродного зазору (табл.1). На рис.4 наведено залежність відносного опір величини міжелектродного зазору.

Табл. 1 – Значення активних опір

Міжелектродний зазор S , мкм	R_1 , Ом	R_2 , Ом
Коротке замикання, 0	4,85	0
1	4,85	0,13
2	4,85	0,27
3	4,85	0,51
4	4,85	0,77
5	4,85	1,21
6	4,85	1,75
7	4,85	2,52
8	4,85	4,48

На рис.4 показано, що відносний опір міжелектродного проміжку $R_{отн} = R_2/R_1$ нелінійно залежить від величини міжелектродного проміжку S . Оскільки при заданій напрузі генератора U існує граничне значення міжелектродного проміжку S , при якому електричний розряд не виникає, то зазначену залежність $R_{отн} = f(S)$ можна апроксимувати виразом [6]:

$$R_{отн} = 0,011 \cdot S^{2,843} \quad (3)$$

де 0,011 та 2,843 – коефіцієнти апроксимації, знайдені за методом найменших квадратів, що залежать від амплітуди робочих імпульсів генератора та електричних параметрів схеми заміщення.

Для визначення інших параметрів схеми заміщення, а саме L_1 , L_2 і C були знайдені координати декількох характерних точок на експериментально знятій осцилограмі процесу одиничного електричного розряду (рис.1в). Параметрична ідентифікація осцилограм (рис.4) оцифровувалась у програмі OriginPro. Ці точки задовольняють рішення системи диференціальних рівнянь перехідного процесу, що протікає в Т - образній схемі заміщення [7].

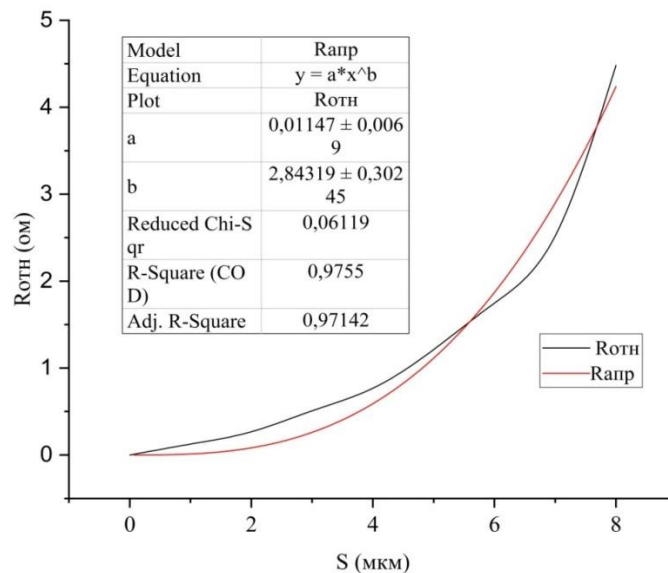


Рис. 4 – Залежність відносного опору від величини міжелектродного зазору

$$\begin{cases} L_1 \frac{dI_1}{dt} + R_1 I_1 + U_C = U \\ L_2 \frac{dI_2}{dt} + R_2 I_2 = U_C \\ C \frac{dU_C}{dt} = I_1 - I_2 \end{cases} \quad (4)$$

Мірою адекватності експериментальних даних та розрахункових значень, отриманих в результаті рішення системи (4) є квадрат відстані між експериментальними та розрахунковими точками:

$$F(L_1, L_2, C) = \sum_{i=1}^{50} (t_i - t_{pi})^2 + \sum_{i=1}^{50} (I_i - I_{pi})^2 \quad (5)$$

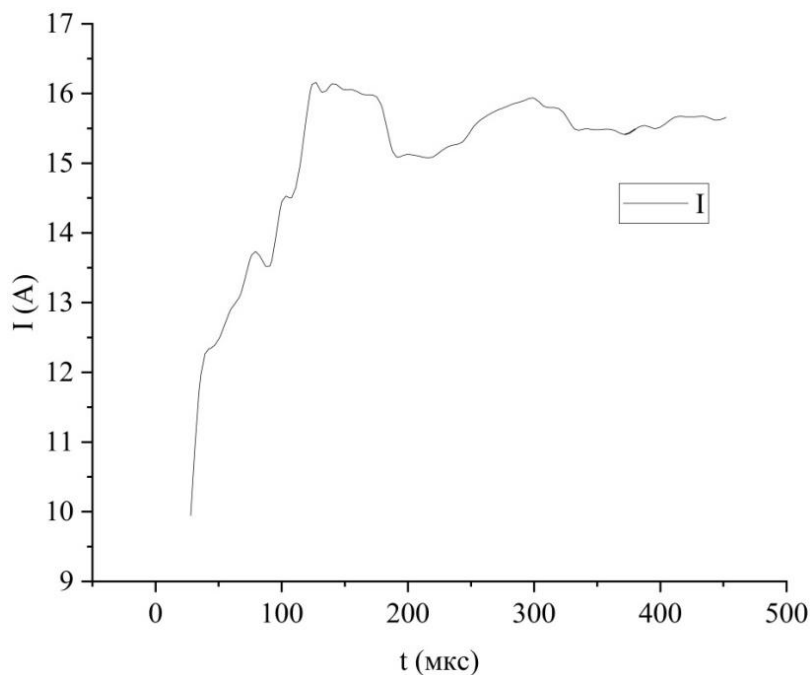


Рис. 5 – Приклад оцифрування імпульсу струму

Розрахункові точки також вибираються на екстремальних значеннях рішення (рис.5). Мінімізуючи $F(L_1, L_2, C)$ змінними L_1 , L_2 і C можна визначити їх значення. Мінімізація здійснювалася у програмі Matlab з використанням

симплекс методу Нелдера-Міда [8]. В результаті були отримані наступні усереднені по всій серії дослідів значення параметрів схеми заміщення: $L_1=173\mu\text{Гн}$, $L_2=173\mu\text{Гн}$ і $C=18\text{ мкФ}$.

На рис.6 представлена розрахункова крива, отримана в результаті мінімізації рішення (4) за критерієм (5) та експериментальна крива, знята з осцилограми рис.1в, що підтверджують гарний збіг результатів розрахунку та експерименту.

На основі прийнятого типу та знайдених параметрів схеми заміщення міжелектродного зазору була розроблена модель міжелектродного зазору при електроерозійному алмазному шліфуванні в програмі імітаційного моделювання Matlab Simulink. Структурна схема моделі міжелектродного зазору при електроерозійному шліфуванні представлена рис.7.

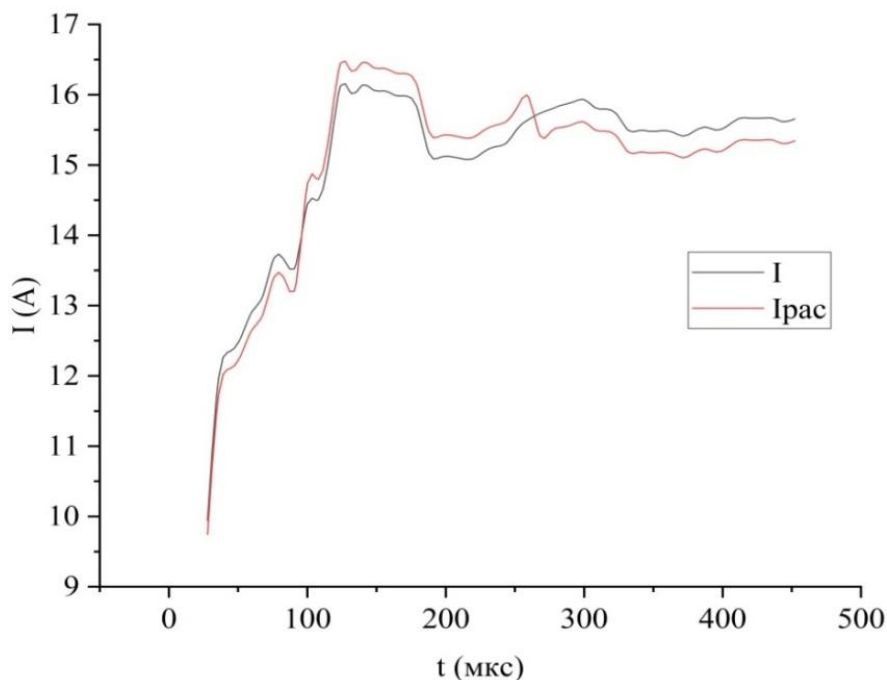


Рис. 6 – Розрахункові та експериментальні значення імпульсу струму в міжелектродному зазорі

На рис.8 наведено розрахункові осцилограми потужності, струму та напруги у міжелектродному зазорі. Розрахункові осцилограми отримані у розробленій Simulink-моделі міжелектродного зазору. Поява імпульсу струму в початковий час на розрахункових осцилограмах обумовлено електричної ємністю зазору між алмазним кругом і поверхнею оброблюваного матеріалу до виникнення розряду. Наявність цієї ємності в експерименті не враховується, оскільки вона практично не впливає на процес електроерозійного алмазного шліфування. Таким чином, в результаті аналізу експериментальних осцилограм струму робочих імпульсів було встановлено, що електричні процеси, що протікають у міжелектродному зазорі, при електроерозійному шліфуванні мають коливальний характер. Середовище, в якому протікають ці процеси, може бути з достатньою точністю представлено у вигляді Т-подібної схеми заміщення, що включає активні опори, індуктивності і ємність. Електроерозійні процеси та явища, пов'язані з розмиканням контактів з подальшою дією розрядів, можуть мати місце, коли відбувається розрив електричного ланцюга шляхом усунення перемикаючих міжелектродний проміжок містків (стружок). Розрив ланцюга відбувається в момент закінчення стружкоутворення, коли стружка викидається різальним зерном з міжелектродного проміжку зони обробки. При цьому можлива одночасне або послідовне розмикання у двох контактних точках - у верхній, де стружка стикається з зв'язкою круга, і - в нижній, де вона пов'язана з оброблюваним матеріалом і відбувається відділення стружки від його поверхні.

Висновки. В результаті аналізу експериментальних осцилограм струмів робочих імпульсів було встановлено, що електричні процеси, що протікають у міжелектродному зазорі при електроерозійному шліфуванні мають коливальний характер. Середовище, в якому протікають ці процеси може бути з достатньою точністю представлено у вигляді Т-подібної схеми заміщення, що включає активні опори, індуктивності і ємність. Встановлено, що активний опір міжелектродного зазору нелінійно залежить від його величини. Середньоквадратичне відхилення між розрахунковими та експериментальними імпульсами струму та напруги, віднесене до його встановленого значення, не перевищує 12-15%. Знайдені значення параметрів схеми заміщення дозволили отримати Simulink-модель міжелектродного зазору при електро-ерозійному шліфуванні. Добрий збіг розрахункових осцилограм, отриманих в Simulink-моделі, з експериментальними, показало що розроблена модель міжелектродного зазору при електроерозійному шліфуванні досить адекватно відображає реальні електричні процеси, що протікають в міжелектродному зазорі.

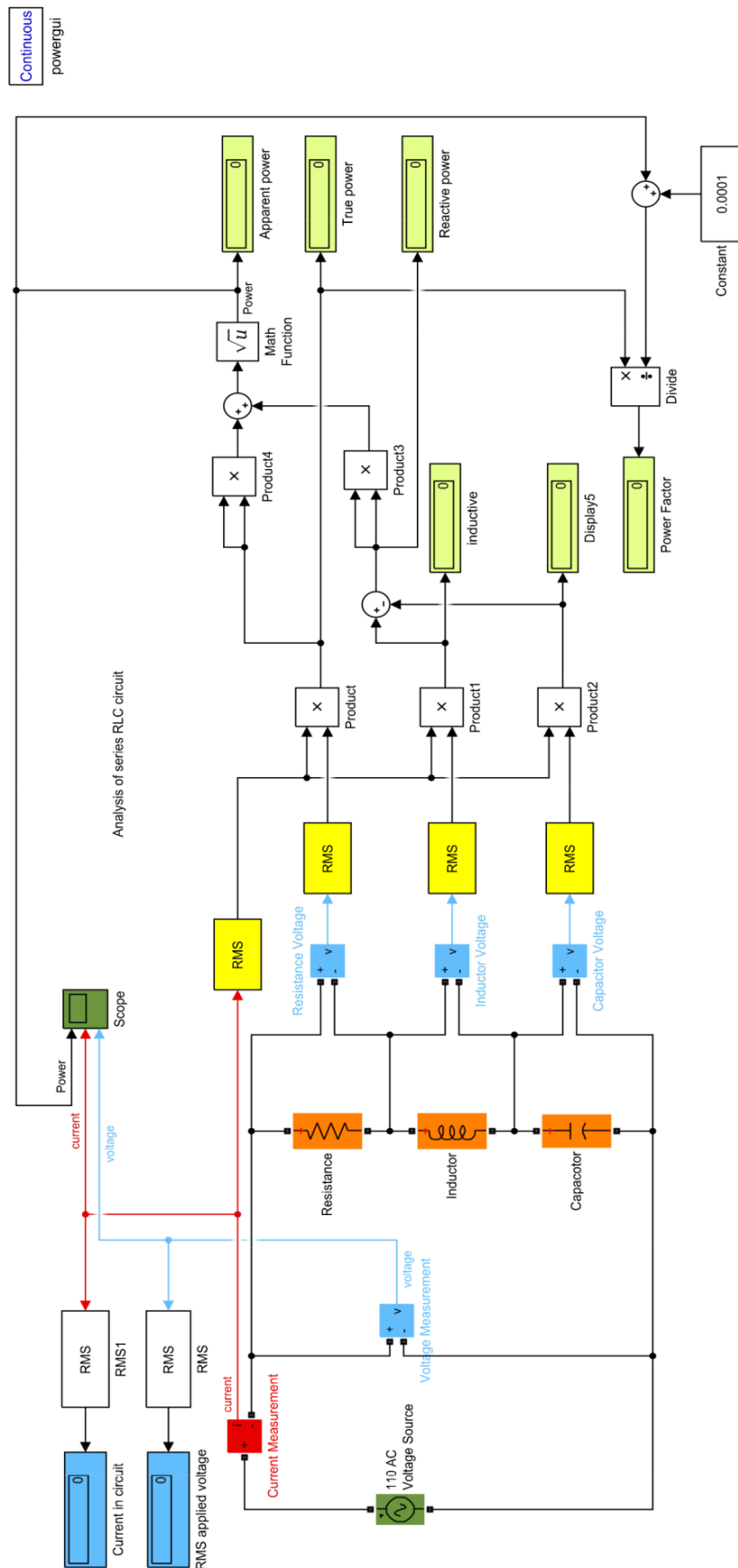


Рис. 7 – Модель міжелектродного зазору при електроерозійному шліфуванні

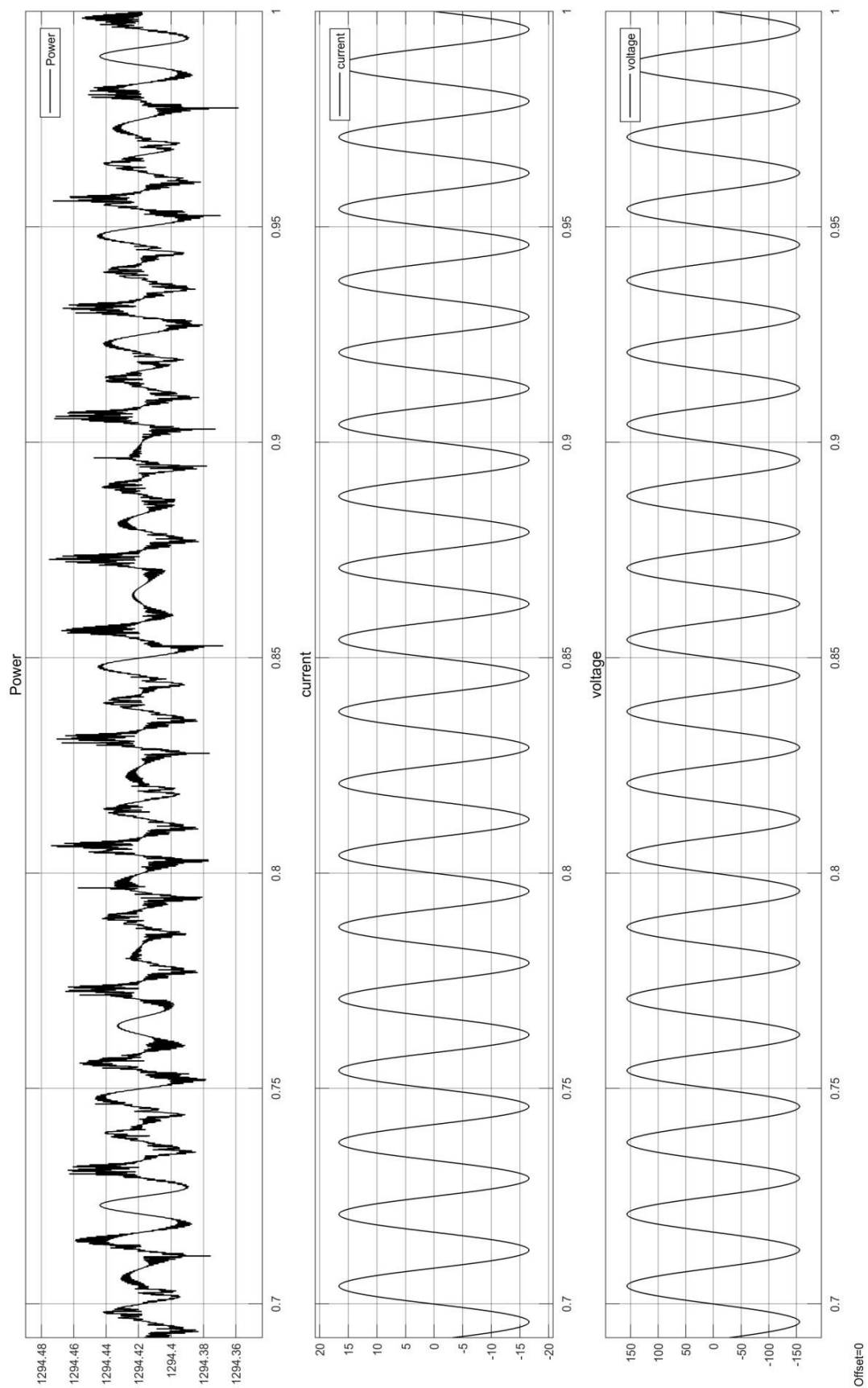


Рис. 8 – Розрахункові осцилограми потужності, струму та напруги у міжелектродному зазорі

Список литературы

1. Пат. України на корисну модель №131894, МПК (2018.01) B24B 1/00. Спосіб електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів / Стрельчук Р. М., Узунян М. Д. – № u 201806851; заявл. 18.06.2018; опубл. 11.02.2019.–Бюл. № 3.
2. Arun, I., Yuvaraj, C., Jyothibabu, P. Influence of Silica on Microstructural Modification of Electrical Discharge Composite Coating and its Wear Performance // *Silicon* 12, p. 2375–2386 (2020).
3. Montes, J., Cuevas, F., Reina, F. Modelling and Simulation of the Electrical Resistance Sintering Process of Iron Powders // *Met. Mater. Int.* 26, p. 1045–1059 (2020).
4. D'Urso, G., Maccarini, G., Ravasio, C. Influence of electrode material in micro-EDM drilling of stainless steel and tungsten carbide // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 85, p. 2013–2025 (2016).
5. Giridharan, A., Samuel, G. Investigation into erosion rate of AISI 4340 steel during wire electrical discharge turning process // *Machining Science and Technology*, p. 287–298, (2018).
6. Сухов А. Н. Математическая обработка результатов измерений. – М.: МИСИ, 1982. – 89 с.
7. Тарасик В. П. Математическое моделирование технических систем – Минск: Дизайн ПРО, 2004 – 640 с.
8. Andreani, R., Haeser, G., Martínez, J.M. // On sequential optimality conditions for smooth constrained optimization, *Optimization* 60 (2011), pp. 627–641.

References (transliterated)

1. Strelchuk R.M., Uzunian M.D. Sposib elektroeroziinoho almaznoho shlifuvannia zi zminnoi poliamistiu elektrodov, Patent UA, no. 131894, 2019.
2. Arun, I., Yuvaraj, C., Jyothibabu, P. Influence of Silica on Microstructural Modification of Electrical Discharge Composite Coating and its Wear Performance // *Silicon* 12, p. 2375–2386 (2020).
3. Montes, J., Cuevas, F., Reina, F. Modelling and Simulation of the Electrical Resistance Sintering Process of Iron Powders // *Met. Mater. Int.* 26, p. 1045–1059 (2020).
4. D'Urso, G., Maccarini, G., Ravasio, C. Influence of electrode material in micro-EDM drilling of stainless steel and tungsten carbide // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 85, p. 2013–2025 (2016).
5. Giridharan, A., Samuel, G. Investigation into erosion rate of AISI 4340 steel during wire electrical discharge turning process // *Machining Science and Technology*, p. 287–298, (2018).
6. Sukhov A. N. Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov izmerenij. – Moscow: MISI, 1982. – 89 p.
7. Tarasik V. P. Matematicheskoe modelirovanie tekhnicheskikh sistem. – Minsk: DizajnPRO, 2004 – 640 p.
8. R.Andreani, G.Haeser, J.M.Martínez // On sequential optimality conditions for smooth constrained optimization, *Optimization* 60 (2011), pp. 627–641.

Поступила (received) 15.03.2022

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Стрельчук Роман Михайлович (Стрельчук Роман Михайлович, Strelchuk Roman Mykhailovych) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», ст. викл. кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка; м. Харків, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-7221-031X>; e-mail: r.m.strelchuk@gmail.com.

Шелковий Олександр Миколайович (Шелковой Александр Николаевич, Shelkovyi Oleksandr Mykolaiovych) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7414-4854>; e-mail: alnikshelk@gmail.com.