

DOI: 10.20535/kpi-sn.2019.1.157272

УДК 621.3

С.Ф. Петренко<sup>1</sup>, А.В. Омелян<sup>1</sup>, О.О. Горбатюк<sup>2</sup>, В.С. Антонюк<sup>2\*</sup><sup>1</sup>Мале науково-виробниче підприємство ТОВ “Лілея”, Київ, Україна<sup>2</sup>КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

\*corresponding author: vp@kpi.ua

## ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК П’ЕЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА ЗАЛЕЖНО ВІД РЕСУРСНОГО СТАНУ

**Проблематика.** Перспектива використання п’єзоелектричних двигунів у різних галузях приладобудування, збільшення їх ресурсних характеристик, подальше дослідження та вдосконалення є актуальною проблемою.

**Мета дослідження.** Метою роботи є дослідження резонансних характеристик п’єзоелектричного двигуна залежно від ресурсного стану.

**Методика реалізації.** Поставлена мета роботи досягається за рахунок створення стенда для дослідження резонансних характеристик п’єзоелектричного двигуна, виконання вимірювань резонансних характеристик п’єзоелектричного двигуна залежно від ресурсного стану й аналізу отриманих результатів.

**Результати дослідження.** Показано, що в процесі напрацювання відбувалася значна зміна резонансних характеристик залежно від кількості напрацьованих обертів. При цьому не завжди зі зменшенням моменту самогальмування збільшуються швидкість обертання та резонансний струм. Встановлено різну поведінку резонансних характеристик двигуна правого та лівого обертання, що пояснюється хвиловими ефектами, які виникають в елементах конструкції п’єзоелектричного двигуна. З точки зору ресурсних можливостей п’єзоелектричного двигуна встановлено, що двигун правого обертання має більші ресурсні можливості, ніж двигун лівого обертання, що необхідно враховувати при довгостроковій його експлуатації.

**Висновки.** У результаті проведеної роботи розроблено й апробовано стенд для контролю резонансних характеристик п’єзоелектричного двигуна залежно від кількості напрацьованих циклів. Виконано дослідження зміни резонансних характеристик п’єзоелектричного двигуна від кількості напрацьованих циклів до одного мільйона. Подальші дослідження будуть спрямовані на вивчення ультраакустичної структури ефектів, що виникають у двигунах лівого та правого обертання, з метою їх компенсації та збільшення ресурсу п’єзоелектричного двигуна реверсивного обертання.

**Ключові слова:** п’єзоелектричний двигун; ресурс; резонансні характеристики; довгострокова експлуатація.

### Вступ

П’єзоелектричні двигуни набувають широкого використання в різних галузях приладобудування, що дає можливість отримувати нові технічні характеристики приладів на основі специфічних особливостей п’єзоелементів [1–8].

До п’єзоелектричних двигунів також висувають спеціальні технічні вимоги, наприклад, двигун повинен крокувати в нанометровому діапазоні, бути немагнітним, або з певним відношенням “момент/маса”, або він повинен бути відмінним позиціонером тощо [9].

П’єзоелектричні двигуни мають значні переваги над традиційними електродвигунами, а саме пусковий момент або сила прикладається і знімається практично миттєво (10–100 мкс) і при знятті пускового моменту (сили) відбувається автоматичне переключення на момент (силу) самогальмування. Це тихохідний двигун із максимальною швидкістю близько 100 об/хв

(200 мм/с) і глибиною регулювання за швидкістю 4–6 порядків [10].

У п’єзоелектричного двигуна унікальна роздільна здатність (~1 кут.с, ~1 нм), він є ідеальним позиціонером і зберігає позицію при вимкненні живлення. Двигун може виконувати швидкий реверс (0,5–1 мс) за рахунок високих динамічних властивостей [10].

Перспектива використання п’єзоелектричних двигунів у різних сферах науково-технічної та виробничої діяльності робить актуальною проблему їх подальшого дослідження і вдосконалення, а особливо дослідження ресурсних характеристик двигунів.

Це пояснюється тим, що п’єзоелектричний двигун – це двигун тертя, і тому зміна тертя в системі значною мірою впливає на параметри двигуна, що дуже важливо для п’єзоелектричних двигунів зі штовхачами, оскільки стирання штовхачів призводить до зміни його вихідних параметрів – моменту та швидкості [10, 11].

## Постановка задачі

Метою роботи є дослідження резонансних характеристик п'єзоелектричного двигуна залежно від кількості напрацьованих циклів обертання.

## Аналіз п'єзоелектричних резонаторів

У п'єзоелектричних двигунах використовуються різні види резонаторів (п'єзоелементів), які працюють на різних типах коливань (радіальні, повздовжні, згинальні, крутильні тощо) [12].

Найчастіше це кільцевий п'єзоелектричний резонатор (п'єзоелемент у вигляді кільця), в якому формуються радіальні ультразвукові коливання, які в подальшому трансформуються в направлений рух металевого ротора за допомогою пружних (частіше сталевих) штовхачів [10, 12].

Основними характеристиками такого двигуна є частотна (резонансна) характеристика осцилятора (п'єзоелемента) та частотна (резонансна) характеристика самого двигуна.

Частотна характеристика осцилятора (п'єзоелемента) – це залежність струму  $I$  через п'єзоелемент (або на вході генератора збудження) від частоти  $F$  збудження п'єзоелемента (рис. 1).

Це головна характеристика при проектуванні системи керування двигуном. Для кільцевих резонаторів ця характеристика має явно виражений резонансний характер (рис. 1, *a*), а резонанс струму практично збігається з резонансною характеристикою самого двигуна – швидкістю обертання  $V$  двигуна залежно від частоти збудження  $F$  (рис. 1, *б*).

Керування таким двигуном [9, 10] здійснюється через підстроювання робочої точки

(частоти) збудження п'єзоелемента  $F$  відносно максимуму резонансної характеристики двигуна (наприклад, точка 2, рис. 1, *a, б*).

Дослідження виконувалися на п'єзоелектричному двигуні РМ-20R із пружними штовхачами і циліндричним кільцевим резонатором стоячих акустичних хвиль [13].

## Стенд контролю резонансних характеристик п'єзоелектричного двигуна

Стенд контролю резонансних характеристик п'єзоелектричного двигуна включав у себе послідовно з'єднані персональний комп'ютер (ПК), перетворювач USB-UART, мікроконтролер (МК), підсилювач сигналів генератора збудження, п'єзоелектричний двигун, навантажувальний пристрій двигуна, а також вимірювач швидкості (обертів) та вимірювач струму.

Структурна схема стенда контролю резонансних характеристик п'єзоелектричного двигуна зображена на рис. 2.

Вимірювач струму під'єднаний до підсилювача сигналів генератора збудження та мікроконтролера, вимірювач швидкості оптично зв'язаний із валом двигуна та мікроконтролером.

За допомогою навантажувального пристрою задавали робоче навантаження в процесі вимірювання резонансних характеристик, а також виконували вимірювання моменту самогальмування двигуна та пускового моменту.

Вимір резонансних характеристик п'єзоелектричного двигуна відбувався таким чином. Персональний комп'ютер надсилав на мікроконтролер PIC16F18325 такі параметри вимірювання, як діапазон робочих частот двигуна (від 70 до 80 кГц); крок зміни частоти генератора збудження (40 Гц); час утримання частоти генератора (близько однієї секунди); напрямок

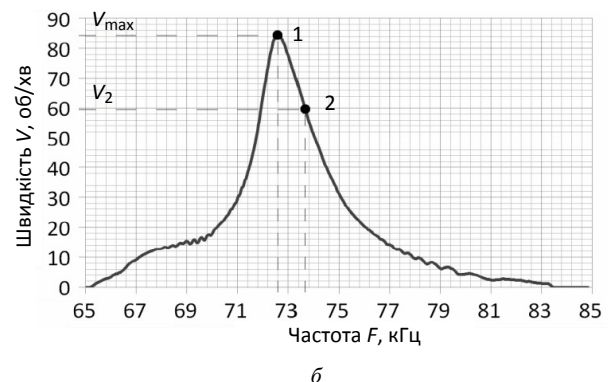
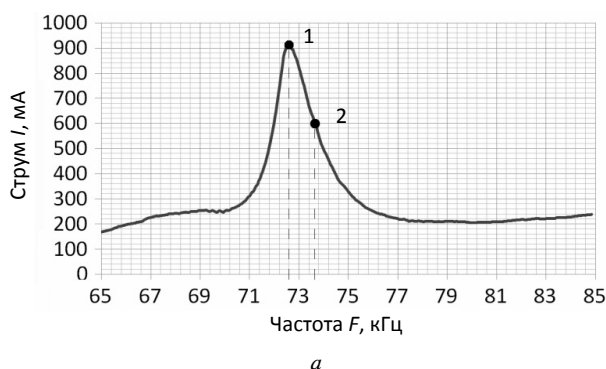


Рис. 1. Типові резонансні характеристики п'єзоелектричного двигуна: *a* – залежність струму  $I$  осцилятора від частоти  $F$  збудження, *б* – залежність швидкості обертання  $V$  двигуна від частоти  $F$  збудження

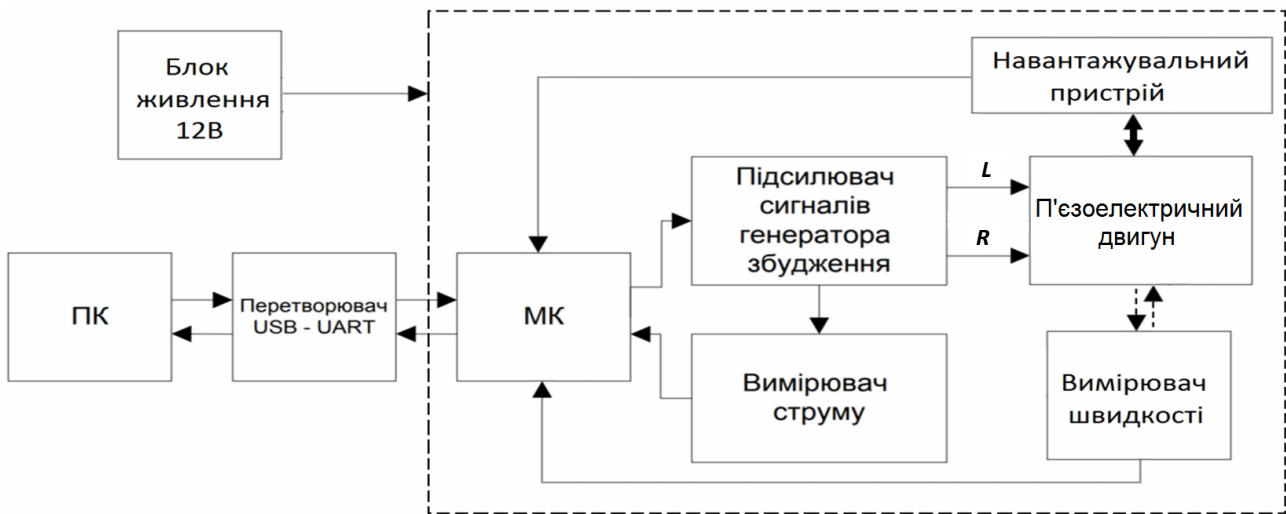


Рис. 2. Структурна схема стенда контролю резонансних характеристик п'єзоелектричного двигуна

обертання двигуна ( $L$  – проти годинникової стрілки,  $R$  – за годинниковою стрілкою) та рівень робочого навантаження двигуна.

Після цього МК генерував сигнал збудження для п'єзоелектричного двигуна з початковою частотою, яка відповідала правій границі заданого діапазону частот – 80 кГц. Цей сигнал надходив на блок підсилення сигналів генератора збудження для підсилення вихідної потужності, а далі на п'єзоелектричний двигун.

Навантажувальний пристрій виконано на базі електромагнітної муфти ВРМ-6В, а вимірювач швидкості (обертів) – на базі оптичного енкодера MOZ-30 (4000 імпульсів на 1 оберт).

Вимірювач струму споживання двигуна реалізований на шунтовому резисторі з подальшим підсиленням напруги на ньому з використанням операційного підсилювача LMV3211LT. Вихідний сигнал підсилювача фільтрувався низькочастотним RC-фільтром.

Відфільтрований сигнал оцифровувався за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) з частотою  $\sim 31$  кГц, вбудованого в МК.

Вимірювання продовжувалося протягом зазначеного часового параметра, такого як час утримання частоти генератора. Після цього одержані значення струму, швидкості та частоти генератора надсилались на ПК.

Далі частота генератора зменшувалася на значення, яке відповідало параметру кроку зміни частоти генератора.

Після цього вимірювання виконували повторно до тих пір, поки частота генератора не ставала рівною лівій границі заданого діапазону частот – 70 кГц.

Після завершення вимірювання ПК виконував розрахунки струму та швидкості, зберігав отримані дані у файл і будував графіки залежностей струму та швидкості від частоти збудження п'єзоелектричного двигуна.

Кількість напрацьованих обертів вимірювали за спеціальною програмою за допомогою вимірювача обертів, яка здійснювала послідовний оберт то в одну, то в іншу сторону, та накопичувала загальну кількість циклів.

Резонансні характеристики вимірювались після кожних 100 тис. циклів.

### Результати експерименту

Для експериментальних досліджень використовували п'єзоелектричний двигун РМ-20R, який являв собою два незалежних двигуни правого та лівого обертання, з'єднаних між собою через фрикційну муфту, яка реалізована на елементах конструкції самого двигуна [10].

У процесі експерименту за допомогою спеціальної програми двигун робив по черзі один оберт за годинниковою та один проти годинникової стрілки за середньої швидкості обертання 30 об/хв та робочого моменту 0,015 Н·м.

Це фіксувалось як один цикл. Після кожних 100 тис. циклів вимірювали резонансні характеристики двигуна при такому ж моменті. Також фіксували момент самогальмування та пусковий момент у кожному зі сторін. З метою підвищення достовірності отриманих результатів експериментальні дослідження виконували на трьох п'єзоелектричних двигунах.

З отриманих результатів випливає, що в процесі напрацювання відбувалася значна змі-

на резонансних характеристиках. Типові резонансні характеристики п'єзоелектричного двигуна залежно від кількості напрацьованих циклів показано на рис. 3.

Спочатку, після 200 тис. циклів (рис. 3, б), спостерігалось зростання максимуму резонансної характеристики двигуна (залежність швидкості  $V$  від частоти збудження  $F$ ) порівняно з початковим станом (рис. 3, а).

При цьому максимум резонансної характеристики осцилятора (залежність струму  $I$  від частоти збудження  $F$ ) істотно не зменшився, але ці характеристики стали більш пологими.

Це означало, що за меншої потужності збудження зростала кількість обертів, а отже, і ККД двигуна, що пояснюється підвищенням якості фрикційного контакту штовхачів і ротора за рахунок притирання їх у процесі напрацьовання.

На цей факт вказує і зниження моменту самогальмування в середньому на 25–30 % (було 0,14 Н·м, а стало 0,10 Н·м), що узгоджується з результатами, отриманими раніше [11].

Така поведінка п'єзоелектричного двигуна (зростання максимуму резонансної характеристики двигуна при практично незмінному максимумі резонансної характеристики осцилятора) узгоджується з його динамічною моделлю, спрощене диференціальне рівняння якого має вигляд [10]

$$j\ddot{a} + k\dot{a} + k_3a = M_{\Pi}, \quad (1)$$

де  $j$  – зведений до вала двигуна сумарний момент інерції;  $k$  – коефіцієнт демпфування;  $k_3$  – коефіцієнт, який враховує кутову жорсткість конструкції п'єзоелектричного двигуна;  $M_{\Pi}$  – пусковий момент п'єзоелектричного двигуна;  $\alpha$  – кут повороту вала;  $\dot{\alpha}$  – кутова швидкість;  $\ddot{\alpha}$  – кутове прискорення.

Враховуючи той факт, що в конструкції досліджуваного п'єзоелектричного двигуна закладена велика жорсткість (за рахунок значного ефекту самогальмування  $\sim 0,1$  Н·м), складовою  $k_3\dot{\alpha}$  можна знехтувати і вважати його абсолютно жорстким.

З огляду на це рівняння (1) можна записати у вигляді

$$\ddot{a} + k\dot{a} = M_{\Pi}. \quad (2)$$

Пусковий момент  $M_{\Pi}$  згідно зі специфікою роботи двигуна прикладається і знімається практично миттєво (зі сталою часу  $\sim 10$ – $100$  мкс, яка визначається сталою п'єзоелемента і електронних систем збудження п'єзоелемента), а час дії моменту  $M_{\Pi}$  дорівнює тривалості збудження п'єзоелемента.

У нашому випадку пусковий момент не змінювався для кожної фіксованої частоти залежно від кількості напрацьованих циклів, тобто він був сталим для фіксованої частоти збудження п'єзоелемента.

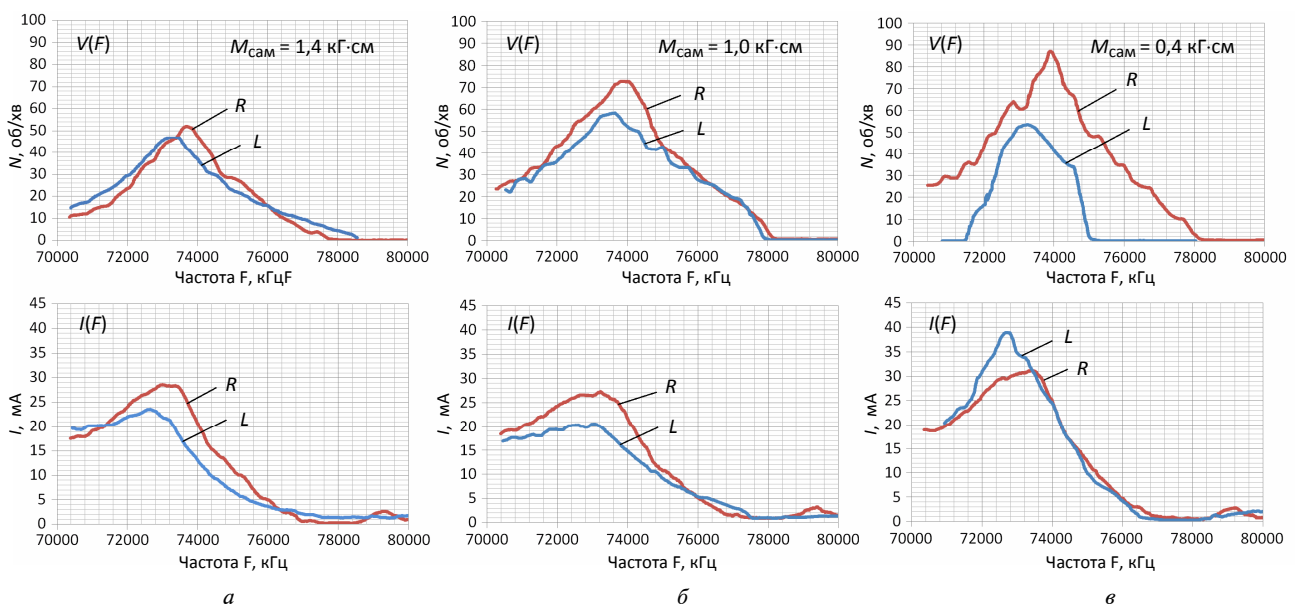


Рис. 3. Резонансні характеристики п'єзоелектричного двигуна залежно від кількості напрацьованих циклів: а – початковий стан; б – після 200 000 циклів; в – після 1 000 000 циклів

Тоді для стаціонарного руху п'єзоелектричного двигуна (режим реєстрації частотних характеристик) рівняння (2) трансформується до вигляду

$$k\dot{\alpha} = M_{\Pi}, \quad (3)$$

у якому коефіцієнт  $k$  демпфування (у певних частотних межах) буде пропорційний коефіцієнту самогальмування. З цього слідує, що за незмінної резонансної характеристики осцилятора (пусковий момент постійний) зменшення коефіцієнта демпфування (самогальмування) на 30 % приводить до збільшення швидкості на 30 %, що і підтверджувалось експериментально.

Права гранична пускова частота резонансної характеристики п'єзоелектричного двигуна (частота, за якої двигун починає рухатись) практично не змінилася і становила приблизно 78 кГц, при цьому ліва гранична частота (за якої двигун зупинявся) зменшувалась (на рисунках не показано) і становила приблизно 65 кГц, що вказувало на розширення можливого частотного діапазону збудження двигуна.

У середньому робочий діапазон становив 13 кГц (65–78 кГц) (див. рис. 3, б).

Це важливий показник, оскільки робочий частотний діапазон двигуна є одним із головних параметрів при проектуванні драйвера та при роботі двигуна з урахуванням зовнішніх експлуатаційних факторів.

Такий характер зміни резонансних характеристик був практично до 500 000 циклів напрацювання (зниження моменту самогальмування у 2 рази), а характер змін для двигуна  $L$  лівого та правого  $R$  обертання був практично ідентичним.

Після 500 000 циклів зміни резонансних характеристик двигунів стали більш суттєвими та мали, деколи, інший характер.

Після 1 млн циклів (див. рис. 3, в) спостерігалися більш значні зміни резонансних характеристики двигуна  $V(F)$ , при цьому максимум резонансної характеристики двигуна  $R$  правого обертання виріс (швидкість зросла до 90 об/хв), а лівого  $L$  – зменшився (швидкість впала до 55 об/хв).

Частотний діапазон роботи правого двигуна залишився на початковому рівні (65–78 кГц), а лівого зменшився майже у 4 рази і становив 3,5 кГц (71,5–75 кГц) замість 13 кГц. Момент самогальмування як правого, так і лівого двигунів зменшився приблизно в 3 рази.

При цьому резонансна характеристика осцилятора правого двигуна змінилася неістотно (5–10 %) і узгоджувалася з поведінкою двигуна після 500 000 циклів напрацювання.

Але в цьому випадку швидкість двигуна зросла всього у 1,8 разу.

Це вказувало на той факт (згідно з рівнянням (3)), що зменшився пусковий момент в 1,6 разу, що повністю узгоджувалося з експериментом.

Дефектація двигуна показала, що за рахунок значного стирання штовхачів у процесі напрацювання змінився кут їх нахилу, що і вказувало на зміну “наноеліпса” руху в зоні фрикційного контакту.

Максимальна швидкість лівого  $L$  двигуна змінилася неістотно, але значно зменшився частотний діапазон при підвищенні резонансу струму (майже у 2 рази). Це вказувало на інший фізичний процес зміни характеристик лівого двигуна порівняно з правим.

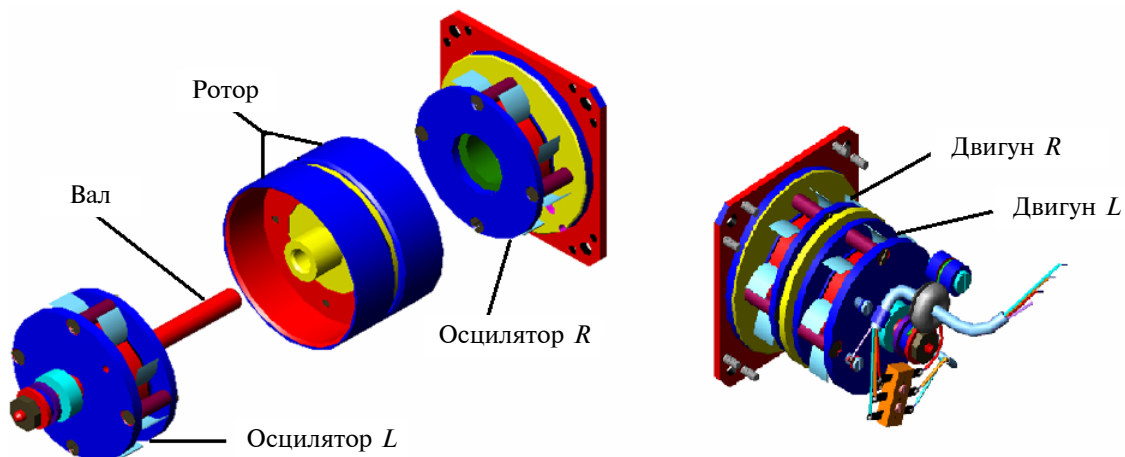


Рис. 4. Елементи конструкції двигуна PM-20R



Різна поведінка резонансних характеристик двигуна правого та лівого обертання пояснюється конструктивними особливостями досліджуваного типу двигуна (рис. 4) і пов'язана з додатковим параметричним збудженням елементів конструкції двигуна [10].

Осцилятор лівого обертання (лівий двигун) розміщений на рухомому повздовжньому валу. При зменшенні моменту самогальмування фрикційний зв'язок осцилятора з ротором зменшується, і виникають додаткові ступені свободи усїєї конструкції.

Виникнення додаткових ступенів свободи створює умови для параметричного збудження більш низьких форм коливань, зокрема згинальних коливань у роторі й валу, на якому жорстко закріплений осцилятор.

Ротор п'єзоелектричного двигуна являє собою кільцеву оболонку, в якій можуть виникати різні типи коливань як за своєю природою (згинальні та поздовжні), так і за частотою і амплітудою.

Розрахункове відношення для частоти згинальних коливань ротора має вигляд

$$F^n = \frac{n(n^2 - 1)}{2\pi\sqrt{1 + n^2}} \sqrt{\frac{EI}{S\rho r^4}},$$

де  $n$  – номер моди коливань;  $I$  – момент інерції перерізу відносно головної осі;  $E$  – модуль Юнга;  $S$  – площа поперечного перерізу кільця;  $r$  – радіус осьового кільця ротора;  $\rho$  – щільність.

Розрахункове відношення для частоти згинальних коливань вала має вигляд

$$f_i = \frac{\pi d(m + 0,5)^2 \sqrt{E}}{4l^2 \sqrt{3\rho}},$$

де  $m$  – номер моди згинальних коливань,  $l$  – довжина вала,  $d$  – діаметр вала.

Найбільш ефективною формою згинальних коливань такої структури ротора є формування стоячої хвилі з чотирма вузлами і чотирма пучностями, форма  $n = 2$ .

Виконані оцінки показують, що частота коливань ротора для форми  $n = 2$  близька (~10 %) до частоти згинальних коливань вала для форми  $n = 1$ , що вказує на можливість параметричного захвату коливань вала коливаннями ротора.

Це своєю чергою приводить до збільшення ймовірності проковзування осцилятора  $L$

відносно ротора, а згідно з принципом роботи цього двигуна рухомий осцилятор  $L$  повинен відштовхуватись від нерухомого ротора.

Таким чином, знижується динамічний фрикційний зв'язок між осцилятором  $L$  і ротором, чим і пояснюється такий характер резонансної характеристики  $V(F)$ .

Це своєю чергою – зменшення ефективності лівого двигуна.

Усього цього не можна сказати про двигун правого обертання. Правий осцилятор  $R$  розміщений на більш жорсткій основі, в якій не виникає додаткового параметричного збудження.

При цьому двигун працює як звичайний двигун нереверсивного обертання, а зміна його параметрів повністю узгоджується зі зменшенням моменту самогальмування – зростають максимуми резонансних характеристик осцилятора  $I(F)$  і двигуна  $V(F)$  (див. рис. 3, в, характеристики  $R$ ).

## Висновки

У роботі представлено розроблений і апробований стенд для контролю резонансних характеристик п'єзоелектричного двигуна залежно від кількості напрацьованих циклів.

Виконано дослідження резонансних характеристик п'єзоелектричного двигуна  $V(F)$  та осцилятора  $I(F)$ . При цьому показано, що в ході напрацювання відбувається значна зміна резонансних характеристик залежно від кількості напрацьованих обертів.

Встановлено, що зі зменшенням моменту самогальмування не завжди збільшуються швидкість обертання та резонансний струм, а різна поведінка резонансних характеристик двигуна правого та лівого обертання пояснюється хвильовими ефектами, що виникають в елементах конструкції п'єзоелектричного двигуна.

Хвильові ефекти мають складну коливальну структуру і, безумовно, підлягають більш детальному дослідженню.

З точки зору ресурсних можливостей двигуна встановлено, що двигун правого обертання має більші ресурсні можливості, ніж двигун лівого обертання, що необхідно враховувати при довгостроковій експлуатації двигуна.

Подальші дослідження спрямовані на вивчення ультраакустичної структури ефектів, що виникають у двигунах лівого та правого обертання, з метою їх компенсації та збільшення ресурсу п'єзоелектричного двигуна реверсивного обертання.

## References

- [1] D. Wang *et al.*, “A monolithic compliant piezoelectric driven microgripper: Design, modeling, and testing”, *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 18, no. 1, pp. 138–147, Feb. 2013. doi: 10.1109/TMECH.2011.2163200
- [2] D. Amin-Shahidi and D.L. Trumper, “Design and control of a piezoelectric driven reticle assist device for prevention of reticle slip in lithography systems”, *Mechatronics*, vol. 24, no. 6, pp. 562–571, 2014. doi: 10.1016/j.mechatronics.2014.03.001
- [3] J. Kongthon and S. Devasia, “Iterative control of piezoactuator for evaluating biomimetic, cilia-based micromixing”, *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 18, no. 3, pp. 944–953, Jun. 2013. doi: 10.1109/TMECH.2012.2194302
- [4] G.-Y. Gu *et al.*, “Motion control of piezoelectric positioning stages: modeling, controller design, and experimental evaluation”, *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 18, no. 5, pp. 1459–1471, Oct. 2013. doi: 10.1109/TMECH.2012.2203315
- [5] G.-Y. Gu *et al.*, “Modeling and control of piezo-actuated nanopositioning stages: A survey”, *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 13, no. 1, 2016. doi: 10.1109/TASE.2014.2352364
- [6] R.J.E. Merry *et al.*, “Modeling and waveform optimization of a nano-motion piezo stage”, *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 16, no. 4, pp. 615–626, Aug. 2011. doi: 10.1109/TMECH.2010.2050209
- [7] S.F. Petrenko *et al.*, “Comparison of piezoelectric and DC motor control principles”, *J. Nano- and Electronic Physics*, vol. 10, no. 5, ID 05032, 2018. doi: 10.21272/jnep.10(5).05032
- [8] Y. Li and Q. Xu, “Design and robust repetitive control of a new parallel kinematic XY piezostage for micro/nanomanipulation”, *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 17, no. 6, pp. 1120–1132, Dec. 2012. doi: 10.1109/TMECH.2011.2160074
- [9] S.F. Petrenko *et al.*, “Piezoelectric motor control system”, *Visnyk NTUU “KPI”. Seriya Pryladobuduvannya*, no. 55, pp. 5–10, 2018. doi: 10.20535/1970.55(1).2018.135857
- [10] S.F. Petrenko, *Piezoelectric Motor in Instrument Making*. Kyiv, Ukraine: Kornijchuk Publ., 2002.
- [11] S.F. Petrenko and O.O. Gorbatiuk, “Research of resource characteristics of a piezoelectric motor”, *Visnyk NTUU “KPI”. Seriya Pryladobuduvannya*, no. 44, pp. 105–111, 2012.
- [12] V.V. Lavrynenko, *Principles of Construction of Piezoelectric Motors. Fundamentals of the Theory and Implementation*. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015, 227 p.
- [13] *dtimotors.com*, ‘PM-20R’ [Online]. Available: <https://www.dtimotors.com/product/pm-20r/>

С.Ф. Петренко, А.В. Омелян, О.О. Горбатюк, В.С. Антонюк

### ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕСУРСНОГО СОСТОЯНИЯ

**Проблематика.** Перспектива использования пьезоэлектрических двигателей в различных отраслях приборостроения, увеличение их ресурсных характеристик, дальнейшее исследование и совершенствование является актуальной проблемой.

**Цель исследования.** Цель работы состоит в исследовании резонансных характеристик пьезоэлектрического двигателя в зависимости от ресурсного состояния.

**Методика реализации.** Поставленная цель работы достигается за счет создания стенда для исследования резонансных характеристик пьезоэлектрического двигателя, выполнения измерений резонансных характеристик пьезоэлектрического двигателя в зависимости от ресурсного состояния и анализа полученных результатов.

**Результаты исследования.** Установлено, что в процессе наработки происходит значительное изменение резонансных характеристик в зависимости от количества наработанных оборотов. Показано, что не всегда с уменьшением момента самоторможения увеличиваются скорость вращения и резонансный ток. Установлено разное поведение резонансных характеристик двигателя правого и левого вращения, что объясняется волновыми эффектами, возникающими в элементах конструкции пьезоэлектрического двигателя. С точки зрения ресурсных возможностей пьезоэлектрического двигателя установлено, что двигатель правого вращения имеет большие ресурсные возможности, чем двигатель левого вращения, что необходимо учитывать при долгосрочной его эксплуатации.

**Выводы.** В результате проведенных исследований разработан и апробирован стенд для контроля резонансных характеристик пьезоэлектрического двигателя в зависимости от количества наработанных циклов. Выполнены исследования изменения резонансных характеристик пьезоэлектрического двигателя от количества наработанных циклов до одного миллиона. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение ультразвуковой структуры эффектов, возникающих у двигателей левого и правого вращения, с целью их компенсации и увеличения ресурса пьезоэлектрического двигателя реверсивного вращения.

**Ключевые слова:** пьезоэлектрический двигатель; ресурс; резонансные характеристики; долгосрочная эксплуатация.

S.F. Petrenko, A.V. Omelian, O.O. Horbatiuk, V.S. Antonyuk

### RESEARCH OF THE RESONANT CHARACTERISTICS OF THE PIEZOLE-ELECTRIC ENGINE IN DEPENDENCE ON RESOURCE STATE

**Background.** Possibility of using piezoelectric engines in various branches of instrument-making industry, increasing its resource characteristics, further research and improvement is a pressing issue.

**Objective.** The aim of the paper is to research the resonance characteristics of a piezoelectric engine depending on the resource state.

**Methods.** The research goal is achieved by creating test bench for studying the resonance characteristics of piezoelectric engine, measuring the resonance characteristics of piezoelectric engine depending on the resource state and analyzing the results obtained.

**Results.** It was established that in the process of development there was a significant change in the resonance characteristics depending on number of accumulated turns. It is shown that the rotation speed and the resonant current don't always increase with a decrease in the self-braking torque. The different behavior of the resonance characteristics for motor of the right and left rotation is determined, due to the wave effects that occur in the structural elements of the piezoelectric motor. From the point of view of resource potential of the piezoelectric engine, it has been established that the right-hand engine has greater resource potential than the left-hand engine, which must be addressed in its long-term operation.

**Conclusions.** As a result of the research conducted, a stand was developed and tested to monitor the resonant characteristics of the engine depending on the number of accumulated cycles. Studies of changes in the resonant characteristics of the engine from the number of accumulated cycles to one million were carried out. Further research will be directed to study the ultra-acoustic structure of the effects arising from the left and right rotation motors in order to compensate them and increase the resource of the piezoelectric reverse rotation motor.

**Keywords:** piezoelectric motor; resource; resonance characteristics; long-term operation.

Рекомендована Радою  
приладобудівного факультету  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
28 грудня 2018 року

Прийнята до публікації  
28 лютого 2019 року