

УДК 621.9.048.4

Ю.Г. Лега, д.т.н., проф.
К.С. Небилиця, інж.

Черкаський державний технологічний університет

ЗАСТОСУВАННЯ ДВОРІВНЕВОЇ СИСТЕМИ ПОДАЧІ ДРОТЯНОГО ЕЛЕКТРОДА-ІНСТРУМЕНТА ПРИ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОМУ ВИРІЗАННІ

У статті представлені фізичні, структурні та конструктивні концепції створення автоматизованої дворівневої системи подачі дротяного електрода-інструмента для процесу електроерозійного вирізання. Проведений аналіз впливу таких систем на перебіг та показники технологічного процесу. Представлено алгоритми керування та визначені напрямки впровадження дворівневих систем подачі дротяного електрода-інструмента в електроерозійних вирізних верстатах. Визначено основні напрямки теоретичних робіт та робіт по дослідженню і створенню дворівневих систем подачі дротяного електрода-інструмента для електроерозійного вирізання.

Основними технологічними показниками при електроерозійному (ЕЕ) вирізанні є точність, шорсткість поверхні та продуктивність обробки. Кращі сучасні зарубіжні ЕЕ вирізні верстати дозволяють отримувати точність до 1 мкм, шорсткість $Ra = 0,6$ мкм та забезпечують максимальну продуктивність на прямих різках $250...300$ мм²/хв [1]. Але на практиці при обробці реальних деталей інструментального виробництва продуктивність рідко перевищує $60...80$ мм²/хв, що зумовлено погіршенням умов промивання міжелектродного проміжку (МЕП) внаслідок ступінчастої форми заготовки, утворенням мікротріщин та спотвореннями форми поверхонь внаслідок прогину дротяного електрода-інструмента (ДЕІ) при інтенсивному промиванні МЕП з тиском робочої рідини понад 3 атм. Ступінь інтенсифікації технологічного процесу (ТП) ЕЕ вирізання шляхом підвищення потужності імпульсів технологічного струму, яка базується на підвищенні тиску робочої рідини промивання зони обробки та стабілізації параметрів обробки, досягла крайньої межі і в подальшому не може бути використана для підвищення технологічних показників. Про це свідчить тенденція розвитку ЕЕ вирізних верстатів за останні п'ять років, модифікація яких йде шляхом розширення сервісних функцій. Тому задача розробки нових методів інтенсифікації ТП ЕЕ вирізання, на основі яких будуть створені ЕЕ вирізні верстати нового покоління, є актуальною.

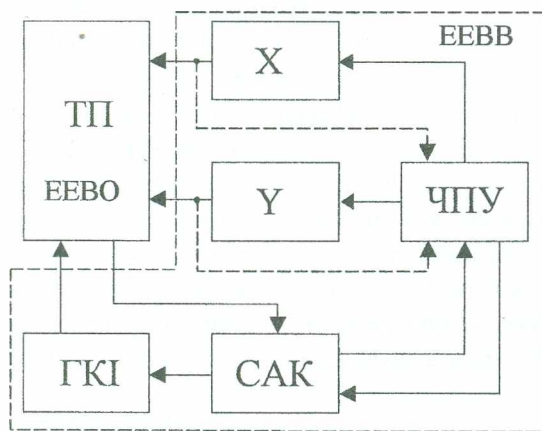


Рис. 1. Структурна схема забезпечення перебігу ТП ЕЕ вирізної обробки (ЕЕВО):

ТП – технологічний процес;

ГКІ – генератор коротких імпульсів;

САК – система адаптивного керування;

ЧПУ – система числового програмного управління;

Х, У – приводи подачі дротяного електрода-інструмента координат Х та У;

ЕЕВВ – електроерозійний вирізний верстат

Вартість сучасних зарубіжних ЕЕ вирізних верстатів становить $80...250$ тис. доларів, що не відповідає закупній спроможності вітчизняного виробника. Тому за останні 10 років на просторах України не продано жодного сучасного ЕЕ вирізного верстата, наприклад, таких виробників, як AGIE та SHARMILLES. Слід зазначити, що наявні у вітчизняного виробника ЕЕ вирізні верстати мають критичний рівень морального та фізичного зносу, що потребує термінового визначення напрямків та розробки методів їх модернізації. При визначенні напрямків модернізації ЕЕ вирізних верстатів перевагу слід надавати тим, які не потребують значних переробок всієї конструкції, а обмежуються доукомплектуванням окремими вузлами, системами та заміною програмного забезпечення.

Виходячи з вищесказаного, для розробки нових та проведення модернізації наявних у вітчизняного виробника ЕЕ вирізних верстатів відповідно до сучасних вимог вітчизняного виробництва, необхідно провести аналіз

структурної схеми забезпечення перебігу ТП та із врахуванням будови ЕЕ вирізних верстатів визначити напрямок створення нових методів інтенсифікації ТП ЕЕ вирізання.

Сучасні електроерозійні ЕЕ вирізні верстати у своїй більшості мають структурну схему будови, яка представлена на рис. 1, з якого видно, що в ТП ЕЕ вирізної обробки визначають дві системи: привод подачі X , Y (для 4-координатної також U та V , які в подальшому будемо асоціювати з координатами X та Y), та систему адаптивного керування (САК), яка визначає прикладення до МЕР імпульсів технологічної напруги. Розглянемо характеристики та особливості комплексної роботи вказаних систем.

В якості систем подачі в технологічному оснащенні (ТО) для ЕЕ вирізної обробки використовуються приводи на крокових двигунах (верстати ВР-95d, ВР-97d фірми ZAP-B.P., 4732 та А207.79-М2 ФЗМ та інші), приводи на двигунах постійного струму (нові моделі верстатів фірми AGIE) та приводи на лінійних двигунах (СЕЛД-02, СЕЛД-03 виробництва НВО "Ротор", верстати фірми "Sodick", Японія). Основними характеристиками систем подачі для ЕЕ обладнання є точність та максимальна частота відпрацювання переміщення. Привод на крокових двигунах забезпечує точність переміщення по контуру на рівні 5...10 мкм, що визначається дискретністю переміщення та кінематичною похибкою системи переміщення. Точність обробки на ЕЕВВ з приводами на двигунах постійного струму чи лінійних двигунах становить 0,5...5 мкм, що в основному визначається точністю датчиків положення та роботою системи управління переміщення. Максимальна частота відпрацювання приводів суттєво відрізняється: для крокових вона становить $f_{\max} = 7...10$ Гц, для приводів на двигунах постійного струму $f_{\max} = 30...40$ Гц, а для приводів на лінійних двигунах $f_{\max} = 60...80$ Гц. Така різниця зумовлена наявністю в системі подачі на крокових двигунах та двигунах постійного струму редуктора чи механізмів перетворення обертового руху в поступальний, які характеризуються значним моментом інерції, та меншою потужністю крокових двигунів від двигунів постійного струму [2], [3].

Незважаючи на гірші характеристики систем переміщення на крокових двигунах, вони найбільш широко застосовуються в системах подачі ЕЕ вирізних верстатів, що пояснюється високою надійністю, простотою та низькою вартістю, як самих двигунів, так і блоків їх живлення і систем ЧПУ для них. Тому при визначенні напрямків створення нових методів інтенсифікації ТП ЕЕ вирізання слід орієнтуватися на використання в якості систем подачі приводів на крокових двигунах.

Стосовно максимальної частоти відпрацювання приводів, то навіть частота $f_{\max} = 60...80$ Гц є недостатньою для задовільного перебігу ТП, оскільки час відпрацювання переміщення при цьому становить 10...25 мс, що еквівалентно для типових режимів обробки пропуску 400...1000 імпульсів технологічного струму, внаслідок чого знижується продуктивність обробки, а значний час відпрацювання збільшує ймовірність обриву ДЕІ внаслідок локального перегріву. Сучасні дослідження виділення енергії при ЕЕ вирізній обробці, які наведені в роботі [4], вказують, що флуктуації енергії на частотах менше 500 Гц суттєво збільшують шорсткість поверхні. В цій роботі також встановлена чутливість ТП ЕЕ вирізної обробки до механічних збурень ДЕІ в області низьких частот 0...6 кГц зі спадом чутливості в області частот 2,5...6 кГц, що свідчить про можливість та доцільність досягнення максимальної частоти відпрацювання переміщень приводами на частотах $f_{\max} = 1...5$ кГц.

Визначимо особливості побудови, роботи та впливу на ТП системи адаптивного керування. Системи САК ЕЕ вирізних верстатів за принципом будови суттєво різняться як засобами збору інформації про перебіг ТП, так і критеріями прийняття рішень про вид та глибину впливу на процес ЕЕ вирізання. За ознакою впливу всі вони визначають стратегію подача-зупинка-від'їзд та стратегію прикладання до МЕР імпульсів технологічної напруги. Всі ці впливи системи САК призводять до суттєвого зменшення кількості робочих імпульсів струму, що позначається на продуктивності ЕЕ вирізної обробки. Реверси привода зумовлюють зміни умов обробки в МЕР, що негативно позначається на якості поверхні: підвищується шорсткість та відхилення форми новоутворених поверхонь. Вищепроведений аналіз вказує на проблеми та негативні сторони застосування існуючих САК ЕЕ вирізних верстатів, і зрозуміло, що без систем проходження ЕЕ вирізної обробки є нестабільним, а інколи і неможливим. У випадку збільшення максимальної частоти відпрацювання переміщень приводами, можливості адаптивного впливу

на ТП значно розширюються. Зокрема, використовуючи програмно-селективний метод та метод спектрального аналізу енерговиділення в МЕР за [4], можливо визначити оптимальну частоту відпрацювання переміщення та формувати фазу відгуку на зміни в перебігу ЕЕ вирізання.

Виходячи з аналізу структурної схеми забезпечення перебігу ТП ЕЕ вирізної обробки, витікає, що підвищення технологічних показників доцільно та можливо проводити шляхом покращення роботи систем подачі ДЕІ та системи САК, зокрема підвищенням максимальної частоти відпрацювання подачі ДЕІ та розширенням впливу на ТП системи САК, внаслідок чого зменшиться кількість імпульсів холостого ходу та короткого замикання, що, в свою чергу, зумовить зменшення ймовірності обриву ДЕІ та підвищення ефективної потужності, яка направиться на видалення матеріалу з деталі.

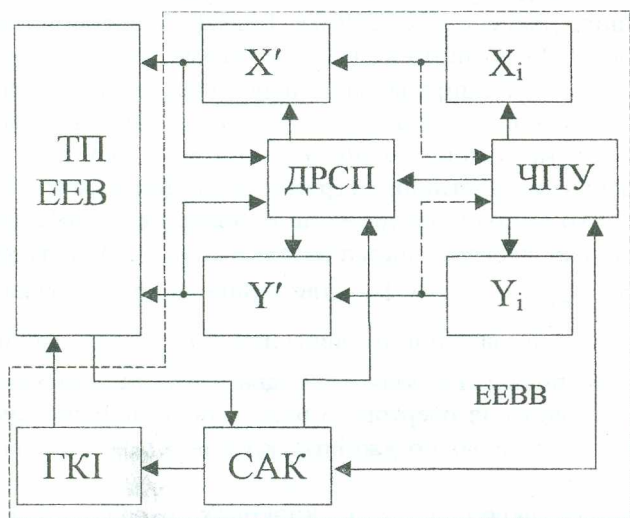


Рис. 2. Структурна схема забезпечення перебігу ТП ЕЕ вирізної обробки при дворівневій системі подачі ДЕІ (ДРСП ДЕІ)

Вирішення задачі підвищення максимальної частоти відпрацювання подачі ДЕІ потребує зменшення маси рухомих елементів конструкції, збільшення її жорсткості та рівня питомої потужності системи подачі. Враховуючи, що сам об'єкт керування – ДЕІ має незначну масу (при $\varnothing 0,1..0,2$ мм та при висоті обробки $h = 60$ мм має масу $0,8..1,5$ г), а маса рухомих частин системи подачі координат X, Y сягає понад десятка кілограм, то доцільно подачу ДЕІ реалізувати шляхом дворівневого переміщення. Тобто основна система подачі першого рівня виконує грубі дискретні переміщення в зоні обробки з невисокою частотою відпрацювання, а друга, високодинамічна, виконує прецизійні переміщення лише в межах дискрети переміщення основної системи подачі. Оскільки дія на ДЕІ з боку систем подачі прикладається лише через

напрявні верхньої та нижньої камер, то доцільно систему подачі другого рівня монтувати на цих камерах.

Розглянемо забезпечення перебігу ТП ЕЕ вирізної обробки при застосуванні дворівневої системи подачі ДЕІ із структурної схеми рис. 2. На відміну від структурної схеми рис. 1 на рис. 2 змінено систему подачі ДЕІ з однорівневої в послідовну дворівневу, в якій елементарне переміщення X формується з двох переміщень – основного привода подачі X_i, Y_i , та привода системи подачі другого рівня X', Y' , в результаті чого загальне переміщення ДЕІ становитиме $X_n = X_i + X'$ та $Y_n = Y_i + Y'$. Прецизійність переміщень системи подачі другого рівня забезпечується локальним зворотним зв'язком, датчик якого повинен мати роздільну здатність на порядок вищу, ніж у основної системи подачі, що з врахуванням малих розмірів зони переміщення досягається використанням оптичних чи індуктивних датчиків.

Перебіг ТП ЕЕ вирізної обробки при застосуванні дворівневої системи подачі ДЕІ проходить наступним чином: ЧПУ здійснює подачу по координатах X_i, Y_i на одну ітерацію, до МЕР прикладаються імпульси технологічного струму від ГКІ, якщо виділення енергії проходить задовільно, то САК формує сигнали дозволу переміщення X', Y' в бік подачі, у випадку аномального виділення енергії припиняють прикладання імпульсів до МЕР та формується сигнал від'їзду по X', Y' , що збільшує МЕР та стабілізує ТП. Якщо переміщення X', Y' досягнуть межі кінця i -тої ітерації переміщення по контуру, то системою ЧПУ здійсниться наступне дискретне переміщення по координатах X_i, Y_i , при цьому система ДРСП переведе X', Y' в протилежний бік подачі. Рівень переміщення X', Y' визначається ДРСП зі співвідношення $Y_i + 1 - Y_i / X_i + 1 - X_i$, яке надходить з ЧПУ. Інформаційний канал ЧПУ-САК призначений для завантаження режимів роботи в САК, а в ЧПУ по ньому надходять дані про перебіг ТП.

Наведений вище опис розкриває основи здійснення керування процесом ЕЕ вирізної обробки при використанні ДРСП. Для визначення впливу високодинамічних переміщень ДЕІ на ТП проведемо аналіз літературних джерел.

В процесі ЕЕ вирізання внаслідок виділення енергії від імпульсів технологічного струму на ДЕІ діють сили, які зумовлюють його локальний прогин та хвилю поперечних коливань, що розповсюджується від зони локального виділення енергії в обидва боки. Коливання електрода-дроту описуються математичною моделлю, заснованою на використанні лінійних диференціальних рівнянь малих пружних коливань струни. Рішення системи рівнянь, що визначає амплітуду коливання електрода-дроту в довільний момент часу та координаті по висоті різі від послідовності імпульсів технологічного струму процесу ЕЕ вирізання, виведені в роботі [5, (1)]. Положення ДЕІ, при прикладанні вимушених зовнішніх коливань в точках верхньої та нижньої напрямних, можливо визначити за [5, (22)]. В цій роботі формулою (25) визначаються результуючі коливання ДЕІ, як накладання коливального процесу від вимушених коливань на коливання від імпульсів технологічного струму. Формули (1), (22), (25) [5] достатньо громіздкі, тому не можуть використовуватися в системах адаптивного керування, які потребують ведення обчислень в режимі реального часу. Слід вказати на наступні неоднозначності у її використанні: так, коефіцієнт демпфування коливань для ЕЕ вирізання залежить від багатьох чинників, зокрема, шорсткості новоутворених поверхонь, складу робочої рідини (наявність добавок – поверхнево-активних речовин, інгібіторів корозії тощо), концентрації та розмірів продуктів ерозії, температури, стану ДЕІ та інших, що в цілому викликає зміну коефіцієнта демпфування коливань в значних межах та ускладнює задачу його визначення. Також проблематичним та неоднозначним є визначення амплітуди та кута дії зосередженої імпульсної сили від k -го імпульсу технологічного струму. Зазначимо, що в цих залежностях не враховується зонний характер роботи ДЕІ: верхня напрямна-паз, безпосередньо паз та паз-нижня напрямна, що в цілому зумовлює неточності розрахунку. Але незважаючи на вказані недоліки, формули (1), (22), (25) [5] цінні для проведення математичного моделювання та обробки експериментальних даних.

Крім фізико-математичних моделей коливального процесу ДЕІ є багато робіт, в яких визначається вплив коливань ДЕІ на ТП. Так, в роботі [8] викладені результати експериментальних досліджень з впливу ультразвукових коливань на продуктивність ЕЕ вирізання. Було встановлено, що при підведенні ультразвукових коливань частотою 26 кГц та амплітудою коливань 10 мкм до ДЕІ в напрямку основної подачі продуктивність ЕЕ вирізання збільшилася на 20–30 %, але лише при товщині деталей 5–10 мм, що з врахуванням [4] можливо пояснити значним затуханням поперечної хвилі коливань ДЕІ в пазу на високих частотах.

В [6], [7] визначено чинники, які впливають на відхилення форми новоутворених поверхонь, зокрема впливу від коливань ДЕІ. Результати, викладені в цій роботі, вказують на необхідність забезпечення однонапрямого коливання в напрямку подачі (запобігати еліпсоїдності коливань на рівні 1–2 мкм.).

Результати моделювання на ЕОМ впливу на ЕЕ вирізання ультразвукових коливань [5] свідчать, що в міжелектродному проміжку виникають звукові тиски, які істотно впливають на гідродинамічні процеси вимивання диспергованих продуктів ерозії з МЕП. Ця обставина є суттєвою для інтенсифікації процесу вирізання. Такі виробники високопродуктивних ЕЕ верстатів, як AGIE, SHARMILLES прокачують через зону обробки робочу рідину під значним тиском 6...12 атм, що крім підвищення продуктивності обробки на прямих різках при чорнових проходах зумовлює значний прогин ДЕІ. Такий прогин ускладнює обробку складноконтурних деталей та потребує проведення додаткових чистових проходів. При чотирикоординатній обробці з нахилом ДЕІ, а також обробці деталей з порожнинами та підниженнями ефективність промивки під високим тиском суттєво знижується, що викликає зниження продуктивності обробки. Слід також відмітити, що потужність систем промивки під високим тиском сягає 1–4 кВт, тобто перебільшує енергетичні витрати самого процесу ЕЕ вирізання, що суттєво впливає на собівартість виробів.

Виходячи з літературного огляду, можна зробити такі висновки:

- розроблені фізико-математичні моделі визначення коливального процесу ДЕІ від дії імпульсів технологічного струму та вимушених коливань, що прикладаються до ДЕІ. Ці

моделі потребують уточнення та адаптації для використання в автоматизованих системах керування процесом ЕЕ вирізання;

- встановлено, що направлені вимушені коливання забезпечують збільшення швидкості вирізання в межах 20–50 %, що дозволяє досягти продуктивності обробки на рівні 100...150 мм²/хв без застосування промивки під високим тиском;

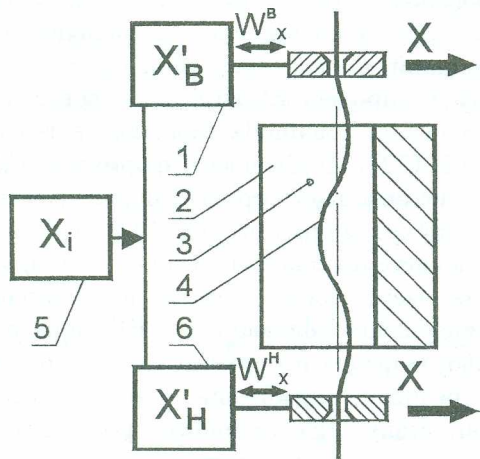


Рис. 3. Схема ЕЕ вирізання із застосуванням ДРСП ДЕІ:

- 1 – верхня система переміщення другого рівня;
- 2 – деталь, що обробляється;
- 3 – паз, отриманий в процесі ЕЕ вирізання;
- 4 – ДЕІ;
- 5 – основна система переміщення;
- 6 – нижня система переміщення другого рівня

бути співрозмірною МЕР, тобто 2...5 мкм.

Схеми ЕЕ вирізання із застосуванням ДРСП ДЕІ можуть поділятися на схеми з одностороннім та двостороннім формуванням мікропереміщень, що представлено на рис. 3. Схеми з одностороннім збудженням більш прості у використанні і не потребують застосування схем та алгоритмів узгодження коливального процесу. Такі схеми характеризуються значною нерівномірністю амплітуди коливань ДЕІ по висоті різку та зумовлюють збільшення конусності утворених поверхонь. Тому можливо припустити, що ця схема буде використовуватись обмежено, лише на перших етапах дослідження для усунення багатофакторного впливу на ТП.

Застосування схеми з двостороннім формуванням мікропереміщень дозволяє забезпечити рівномірність амплітуди коливань ДЕІ по висоті різку та надає можливість впливати на просторово-часовий характер виділення енергії шляхом зміни амплітуди та фази коливань між верхньою та нижньою системами переміщення другого рівня, що значно розширює діапазон автоматизованого керування процесом ЕЕ обробки. Тому приймемо схему з двостороннім формуванням мікропереміщень за основну схему.

Розглянемо будову та роботу схеми з двостороннім формуванням мікропереміщень рис. 3. Приводи другого рівня системи переміщення ДЕІ X'_B поз. 1 та X'_H поз. 2 встановлені відповідно на верхній та нижній камерах таким чином, що викликають зміщення напрямної з амплітудами W_x^B та W_x^H , яка збігається з напрямком подачі ДЕІ. Основною системою подачі здійснюються дискретні переміщення верхньої та нижньої камер X_0 , що зумовлює і переміщення ДЕІ. В результаті результуючого переміщення та видалення матеріалу внаслідок проходження імпульсів технологічного струму між ДЕІ поз. 4 та деталлю поз. 2 формується паз поз. 3.

- необхідно провести теоретичні та експериментальні дослідження для встановлення оптимальних параметрів вимушених коливань і параметрів ТП ЕЕ вирізання для дворівневих систем подачі ДЕІ. Встановити кореляційні залежності між параметрами вимушених коливань та характеристиками виділення енергії в МЕР. Встановити закон автоматичного регулювання для ДРСП ДЕІ.

Побудова систем переміщень другого рівня. Побудова ДРСП ДЕІ базується на виборі схеми формування елементарних переміщень, схеми ЕЕ вирізання, кінематичної схеми, вибору приводів та їх характеристик.

При розробці схеми формування елементарних переміщень слід врахувати особливості роботи ЧПУ, зокрема системи автоматизованого регулювання переміщення, роботу САК та вплив на ТП ЕЕ вирізання вимушених поперечних коливань. Вказані чинники мають спільні властивості: підвищення стійкості та збільшення смуги автоматизованого регулювання, гнучкості роботи САК та підвищення показників ТП при накладанні вимушених коливань. Тому формування елементарного переміщення слід проводити шляхом накладання на дискретне переміщення, яке визначатиме середнє положення ДЕІ, коливальної складової, амплітуда якої в зоні обробки повинна

Особливості керування процесом ЕЕ вирізання при ДРСП ДЕІ та узгодження переміщень, які задаються основною системою подачі та системою другого рівня, показані на рис. 4 схемою формування переміщення і на рис. 5 алгоритмом керування.

Траекторія переміщення по координатній площині ХУ складається з n -кадрів (фрагментів), які позначаються координатами кінцевих точок X_n, Y_n . В межах кадру елементарні переміщення ΔX і ΔY визначаються інтерполятором (лінійним чи круговим) послідовно ітераціями $i = 0, i = 1$ і т.д. Тому у випадку використання крокових приводів траекторія переміщення з точки $A(X_n, Y_n)$ в точку $B(X_{n+1}, Y_{n+1})$ буде мати вигляд сходинок, що позначиться і на шорсткості поверхні. У випадку використання ДРСП ДЕІ траекторія переміщення буде апроксимована, що суттєво знизить шорсткість (жирна суцільна лінія АВ), оскільки мікропереміщення $\delta X'$ та $\delta Y'$ виконуються таким чином, що їх результуючий вектор збігається з вектором подачі \vec{AB} .

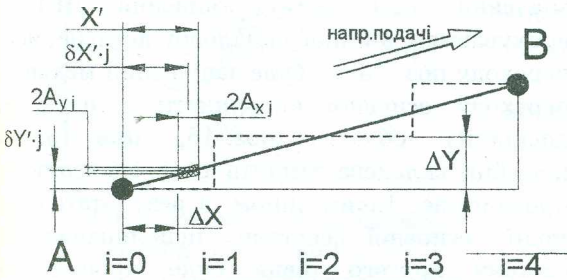


Рис. 4. Схема формування переміщення при застосуванні ДРСП ДЕІ

Для формування траекторії обробки із застосуванням ДРСП ДЕІ слід використовувати алгоритм керування рис. 5. Так, при запуску процесу обробки з пам'яті керуючих програм (ПКП) поз. 1 завантажуються параметри ТП та початкові координати обробки. Ці координати завантажуються з ПКП кожного разу, коли виконується умова досягнення кінця кадру поз. 12, при цьому інкрементується лічильник кадрів n поз. 4. Якщо всі кадри керуючої програми будуть виконані, то процес обробки закінчиться.

Для відпрацювання переміщення в межах кадру по параметрах обробки з технологічної бази даних та значеннях $X_n - X_{n-1}$ та $Y_n - Y_{n-1}$ визначаються елементарні переміщення ΔX і ΔY поз. 7 основної системи подачі. Із співвідношення різниці початкових та кінцевих координат $X_n - X_{n-1}$ та $Y_n - Y_{n-1}$ визначаються елементарні переміщення δX і δY системи координат другого, які визначають на j -тій ітерації постійні складові \bar{X}_j та \bar{Y}_j . З врахуванням змінної складової $\tilde{X} = A_x \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_x)$ та $\tilde{Y} = A_y \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_y)$ повне переміщення, яке буде сформоване системою координат другого рівня, становитиме:

$$X_j' = \bar{X}_j + \tilde{X} = \delta X \cdot j + A_x \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_x), \tag{1}$$

$$Y_j' = \bar{Y}_j + \tilde{Y} = \delta Y \cdot j + A_y \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_y), \tag{2}$$

де, $\omega, \varphi_x, \varphi_y$ – циклічна частота та фази по напрямку x і y коливань системи подачі другого рівня;

j – номер ітерації переміщення в межах кадру.

Постійна складова визначає середнє положення ДЕІ, а змінна складова визначає просторово-часовий розподіл виділення енергії по висоті МЕР, інтенсифікацію процесу виносу продуктів ерозії та охолодження ДЕІ.

Відомо, що за рівнем струму технологічні імпульси поділяються на: робочі, короткого замикання, холостого ходу [2]. Якщо поділити кількість імпульсів кожної із наведених складових на загальну кількість імпульсів, які були прикладні до МЕР, то отримаємо коефіцієнти використання імпульсів: $k_p, k_{кз}, k_{хх}$. За цими коефіцієнтами неможливо отримати повну інформацію про ТП вирізання, а тим більше визначити оптимальні параметри регулювання, але зручно використовувати їх в ролі індикаторів процесу, тобто проводити оцінку перебігу ЕЕ вирізання. Так за умову задовільності перебігу ТП ЕЕ вирізання будемо брати нерівність $k_p \geq [k_p]$, де $[k_p]$ – допустимий коефіцієнт використання робочих імпульсів. При виконанні цієї умови будемо вважати ТП задовільним, тобто таким, що не потребує корекції, а тому постійні складові $\bar{X}_j = \delta X \cdot j$ та $\bar{Y}_j = \delta Y \cdot j$ залишатимуться незмінними і перебіг процесу буде визначатися лише складовими \tilde{X} та \tilde{Y} , які на цій ітерації можуть залишатися незмінними, що на блок-схемі алгоритму показано зв'язком ab .

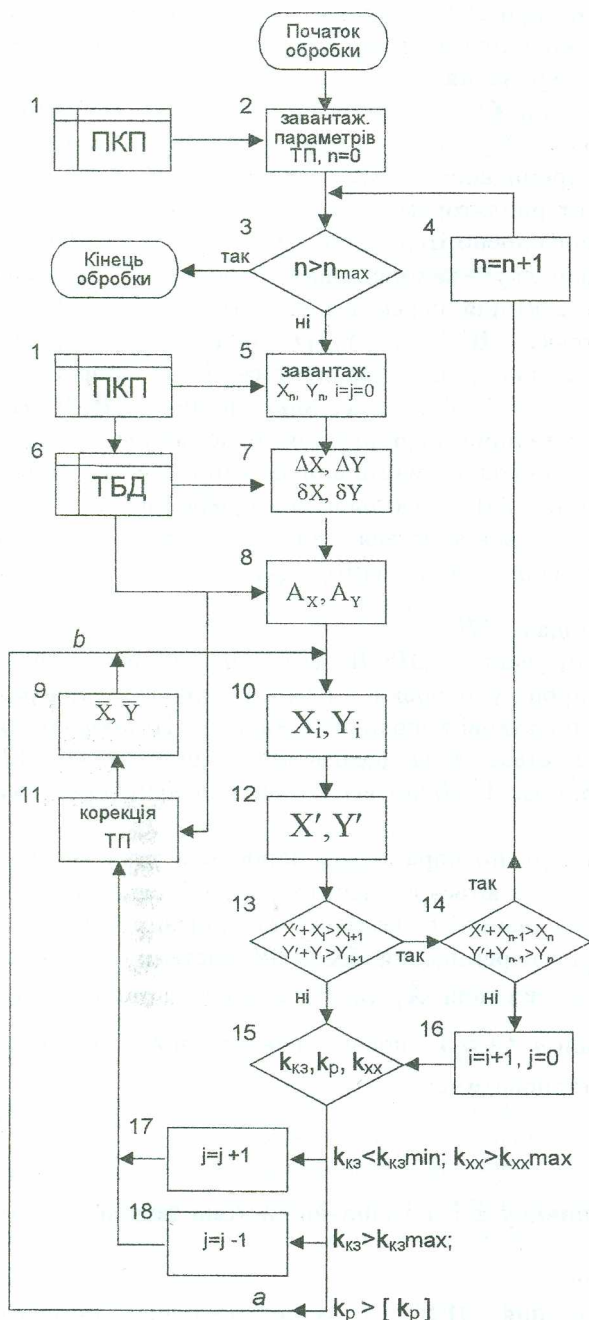


Рис. 5. Алгоритм керування ЕЕ вирізання при ДРСП ДЕІ

По-друге, підсилювач керуючого сигналу повинен підсилювати постійну складову, працювати в класі "В" та живитися від двополярного джерела живлення. Для забезпечення необхідного запасу стійкості та динамічних спотворень частотний діапазон підсилювачів повинен складати 0...50 кГц. Такі характеристики дозволяють отримати сучасні підсилювачі в інтегральному виконанні, наприклад TDA2030 фірми SGS-THOMSON (російський аналог 174УН19), яка має характеристики, - вихідна потужність при $R_{нав} = 4 \text{ Ом}$, - 14 Вт, смугу пропускання за рівнем -3Дб, - 0-140 кГц.

Розробка приводів системи переміщення другого рівня полягає у виборі кінематичної схеми, виборі конструктивних рішень та виборі місця установки приводів. Комплексний аналіз вказаних рішень направлений на досягнення технічних показників: високої динамічної характеристики, високого коефіцієнта перетворення енергії, надійності, технологічності та компактності. Особливий вплив на формування технічних показників буде визначати вид

Якщо в результаті аналізу буде встановлено, що $k_{кз} > k_{кз \text{ max}}$, а це свідчить про недостатню величину МЕР, то необхідно виконати від'їзд на одну ітерацію назад, тобто $j = j - 1$.

Коли рівень постійної складової досягне значення, при якому зміщення ДЕІ із врахуванням змінної складової досягне межі переходу поз. 13, то буде запущений механізм переходу основної координати в наступну дискретну область поз. 16, при цьому постійна складова змінить своє значення на протилежне. Таким чином, в результаті взаємодії основної системи переміщення та системи другого рівня буде проводитися обробка по траєкторії, що визначена керуючою програмою ЧПУ.

Для побудови ДРСП ДЕІ за приводи можливо використовувати п'єзоелектричні, магнітострикційні та електродинамічні системи збудження [10, с.105]. Виходячи з необхідної амплітуди коливань на рівні напрямної ДЕІ в 5...25 мкм та низької частоти коливань $f_{xy} = 1...5 \text{ кГц}$, а також врахувавши умову електричного узгодження вихідного підсилювача з навантаженням, яке повинно мати опір в діапазоні 2...16 Ом, в якості привода краще вибрати електродинамічні системи збудження. Потужність такої системи повинна становити 2...10 Вт, що при використанні сучасних постійних самарій-кобальтових магнітів дозволяє виконати компактні приводи ДРСП ДЕІ, які можна безпосередньо встановити на верхній та нижній камерах.

Визначимо основні вимоги до підсилювачів керуючого сигналу приводів систем другого рівня. По-перше, підсилювачі повинні мати низьку напругу живлення 9-15 В, що викликано умовою забезпечення захисту від враження електричним струмом персоналу, оскільки магнітна система хоча виконана в герметичному корпусі, але знаходиться в зануреному стані (особливо на нижній

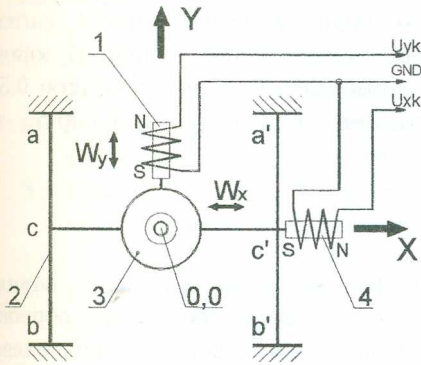


Рис. 6. Кінематична схема формування прогину ДЕІ W_x та W_y (вид зверху на верхню напрямну)

комплексною дією цих чинників. Тому і кінематичні схеми будуть поділятися на схеми генерування поперечних коливань шляхом:

- прогину ДЕІ, схема представлена рис. 6;
- повороту ДЕІ, схема представлена рис. 7;
- комплексної дії прогину та повороту ДЕІ.

При розгляді кінематичних схем необхідно враховувати силу, яка діє на напрямну ДЕІ і становить 2–5 Н та направлена паралельно натягу дроту. Тому напрямна повинна бути закріплена до корпусу камер таким чином, щоб прикладення вимушених коливань було направлено в бік меншої жорсткості підвісу, а сам підвіс забезпечував розвантаження приводів другого рівня від дії сил натягу ДЕІ. Такі схеми підвісів показані на рис. 6 та рис. 7.

Розглянемо кінематичну схему представлену на рис.6. Через напрямну поз. 3 в точці 0,0 проходить ДЕІ, а сама напрямна закріплена до підвіски поз. 2, яка виконана з пружних елементів ab , cc' , $a'b'$ так, що плечі елементів рівні $ac=cb$, $a'c'=c'b'$, що забезпечує одномодовий режим коливань. Магнітні системи збудження по координатах X поз. 4 та Y поз. 1 закріплені до підвісу так, щоб центр мас напрямної був на перетині дії магнітних систем. Така конструкція при масі напрямної 1...3 г може мати основні резонансні частоти коливання в полосі частот 0,5...2 кГц, технологічно зручна, легка в регулюванні. До недоліків слід віднести дещо збільшені розміри конструкції.

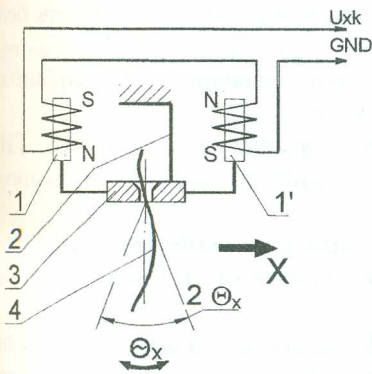


Рис. 7. Кінематична схема збудження коливань шляхом повороту ДЕІ

Кінематична схема, що зображена на рис. 7, генерує поперечні коливання ДЕІ поз. 4 шляхом повороту напрямної на кут $\pm\Theta_x$, магнітні системи підключені в протифазі. Схема характеризується більш широкою робочою смугою частот в 1...3 кГц та внаслідок просторового рознесення підвісу поз. 2, напрямної поз. 3 і магнітних систем поз. 1 і 1' має гарні компонувальні властивості і тому більш компактна. До недоліків слід віднести спектральну неоднорідність коливань та складність симетрування магнітних систем.

Слід очікувати, що в практичних конструкціях будуть використовуватися кінематичні схеми з комплексною дією прогину та повороту ДЕІ, яка буде в собі поєднувати переваги кожної зі схем. Причому, одна координата буде виконана за схемою формування прогину, а інша – за схемою повороту ДЕІ.

Розглянемо вимоги до керування приводами збудження коливань. Оскільки приводи відслідковують постійну складову, то для зменшення похибки відпрацювання мікропереміщень слід вводити датчики електромеханічного зв'язку, які можуть бути п'єзоелектричними, магнітними та оптичними. Вони можуть бути встановлені як з боку до деталі, так і від неї. При встановленні датчиків електромеханічного зв'язку до деталі можливо отримувати додаткову

інформацію про коливальні процеси в МЕР, але виділення сигналу реального переміщення буде ускладненим. При встановленні датчика від деталі буде зніматись чистий сигнал переміщення, для чого необхідно встановлювати пристрої демпфування зворотної хвилі. Оптичні датчики відхилення ДЕІ, які забезпечують визначення переміщення з точністю 0,5–1 мкм на базовій довжині 10–20 мкм, достатньо прості, мають високу стабільність та завадостійкість.

Висновки.

В результаті проведення аналізу сучасного розвитку ЕЕ вирізних верстатів, впливу параметрів обробки та вимушених коливань ДЕІ на ТП, а також сучасних методів обробки сигналів від ТП ЕЕ вирізання [4], визначені наступні передумови створення дворівневої системи переміщення ДЕІ:

- відсутність нових та ефективних методів підвищення технологічних показників ЕЕ обробки;
- неможливість подальшої інтенсифікації процесу ЕЕ вирізання шляхом збільшення потужності, що прикладається до МЕР під дією технологічних імпульсів струму, збільшення тиску промивання проміжку та шляхом стабілізації параметрів ТП ЕЕ обробки;
- наявність попередніх теоретичних та експериментальних матеріалів з використання ультразвукових коливань для інтенсифікації ЕЕ вирізання, а також матеріалів з впливу коливань ДЕІ на технологічні показники;
- наявність нових методів отримання інформації про перебіг ЕЕ вирізної обробки [9] та нових методів обробки інформаційних сигналів ТП;
- наявність силової та мікроелектронної бази для створення схемотехнічно простих, потужних та програмно гнучких апаратних засобів для обробки та аналізу вхідних сигналів та формування вихідних сигналів для управління виконавчими системами.

Ці передумови вказують на актуальність, необхідність та можливість створення дворівневої системи переміщення ДЕІ. Застосування ДРСР при ЕЕ вирізній обробці дозволить:

- підняти динамічні характеристики, гнучкість та глибину регулювання системами адаптивного керування ТП;
- забезпечити підвищення продуктивності ЕЕ вирізання до рівня 100...150 мм²/хв без додаткових засобів інтенсифікації процесу обробки;
- знизити вартість та підвищити технологічні показники сучасних ЕЕ вирізних верстатів з кроковими приводами в основних системах подачі;
- лише заміною верхньої, нижньої камер та заміною алгоритмів керування ТП модернізувати старі ЕЕ вирізні верстати до вимог сучасного інструментального господарства.

В статті викладено основи по створенню дворівневих систем переміщення ДЕІ та використання для них високодинамічних систем адаптивного керування ТП ЕЕ вирізної обробки. Для проведення повного обсягу робіт потрібно:

- розробити конструкції системи переміщення ДЕІ другого рівня, які були технологічними у виробництві, мали високу надійність в роботі та призначені як для використання на нових ЕЕ вирізних верстатах, так і для модернізації існуючих ЕЕ вирізних верстатів з мінімальними доробками та мінімальними витратами;
- розробити гнучкі універсальні алгоритми керування ТП ЕЕ вирізання;
- створити електронні апаратні засоби для новостворюваних ЕЕ вирізних верстатів, які б могли повністю використати можливості дворівневої системи переміщення ДЕІ;
- створити технологічні бази даних для систем адаптивного керування та автоматизованих систем розробки типових ТП ЕЕ вирізної обробки із застосуванням дворівневої системи переміщення.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Кохан Ю.* Прецизионная электроэрозионная обработка: Аналитический обзор ВНИИТЭМР, Минстанкопром СССР. – М., 1990. – 36 с.
2. *Иоффе В.Ф., Коренблюм М.В., Шавырин В.А.* Автоматизированные электроэрозионные станки. – Л.: Машиностроение, 1984. – 231 с.
3. *Поляков С.П., Осипенко В.И.* Дослідження точності та основних технологічних характеристик електроерозійного вирізного верстата з газовим змащенням напрямних // Вісті Академії інженерних наук України. – 1995. – № 5. – С. 35–41.
4. *Небилиця Ю.М., Дідковський Р.М., Калейніков Г.Є.* Спектральна щільність виділення енергії при електроерозійному вирізання // Вісник ЖІТІ. – Житомир, 2002. – № 22. – С. 46–53.
5. *Кавтанадзе О.Н., Линчанский А.Б., Нечаев Г.Г.* Колебания электрода проволоки при электроэрозионной обработке с наложением ультразвуковых колебаний // Электронная обработка материалов. – 1989. – № 4. – С. 11–16.
6. *Бихман Б.М., Коренблюм М.В., Рейбах С.Ю.* Исследование влияния колебаний электрода проволоки на качество обработки при электроэрозионном вырезании // Электронная обработка материалов. – 1985. – № 6. – С. 8–12.
7. *Рейбах С.Ю.* Влияние технологических условий электроэрозионного вырезания на точность обработки // Станки и инструменты. – 1988. – № 12. – С. 19–20.
8. *Семешкин В.А., К.К. Гуларян* Экспериментальное исследование влияния ультразвуковых колебаний на производительность электроискрового вырезного станка // Электронная обработка материалов. – 1986. – № 4. – С. 85–88.
9. *Небилиця Ю.М., Осипенко В.І.* Методика реєстрації енергії імпульсів технологічного струму в процесах електроерозійної обробки // Наукові нотатки. – 9-й випуск. – Луцьк: ЛДТУ, 2001.
10. *Подураев В.Н.* Обработка резанием с вибрациями. – М.: Машиностроение, 1970. – 350 с.
11. *Ободовский Б.А., Ханин С.Е.* Сопротивление материалов в примерах и задачах. – Харьков: Высшая школа, 1981. – 344 с.

ЛЕГА Юрій Григорович – доктор технічних наук, професор, ректор Черкаського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- статистична радіотехніка;
- цифрова обробка сигналів;
- автоматизація процесів та систем.

НЕБИЛИЦЯ Катерина Сергіївна – інженер Черкаського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- технологія та процеси фізико-технічних методів обробки, зокрема електроерозійна обробка;
- розробка та модернізація автоматизованих систем.

Подано 5.04.04