

Р.М. Дідковський, к.т.н, ст. викл.

Г.Є. Калейніков, аспір.

Ю.М. Небилиця, інж.

Черкаський державний технологічний університет

СПЕКТРАЛЬНА ЩІЛЬНІСТЬ ВИДІЛЕННЯ ЕНЕРГІЇ ПРИ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОМУ ВИРІЗАННІ

Представлені результати дослідження процесу електроерозійного вирізання шляхом спектрального аналізу енергії, яка виділяється в міжелектродний проміжок від імпульсів технологічного струму. Визначені основні чинники, які впливають на спектральну щільність енергії. Освітлено практичне застосування результатів спектрального аналізу для електроерозійного вирізання.

Вступ. В більшості робіт, присвячених проблемам електроерозійного дротяного вирізання, вирішуються задачі підвищення якості та продуктивності обробки [1, 2]. Одним з напрямків поліпшення технологічних характеристик електроерозійних верстатів є використання динамічного діагностування перебігу електроерозійної (ЕЕ) вирізної обробки.

Для розробки цього методу потрібно розв'язати наступні задачі:

1. Збір фізико-технологічної інформації:

- а) вибір фізичної величини, чи їх сукупності, яка підлягає вимірюванню;
- б) розробка методики вимірювання і накопичення результатів первинної інформації;
- в) розробка методики обробки первинної інформації (отримання вторинної інформації).

2. Встановлення взаємозв'язку між характеристиками технологічних систем ЕЕ вирізних верстатів та фізичними процесами, що протікають в системі, зокрема в міжелектродному проміжку (МЄП):

- а) розробка методики аналізу та співставлення вторинної інформації;
- б) визначення критеріальних функцій та їх рівнів;
- в) розробка методики прийняття рішень на основі проведеного аналізу.

Постановка задачі. Покажемо, що результати вимірювання процесу виділення енергії в МЄП є достатньо інформативними стосовно технологічного процесу (ТП) ЕЕ вирізання, тобто мають значну корельованість з параметрами, зовнішніми та внутрішніми збуреннями ТП, технологічними показниками обробки. Доведемо, що результати спектрального аналізу процесу виділення енергії можуть бути покладені в основу методики оцінки якості протікання ТП ЕЕ вирізання.

Розв'язання. Застосування енергії, що виділяється в МЄП від проходження імпульсів технологічного струму, як первинної інформації про ТП є доцільним, що впливає з наступних апріорних міркувань:

1. Саме виділення енергії в МЄП викликає знімання матеріалу з деталі, отже безпосередньо позначається на технологічних показниках.

2. Рівень енергії імпульсів значний, що спрощує реалізацію апаратних засобів реєстрації сигналу.

Отримаємо експериментальне підтвердження правильності вибору вимірюваної величини. Експериментальне визначення енергії імпульсів технологічного струму проводилось за методикою, описаною в [3], на ЕЕ вирізному верстаті "СЕЛД-02" НВО "РОТОР", який укомплектований генератором ГКІ-200-300, при обробці зразків товщиною 30 мм, матеріал – сталь 45 на режимі генератора $f = 22$ кГц, енергія імпульсів 0,04 Дж. Вимірювання енергії $E(t)$ одиничних імпульсів процесу обробки було синхронізовано з роботою генератора, при цьому частота дискретизації дорівнювала частоті технологічного струму $f_T = 22$ кГц (інтервал дискретизації $\Delta t = 45 \cdot 10^{-6}$ с). В результаті формувался вектор E_i , $i = \overline{0, N}$, представлений у вигляді файлу-масиву 8-бітних чисел. Розмірність вектора N дорівнювала 65535, що відповідає інтервалу спостереження $t_C = \Delta t \cdot N = 2,979$ с.

За таких умов згідно з теоремою Котельникова [4] можливе отримання спектра процесу в смузі частот до 11кГц. Використовуючи дискретне перетворення Фур'є та рівняння Парсеваля,

отримаємо оцінку спектральної щільності енергії (СЩЕ) процесу ЕЕ вирізання в точках $f_k = k/t_c$, $k = \overline{0, N/2}$, відстань між якими $1/t_c = 0,336$ Гц за формулою (1):

$$S(f_k) = S_k = t_c(A_k^2 + B_k^2), \tag{1}$$

де $A_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N E_i \cos\left(\frac{2\pi i}{N} k\right)$, $B_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N E_i \sin\left(\frac{2\pi i}{N} k\right)$.

Виходячи з дискрети частоти 0,336 Гц, смуга спектра становить $f \in [0,336; 11000]$ Гц, що задовольняє основні вимоги до експерименту.

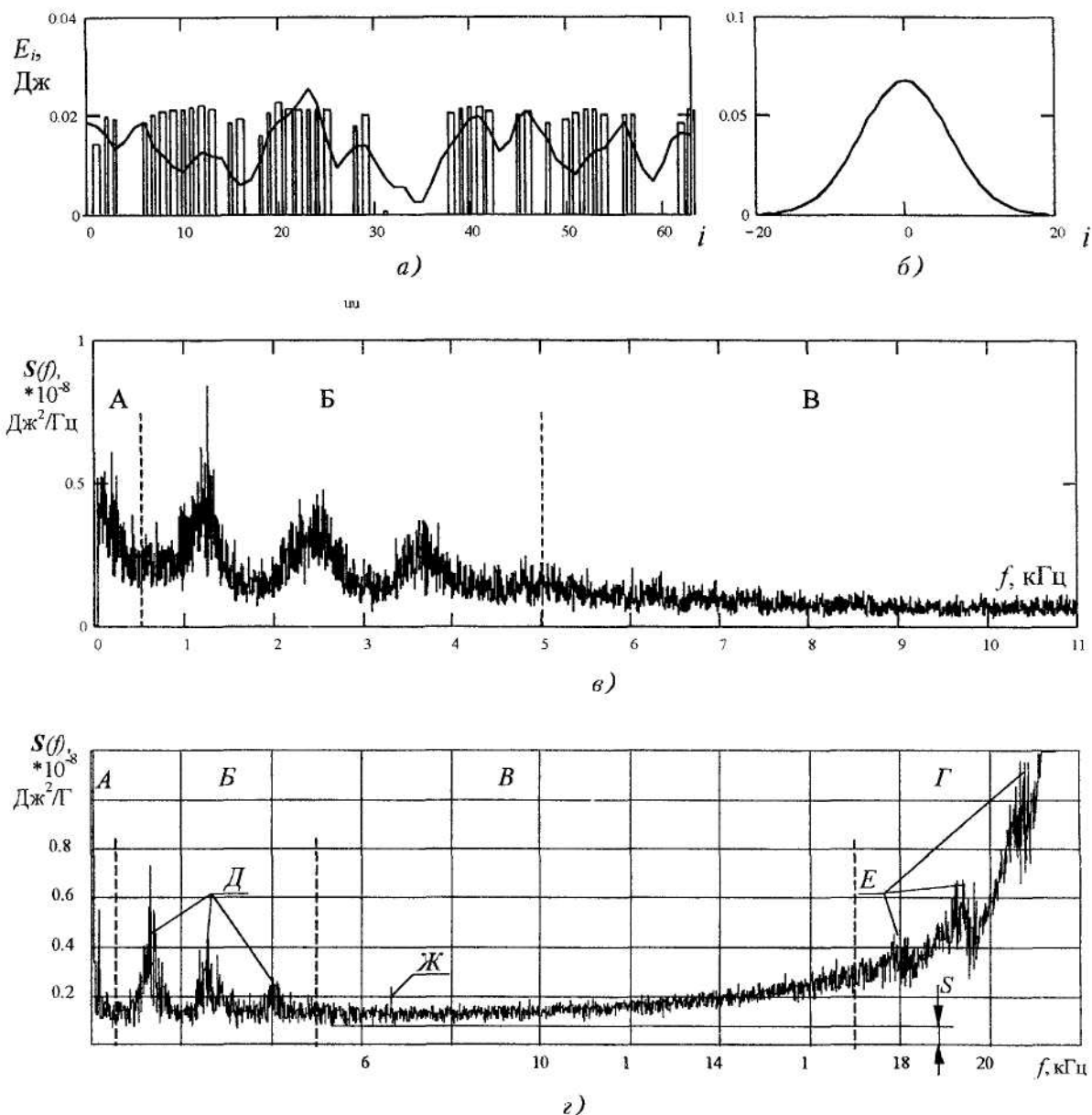


Рис. 1. Характерний вид: а) номограми виділення енергії; б) ядра фільтра; в) згладженої СЩЕ; г) повного спектра

Для покращення сприйняття і обробки отриманих результатів вектор S_k згладжується шляхом квазіоптимальної лінійної фільтрації [5, 6], що в дискретному вигляді виражається формулою:

$$\bar{S}_k = \frac{1}{H} \sum_{i=-n}^n S_{k+i} h(i), \quad (2)$$

де $h(i)$ – ядро фільтра, яке визначається з $h(i) = \exp\left(-\frac{i^2}{\sigma}\right)$; H – коефіцієнт $H = \sum_{i=-n}^n h(i)$ нормує інтеграл ядра фільтра до одиниці, а сталі $n = 20$ і $\sigma = 70$ підібрані емпіричним шляхом, за критерієм оптимальної інформативності.

На рис. 1, а зображено характерний для нормального протікання ТП фрагмент номограми E_i , на рис. 1, б – ядро фільтра, а на рис. 1, в – графік \bar{S}_k – відповідна згладжена СЩЕ. В подальшому всі СЩЕ будемо наводити у згладженому вигляді.

Дані (рис. 1) отримані при наступних параметрах системи: максимальна енергія одиничного імпульсу 4 мДж, напруга в МЕР $U_{\text{МЕР}} = 70$ В, діаметр дротяного електрода-інструмента (ДЕІ) $d_{\text{ДЕІ}} = 0,195$ мм, сила натягу ДЕІ $T_{\text{ДЕІ}} = 8$ Н, промивка нижня тиском $P_{\text{Н}} = 6$ атм, робоча подача $V_n = 1,6$ мм/хв, регулятор подачі на систему автоматичного керування (САК) – ввімкнено.

Наочне зображення смуги спектра поблизу частоти процесу можна легко отримати, якщо врахувати специфіку процесу, а саме: в проміжках часу між імпульсами технологічного струму енергія не виділяється. Тому, доповнюючи отриману вибірку нулями між кожними двома значеннями, штучно підвищимо частоту дискретизації вдвічі. Одержаний таким чином спектр умовно будемо називати *повним*. Приклад такого спектра наведено на рис. 1, г. Розширення смуги частот СЩЕ призводить до суттєвого збільшення об'єму обчислювальних робіт і, крім того, не містить додаткової корисної інформації, що видно з форми спектра зони Г. Вона утворюється накладанням симетрично відображених зон А і Б на круто зростаючу функцію з максимумом на частоті 22 кГц, що призводить до появи пелюстків Е. Тому в подальшому будемо розглядати спектри лише до частот $f_T/2$.

Виходячи з вигляду СЩЕ, в ній можна виділити кілька характерних частотних діапазонів:

1. Низькочастотна область А.
2. Середньочастотна область Б.
3. Високочастотна область В – область шуму процесу ЕЕ вирізання.

Розглянемо кожну з областей та визначимо їх інформативність щодо процесу ЕЕ вирізання. Для цього скористаємося селективним методом [7]. Він полягає у стабілізації процесу обробки в цілому при внесенні відомих нормованих збурень в ТП. Це досягається зміною одного або декількох параметрів обробки.

Перш за все дослідимо яскраво виражені три пелюстки спектра в області Б. Як видно з рис. 1, в, вони зосереджені біля частот, кратних частоті першої найбільш потужної пелюстки, в даному конкретному випадку це 1250 Гц (1250, 2500, 3750), що говорить про спільне походження даних утворень, пов'язане з присутністю досить стабільного і потужного періодичного процесу серед складових $E(t)$. Розрахунки показують, що основний період даного процесу складає $t_0 = 1/f_0 = 0,8 \cdot 10^{-3}$, що становить приблизно 18 періодів технологічного струму.

Виділимо та проаналізуємо цей процес. Для цього вилучимо зі спектра компоненти, амплітуди яких менші 4-х середніх значень спектра, тобто залишимо лише найпотужніші спектральні складові (що якраз і відповідають цим пелюсткам). Виконавши обернене перетворення Фур'є, отримаємо згладжений “майже періодичний” сигнал [4], який зображений на рис. 1, а неперервною лінією.

Виходячи з виду цієї кривої було змодельовано періодичний сигнал, головні спектральні компоненти якого знаходяться в точках максимуму СЩЕ та мають аналогічне співвідношення амплітуд. На рис. 2, а зображено два періоди модельного сигналу, а на рис. 2, б його спектральна щільність. Як бачимо, такий сигнал являє собою пачки імпульсів, що повторюються з періодом у 18 відліків дискретизації з деякими флуктуаціями всередині пачки.

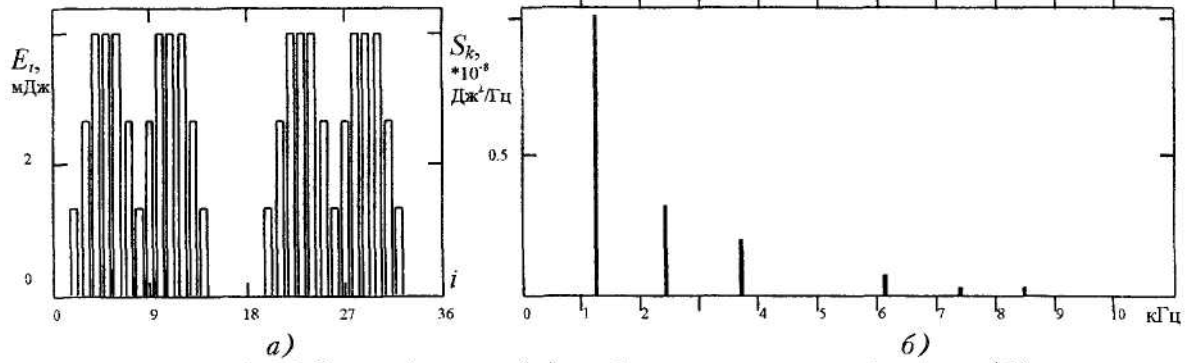


Рис. 2. Модельний сигнал (а) та його спектральна щільність (б)

Подальші експериментальні дослідження перебігу процесу ЕЕ вирізання дозволили встановити, що вказані вище частоти є резонансними частотами ДЕІ.

Для підтвердження даного положення наведемо результати наступного дослід. З фізики твердого тіла відомо, що збільшення натягу струни веде до зростання частоти її коливань та зменшення амплітуди [8]. Порівняємо СЩЕ для двох вимірювань, натяг ДЕІ в яких становив 4 та 6 Н відповідно, при всіх інших незмінних умовах (рис. 3).

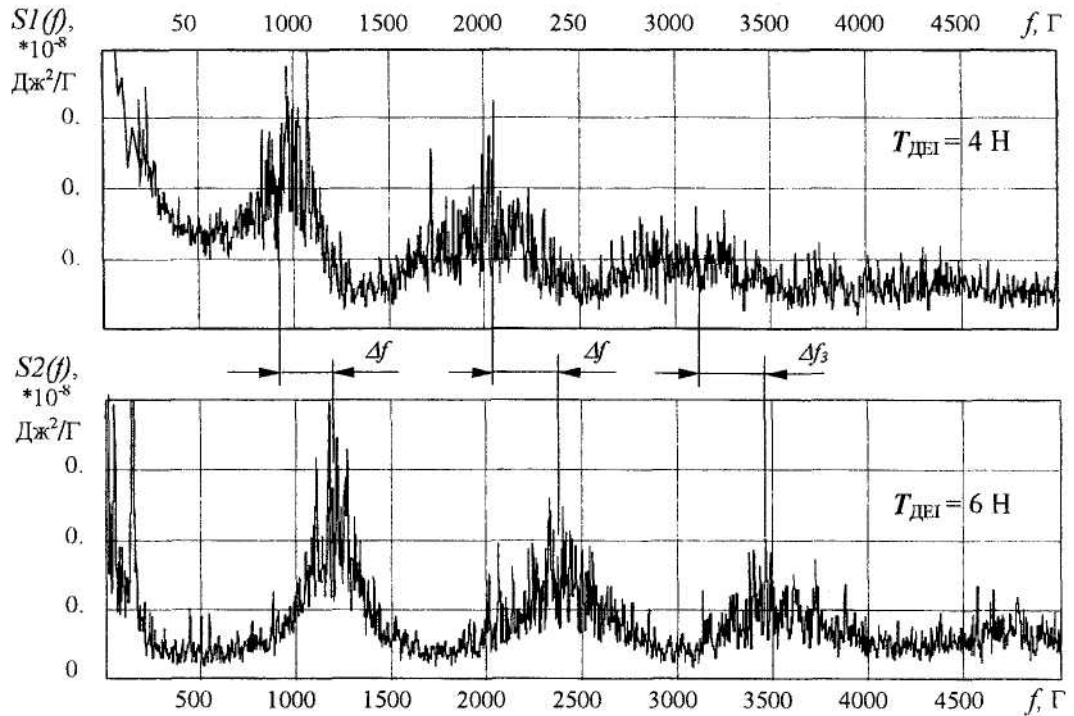


Рис. 3. Вплив на СПЕ натягу ДЕІ

З рисунка видно, що положення основних спектральних пелюсток змістилося приблизно на 500 Гц; це добре узгоджується з теоретичними розрахунками. Крім того спостерігається зменшення амплітуди шумових компонент, а самі пелюстки стають більш вираженими та інтенсивними на фоні шуму, що свідчить про стабільність протікання процесу ЕЕ вирізання.

Зазначимо також, що має місце загальна тенденція підвищення інтенсивності перебігу процесу ЕЕ вирізної обробки при збільшенні вмісту енергії на цих частотах, які називатимемо ефективними. У випадку наявності зовнішніх збурень виділення енергії в основних спектральних пелюстках зменшується, а вивільнена потужність переходить в область частот шуму процесу, в смугу частот, близьких до частоти зовнішнього збурення, або в смуги частот його мод.

По співставленню ширин, амплітуд пелюсток в області Б та амплітуд СПЕ низькочастотних коливань можливо в залежності від умов обробки визначати величину оптимального натягу ДЕІ, що дозволить зменшити механічне навантаження на дротяний електрод тим самим розши-

рити діапазон безпечної роботи та збільшити продуктивність обробки. На сьогоднішній день натяг ДЕІ як параметр технологічного процесу у більшості випадків не змінюють і встановлюють в межах 0,6...0,8 від допустимої міцності (для латунного дроту $d = 0,2$ мм [$T_{ДЕІ} = 15$ Н]), на сьогодні такий підхід є неприйнятний.

Технологічний процес ЕЕ вирізної обробки виявився чутливим до зовнішніх коливань, прикладених до ДЕІ, частота яких лежить в області **Б**. З метою дослідження зв'язку між прикладеними коливаннями та характеристиками СЩЕ проводились такі досліді: на верхню камеру верстата закріплювався п'єзокерамічний перетворювач, що зумовлював коливання ДЕІ з амплітудою $0,03 \pm 0,01$ мм біля верхнього сопла та $0,02$ біля нижнього та забезпечував лінійну частотну характеристику коливань в діапазоні частот 2–6 кГц.

В результаті досліджень встановлено чутливість процесу вирізання до зовнішніх коливань в області частот 0...6 кГц при спаді в 2 дБ (рис. 4). На рисунку видно потужні вузькосмугові викиди в спектрі на частотах близько 2,3 та 3,6 кГц. Причому положення найбільш потужної пелюстки **а** точно відповідає частоті підведеного до системи коливання, а пелюстки **б** і **в** є відгуками системи з урахуванням власних резонансних частот. При цьому процес вирізання протікав більш стабільно, про що свідчить зменшення СЩЕ в діапазоні частот 0...200 Гц. Зафіксовано підвищення продуктивності обробки до 10 % та покращення шорсткості поверхні на 0,5...1 мкм по R_a .

Слід відмітити, що підведення коливань до ДЕІ на всій області **Б** призводило до появи на СЩЕ дельта-видних пелюсток, ширина яких повністю визначалась параметрами зовнішньої коливної системи, а не особливостями перебігу процесу ЕЕ вирізання. Це свідчить про слабкість впливу підведених коливань на міжканальні процеси енерговиділення, що можливо частково пов'язати з відношенням потужності технологічних імпульсів струму та потужності коливної системи (1–2 Вт).

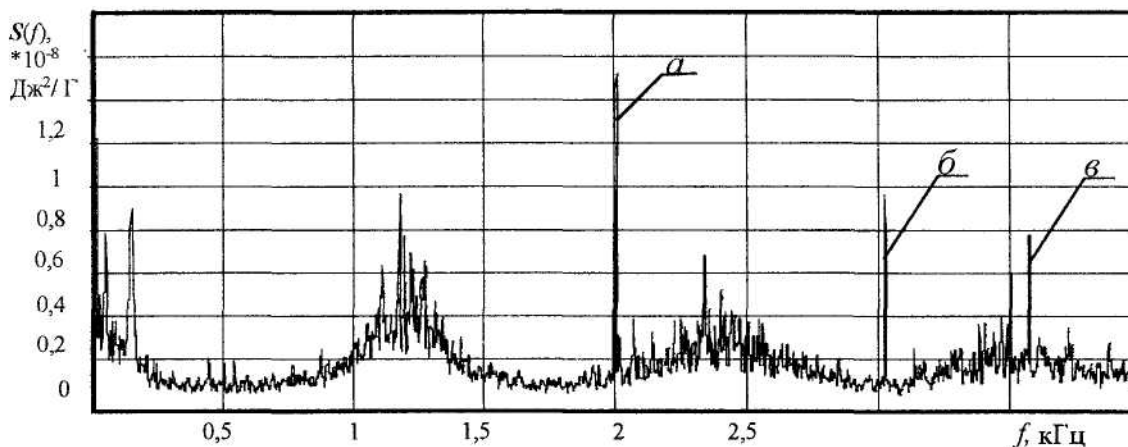


Рис. 4. СЩЕ при ЕЕ вирізанні з накладенням вимушених коливань

Зазначимо, що при прикладенні вимушених коливань з частотою більше 7 кГц спектральна щільність енергії не змінювалась. Це свідчить про несприйняття цих частот ТП. Частота вібрації системи переміщень верстата СЕЛД-02 становить 6,5 кГц з амплітудою коливань на рівні сопла камер 0,008 мм зумовлює появу пелюстка Ж на СЩЕ (рис.1, з), який перевищує рівень шуму лише на 0,5 дБ.

Розглянемо тепер область **А** низьких частот. Вона є інформативною стосовно низькочастотних процесів енерговиділення, наявність яких істотно погіршує якість обробки. Так вмикання вентиляційного пристрою (частота вібрації 25 Гц) викликало зменшення енергії на ефективних частотах на 30 % та приріст енергії на частотах, близьких до 50 Гц, в 2–2,5 рази (рис. 5). Це зумовило появу явно вираженої макроструктури поверхні, при цьому шорсткість поверхні становила 4...4,5 мкм по R_a .

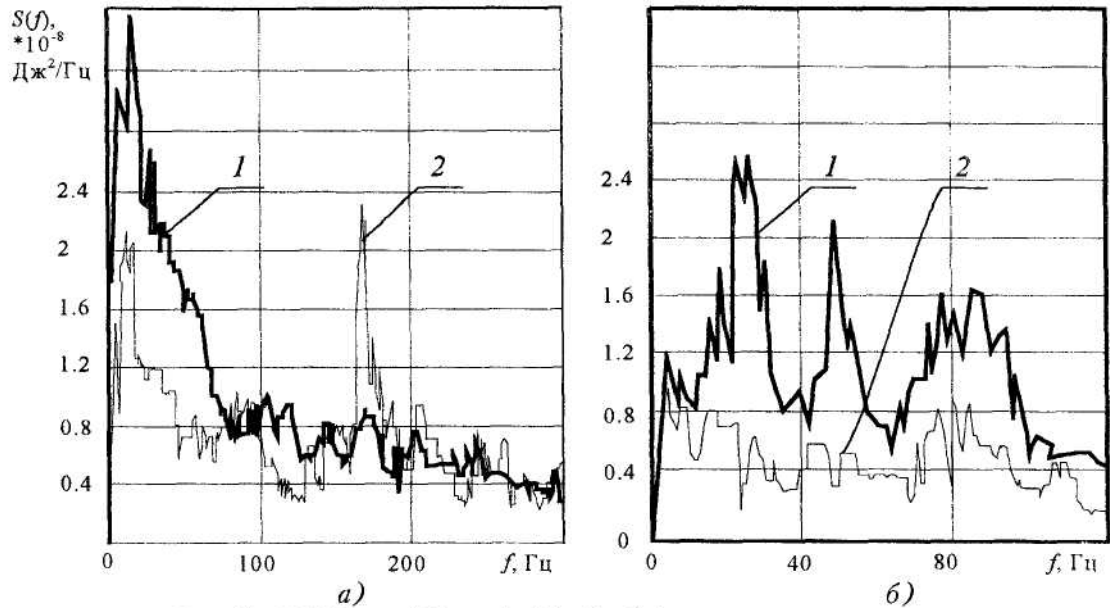


Рис. 5. СЩЕ при ЕЕ вирізній обробці на низьких частотах:

а) вплив на СЩЕ зовнішніх механічних коливань:

- 1 – вентиляційний пристрій ввімкнено, а система адаптивного керування вимкнена;
- 2 – вентиляційний пристрій та систему адаптивного керування ввімкнено;

б) вплив на СЩЕ роботи системи адаптивного керування при відсутності зовнішніх збурень:

- 1 – система адаптивного керування вимкнена;
- 2 – система адаптивного керування ввімкнена

Ввімкнення системи адаптивного керування зменшило викиди на частотах до 50 Гц (лінія 2 рис. 5, а, що свідчить про ефективність роботи САК. При цьому поява пелюстка на частоті 160 Гц зумовлена частотною характеристикою системи регулювання зазора (частота відпрацювання приводів 80 Гц). Як видно з рис. 5, б, робота САК є ефективною і у випадку низького рівня коливань в смузі частот 0...20 Гц, при цьому амплітуди СЩЕ зменшилися на 1,5...2 дБ. Резонанс на частотах 80 та 160 Гц незначний, що свідчить про малий рівень регулювання. З цього випливає, що виходячи з виду СЩЕ можливо визначати ефективність роботи системи адаптивного керування та рівень керування ТП ЕЕ вирізання. Це важливо, оскільки САК має два напрямки впливу – регулює величину міжелектродного проміжку шляхом подачі, зупинки та відводу ДЕІ від місця обробки і обмежує подачу імпульсів технологічного струму в МЕР, співвідношення між цими напрямками регулювання визначаються оператором, при цьому лише наближено враховуються особливості перебігу ТП. Вибравши за критерій регулювання мінімальність амплітуд СЩЕ в області частот 0...200 Гц (флуктуації енергії в цьому діапазоні мають суттєвий вплив на макроструктуру поверхні) визначати рівні регулювання шляхом сумісного сканування.

Відомо [9], що на якість обробки істотно впливає стан МЕР, зокрема провідність, швидкість промивання, наявність домішок в робочій рідині промивки тощо. Дослідження діагностичних можливостей СЩЕ для визначення стану МЕР проводилося таким чином: в робочу рідину (технічна вода) додавалося 0,05 % амфолітних поверхнево активних речовин (ПАР) (додецилсульфат натрію), режими обробки при цьому не змінювались. Результати спектрального аналізу показали зменшення амплітуд по всій частотній області, особливо в зоні Б та В (рис. 6).

Як відомо [10], домішки ПАР інтенсифікують промивання міжелектродного проміжку в 1,5–2 рази. Це обумовлено зменшенням товщини пограничного шару та зниженням турбулентних пульсацій коливання дроту [11]. Даний ефект обумовлений переходом турбулентного пограничного шару рідини на ДЕІ та деталі в ламінарний, а також гашенням пульсацій в міцелярному шарі, що утворюється на поверхні деталі та ДЕІ. Інтенсифікація промивки призводить до зменшення забрудненості міжелектродного проміжку, тобто зменшення кількості газових бульбашок та продуктів ерозії. Як відомо, газові бульбашки розширюючись відхиляють електрод-дріт від вертикального положення, що призводить до коливання дроту. Зменшення кількості продуктів ерозії обумовлює зменшення кількості коротко замкнених імпульсів, при цьому зменщується кількість від'їздів приводу системи регулювання.

Вищенаведені чинники суттєво впливають на вид СЩЕ, яка зображена на рис. 6 лінією **а**. Лінією **б** представлена СЩЕ, знята на тих самих режимах обробки, але без використання ПАР. З порівняння вигляду СЩЕ обробки з домішкою ПАР та без них випливає:

- зниження амплітуди коливання дроту призводить до зменшення викидів у низькочастотній області спектра;
- зменшення кількості коротко замкнутих імпульсів та від'їздів привода призводить до підвищення стабільності процесу електроерозійного вирізання та рівномірного розподілу спектральної щільності по всьому частотному діапазону.

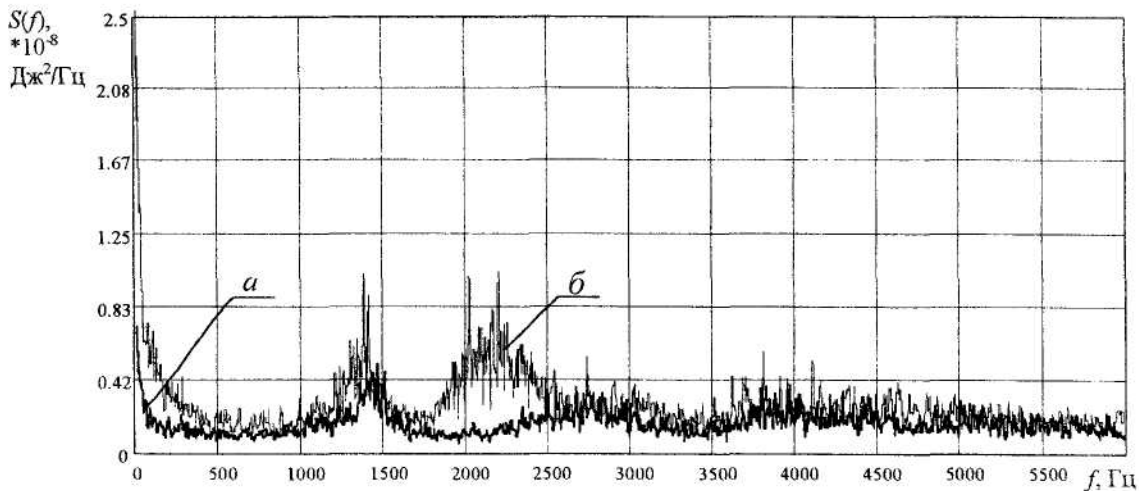


Рис. 6. СЩЕ для робочої рідини: водопровідної води (одинарна лінія) та розчину ПАР (лінія подвійної товщини)

Отже серія з 40 проведених експериментів в різноманітних умовах проходження ТП дозволяє стверджувати, що спектральна щільність процесу виділення енергії в МЕР чутлива до таких показників, як коливальні збурення ДЕІ та інших агрегатів ЕЕ верстата та стан МЕР, які суттєво впливають на якість обробки. Отже аналіз СЩЕ може бути успішно використаний в системі діагностики ТП ЕЕ вирізання.

Виходячи з попередніх викладок, можемо зробити наступні **висновки**:

1. Виділення енергії в процесах ЕЕ вирізної обробки одночасно має періодичний та шумовий характер.
2. Вид спектральної щільності залежить від характеру виділення енергії в МЕР та наступних факторів і параметрів обробки:
 - механічних коливань ДЕІ;
 - величини МЕР та від провідності на ньому;
 - наявності домішок в робочій рідині промивки;
 - особливості роботи в системах ЕЕ верстата – системі подачі та регулювання зазора, системі перемотування ДЕІ та інших.
3. Найбільший вплив на виділення енергії при ЕЕ вирізання мають низькочастотні механічні коливання ДЕІ.
4. Для діагностування процесу ЕЕ вирізання достатньо визначити спектральну щільність виділення енергії в смузі частот 0,5–6000 Гц, оскільки вона суттєво впливає на технологічні показники обробки.
5. Введення ПАР в робочу рідину стабілізує процес ЕЕ вирізання, що позначається на спектральній щільності енерговиділення у вигляді зменшення амплітуди спектральних пелюстків.
6. Використання спектрального аналізу енерговиділення дає можливість визначити оптимальну концентрацію та якісний склад домішок ПАР до робочої рідини в залежності від технологічних параметрів.
7. Регулювання подачі ДЕІ з частотою 50–100 Гц є недостатнім, ефективність регулювання значно підвищується при регулюванні на резонансних частотах виділення енергії (1–2 кГц). Таке регулювання можливо реалізувати на двохрівневих координатних системах, причому несутуча координатна система може бути низькочастотною (5–10 Гц).

8. По спектральній щільності можливо визначати перехідну функцію системи регулювання МЕР, величину натягу ДЕІ, рівень роботи САК тощо.

9. Поеднання програмно-селективного впливу на процес та методу спектрального аналізу енерговиділення дозволяє виявляти як самі чинники, які визначають перебіг ЕЕ вирізання, так і їх рівень.

Наведені результати досліджень свідчать про важливість використання спектрального аналізу енерговиділення в процесах ЕЕ вирізання для діагностування ЕЕ вирізних верстатів та при керуванні процесом обробки.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Бихман Б.М., Зорин Ю.А., Златкин Я.И. О механизме обрыва проволоки при электроэрозионном вырезании // Электронная обработка материалов. – 1984. – № 3. – С. 8–11.
2. Овсянников Б.Л. Модель формирования паза при вырезной электроэрозионной обработке // Электрофизические и электрохимические методы обработки: Сб. НИИ информации по машиностроению. – М.: Наука, 1998. – С. 5–7.
3. Небилиця Ю.М., Осипенко В.І. Методика реєстрації енергії імпульсів технологічного струму в процесах електроерозійної обробки. Наукові нотатки 9-й випуск. – Луцьк: ЛДТУ, 2001.
4. Бабак В.П., Хандецький В.С., Шрюфер Е. Обробка сигналів. – К.: Либідь, 1996. – 392 с.
5. Виленкин С.Я. Статистическая обработка результатов исследования случайных функций. – М.: Энергия, 1979. – 320 с.
6. Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н. Цифровая обработка сигналов. – М.: Радио и связь, 1990. – 256 с.
7. Проников А.С. Программный метод испытания металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1985. – 288 с.
8. Бутенин Н.В., Луцк Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. – М.: Наука, 1985. – Т. 2. – 496 с.
9. Филиппов Г.А., Салтанов Г.А., Кукушкин А.Н. Гидродинамика и тепломассообмен в присутствии поверхностно-активных веществ. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 184 с.
10. Калейніков Г.Є, Поляков С.П., Осипенко В.І. Вплив поверхнево-активних речовин на параметри промивання міжелектродного проміжку // Вісник ЧДТУ. – 2002. – № 1. – С. 50–55.

ДІДКОВСЬКИЙ Руслан Михайлович – кандидат технічних наук, старший викладач Черкаського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- статистична радіотехніка;
- обробка сигналів.

Тел.: (0472) 43-73-67.

КАЛЕЙНІКОВ Геннадій Євгенійович – аспірант Черкаського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- технологія і процеси електроерозійної обробки.

Тел.: (0472) 42-21-67.

НЕБИЛИЦЯ Юрій Миколайович – інженер Черкаського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- технологія і процеси фізико-технічних методів обробки;
- електроерозійна обробка;
- мікроелектроніка;
- силова електроніка.

Тел.: (0472) 11-40-08.