

УДК 621.3

# Дослідження супутнього ударно-вібраційного шуму п'єзоелектричного двигуна в режимі мікро- та наношвидкостей

Петренко С. Ф.<sup>1</sup>, Омелян А. В.<sup>1</sup>, Лисенко О. М.<sup>2</sup>, Антонюк В. С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Мале науково-виробниче підприємство ТОВ “Лілея”

<sup>2</sup>Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

E-mail: victor.antonjuk@gmail.com

В роботі розглянуті методи керування швидкістю п'єзоелектричних двигунів в мікро- та нанодіапазонах. На основі фізичних принципів роботи п'єзоелектричного двигуна, з врахуванням специфіки сигналів керування і зворотнього зв'язку, досліджено ударно-вібраційні ефекти лінійного п'єзоелектричного двигуна квазірезонансного типу при різних режимах керування швидкістю в діапазоні 0,1 мкм/с... 10 мм/с. Описано конструкцію та принцип роботи п'єзоелектричного двигуна класу LPM-5 фірми DTI (який широко застосовується на практиці і має типову конструкцію для лінійних типів двигунів), а також стенд для дослідження вібрацій при роботі двигуна в різних діапазонах швидкостей. Показано, що механічна ударна деформація формується при зупинці двигуна (при знятті збудження). Це вказує на те, що ударне переваження при самогальмуванні двигуна вище, ніж при розгоні, тобто двигун розганяється повільніше, ніж гальмує. З метою зменшення ударно-вібраційного ефекту, вся подальша методологія керування швидкістю будувалася за принципом або повного виключення ділянок розгону і гальмування шляхом безперервного керування, або їх максимального “згладжування” при імпульсному керуванні. Запропоновані алгоритми керування швидкістю забезпечили зменшення в 2... 10 разів ударно-вібраційного ефекту порівняно з широтно-імпульсною модуляцією. Встановлено, що в мікродіапазоні швидкостей найбільш ефективним є комбіновані алгоритми, які поєднують в собі як елементи безперервного керування шляхом сканування по частотній характеристиці двигуна, так і імпульсного — шляхом внутрішньої модуляції частоти збудження. Показано, що найбільш ефективним керуванням в нанодіапазоні є частотне керування при фіксованій тривалості імпульсу керування – нанокроку двигуна. Отримані результати дозволяють забезпечити діапазон керування швидкістю (5 порядків) лінійного п'єзоелектричного двигуна з врахуванням його умов експлуатації в мікроманіпуляційній системі, а також дають можливості для використання лінійних п'єзоелектричних двигунів квазірезонансного типу в робототехнічних і маніпуляційних системах мікро- і нанодіапазону і подальшого вдосконалення з точки зору мініатюризації і підвищення точності.

*Ключові слова:* п'єзоелектричний двигун; швидкість; вібрація; мікродіапазон; нанодіапазон

DOI: [10.20535/RADAP.2019.78.67-73](https://doi.org/10.20535/RADAP.2019.78.67-73)

## Вступ

П'єзоелектричні двигуни набувають широкого використання в різних галузях приладобудування, що дозволяє отримувати нові технічні характеристики приладів [1–7, 9]. Особлива перспектива їх використання набуває для мікро- і нанопереміщень. Це робить актуальною проблему керування їх швидкістю в мікро- і нанопросторі [7].

Керування швидкістю п'єзоелектричного двигуна є достатньо складним завданням і в значній мірі залежить від конструктивних особливостей самого п'єзоелектричного двигуна, принципу його збудження, алгоритму стабілізації швидкості тощо.

Ця багатогранна задача по різному може вирішуватися для різних діапазонів швидкостей. Це

легко пояснюється, оскільки глибина регулювання швидкості для п'єзоелектричного двигуна може досягати 4-5 порядків, а резонансний контур збудження двигуна має складну частотно-амплітудну характеристику.

В роботі розглянуто обмежений діапазон швидкостей, в якому працює п'єзоелектричний двигун, наприклад лінійна мікроманіпуляційна система для клітинних технологій, а це в середньому 0,1 мкм/с... 10 мм/с (5 порядків) [7].

## 1 Постановка задачі

П'єзоелектричний двигун має унікальні стартові характеристики, а саме — час розгону і галь-

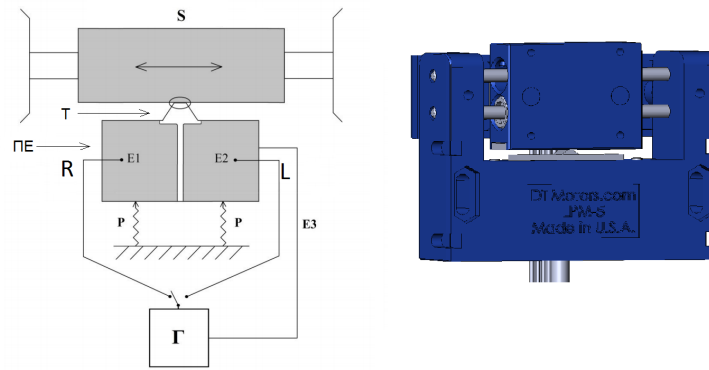


Рис. 1. Схема лінійного п'єзоелектричного двигуна LPM-5 з прямокутним резонатором квазірезонансного типу: S — слайдер ; PE — п'єзоелемент; E1, E2, E3 — електроди п'єзоелемента; Т — штовхач; Р — пружина; Г — генератор збудження.

мування визначається десятками-сотнями мікросекунд. Однак, такий режим виникає лише тільки у тому випадку, якщо частота збудження, яка прикладається, знаходиться поблизу резонансу частотної характеристики — залежності швидкості двигуна від частоти збудження. Зазвичай, це діапазон великих швидкостей. Наприклад для стандартного лінійного двигуна класу LPM — це в середньому 200мм/с [8].

Зменшенням амплітуди збудження (амплітудне керування) можна зменшити швидкість в 3-5 разів, оскільки подальше зменшення призводить до нерівномірності руху аж до зупинки двигуна. Аналогічний ефект виходить і при зміщенні частоти від максимуму резонансу частотної характеристики (частотне керування) [7, 9].

В такому способі керування вибір робочої точки (робочої частоти) здійснюється на правому схилі частотної характеристики двигуна. Цей спосіб дозволяє компенсувати різні зміни самої частотної характеристики двигуна, наприклад, викликані температурним впливом. Однак, зменшити швидкість більше ніж в 5 разів від максимальної він не дозволяє. Тим більше, що цей спосіб не працює коли йде мова про малі швидкості руху.

Тому, для формування малих швидкостей зазвичай використовують широтно-імпульсну модуляцію [7]. Це дуже ефективний спосіб формування малих швидкостей, і швидкості тут можуть бути як в мікро-, так і в нанодіапазонах [7]. Однак, цей спосіб супроводжується ударно-вібраційними ефектами, рівень зменшення яких досягається здебільшого за рахунок маси системи (в нашому випадку маніпулятора) при одночасному підборі частоти широтно-імпульсної модуляції, відходячи, наприклад, у високочастотну область широтно-імпульсної модуляції  $\sim 2$  кГц.

Цей метод добре працює на мікроманіпуляторах з обертальним п'єзоелектричним двигуном з подальшою конвертацією обертального руху в лінійне поступальне на гвинті-гайці, встановлених на прецизійній направляючій. Це досить масивні

п'єзоелектричні двигуни, наприклад, класу PM-20R і мікроманіпулятори, наприклад, класу PSF-3, PSF-3IVF [10], що і дозволяє використовувати широтно-імпульсну модуляцію в мікро- і нанодіапазонах.

Подальша мініатюризація (зменшення масогабаритних параметрів) мікроманіпуляційних систем постійно потребує пошуку нових технічних рішень. Одним з таких і є використання лінійних п'єзоелектричних двигунів, які в декілька разів менше і легше обертальних [8, 9]. Такі двигуни виключають вузли конвертації обертального руху в лінійне поступальне, що також значно зменшує масогабаритні параметри. Маніпулятори на основі таких двигунів мають великий діапазон переміщень.

Однак, як показали попередні експерименти, при керуванні швидкість широтно-імпульсною модуляцією в таких системах особливо відчутні ударно-вібраційні ефекти і які, найчастіше, недопустимі при роботі мікроманіпуляційної системи.

Метою роботи є дослідження супутніх ударно-вібраційних ефектів лінійного п'єзоелектричного мікродвигуна в діапазоні 0,1мкм/с ... 10 мм/с при різних режимах керування швидкістю, що базуються на частотному скануванні і безперервному коригуванні частоти збудження двигуна по сигналу зворотного зв'язку з датчика швидкості.

## 2 Об'єкт та методи дослідження

Для дослідження і аналізу запропонованих методів керування п'єзоелектричним двигуном в режимі мікро- та нановидкостей використовували лінійний мікродвигун класу LPM-5 [8]. Це клас серійного лінійного п'єзоелектричного двигуна з безпосереднім контактом і прямокутним плоским резонатором квазірезонансного типу на стоячих акустичних хвилях.

Схема такого п'єзоелектричного двигуна представлена на рис. 1. На відміну від двигунів німецької компанії Physik Instrumente (PI) [11], в такому двигуні штовхач є елементом резонатора (одне ціле з

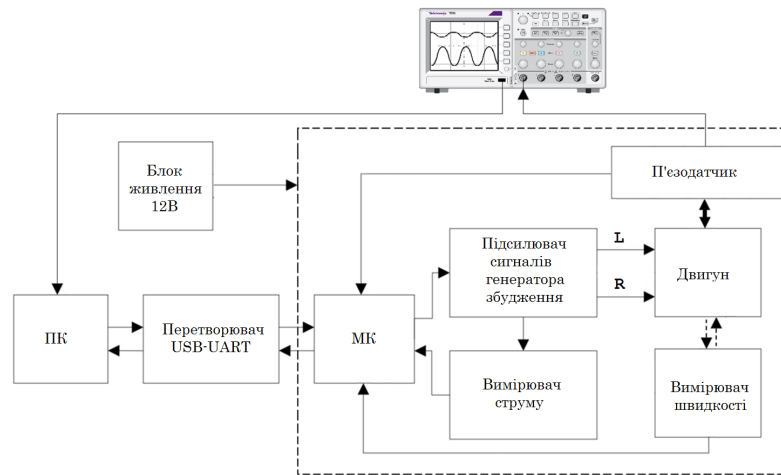


Рис. 2. Структурна схема стенду для вимірювання параметрів п'єзоелектричного двигуна: ПК- персональний комп'ютер, МК- мікроконтролер

резонатором) і виконує функції концентратора механічних коливань в зоні фрикційного контакту. Квазірезонансний двигун працює на суперпозиції другої повздожньої моди коливань по довжині резонатора і першої повздожньої моди коливань по ширині резонатора, які рознесені по частоті в межах 3 ... 5%.

Суперпозиція цих двох незалежних взаємоортогональних коливань при їх фазовому зсуві  $\sim 90^\circ$  (який задається в першу чергу геометрією резонатора і результуючою частотою збудження) приводить до виникнення механічного "нано-еліпса" руху в зоні фрикційного контакту штовхача.

Для збудження цих коливань за рахунок зворотнього п'єзоелектричного ефекту, п'єзоелемент має два електроди E1, E2 з однієї сторони і спільний електрод E3 (на рисунку не показано) з іншої сторони. П'єзоелемент притиснутий за допомогою двох пружин Р через контактну площадку штовхача до слайдера S — рухомої каретки. Збудження п'єзоелемента здійснюється за допомогою генератора Г. Робоча частота збудження двигуна 150 ... 160 кГц.

При збудженні п'єзоелемента через електрод E1 в контактній фрикційній зоні формується механічний "нано-еліпс" правого обертання, який рухає каретку в правому R напрямку. Аналогічно, при збудженні п'єзоелемента через електрод E2 формується механічний "нано-еліпс" лівого обертання, який рухає каретку в лівому L напрямку.

Структурна схема стенду для вимірювання параметрів двигуна в процесі дослідження представлена на рис. 2.

Стенд включав послідовно з'єднані персональний комп'ютер, перетворювач USB-UART, мікроконтролер, підсилювач сигналів генератора збудження, досліджуваний двигун, п'єзоелектричний датчик ударно-вібраційного шуму, вимірювач швидкості двигуна. Вимірювач швидкості оптично зв'язаний з рухомою кареткою двигуна і електрично з контролером.

П'єзоелектричний датчик ударно-вібраційного шуму жорстко встановлений на корпусі двигуна і електрично зв'язаний з цифровим осцилографом типу Tektronix, вихід якого під'єднано до персонального комп'ютера. В процесі вимірювань додатково контролювали струм п'єзодвигуна за допомогою вимірювача струму, а весь стенд живився від джерела постійного струму 12В.

Вимірювач швидкості був виконаний на основі оптичного енкодера іС-RX3212 з рівнем роздільної здатності 2,6 мкм. Оптична лінійка енкодера була закріплена на рухомій каретці, а сам датчик на корпусі двигуна. Сигнал з енкодера (імпульси  $\sim 5\text{В}$ ) надходили на мікроконтролер для подальшої обробки и формування сигналу помилки швидкості.

П'єзоелектричний вібродатчик виконаний на основі тонкого п'єзоелектричного диску товщиною 0,2 мм, діаметром 20 мм і чутливістю 0,05 мкм/мВ, закріпленого на корпусі двигуна за допомогою жорсткого клею на циакриновій основі.

Власний шум вібродатчика і його вимірюючого каналу знаходився на рівні  $\sim 5\text{мВ}$ , що дозволяло оцінювати мінімальну амплітуду вібрацій на рівні 0,2 ... 0,3 мкм. Цього цілком достатньо для оцінки ступеня відповідності п'єзоелектричного двигуна в умовах експлуатації в мікроманіпуляційній системі для клітинних технологій на базі оптичного мікроскопу, граничний рівень роздільної здатності якого  $\sim 0,6$  мкм.

В процесі роботи персональний комп'ютер надсилав параметри керування на мікроконтролер PIC16F18325, а саме режим роботи (широтно-імпульсна модуляція або заданий алгоритм), значення необхідної швидкості, напрямок руху двигуна.

У відповідності з цими командами керування на виході мікроконтролера формувалася сигнал збудження двигуна, який проходячи через підсилювач надходив на відповідне плече двигуна і приводив його в рух з відповідною швидкістю. В процесі руху вимірювався сигнал вібраційного шуму двигуна-

на, який надходив на персональний комп'ютер для подальшої обробки.

### 3 Дослідження швидкості п'єзоелектричних двигунів в мікро- та нанодіапазонах

Спочатку виконувалося дослідження ударно-вібраційного ефекту при формуванні одиночного імпульсу керування двигуном. Типова осцилограма виникаючих вібрацій на корпусі двигуна при імпульсному керуванні представлена на рис. 3.

Із представлених даних слідує, що механічна ударна деформація формується при зупинці двигуна, тобто при знятті збудження. Це вказує на те, що ударне перевантаження при самогальмуванні двигуна вище, ніж при розгоні, тобто двигун розганяється повільніше, ніж гальмує. Фізично це зрозуміло, оскільки на ділянці розгону відбувається поступове “розклинювання” і розгін системи, а на ділянці гальмування — миттєве “заклинювання” і гальмування, хоча цей час і вимірюється десятками мікросекунд [7].

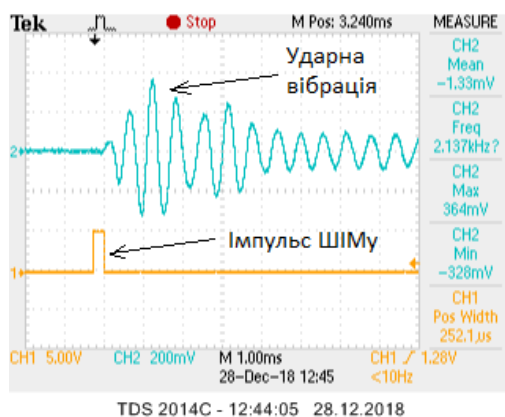


Рис. 3. Осцилограма ударно-вібраційного ефекту на корпусі двигуна при імпульсному збудженні.

Тобто, на ділянці розгону, розклинювання відбувається практично на нульовій швидкості, а на ділянці гальмування механічне заклинювання відбувається на максимальній швидкості.

Тому, з метою зменшення ударно-вібраційного ефекту, вся подальша методологія керування швидкістю будувалася за принципом або повного виключення ділянок розгону і гальмування шляхом безперервного керування, або їх максимального “згладжування” при імпульсному керуванні.

В зв'язку з цим, для різних швидкісних інтервалів досліджувалися різні алгоритми керування швидкістю, основним критерієм оцінки яких був ударно-вібраційний ефект.

#### 3.1 Інтервал 10 мм/с ... 1 мм/с

Найбільш ефективним в цьому діапазоні швидкостей виявився (умовно названий) частотно-безперервний алгоритм, який базувався на налаштуванні швидкості за сигналом датчика швидкості шляхом зміни частоти на правому схилі частотної характеристики п'єзоелектричних двигунів [12].

В такому алгоритмі крок квантування частоти збудження — дискрет зміни частоти за сигналом помилки підбирався з умови крутизни самої частотної характеристики, а сигнал помилки формувався по інтегральному (накопичувальному) принципу прийнятих імпульсів з енкодера.

Характерним тут було те, що працював гістерезис двигуна з шириною 5 ... 10 кГц [12]. Тобто двигун працював в зоні збудження 160 ... 170 кГц, а це зона нечутливості (як згадувалося раніше, робоча зона 150 ... 160 кГц). Це вказувало на той факт, що система фактично розширяла частотну зону збудження двигуна заходячи в зону низьких швидкостей, виключаючи при цьому ділянки зупинки і повторного запуску двигуна.

Порівняльний експериментальний результат ударно-вібраційного ефекту для досліджуваного алгоритму і широтно-імпульсної модуляції в інтервалі швидкостей 10мм/с ... 1 мм/с представлений на рис. 4.

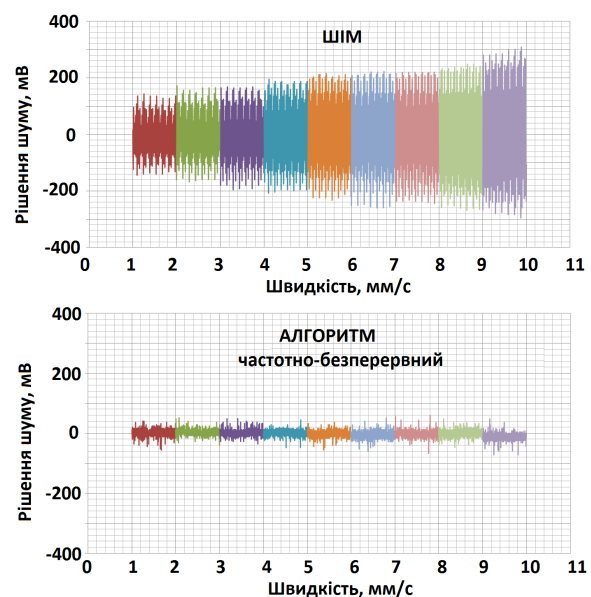


Рис. 4. Рівень шуму при керуванні в режимі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) і при керуванні частотно-безперервним алгоритмом в діапазоні швидкостей 1 ... 10мм/с (частота ШІМу — 278 Гц, діапазон зміни тривалості імпульсів ШІМу — 80...270 мкс).

Із представлених даних слідує, що амплітуду вібрацій в порівнянні з широтно-імпульсною модуляцією вдалося зменшити в 3-10 разів і довести до рівня ~20 мВ, що відповідало амплітуді механічних вібрацій ~1 мкм. При цьому практично повністю

вдалося виключити акустичний шумовий ефект, супутній ударно-вібраційному.

### 3.2 Інтервал 1 мм/с ... 0.1 мм/с

Для роботи в цьому інтервалі швидкостей найбільш ефективним виявився імпульсно-гармонійний алгоритм з пакетами збудження і при фіксованій частоті їх слідування. Частота збудження двигуна в самих пакетах змінювалася за гармонійним законом (принципом частотної "гармошки"), а підстроювання швидкості здійснювалася за сигналом помилки швидкості шляхом зсуву всього пакету збудження на фіксований крок квантування по правому контуру частотної характеристики двигуна.

При цьому частотна ширина пакету, швидкість зміни частоти збудження в пакеті, частота слідування пакетів, сигнал формування помилки і т.д. підбиралися експериментально з врахуванням мінімізації ударно-вібраційного ефекту.

Порівняльний експериментальний результат ударно-вібраційного ефекту для досліджуваного алгоритму і в режимі широтно-імпульсної модуляції в інтервалі швидкостей 1 мм/с ... 0,1 мм/с представлено на рис. 5.

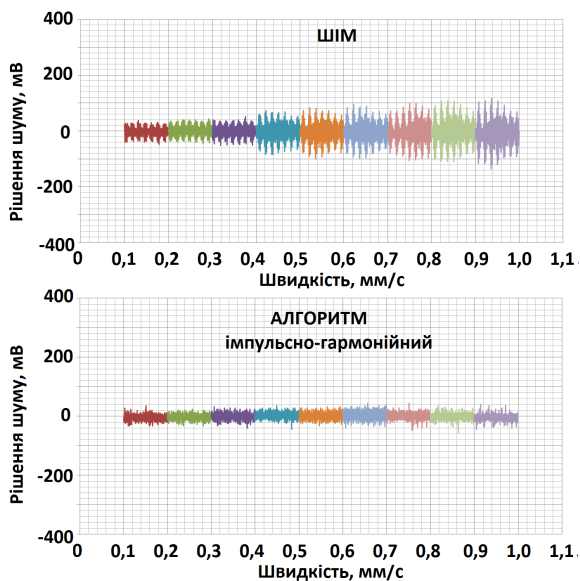


Рис. 5. Рівень шуму при керуванні в режимі широтно-імпульсної модуляції і при керуванні імпульсно-гармонійним алгоритмом в діапазоні швидкостей 0,1-1мм/с (частота ШІМу — 278 Гц, діапазон зміни тривалості імпульсу ШІМу — 36...80 мкс, частотна ширина пакету — 10 кГц, час зміни частоти збудження в пакеті — 1 мс, частота слідування пакетів — 120 Гц).

Із представлених даних слідує, що амплітуду вібрацій порівняно з широтно-імпульсною модуляцією вдалося зменшити в 2-3 рази, а також довести її до рівня ~20 мВ, що відповідало амплітуді механічних вібрацій ~1 мкм. При цьому також вдалося зна-

чно зменшити акустичний шумовий ефект, супутній ударно-вібраційному.

### 3.3 Інтервал 100 мкм/с ... 10 мкм/с

Для роботи в цьому інтервалі досліджувався частотно-імпульсний алгоритм з пакетами збудження (за аналогією з попереднім алгоритмом), але в якому частота слідування пакетів змінна (зменшувалася пропорційно зменшенню швидкості).

В нашому випадку це було зменшення від 120 Гц до 12 Гц, тобто в 10 разів.

Порівняльний експериментальний результат ударно-вібраційного ефекту для досліджуваного алгоритму і широтно-імпульсної модуляції в інтервалі швидкостей 100 мкм/с ... 10 мкм/с представлено на рис. 6.

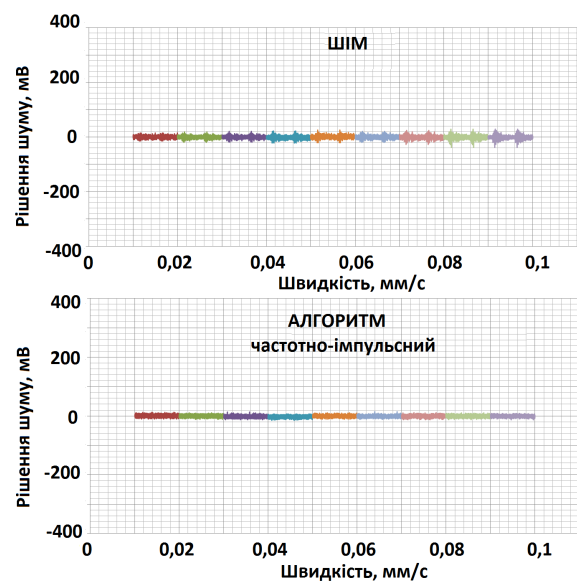


Рис. 6. Рівень шуму при керуванні в режимі широтно-імпульсної модуляції і при керуванні частотно-імпульсним алгоритмом в діапазоні швидкостей 10 мкм/с ... 100 мкм/с (частота ШІМу — 28 Гц, діапазон зміни тривалості імпульсу ШІМу — 36 ... 80 мкс, частотна ширина пакету — 10 кГц, час зміни частоти збудження в пакеті — 1 мс, частота слідування пакетів — 12 ... 120 Гц).

Із представлених результатів досліджень слідує, що вже в області ~10 мкм/с рівень ударно-вібраційного шуму як для даного алгоритму, так і для широтно-імпульсної модуляції був близький до власного шуму вібродатчика (~0,3 мкм), що вказувало на можливість керування в режимі ШІМу в області як мікрошвидкостей, так і наношвидкостей.

Це пояснюється тим, що в цій області тривалість керуючого імпульсу вимірюється 3-5 періодами імпульсів збудження п'єзoeлементу (20 ... 35 мкс). За цей час двигун не встигає розігнатися і швидкість гальмування на порядки менше максимальної [7].

Як результат — ступінь удано-вібраційного впливу різко зменшується.

### 3.4 Інтервал 10 мкм/с ... 1 мкм/с

З метою апробації вищесказаного, досліджувався алгоритм частотного керування, в якому двигун збуджувався фіксованою резонансною частотою  $\sim 150$  кГц. Тривалість імпульсу (пакету) збудження двигуна також була фіксована і відповідала 5 періодам збудження (в нашому випадку  $\sim 35$  мкс), що відповідало одному кроку двигуна  $\sim 100$  нм, а частота слідування пакетів збудження змінювалася в залежності від швидкості від 10 Гц до 100 Гц.

Залежність швидкості двигуна від частоти слідування імпульсів при такому режимі керування представлена на рис. 7.

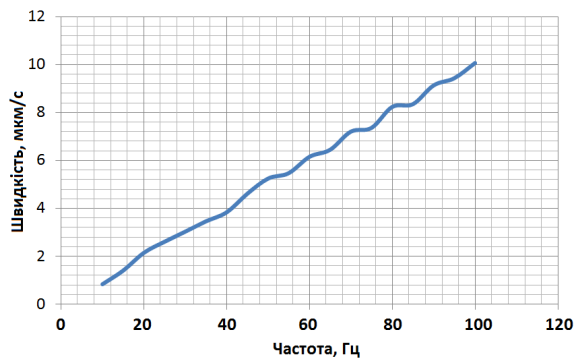


Рис. 7. Частотне керування двигуном в діапазоні швидкостей 1 мкм/с ... 10 мкм/с при фіксованій тривалості імпульсу  $\sim 35$  мкс.

Із представлених даних слідує, що швидкість в мікродіапазоні практично лінійно залежить від частоти, а її вібраційна складова не фіксувалася наявними засобами контролю і була нижче рівня власного шуму вимірювального тракту.

### 3.5 Інтервал 1 мкм/с ... 100 нм/с

Для роботи в цьому інтервалі зменшено тривалості імпульсу збудження до  $\sim 20$  мкс, що відповідало одному кроку двигуна  $\sim 20$  нм, і частотне слідування імпульсів від 5 до 50 Гц.

Залежність швидкості двигуна від частоти слідування імпульсів при такому режимі керування представлена на рис. 8.

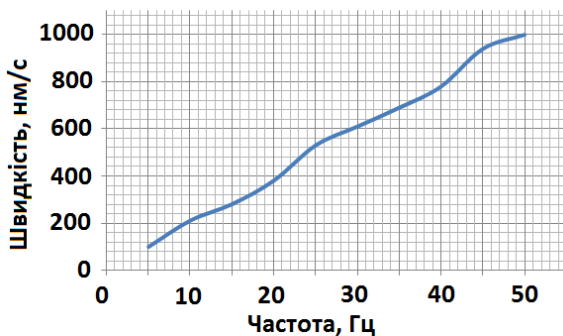


Рис. 8. Частотне керування двигуном в діапазоні швидкостей 0,1 мкм/с ... 1 мкм/с при тривалості імпульсу  $\sim 20$  мкс.

Отримано аналогічні результати порівняно з попереднім інтервалом: швидкість практично лінійно залежить від частоти, вібраційна складова не фіксувалася наявними засобами контролю і була нижче рівня власного шуму вимірювального тракту.

## Висновки

На основі фізичних принципів роботи п'єзоелектричного двигуна, з врахуванням специфіки сигналів керування і зворотнього зв'язку, запропоновані і досліджені методи керування швидкістю в діапазоні 0,1 мкм/с ... 10 мм/с, що дозволило:

1. Забезпечити діапазон керування швидкістю (5 порядків) лінійного п'єзоелектричного двигуна квазірезонансного типу з врахуванням його умов експлуатації в мікроманіпуляційній системі.
2. Зменшити в 2-10 разів ударно-вібраційний шум при роботі в мікродіапазоні в порівнянні з керуванням за допомогою широтно-імпульсної модуляції. Показано, що в мікродіапазоні швидкостей найбільш ефективним є комбіновані алгоритми, які поєднують в собі як елементи безперервного керування шляхом сканування по частотній характеристиці двигуна, так і імпульсного — шляхом внутрішньої модуляції частоти збудження.
3. Забезпечити лінійний безвібраційний режим керування швидкістю в нанодіапазоні. Показано, що в цьому діапазоні керування швидкістю може будуватися за принципом частотного керування — шляхом зміни частоти слідування фіксованого нанокроку двигуна.

Отримані результати відкривають можливості для широкого використання лінійних п'єзоелектричних двигунів квазірезонансного типу в робототехнічних і маніпуляційних системах мікро- і нанодіапазону, а також їх подальшого вдосконалення з точки зору мініатюризації, підвищення точності і здешевлення.

## References

- [1] Wang D.H., Yang Q. and Dong H.M. (2013) A Monolithic Compliant Piezoelectric-Driven Microgripper: Design, Modeling, and Testing. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 18, Iss. 1, pp. 138-147. DOI: 10.1109/tmech.2011.2163200
- [2] Amin-Shahidi D. and Trumper D.L. (2014) Design and control of a piezoelectric driven reticle assist device for prevention of reticle slip in lithography systems. *Mechatronics*, Vol. 24, Iss. 6, pp. 562-571. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2014.03.001

- [3] Kongthon J. and Devasia S. (2013) Iterative Control of Piezoactuator for Evaluating Biomimetic, Cilia-Based Micromixing. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 18, Iss. 3, pp. 944-953. DOI: 10.1109/tmech.2012.2194302
- [4] Gu G., Zhu L., Su C. and Ding H. (2013) Motion Control of Piezoelectric Positioning Stages: Modeling, Controller Design, and Experimental Evaluation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 18, Iss. 5, pp. 1459-1471. DOI: 10.1109/tmech.2012.2203315
- [5] Gu G., Zhu L., Su C., Ding H. and Fatikow S. (2016) Modeling and Control of Piezo-Actuated Nanopositioning Stages: A Survey. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 13, Iss. 1, pp. 313-332. DOI: 10.1109/tase.2014.2352364
- [6] Alonso-delPino M., Jung-Kubiak C., Reck T., Llombart N. and Chattopadhyay G. (2019) Beam Scanning of Silicon Lens Antennas Using Integrated Piezomotors at Submillimeter Wavelengths. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, Vol. 9, Iss. 1, pp. 47-54. DOI: 10.1109/tthz.2018.2881930
- [7] Petrenko S.F. (2002) *P'ezoelektricheskii dvigatel' v priborostroenii* [A piezoelectric motor in instrument]. Kornii-chuk Publ., 96 p.
- [8] *Digital International Technology*. Available at: [www.dtimotors.com](http://www.dtimotors.com)
- [9] Lavrinenko V. V. (2015) *Printsipy postroeniya p'ezoelektricheskikh motorov. Osnovy teorii i realizatsiya* [The principles of construction of piezoelectric motors. Fundamentals of theory and implementation]. Lambert, 227 p.
- [10] *Piezo Technologies*. Available at: [piezotech.com.ua](http://piezotech.com.ua)
- [11] Halchenko V.Y., Filimonov S.A., Batrachenko A.V. and Filimonova N.V. (2018) Increase the Efficiency of the Linear Piezoelectric Motor. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, Vol. 10, Iss. 4, pp. 04025-1. DOI: 10.21272/jnep.10(4).04025
- [12] Petrenko S., Omelyan A., Antonyuk V. and Novakovsky O.G. (2018) Piezoelectric motor control system. *Bulletin of Kyiv Polytechnic Institute. Series Instrument Making*, Iss. 55(1), pp. 5-10. DOI: 10.20535/1970.55(1).2018.135857

## Исследование сопутствующего ударно-вибрационного шума пьезоэлектрического двигателя в режиме микро- и наноскоростей

Петренко С. Ф., Омелян А. В., Лысенко А. Н.,  
Антонюк В. С.

В работе рассмотрены совершенствования методов управления скоростью пьезоэлектрических двигателей в микро- и нанодиапазоне. На основе физических принципов работы пьезоэлектрического двигателя, с учетом специфики сигналов управления и обратной связи, исследованы ударно-вибрационные эффекты линейного пьезоэлектрического двигателя квазирезонансного типа при различных режимах управления скоростью в

диапазоне 0,1мкм/с...10мм/с. Предложенные алгоритмы управления скоростью, обеспечили уменьшение в 2...10 раз ударно-вибрационного эффекта по сравнению с широтно-импульсной модуляцией. Установлено, что в микродиапазоне скоростей наиболее эффективно комбинированные алгоритмы, которые сочетают в себе как элементы непрерывного управления путем сканирования по частотной характеристике двигателя, так и импульсного - путем внутренней модуляции частоты возбуждения. Показано, что наиболее эффективным управлением в нанодиапазоне является частотное управление при фиксированной длительности импульса управления - наношага двигателя. Полученные результаты позволяют обеспечить диапазон управления скоростью (5 порядков) линейного пьезоэлектрического двигателя с учетом его условий эксплуатации в микроманипуляционной системе, а также дают возможности для использования линейных пьезоэлектрических двигателей квазирезонансного типа в робототехнических и манипуляционных системах микро- и нанодиапазона и дальнейшего совершенствования с точки зрения миниатюризации и повышения точности.

*Ключевые слова:* пьезоэлектрический двигатель; скорость; вибрация; микродиапазон; нанодиапазон

## Research of concomitant shock-vibration noise of a piezoelectric motor in the mode of micro and nano speed

Petrenko S.F., Omelian A.V., Lysenko O.M.,  
Antonyuk V.S.

This work is devoted to improvement of methods for controlling the speed of piezoelectric motors in the micro and nano-bands. Based on the physical principles of the piezoelectric motor, taking into account the specifics of control signals and feedback, investigated the shock-vibration effects for linear piezoelectric motor by quasi-resonance type under different speed control modes in the range of 0,1  $\mu\text{m/s}$ ...10 mm/s. Proposed speed control algorithms, which ensured a decrease of 2...10 times the shock-vibration effect in comparison with pulse-width modulation. It is established that in the speed microwave range the most effective are combined algorithms that combine as elements of continuous control by frequency response scanning for engine, and pulse - by internal modulation of excitation frequency. The paper shows that the most effective control in nano-band is frequency control with a fixed duration of control pulse - a nanocorrect engine. The obtained results allow to provide a control range of speed (5 orders) for linear piezoelectric motor taking into account its operating conditions in a micromanipulation system, as well as provide opportunities for use linear piezoelectric motors of quasi-resonance type in robotic and manipulation systems in micro and nano-range and further improvement in terms of miniaturization and increased accuracy.

*Key words:* piezoelectric motor; velocity; vibration; micron; nano-range