Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”
Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

Омелян Анатолій Васильович

УДК 621.3

ДИСЕРТАЦІЯ

МЕТОДИ ТА СИСТЕМА ПІДВИЩЕНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ П’ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИМ МІКРОМАНІПУЛЯТОРОМ

17 Електроніка та телекомунікації

172 Телекомунікації та радіотехніка

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____/Омелян А.В.

Науковий керівник: Лисенко Олександр Миколайович, доктор технічних наук, професор

Київ – 2022

АНОТАЦІЯ

Омелян А.В. Методи та система підвищеної ефективності керування п’єзоелектричним мікроманіпулятором. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 “Телекомунікації та радіотехніка”. – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, МОН України, Київ, 2022.

Дисертаційна роботи присвячена вирішенню актуальної та важливої науково-прикладної задачі підвищення ефективності керування п’єзоелектричним мікроманіпулятором на базі лінійних п’єзоелектричних двигунів на стоячих акустичних хвилях з прямокутним резонатором в мікро- та нанодіапазонах швидкостей, що досягнуто за рахунок подальшого розвитку і вдосконалення існуючих методів керування п’єзоелектричним мікроманіпулятором, розробки програмно-апаратних рішень, їх реалізації та системи керування на їх основі.

Під *ефективністю* тут розуміється *бажана* відповідність наступним критеріям:

-широкий діапазон швидкості руху;

-низький рівень вібрацій;

-точність позиціонування;

-маневреність (точна та швидка реакція на команду керування).

Зміст дисертаційного дослідження викладено у чотирьох розділах, в яких представлені та обґрунтовані основні результати роботи.

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету та вказано поставлені задачі дослідження, описано методи дослідження, представлено інформацію про наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, їх апробацію та публікації по роботі.

У першому розділі проведено аналіз мікроманіпуляційної системи, її конструкції, а також основних компонентів. Досліджено основний елемент мікроманіпулятора – лінійний п’єзоелектричний двигун. Детально проаналізовано

кожен елемент конструкції двигуна для розуміння функцій, які він виконує. Особливу увагу приділено направляючій двигуна (каретці), від якої залежить лінійність її руху та робочого інструменту маніпулятора, а також п’єзоелектричному резонатору, оскільки розуміння процесів, які відбуваються в ньому при прикладанні різних збуджень (сигналів керування), дало змогу визначити шляхи підвищення ефективності роботи двигуна та мікроманіпуляційної системи в цілому. Розглянуто принцип формування механічних коливань в п`єзоелектричному елементі, а також види деформацій, які можна збудити в ньому. Розглянуто умови, при яких штовхач (“зуб”) п’єзоелектричного резонатора здійснює коливальні рухи по траєкторії еліпсу та за рахунок фрикційного контакту між штовхачем і кареткою відбувається лінійний рух каретки.

В другому розділі розглянуто систему контролю кутової стабільності лінійного п’єзоелектричного двигуна (каретки двигуна), яка забезпечила вимірювання його кутових переміщень Roll(θx), Pitch(θy) та Yaw(θz). Представлено результати проведених досліджень, наведено алгоритмічні та програмні рішення для обробки зображень в створеній системі, які забезпечили вимірювання кутової нестабільності п’єзоелектричного двигуна в режимі реального часу, що дало змогу суттєво скоротити час проведення експерименту. Представлено математичну модель переміщення робочого інструменту маніпуляційної системи під впливом кутових відхилень Pitch та Yaw.

В третьому розділі проведено моделювання механічних коливань п’єзоелектричного резонатора двигуна за допомогою програмного комплексу Comsol Multiphysics. Показано форму та характер механічних коливань п’єзоелектричного резонатора при збудженні в ньому різних мод коливань (а саме першої, другої та результуючої – робочої). Розглянуто процес регулювання зсуву частот резонансних кривих першої та другої мод між собою для забезпечення умови виникнення зсуву між взаємно перпендикулярними механічними коливання штовхача (“зуба”) рівною 90° шляхом зміни розмірів довжини та

ширини п’єзоелектричного резонатора. Обґрунтовано необхідність вибору саме правого електричного резонансного піка двигуна при його керуванні.

В четвертому розділі проведено удосконалення методів керування п’єзоелектричного двигуна, які забезпечили підвищення ефективності його керування, а як наслідок і п’єзоелектричного мікроманіпулятора в цілому. Наведено результати досліджень п’єзоелектричного двигуна, а саме:

-електричні резонанси мод двигуна (першої, другої та результуючої);

-залежність швидкості двигуна від частоти збудження резонатора двигуна;

-старт-стопна навантажувальна характеристика двигуна (швидкість розгону двигуна і зупинки) в залежності від напрямку руху та прикладеного навантаження при фіксованій частоті збудження (X,Y та Z координат);

-навантажувальні характеристики двигуна в залежності від напрямку руху та прикладеного навантаження (X,Y та Z координат);

-величина кроку двигуна в залежності від частоти збудження та кількості періодів збудження;

-навантажувальні характеристики двигуна (величина кроку при прикладенні навантаження) в кроковому режимі роботи в залежності від кількості імпульсів збудження (X,Y та Z координат).

Наведено розроблені програмно-апаратні рішення реалізації запропонованих удосконалених методів керування п’єзоелектричним мікроманіпулятором та макет системи на їх основі, а також результати їх дослідження.

В дисертаційній роботі отримано наступні нові наукові результати дослідження:

1.Вперше запропоновано удосконалення методу керування п’єзоелектричним двигуном з прямокутним резонатором на основі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) шляхом мінімізації швидкості двигуна при його старті та зупинці, що дозволило зменшити рівень шумів та вібрацій в 2-10 разів при роботі в мікродіапазоні швидкостей.

2.Вперше запропоновано удосконалення методу керування п’єзоелектричним двигуном, який забезпечив режим керування швидкістю в

нанодіапазоні швидкостей за рахунок використання фіксованої кількості імпульсів збудження (до 20 в послідовності) з регулюванням частоти слідування цих послідовностей, яка формувалася механічним засобом керування мікроманіпулятором (джойстик, трекбол), що дозволило підвищити маневреність керування більше, ніж у 2 рази.

3.Вперше запропоновано удосконалення методу підвищення точності позиціонування п’єзоелектричного мікроманіпулятора в автоматичному режимі за рахунок уникнення перерегулювань шляхом зміни переміщення маніпулятора при безперервному русі до крокового режиму руху з подальшою зупинкою в точці позиціонування, що забезпечило підвищення точності позиціонування до рівня (5-10) мкм.

4.Розроблено математичну модель переміщення робочого інструменту маніпуляційної системи під впливом кутових відхилень Pitch та Yaw, яка дозволяє алгоритмічно компенсувати дані відхилення для мінімізації похибки позиціонування мікроманіпулятора з врахуванням експериментальних даних, отриманих при дослідженні направляючих двигунів.

5.На основі дослідження характеристик п’єзоелектричного двигуна встановлено, що його резонансна характеристика має два резонансні піки, при цьому керування його швидкістю слід здійснювати шляхом регулювання частоти збудження в зоні керування, яка знаходиться на правому схилі правого резонансного піка.

6.Виконано моделювання механічних коливань п’єзоелектричного резонатора двигуна, що дозволило підтвердити необхідність вибору саме правого електричного резонансного піка двигуна при його керуванні.

Отримано наступні практичні результати досліджень:

1.Розроблено алгоритмічні та програмні рішення реалізації удосконалених методів керування п’єзоелектричним мікроманіпулятором / двигуном, що дозволило досягти діапазон керування по швидкості 140 мм/с - 0.05 мм/с, точність позиціювання з енкодерною версією (5-10) мкм і, як наслідок, в середньому

підвищило ефективність мікроманіпуляторної системи по цим параметрам у порівнянні з існуючими рішеннями у 2 рази.

2.Створено засоби контролю параметрів нових п’єзоелектричних двигунів, які дозволяють вимірювати характеристики п’єзоелектричного резонатора, досліджувати точність переміщень лінійних направляючих та здійснювати вимірювання вібраційних ефектів при дослідженні нових методів керування п’єзодвигуном та скоротити час тестування в середньому в 1.5-2 рази.

3.Створено макет системи керування п’єзоелектричним мікроманіпулятором на основі розроблених методів керування лінійним п’єзоелектричним двигуном з підвищеною ефективністю керування в середньому в 2 рази, зокрема:

-діапазон швидкості руху – розширення до рівня (0.05-140) мм/с.

-низький рівень вібрацій – зменшення рівня вібраційних ефектів в 2-10 разів в залежності від діапазону робочої швидкості.

-точність позиціонування – підвищення точності позиціонування до рівня (5-10) мкм.

-маневреність – зменшення часу відклику джойстику з 10 мс до 5 мс, переведення двигуна в режим нанокроків (200-300) нм.

Отримані практичні результати дослідження можуть буди використані при побудові систем, які повинні виконувати точне переміщення об’єктів в мікро- та нанопросторі з високою точністю та швидкодією.

Одержані в дисертації нові результати знайшли застосування на підприємстві ТОВ «Лілея» (м. Київ), що підтверджується відповідним актом від 23.09.2022 про впровадження запропонованих методів керування швидкістю, контролю параметрів п’єзодвигуна, динамічного контролю лінійних параметрів направляючих мікроманіпулятора та розробленого програмного забезпечення Driver Rev.J, Rev.H в системах керування мікроманіпуляторних п’єзоелектричних двигунів LPM-2M, LPM-5 та LPM-1.

Ключові слова: мікроманіпуляційна система, п’єзоелектричний двигун, точність, маневреність, низький рівень вібрацій, методи керування.

SUMMARY

Anatolii Omelian Methods and system of increasing the efficiency of piezoelectric micromanipulator control. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Philosophy Doctor, in specialty 172 “Telecommunications and Radio Engineering”. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2022.

The dissertation is devoted to solving the actual and important scientific and applied problem of improving the control efficiency of a piezoelectric micromanipulator based on linear piezoelectric motors on standing acoustic waves with a rectangular resonator in the micro- and nanospeed ranges, which was achieved due to the further development and improvement of existing control methods piezoelectric micromanipulator, development of hardware and software solutions, their implementation and control systems based on them.

Effectiveness here means *the desired* compliance with the following criteria:

- a wide range of movement speed;
- low vibration level;
-accuracy of positioning;
-maneuverability (accurate and quick reaction to the control command).

The content of the dissertation research is presented in four sections, in which the main results of the work are presented and substantiated.

The introduction substantiates the relevance of the dissertation work, formulates the goal and indicates the research tasks, describes the research methods, presents information about the scientific novelty and practical significance of the obtained results, their approval and publication of the work.

The first section considers an analysis of the micromanipulation system, its design, and the main components. The main element of the micromanipulator was studied – a linear piezoelectric motor. Each element of the engine design is analyzed in detail to understand the functions it performs. Special attention is paid to the motor guide (carriage), which depends on the linearity of its movement and the working tool

of the manipulator, as well as to the piezoelectric resonator, since understanding the processes that take place in it when various excitations (control signals) are applied makes it possible to determine ways to improve efficiency operation of the engine and the micromanipulation system as a whole. The principle of the formation of mechanical vibrations in a piezoelectric element, as well as the types of deformations that can be induced in it, are considered. We have considered the conditions under which the pusher ("tooth") of the piezoelectric resonator performs oscillating movements along the trajectory of the ellipse, and due to the frictional contact between the pusher and the carriage, linear movement of the carriage occurs.

The second section present the angular stability control system of the linear piezoelectric motor (motor carriage), which provided measurement of its angular displacements Roll(θx), Pitch(θy) and Yaw(θz). The results of the conducted research are presented, algorithmic and software solutions for image processing in the created system are presented, which ensured the measurement of the angular instability of the piezoelectric motor in real time, which made it possible to significantly reduce the time of the experiment. Presented of mathematical model of the movement of the working tool of the manipulation system under the influence of Pitch and Yaw angular deviations.

The third section presents the mechanical oscillations of the piezoelectric resonator of the engine are modeled using the Comsol Multiphysics software complex. The form and nature of mechanical vibrations of a piezoelectric resonator when different modes of oscillations are excited in the resonators (namely, the first, second, and the resulting operating modes) are shown. The process of adjusting the frequency shift of the resonance curves of the first and second modes between each other to ensure the conditions for the occurrence of a shift between mutually perpendicular mechanical oscillations of the pusher (“tooth”) at the level of 90° by changing the dimensions of the length and width of the piezoelectric resonator is considered. The necessity of choosing the right electrical resonance peak of the motor during its control is substantiated.

The fourth section provides the methods of controlling the piezoelectric motor were improved, which ensured an increase in the efficiency of its control, and as a

result, of the piezoelectric micromanipulator as a whole. The results of research on the piezoelectric motor are given, namely:

-resonance curves of engine modes (first, second and resulting);

-dependence of the engine speed on the excitation frequency of the engine resonator;

-start-stop loading characteristics of the engine (speed of engine acceleration and stopping) depending on the direction of movement and the applied load at a fixed frequency of excitation (X, Y and Z coordinates);

-load characteristics of the engine depending on the direction of movement and the applied load (X, Y and Z coordinates);

-the size of the motor step depending on the excitation frequency and the number of excitation periods;

-load characteristics of the engine (step size when applying the load) in the step mode of operation depending on the number of excitation pulses (X, Y and Z coordinates).

The developed software and hardware solutions for the implementation of the proposed improved methods of controlling the piezoelectric micromanipulator and the layout of the system based on them are presented, as well as the results of their research.

The following research results were obtained in the dissertation work:

1.For the first time, an improvement of the method of controlling a piezoelectric motor with a rectangular resonator based on pulse width modulation (PWM) was proposed by minimizing the speed of the motor during its start and stop, which made it possible to reduce the noise and vibration level by 2-10 times when working in the micro speed range.

2.For the first time, an improvement of the piezoelectric motor control method was proposed, which provided a speed range control mode in the nanorange by using a fixed number of excitation pulses (up to 20 in a sequence) with regulation of the frequency of following these sequences, which was formed by a mechanical means of controlling a micromanipulator (joystick, trackball), which made it possible to increase control maneuverability by more than 2 times.

3.For the first time, an improvement of the method of increasing the positioning accuracy of the piezoelectric micromanipulator in automatic mode by avoiding over-adjustments by changing the movement of the manipulator during continuous movement to a step mode of movement with subsequent stopping at the positioning point is proposed. This ensured an increase in positioning accuracy to the level of (5-10) microns.

4.A mathematical model of the movement of the working tool of the manipulation system under the influence of Pitch and Yaw angular deviations has been developed, which allows algorithmically compensating the deviation data to minimize the positioning error of the micromanipulator, taking into account the experimental data obtained during the study of the guide motors.

5.Based on the research of the characteristics of the piezoelectric motor, it was established that its resonance characteristic has two resonance peaks, while its speed should be controlled by adjusting the excitation frequency in the control zone, which is located on the right slope of the right resonance peak.

6.Simulation of mechanical vibrations of the piezoelectric resonator of the engine was performed, which allowed to confirm the necessity of choosing the right electrical resonance peak of the engine during its control.

The following practical research new results were obtained:

1.Algorithmic and software solutions for the implementation of improved methods of controlling the piezoelectric micromanipulator / motor, which made it possible to achieve a speed control range of 140 mm/s - 0.05 mm/s, positioning accuracy with the encoder version (5-10) μm and, as a result, on average, it increased the efficiency of the micromanipulator system in these parameters compared to existing solutions by 2 times.

2.Means of controlling the parameters of new piezoelectric motors, which allow measuring the characteristics of the piezoelectric resonator, investigating the accuracy of linear guide movements and measuring vibration effects when researching new methods of controlling the piezoelectric motor and, as a result, reducing the testing time by an average of 1.5 -2 times.

3.Stand of a piezoelectric micromanipulator control system based on the developed methods of controlling a linear piezoelectric motor with increased control efficiency by an average of 2 times, in particular:

- range of movement speed – expansion to the level of (0.05-140) mm/s.

-low vibration level – reduction of the level of vibration noise by 2-10 times depending on the operating speed range.

-positioning accuracy – increasing the positioning accuracy to the level of (5-10)μm.

-maneuverability – reducing the joystick response time from 10 ms to 5 ms, switching the engine to the mode of nanosteps (200-300) nm.

The obtained practical results of the research can be used in the construction of systems that must perform accurate movement of objects in micro- and nanospace with high accuracy and speed.

The new results obtained in the dissertation were applied at the enterprise "Lileya" LLC (Kyiv), which is confirmed by the relevant act dated 23.09.2022 on the implementation of the proposed methods of speed control, control of piezo motor parameters, dynamic control of linear parameters of micromanipulator guides and developed software Driver Rev.J, Rev.H in control systems of micromanipulator piezoelectric motors LPM-2M, LPM-5 and LPM-1.

Key words: micromanipulation system, piezoelectric motor, precision, maneuverability, low vibration level, control methods.

Список публікацій здобувача

1.С.Ф.Петренко, А.В.Омелян, В.С.Антонюк, та О.Г.Новаковський, «Система керування п’єзоелектричним двигуном», *Вісник НТУУ ”КПІ”. Серія Приладобудування,* №55, с.5-10, 2018. doi:10.20535/1970.55(1).2018.135857 (фахове видання категорії Б).

2.С.Ф.Петренко, А.В.Омелян, В.С.Антонюк, та О.Г.Новаковський, «Порівняння принципів керування п’єзоелектричним двигуном та двигуном постійного струму», *Журнал нано- та електронної фізики*, т.10, №5, с.05032-1 - 05032-4, 2018. doi:10.21272/jnep.10(5).05032 (фахове видання категорії А).

3.С.Ф.Петренко, А.В.Омелян, О.О.Горбатюк, та В.С.Антонюк, «Дослідження ресурсних характеристик п’єзоелектричного двигуна залежно від ресурсного стану», *Наукові вісті КПІ,* №1, с.59-66, 2019. doi: 10.20535/kpi-sn.2019.1.157272 (фахове видання категорії Б).

4.С.Ф.Петренко, А.В.Омелян, О.М.Лисенко, та В.С.Антонюк, «Дослідження супутнього ударно-вібраційного шуму п’єзоелектричного двигуна в режимі мікро- та наношвидкостей», *Вісник НТУУ ”КПІ”. Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування,* №78, с.67-73, 2019. doi: 10.20535/RADAP.2019.78.67-73(фахове видання категорії А).

5.А.В.Омелян, О.М.Лисенко, та С.Ф.Петренко, «Система контролю кутової стабільності лінійного п’єзоелектричного двигуна», *Мікросистеми, Електроніка та Акустика: науково-технічний журнал*, т.24, №6(113), с.22-28, 2019. doi: 10.20535/2523-4455.2019.24.6.196684 (фахове видання категорії Б).

6.С.Ф.Петренко, та А.В.Омелян, «Спосіб керування п’єзоелектричним двигуном»,UA123316, 17.03.2021 (патент на винахід).

7.А.В.Омелян, «Стенд для аналіза вібраційно-шумових характеристик п’єзоелектричних двигунів», на *XI Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених «Електроніка-2018» (ELCONF-2018)*, Київ,2018, с.206-209 (матеріали конференції).

8.А.В.Омелян, С.Ф.Петренко, та О.Г.Новаковський, «Стенд для дослідження резонансних характеристик осциляторів п’єзоелектричних двигунів», на *VII Міжнародній науково-технічній конференції “Датчики, прилади та системи - 2018” (ДПС-2018),* м.Черкаси, 17-21 вересня 2018, с.22-24 (матеріали конференції).

9.А.В.Омелян, та С.Ф.Петренко, «Мікроманіпулятор на базі лінійних п’єзоелектричних двигунів», на *VII Міжнародній науково-технічній конференції “Датчики, прилади та системи - 2018” (ДПС-2018),* м.Черкаси, 17-21 вересня 2018, с.78-79 (матеріали конференції).

10.А.В.Омелян, С.Ф.Петренко, О.Г.Новаковский та В.С.Антонюк, «Исследования резонансные характеристик осциллятора пьезоэлектрических двигателей», на *11-й Международной научно-технической конференции “Приборостроение – 2018”*, г.Минск, 14-16 ноября 2018, ст.145-147 (матеріали конференції).

11.А.В.Омелян, та С.Ф.Петренко, «Алгоритмічні рішення керування п’єзоелектричним двигуном в режимі мікро- та наношвидкостей», на *VIII Міжнародній науково-технічній конференції “Датчики, прилади та системи-2019”*, Черкаси – Херсон – Лазурне, вересень 2019, с.39-41 (матеріали конференції).

12. А.В.Омелян, «Керування швидкістю п’єзоелектричного двигуна в мікро- та нанодіапазонах», на *XVIII Міжнародній науково-технічній конференції “Приладобудування: стан і перспективи”*, м.Київ, 15-16 травня 2019, с.92-93 (матеріали конференції).

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ 17

ВСТУП..... 18

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МІКРОМАНІПУЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ, ЇЇ КОНСТРУКЦІЇ ТА ОСНОВНИХ КОМПОНЕНТІВ 27

1.1. Мікроманіпуляційна система та її конструкція 27

1.2. Лінійний п’єзоелектричний двигун..... 29

1.2.1. Принцип роботи 29

1.2.2. Складові частини 30

1.2.2.1. Резонатор 31

1.2.2.2. Каретка (направляюча)..... 55

1.2.2.3. Підвіска 58

1.2.3. Конструкція двигуна..... 59

Висновки по розділу 1……60

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ КОНСТРУКЦІЇ П’ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПЕРЕМІЩЕННЯ РОБОЧОГО ОРГАНУ МІКРОМАНІПУЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ..... 62

2.1. Мертвий хід 62

2.2. Кутова стабільність мікроманіпуляційної системи 64

2.2.1. Математична модель впливу кутів Pitch, Yaw та Roll на відхилення від прямолінійної траєкторії руху направляючої п’єзоелектричного двигуна64

2.2.2. Математична модель переміщення трьохосьової лінійної мікроманіпуляційної системи 69

2.2.3. Дослідження кутової стабільності п’єзоелектричного двигуна на базі лінійної направляючої BSP-1540SL..... 72

2.2.3.1. Опис експериментальної установки 73

2.2.3.2. Алгоритм проведення експерименту 76

2.2.3.3. Результати експерименту 79

Висновки по розділу 2……80

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ ПРЯМОКУТНОГО РЕЗОНАТОРА ЛІНІЙНОГО П’ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА 82

3.1. Отримання резонансних характеристик резонатора 83

3.2. Форма механічних коливань резонатора 84

3.3. Корекція зсуву фаз між модами коливань 87

Висновки по розділу 3……90

РОЗДІЛ 4. МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ П’ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИМ МІКРОМАНІПУЛЯТОРОМ 91

4.1. Метод стабілізації швидкості в безперервному режимі 91

4.2. Метод розширення динамічного діапазону руху за швидкістю 102

4.2.1. Принцип базового методу керування 102

4.2.2. Вдосконалений метод керування швидкості 105

4.2.3. Дослідження ефективності вдосконаленого методу 109

4.2.3.1. Драйвер п’єзоелектричного двигуна 110

4.2.3.2. Принцип роботи стенду 112

4.2.3.3. Результати досліджень 113

4.3. Методи мінімізації ударно-вібраційних характеристик п’єзоелектричного двигуна 114

4.3.1. Стенд для вимірювання ударно-вібраційних характеристик п’єзоелектричного двигуна 114

4.3.2. Дослідження ударно-вібраційного ефекту 116

4.3.3. Частотно-безперервний метод керування 118

4.3.4. Імпульсно-гармонійний метод керування 120

4.3.5. Частотно-імпульсний метод керування 125

4.4. Метод підвищення маневреності мікроманіпулятора 127

4.5. Метод підвищення точності позиціонування мікроманіпулятора 130

4.6. Оціночні характеристики двигуна 135

4.6.1. Стабільність швидкості руху 135

4.6.2. Девіація швидкості двигуна 136

4.6.3. Моди резонатора та резонансні характеристики 137

4.7. Стенд для дослідження представлених характеристик 138

4.8. Система керування п’єзоелектричним мікроманіпулятором 139

4.9. Прототип системи керування п’єзоелектричним мікроманіпулятором ... 140

Висновки по розділу 4……...142

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 144

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 147

ДОДАТОК А. 3D МОДЕЛЬ МІКРОМАНІПУЛЯТОРА 152

ДОДАТОК Б. 3D МОДЕЛЬ ЛІНІЙНОЇ НАПРАВЛЯЮЧОЇ BSP-1540SL 153

ДОДАТОК В. 3D МОДЕЛЬ ЛІНІЙНОГО П’ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА 154

ДОДАТОК Г. ПРОТОТИП СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ П’ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИМ МІКРОМАНІПУЛЯТОРОМ……...155

ДОДАТОК Д. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ……...156

ДОДАТОК Е. АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ……158

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ШІМ	широтно-імпульсна модуляція
ПЕ	п'єзоелектричний елемент
ПК	персональний комп’ютер
нм	нанометри
мкм	мікрометри
USB	універсальна послідовна шина
UART	універсальний асинхронний приймач/передавач

ВСТУП

Актуальність роботи. Розвиток сучасних нано- та мікротехнологій неможливий без створення спеціальних пристроїв та систем, які дозволяють маніпулювати мікрооб'єктами в мікронних та субмікронних діапазонах. Такі технічні рішення називаються мікроманіпуляторами та наноманіпуляторами.

Коли постає завдання виконати переміщення об'єкту у просторі, насамперед, виникає запитання, на основі якого типу двигуна використовувати маніпулятор об'єктів? Звісно, все залежить від вимог, які висуваються до даного пристрою.

Розглянемо основні типи маніпуляторів, найбільш поширених в наш час.

1.Ручні маніпулятори. Даний тип маніпулятора є найпростішим, надійним, має низьку вартість. До недоліків таких маніпуляторів слід віднести ручне керування та низьку точність маніпуляцій, яка залежить не тільки від самої конструкції маніпулятора, а й від навиків користувача та його емоційного стану.

В якості прикладу можна навести маніпулятори фірми Narishige [1], такі як MMN-1,MN-4,MM-89. Однак, маніпулятори такого типу мають невелику роздільну здатність ~(10 - 100) мкм, що обмежує їх область застосування.

2.Гідравлічні маніпулятори. Широкого розповсюдження отримали в сфері медицини. Маніпулятори даного типу характеризуються високою плавністю руху, простим маневруванням, відносно високим рівнем роздільної здатності (~0.2мкм), широким діапазоном швидкості руху. Основним їх недоліком є те, що ці маніпулятори не можуть працювати як позиціонер, тобто утримувати задану позицію протягом часу, а також для них відсутня можливість або наявна складність реалізації системи автоматичного керування. Також непередбачуваною може бути ситуація заповітрювання системи, що призводить до втрати її працездатності.

Провідним лідером по виготовленню маніпуляторів даного типу є фірма Narishige (трьохосьові маніпулятори MMO-202ND, MMO-203).

3.Маніпулятори на базі двигунів постійного струму. На відміну від гідравлічного, ці маніпулятори не мають температурного дрейфу, тобто є позиціонером. Для прикладу можна навести маніпулятори фірми Narishige, зокрема, такі як ММ-92, ММ-94. До їх недоліків слід віднести незначну роздільну здатність (~10 мкм) та низькі динамічні характеристики (максимальна швидкість до 1.4 мм/с).

4.Мікроманіпулятори на крокових двигунів. Ці маніпулятори мають високу роздільну здатність (<20 нм), відсутність вібрацій, можуть виступати в ролі позиціонера, а їх рух може бути програмованим. Найбільш відомим представником цього класу є маніпулятор TransferMan фірми Eppendorf [2]. Однак, такі маніпулятори мають складну конструкцію, а відповідно і високу вартість та складність керування на малих швидкостях.

5.П’єзотранслятори. Цей клас маніпуляторів має високу швидкодію, але, на жаль, малу дистанцію переміщення. Використовується, наприклад, для проколювання мембрани клітини. Встановлюється додатково на вісь маніпулятора. Прикладом п’єзотранслятору є MPM-20 фірми World Precision Instruments [3].

6.Мікроманіпулятори на базі п’єзоелектричних двигунів. Ці маніпулятори є позиціонерами, мають високу роздільну здатність (<1 нм) та високі динамічні характеристики. Яскравим представником такого типу маніпулятора є PSF-3 (побудований на базі обертального двигуна PM-20R) фірми “Лілея” [4]. До їх недоліків слід віднести складність конструкції та високу вартість.

В час ринкової економіки одним з основних критеріїв вибору маніпулятора є ціна, яка здебільшого залежить від складності його конструкції та характеристик. Оскільки маніпулятор здійснює в просторі саме лінійне переміщення, а двигуни, які використовуються в них, здебільшого обертального принципу дії, то, відповідно, такі маніпулятори мають у своєму складі додатковий вузол перетворення обертального руху в лінійний, якість виготовлення якого першочергово впливає на характеристики маніпулятора та кінцеву ціну пристрою. Якщо ж розглянути маніпулятори прямого принципу дії (механічні, гідравлічні

маніпулятори та п’єзотранслятори), то вони мають теж ряд недоліків, які, однак, є неприпустимими при сучасних рівнях технологій:

-механічні маніпулятори – низька точність;

-гідравлічні маніпулятори – складність або відсутність можливості реалізації системи автоматичного керування;

-п’єзотранслятори – вузький діапазон переміщення.

Наразі найбільш перспективним та маловивченим типом двигунів є лінійний п’єзоелектричний двигун з прямокутним резонатором, який зберіг основні властивості обертального двигуна, однак, «відмовився» від додаткового вузла конвертації обертального руху в лінійний. В результаті це спростило конструкцію двигуна та його вартість.

Звісно, це не є ідеальним двигуном, він має певні недоліки, вирішення яких дозволить розширити різноманіття пристроїв, в яких він може бути застосований та їх функціональні характеристики.

Однією із суттєвих переваг п’єзоелектричного двигуна є старт-стопні характеристики, які характеризуються можливістю двигуна миттєво стартувати та зупинятися, а також утримувати задане положення, не прикладаючи при цьому додаткової енергії чи зусиль. При роботі двигуна в кроковому режимі виникають вібраційні ефекти, що пов’язані з високим рівнем прискорення двигуна при старті та його зупинці. Описані ефекти є недопустимими при роботі маніпулятора, а особливо при його використанні в сфері медицини (клітинні технології).

Значний внесок у дослідження та розв’язання завдань керування п’єзоелектричними двигунами мікроманіпуляторів зробили такі вітчизняні вчені, як Петренко С.Ф., Лавриненко В.В, Філімонов С.О, Бондаренко М.О., Шарапов В.М., Ярошенко В.А., Білорусов Є.В.

На сьогоднішній день методи та алгоритми, які використовуються для керування п’єзоелектричним двигуном в мікро- та нанодіапазонах швидкостей, на жаль, не забезпечують достатню ефективність його роботи, що призводить до погіршення характеристик пристрою, в якому він використовується (маніпулятора

в даному випадку). Під *ефективністю* тут розуміється *бажана* відповідність наступним критеріям:

-широкий діапазон швидкості руху;

-низький рівень вібрацій;

-точність позиціонування;

-маневреність (точна та швидка реакція на команду керування).

Це власне і визначає необхідність подальшого розвитку і вдосконалення існуючих методів керування п’єзоелектричним мікроманіпулятором на базі лінійних п’єзоелектричних двигунів на стоячих акустичних хвилях з прямокутним резонатором в мікро- і нанодіапазонах швидкостей руху та створення на їх основі системи керування підвищеної ефективності як актуальну та **важливу** науково-прикладну задачу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась згідно з тематичними планами НДР КПІ ім. Ігоря Сікорського і кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури (КЕОА) в межах НДР «Методи керування п’єзоелектричними двигунами та мікроманіпуляторами на їх основі», шифр ФЕЛ-4/13, РК № 0118U003673 та на підприємстві-стейкхолдері ТОВ «Лілея» (м. Київ) в рамках договору про співпрацю між зазначеним підприємством і КПІ ім. Ігоря Сікорського від 17 січня 2022р. № Д/0002.01/2220.01/12/2022.

Мета і завдання дослідження.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності керування п’єзоелектричним мікроманіпулятором на базі лінійних п’єзоелектричних двигунів на стоячих акустичних хвилях з прямокутним резонатором в мікро- та нанодіапазонах швидкостей руху шляхом подальшого розвитку і вдосконалення існуючих методів керування п’єзоелектричним мікроманіпулятором, розробки програмно-апаратних рішень, їх реалізації та системи керування на їх основі.

Досягнення мети передбачає розв’язання наступних *завдань:*

1.Дослідження принципу роботи п’єзоелектричного двигуна з прямокутним резонатором та елементів конструкцій мікроманіпуляційної системи.

2.Дослідження механічних елементів конструкції двигуна / мікроманіпулятора, які впливають на точність руху.

3.Моделювання процесів, які відбуваються в п’єзоелектричному елементі двигуна під дією керуючих сигналів.

4.Дослідження характеристик п’єзоелектричного двигуна та розробка удосконалених методів керування п’єзоелектричним мікроманіпулятором на його основі.

5.Створення системи підвищеної ефективності керування п’єзоелектричним мікроманіпулятором.

Об’єкт досліджень: процес керування мікроманіпулятором на базі лінійного п’єзоелектричного двигуна на стоячих акустичних хвилях з прямокутним резонатором.

Предмет дослідження: методи керування мікроманіпулятором на базі лінійного п’єзоелектричного двигуна та системи на їх основі.

Методи дослідження: в основу загальної методології роботи покладено системний підхід до об’єкту дослідження та його структурного аналізу з застосуванням декомпозиції. Моделювання механічної деформації прямокутного резонатора під впливом електричного поля проводилося за допомогою методу скінченних елементів в програмному середовищі Comsol Multiphysics.

Метод керування ПД на основі ШІМ, метод підвищення точності позиціонування.

Обробка результатів експериментальних досліджень проводилася стандартними методами.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

-вперше запропоновано удосконалення методу керування п’єзоелектричним двигуном з прямокутним резонатором на основі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) шляхом мінімізації швидкості двигуна при його старті та зупинці, що дозволило зменшити рівень вібраційних ефектів в 2-10 разів при роботі в мікродіапазоні;

-вперше запропоновано удосконалення методу керування п’єзоелектричним двигуном, який забезпечив режим керування швидкістю в нанодіапазоні за рахунок використання фіксованої кількості імпульсів збудження (до 20 в послідовності) з регулюванням частоти слідування цих послідовностей, яка формувалася механічним засобом керування мікроманіпулятором (джойстик, трекбол), що дозволило підвищити маневреність керування більше, ніж у 2 рази;

-вперше запропоновано удосконалення методу підвищення точності позиціонування п’єзоелектричного мікроманіпулятора в автоматичному режимі за рахунок уникнення перерегулювань шляхом зміни переміщення маніпулятора при безперервному русі до крокового режиму руху з подальшою зупинкою в точці позиціонування, що забезпечило підвищення точності позиціонування до рівня (5-10) мкм;

-розроблено математичну модель переміщення робочого інструменту маніпуляційної системи під впливом кутових відхилень Pitch та Yaw, що дозволяє алгоритмічно компенсувати дані відхилення для мінімізації похибки позиціонування мікроманіпулятора з врахуванням експериментальних даних, отриманих при дослідженні направляючих двигунів;

-на основі дослідження характеристик п’єзоелектричного двигуна встановлено, що його резонансна характеристика має два резонансні піки, при цьому керування його швидкістю слід здійснювати шляхом регулювання частоти збудження в зоні керування, яка знаходиться на правому схилі правого резонансного піка;

-виконано моделювання механічних коливань п’єзоелектричного резонатора двигуна, що дозволило підтвердити необхідність вибору саме правого електричного резонансного піка двигуна при його керуванні.

Практична значимість отриманих результатів визначається, зокрема:

-розробленням алгоритмічних та програмних рішень реалізації удосконалених методів керування п’єзоелектричним мікроманіпулятором / двигуном, що дозволило досягти діапазон керування по швидкості 140 мм/с - 0.05 мм/с, точність позиціювання з енкодерною версією (5-10) мкм і, як наслідок, в

середньому підвищило ефективність мікроманіпуляторної системи по цим параметрам у порівнянні з існуючими рішеннями у 2 рази;

-створенням засобів контролю параметрів нових п’єзоелектричних двигунів, які дозволяють вимірювати характеристики п’єзоелектричного резонатора, досліджувати точність переміщень лінійних направляючих та здійснювати вимірювання вібраційних ефектів при дослідженні нових методів керування п’єзодвигуном та, як наслідок, скоротити час тестування в середньому в 1.5-2 рази;

-створенням системи керування п’єзоелектричним мікроманіпулятором на основі розроблених методів керування лінійним п’єзоелектричним двигуном з підвищеною ефективністю керування в середньому в 2 рази, зокрема:

1.Діапазон швидкості руху – розширення до рівня (0.05-140) мм/с.

2. Низький рівень вібрацій – зменшення рівня вібраційних шумів в 2-10 разів в залежності діапазону робочої швидкості.

3.Точність позиціонування – підвищення точності позиціонування до рівня (5-10)мкм.

4.Маневреність – зменшення часу відклику джойстику з 10 мс до 5 мс, переведення двигуна в режим нанокроків (200-300) нм.

Отримані практичні результати дослідження можуть бути використані при побудові систем, які повинні виконувати точне переміщення об’єктів в мікро- та нанопросторі з високою точністю та швидкодією.

Одержані в дисертації нові результати знайшли застосування на підприємстві ТОВ «Лілея» (м. Київ), що підтверджується відповідним актом від 23.09.2022 про впровадження запропонованих методів керування швидкістю, контролю параметрів п’єзодвигуна, динамічного контролю лінійних параметрів направляючих мікроманіпулятора та розробленого програмного забезпечення Driver Rev.J, Rev.H в системах керування мікроманіпуляторних п’єзоелектричних двигунів LPM-2M, LPM-5 та LPM-1 (Додаток Е).

Особистий внесок здобувача.

Основні ідеї та наукові результати дисертаційної роботи отримані автором особисто і висвітлено у 12 наукових працях.

У наукових роботах, опублікованій у співавторстві, здобувачем особисто належить: [1, 2, 5] – створення програмно-апаратних засобів для оцінки ефективності роботи запропонованих методів керування двигуном; [3] – створення стенду для дослідження ресурсного стану двигуна; [4] – розробка методів керування двигуна, створення програмно-апаратних засобів для оцінки ефективності роботи запропонованих методів керування двигуном; [6] – проведення експериментальних досліджень резонансної характеристики п’єзоелектричного двигуна з прямокутним резонатором.

Апробація результатів дисертації.

Основні результати дисертації пройшли апробацію на наступних конференціях:

1. XI Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених «Електроніка-2018» (ELCONF-2018), Київ, 2018.

2. VII Міжнародній науково-технічній конференції “Датчики, прилади та системи - 2018” (ДПС-2018), м.Черкаси, 17-21 вересня 2018.

3. 11-й Міжнародній науково-технічній конференції “Приборостроение – 2018”, м.Мінськ, 14-16 листопада 2018.

4. VIII Міжнародній науково-технічній конференції “Датчики, прилади та системи-2019”, Черкаси – Херсон – Лазурне, вересень 2019.

5. XVIII Міжнародній науково-технічній конференції “Приладобудування: стан і перспективи”, м.Київ, 15-16 травня 2019.

Публікації. По результатам проведених досліджень опубліковано 12 наукових праць, із них 3 статті у наукових фахових виданнях України, 2 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах WoS або Scopus, 6 тез доповідей у збірниках матеріалів науково-технічних конференцій та отримано 1 патент на винахід.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів основної частини, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний об’єм дисертації складає 160 сторінок, з них 129 сторінок основного тексту, 2 таблиці, 90 рисунків, 70 літературних джерел та 6 додатків.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МІКРОМАНІПУЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ, ЇЇ КОНСТРУКЦІЇ ТА ОСНОВНИХ КОМПОНЕНТІВ

1.1. Мікроманіпуляційна система та її конструкція

Мікроманіпуляційна система на базі лінійних п’єзоелектричних двигунів – це система, яка призначена для формування лінійних переміщень у мікропросторі по трьох координатах. Основним завданням такої систем є висока точність виконання переміщень (позиціонування), маневреність, можливість програмованого руху, відсутність дрейфу, а також відсутність вібрацій.

Система складається з мікроманіпулятора, органу керування та контролера інтерфейсу “орган керування – мікроманіпулятор”. Система працює наступним чином: контролер отримує команду на переміщення від органу керування, в результаті чого виконує аналіз отриманих даних, на основі яких формує відповідні сигнали керування для мікроманіпулятора. В даній роботі розглядається маніпуляційна система, яка працює в двох режимах:

-ручний режим – орган керування системою є механічний пристрій (джойстик, миша, трекбол). В ролі датчика зворотного зв’язку переміщення робочого органу маніпулятора виступає безпосередньо користувач;

-автоматичний режим –орган керування є мікропроцесорна система. В ролі датчика зворотного зв’язку переміщення робочого органу маніпулятора виступає енкодер.

Мікроманіпулятор представляє собою три лінійних двигуни, які з’єднані між собою за допомогою перехідних кронштейнів (пластин). Дві нижні координати X та Y, а верхня – Z.

Двигуни обладнані лінійними енкодерами з рівнем роздільної здатності 2.6 мкм.

Кожна координата встановлена на направляючу через перехідну пластину. Таким чином, основою маніпулятора є пластина 1, на яку встановлюється двигун 2 (координата Y), другий двигун 3 (координата X) встановлений на направляючу

першого двигуна через перехідну пластину 4. А третій двигун 5 (координата Z) встановлений на направляючу другого двигуна через перехідну пластину 6.

Робочою платформою маніпулятора є пластин 7, яка встановлюється на направляючу третього двигуна – координата Z.

Така компоновка забезпечила значне зменшення габаритних параметрів маніпулятора.

Компоненти конструкції з’єднані між собою гвинтами 9. Електричне з’єднання забезпечується гнучкими провідниками (Flexible PCB) 8 (Додаток А).

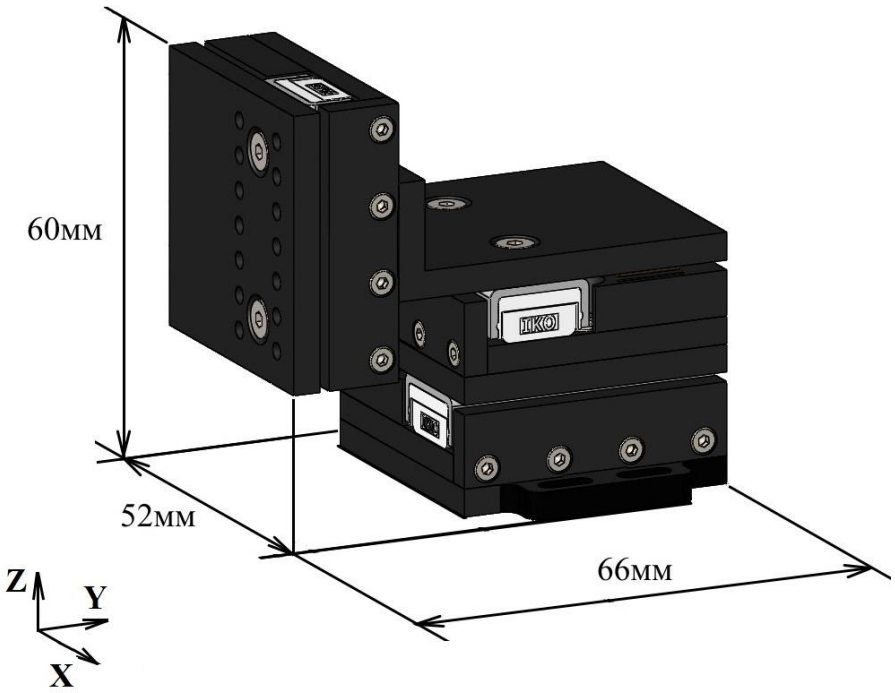


Рис. 1.1 – Мікроманіпулятор на базі лінійних п’єзоелектричних двигунів

Направляючі, перехідні пластини та основи двигунів виготовлені з алюмінію, за рахунок чого забезпечується жорсткість конструкції та стабільність руху в мікропросторі. Інші корпусні частини двигунів (картридж резонатора та інші) виконано з пластика, що забезпечило зменшення його маси та вартості виготовлення. Попередній прототип маніпулятора було виконано з пластику на базі лінійного п’єзоелектричного двигуна LPM-5 [5].

1.2. Лінійний п’єзоелектричний двигун

1.2.1. Принцип роботи

Лінійний п’єзоелектричний двигун – це двигун, в якому лінійний рух каретки здійснюється за рахунок гладкого фрикційного контакту каретки двигуна S та п’єзоелемента (п`єзорезонатора).

Два тіла прижатих один до одного утворюють фрикційний контакт.

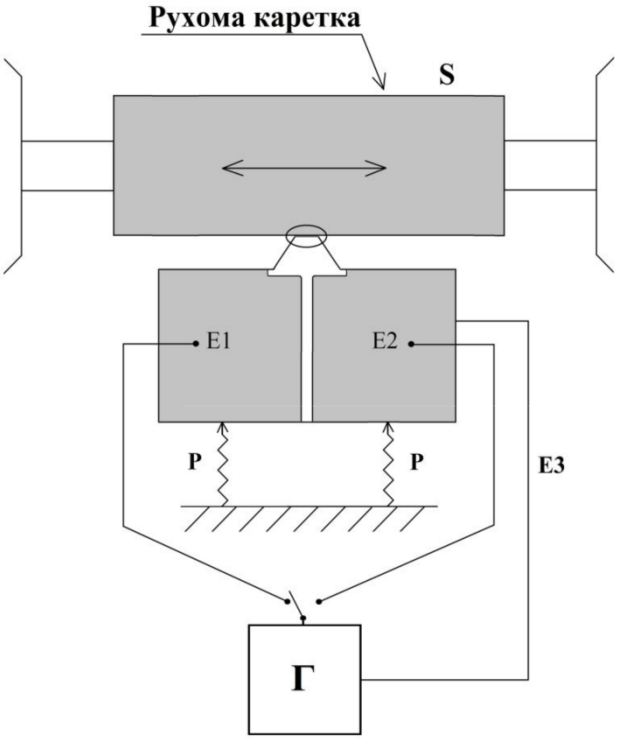


Рис. 1.2 – Схема лінійного п`єзоелектричного двигуна з прямокутним резонатором: S – слайдер (рухома каретка) лінійного двигуна; E1, E2, E3 – електроди п’єзоелемента; P – пружина; Г – генератор

Фрикційний контакт двох тіл в певних умовах може грати роль випрямляча ультразвукових коливань. Для цього, в одному з притиснутих один до одного тіл необхідно збудити два взаємно перпендикулярних і зсунутих по фазі коливань [6]. В результаті, “зуб” п`єзоелемента в зоні фрикційного контакту починає рухатися по траєкторії еліпса. Дослідник, який відкрив цій ефект (працівник кафедри діелектриків та напівпровідників КПІ, нині – кафедра мікроелектроніки Лавриненко В`ячеслав Васильович) назвав цей ефект – принцип весла.

Весляр здійснює коливальні рухи в двох взаємно-поперечних напрямках. При цьому кінець весла описує траєкторію близьку до еліпса. За час, протягом якого весло знаходиться у воді, його рух перетворюється в лінійне переміщення човна. Коли весло знаходиться над водою – човен рухається по інерції. Для того, щоб отримати таку траєкторію руху, взаємно-поперечні коливання повинні бути зсунуті по фазі. При відсутності зсуву фаз між коливаннями траєкторія кінця весла була б схожа на рух по діагоналі [7].

Збудження коливань відбувається шляхом подачі на пари виводів п`єзолемента (Е1-Е3 та для реверсу руху Е2-Е3) гармонійного сигналу за допомогою генератора Г з частотою коливань близькою до резонансної. В результаті за рахунок зворотного п`єзоелектричного ефекту (зміна розміру резонатора під впливом електричного поля) виникають два взаємно-перпендикулярних механічних коливання. Робоча частота резонатора та зсув фаз між коливаннями визначається габаритними розмірами резонатора та властивостями матеріалу резонатора (рис. 1.2).

Властивості фрикційного контакту визначаються пружністю пружин Р (силою притиску) каретки та п`єзоелемента, а також шорсткістю тіл фрикційного контакту.

Отже, для виникнення випрямних властивостей фрикційного контакту повинні виконуватися дві умови:

1.Збудження двох взаємно-перпендикулярних коливань з тіл фрикційного контакту без взаємної передачі енергії.

2.Зсув по фазі взаємно-поперечних коливань.

Як у випадку з веслярем, зміна фази одного з коливань на 180 градусів призведе до зміни напрямку руху човна, тобто реверсу [6, 7].

1.2.2. Складові частини

Розглянемо складові частини лінійного п’єзоелектричного двигуна.

1.2.2.1. Резонатор

Резонатором називають п’єзоелектричний елемент, якому притаманний зворотній п’єзоелектричний ефект.

П’єзоефект

П’єзоелектричний ефект був експериментально відкритий братами П’єром і Жаком Кюрі в 1880 році. Вони виявили, що при переміщенні вантажу на поверхні деяких кристалів на ній з’являються електричні заряди, при чому величина цих зарядів пропорційна прикладеному навантаженню. Слово “п’єзо” грецького походження (piezo) і в перекладі на українську мову означає “тисну” [8, 9, 10]. Суть п’єзоелектричного ефекту полягає в тому, що п’єзоелектричний кристал може слугувати перетворювачем механічної енергії в електричну і навпаки – електричну в механічну. Відповідно, розрізняють прямий та зворотній п’єзоелектричний ефект:

- прямий п’єзоелектричний ефект – це перетворення механічної енергії в електричну;

- зворотній п’єзоелектричний ефект – це перетворення електричної енергії в механічну [11].

Оскільки п’єзоелектричний двигун працює на зворотному п’єзоелектричному ефекті, тому в подальшому будемо розглядати саме його.

П’єзоелектричні матеріали

П’єзоелектричні матеріали можна умовно розділити на дві групи:

1.П’єзоелектричні монокристали.

Природні п’єзоелектричні матеріали. Прикладом такого монокристалу є кристал кварцу [12]. Також почали створювати синтетичні п’єзоелектричні монокристали, які вирощують в спеціальних установках. П’єзоелектричні властивості таких кристалів з достатньо високою точністю повторюваності можна задавати шляхом композиції вхідних в них компонентів [13, 14].

Вирощені кристали певним чином ріжуться на пластини, деякі (сегнетоелектрики) поляризуються й із них шляхом шліфування та нанесення електродів виготовляються п’єзоелектричні елементи.

Монокристали широко розповсюдження не отримали з зв’язку з високою вартістю.

2.П’єзоелектричні полікристали – п’єзоелектрична кераміка (п’єзокераміка).

За своїми фізичними властивостями – це полікристалічний сегнетоелектрик, який представляє собою хімічну сполуку або твердий розчин (порошок), зерен (кристалітів).

За хімічним складом – це складний оксид, який включає іони двохвалентного свинцю або барія, а також іони чотиривалентного титана або цирконія. Шляхом зміни основного співвідношення вихідних матеріалів та введення добавок синтезують різні види п’єзокераміки, які мають необхідні електрофізичні та п’єзоелектричні характеристики. Найбільше розповсюдження отримала група п’єзокерамічних матеріалів типу ЦТС (цирконата-титаната-свинцю). Також використовується кераміка на основі титаната барія (ТБ) і титаната свинця (ТС) [15, 16].

Полікристалічні п’єзоелектрики можуть бути отримані тільки з сегнетоелектричних з’єднань, так як тільки у сегнетоелектриків можлива зміна напрямку спонтанної поляризації під дією прикладеного поля і, як наслідок, наявності залишкової поляризації в напрямку цього поля [17, 18, 19].

Тобто, сегнетокераміка є полікристалічним тілом і в неполяризованому стані не має п’єзоефекту, що пов’язано з хаотичним розміщенням полярних осей окремих кристаликів в ній і здобуває п’єзоелектричні властивості лише після впливу на неї сильного постійного поля, тобто після поляризації. Сегнетокераміка таким чином стає п’єзокерамікою [20].

Під спонтанною поляризацією розуміється фазовий перехід, при якому неполярна речовина мимоволі (спонтанно) переходить в полярний стан.

Із всіх 32-х точкових груп симетрії кристалів, в 20 виникає поляризація кристалів під дією механічного поля. Такі кристали називають п’єзоелектриками.

Однак лише 10 з них можуть мати залишкову поляризацію (про яку мова піде далі) відмінну від нуля при відсутності зовнішнього електричного поля. Такі кристали називають полярними діелектриками [11, 21].

Основні п'єзокерамічні матеріали, що виготовляються промисловістю, мають кристалічну решітку типу перовськіта. Цю структуру можна охарактеризувати простою кубічною елементарною коміркою, в вершинах якої знаходяться великі катіони (A), в центрі – малий катіон (B), а атом кисню (O) займає середину граней [22].

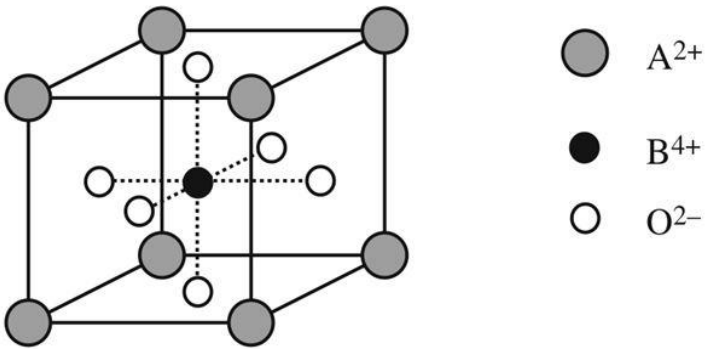


Рис. 1.3 – Структура перовськіта [23]

Для прикладу розглянемо процес виготовлення п’єзоелектричної кераміки на основі титаната барію, що представляє собою тверде тіло, яке складається з кристалітів сегнетоелектрика $BaTiO_3$. Вище точки Кюрі T_C (рівною близько 120°C) решітка $BaTiO_3$ є кубічною: Ba знаходиться в вершинах, O – в центрах граней, Ti^{4+} трішки зміщуються від центру куба. Нижче точки Кюрі комірка переходить в тетрагональну форму, при цьому іони Ti^{4+} трішки зміщуються від центру куба в напрямку одного із іонів кисню. Оскільки титан тут чотирьохвалентний додатній іон, то при його зміщенні виникає дипольний момент зумовлюючий появу спонтанної поляризації. Під дією зовнішнього електричного поля поляризованість P_S у $BaTiO_3$ може змінювати напрямок, тому титанат барію представляє собою сегнетоелектрик.

Зазвичай, п’єзоелектричну кераміку на основі титанату барію виготовляють шляхом спікання при високій температурі (1300-1400°C) еквімолекулярної суміші

карбонату барія ($BaCO_3$) і двоокису титана (TiO_2) [24, 25]. Рівняння хімічної реакції має вигляд:

$$BaCO_3 + TiO_2 \rightarrow BaTiO_3 + C0_2 \uparrow \quad (1.1)$$

Для спікання кераміки використовують печі. Керамікою зазвичай називають всі обпалені вироби. Обпалення закінчується в такому інтервалі температур, коли сформована із порошку заготовка зберігає задану форму На електронній мікрофотографії такої кераміки чітко видні окремі зерна діаметром 3-10мкм.

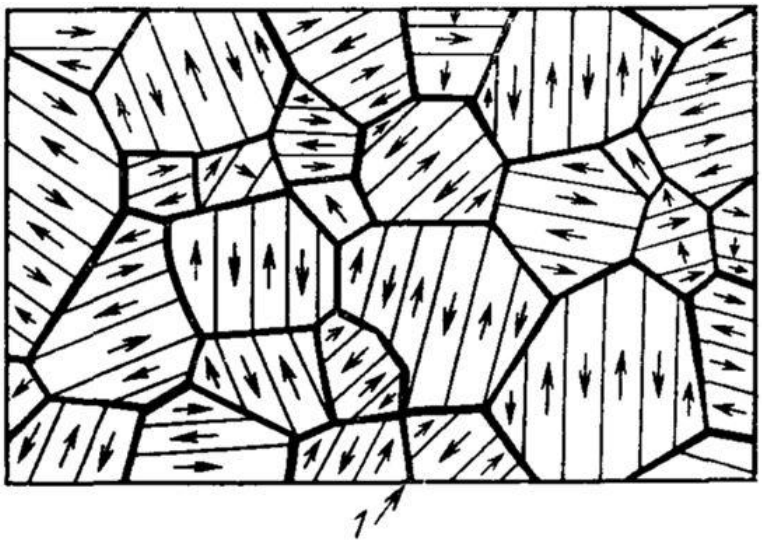


Рис. 1.4 – Кристаліти і доменна структура кераміки $BaTiO_3$. 1-границі зерна [26]

Кожне зерно розбито на декілька доменів. В кожному домені вектор Ps має свій певний напрямок. Оскільки кераміка $BaTiO_3$ представляє собою полікристалічне тіло, то її властивості – усереднення відповідних величин по різних осях кристалітів.

У кераміки $BaTiO_3$ вектори Ps направлені хаотично, тому:

$$\sum P_s = 0 \quad (1.2)$$

Тобто кераміку необхідно розглядати як ізотропне тіло. Оскільки Ps=0, то дана кераміка не має п’єзоелектричного ефекту. Однак, при прикладенні постійного електричного поля вектори Ps доменів орієнтуються в певному напрямку, як показано на рис 1.5.

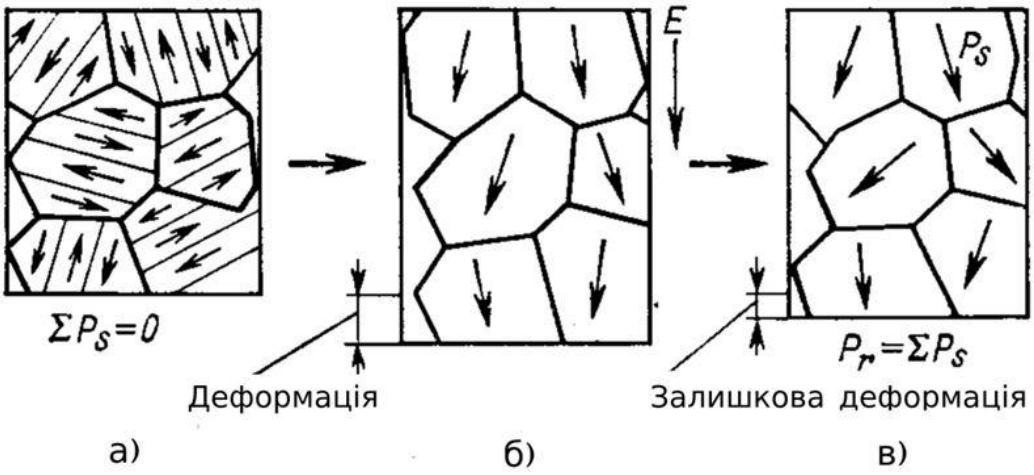


Рис. 1.5 – Поляризація кераміки $BaTiO_3$. *а* – стаціонарний стан; *б* – підчас прикладення електричного поля E; *в* – після знаття електричного поля [26]

На рис.1.6 показана петля гістерезису типу “метелик”, яка ілюструє залежність між напруженістю прикладеного електричного поля і деформацією в напрямку поля для кераміки $BaTiO_3$.

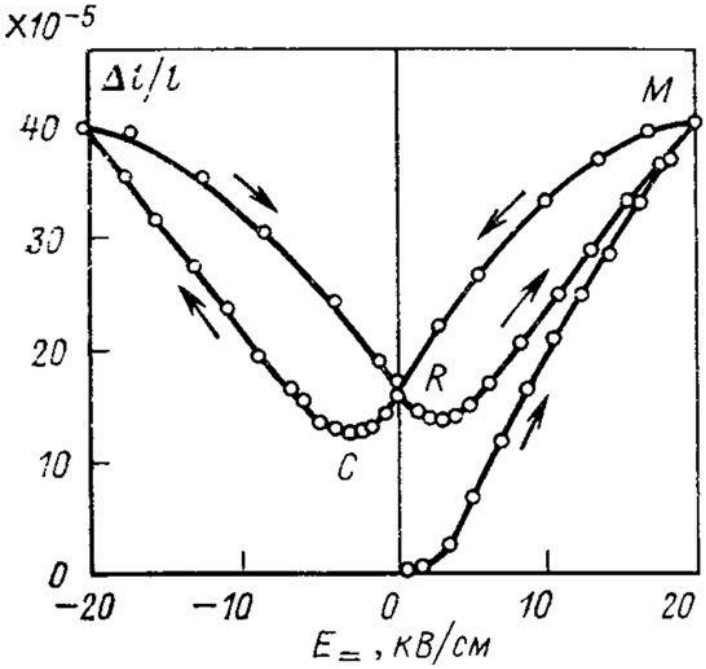


Рис. 1.6 – Електрострикційна крива п’єзокераміки $BaTiO_3$ [26]

Коли до кераміки прикладають і потім знімають постійне електричне поле, то спочатку ізотропній кераміці надають полярність, тому дану операцію називають поляризацією. Процес поляризації йде по кривих OMR. Тому навіть після зняття поля відбувається зміщення в точку R, яка не співпадає з початковим

положенням O. Таким чином, при поляризації створюється зміщення, яке відповідає різниці між точками R і O. Одночасно з цим поляризованість не повертається в початкове положення, якому відповідає сума Ps=0, а в напрямку прикладеного поля залишається поляризованість, Кл/м^2,

$$P_r = \sum \overrightarrow{P_s} \tag{1.3}$$

Pr називають залишковою поляризацією. Таким чином, у початкової ізотропної в цілому кераміці виникає залишкове зміщення і залишкова поляризація, тобто з'являється анізотропія, притаманна полікристалам. Якщо до кераміки в такому стані прикласти змінне електричне поле невеликої амплітуди, то виникне змінна деформація, пропорційна напруженості змінного поля.

Таким чином, сегнетокераміка стає п'єзокерамікою [20, 26, 27] .

Вироби з п'єзокераміки з нанесеними на її поверхню електродами прийнято називати п'єзоелементами.

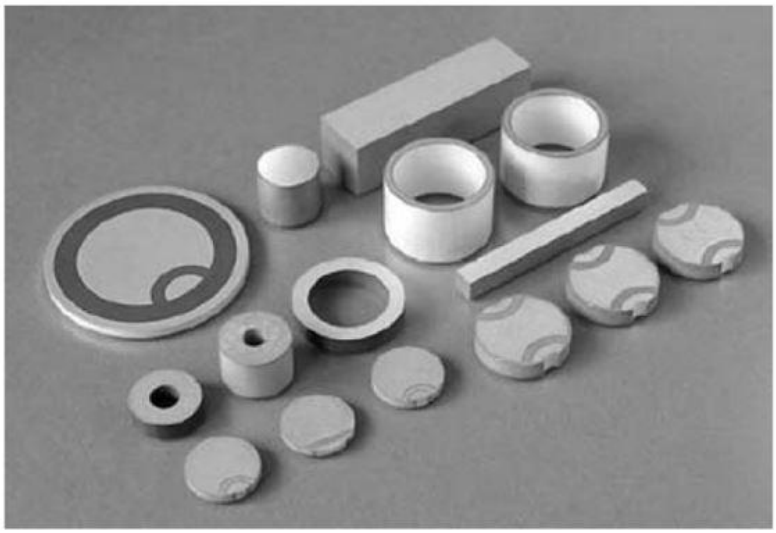


Рис. 1.7 – П'єзокерамічні зразки різної геометричної форми [11]

Для зручності застосування їх виготовляють різної форми [11, 28, 17, 29].

Рівняння п'єзоефекту

Електричні властивості сегнетоелектриків залежать від їх механічного стану, а механічні властивості – від електричного стану. Тому верхні індекси в параметрах п'єзокераміки вказують на сталість (постійність) електричного поля E, електричного зміщення D, механічної напруги T та деформації S.

Вибираючи різні параметри в якості незалежних змінних, можливо отримати вісім різних форм запису рівнянь п’єзоефекту (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Рівняння зворотного п’єзоелектричного ефекту

П’єзоелектричні сталі	Зворотний п’єзоефект
П’єзоелектричний модуль d	$S=d_tE+s^ET$
П’єзоелектричний коефіцієнт напруги g	$S=g_tD+s^DT$
П’єзоелектричний коефіцієнт e	$T=-e_tE+c^ES$
П’єзоелектричний коефіцієнт деформації h	$T=-h_tD+c^DS$

Всі рівняння п’єзоефекту приведені в матричній формі, яка пояснюється нижче. Індекс t позначає транспоновану матрицю, стовпці та рядки якої (3 рядки та 6 стовпчиків) помінялися місцями.

П’єзоелектричні модулі і п’єзоелектричні коефіцієнти є параметрами, які характеризують електромеханічний зв’язок.

П’єзоелектричний модуль $\boldsymbol{d_{ij}}$ визначає деформацію, яка викликана полем 1 В/м:

$$S_i = d_{ij} \cdot E_j \tag{1.4}$$

П’єзоелектричний коефіцієнт напруги $\boldsymbol{g_{ij}}$ характеризує деформацію, яка викликана одиничним зарядом:

$$S_i = g_{ij} \cdot D_j \tag{1.5}$$

П’єзоелектричний коефіцієнт $\boldsymbol{e_{ij}}$ характеризує механічну напругу, яка викликана електричним полем:

$$T_i = e_{ij} \cdot E_j \tag{1.6}$$

П’єзоелектричний коефіцієнт деформації $\boldsymbol{h_{ij}}$ характеризує механічну напругу, яка обумовлена зміною густини заряду [17]:

$$T_i = -h_{ij} \cdot D_j \tag{1.7}$$

При записі виразів у тензорній формі вісі координат x, y та z замінюють на 1, 2 та 3 відповідно. Також прийнято, що напрямок поляризації P співпадає з віссю Z(3) і називається полярною віссю.

П’єзоелектричні модулі мають два індекси i,j (для тензора 2-го рангу) та ijk (для тензора 3-го рангу). Зв’язок тензорного позначення та матричного (коефіцієнт m) представлено нижче (для прикладу, при i,j=3):

ij —	11	22	33	23	32	31	13	12	21
m —	1	2	3	4	4	5	5	6	6

Якщо в пружному тілі створити механічну напругу T, то в ньому виникне деформація S, яка лінійно залежить від T. Існує 6 компонент напруг: T1, T2, T3, T4, T5, T6. З них T1, T2,T3 відносяться до напруг розтягування-стискання, а T4,T5 та T6 – до напруг зсуву, причому мається на увазі зсув в площинах, перпендикулярних відповідно осям x, y та z (рис.1.8).

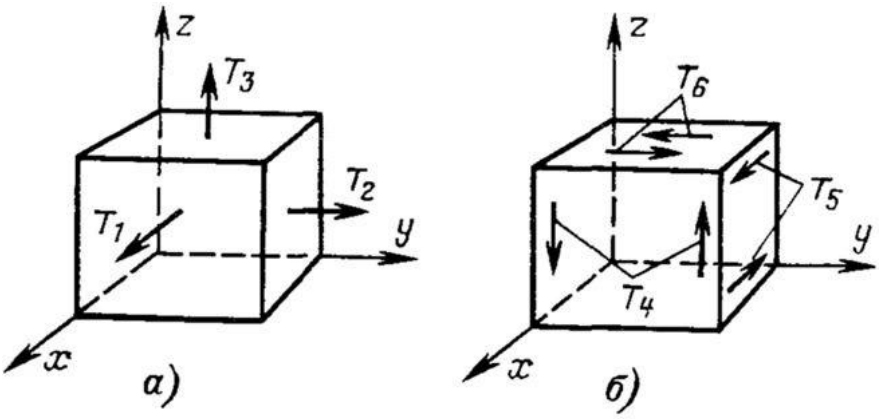


Рис. 1.8 – Коефіцієнти механічних напруг: *а* - напруги розтягування-стискання, *б* - напруги зсуву [26]

Якщо розписати формулу 1 з табл.. 1.1, то отримаємо:

$$\left\|\begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{matrix}\right\| = \left\|\begin{matrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & s_{14}^E & s_{15}^E & s_{16}^E \\ s_{21}^E & s_{22}^E & s_{23}^E & s_{24}^E & s_{25}^E & s_{26}^E \\ s_{31}^E & s_{32}^E & s_{33}^E & s_{34}^E & s_{35}^E & s_{36}^E \\ s_{41}^E & s_{42}^E & s_{43}^E & s_{44}^E & s_{45}^E & s_{46}^E \\ s_{51}^E & s_{52}^E & s_{53}^E & s_{54}^E & s_{55}^E & s_{56}^E \\ s_{61}^E & s_{62}^E & s_{63}^E & s_{64}^E & s_{65}^E & s_{66}^E \end{matrix}\right\| \cdot \left\|\begin{matrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{matrix}\right\| + \left\|\begin{matrix} d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} \\ d_{14} & d_{24} & d_{34} \\ d_{15} & d_{25} & d_{35} \\ d_{16} & d_{26} & d_{36} \end{matrix}\right\| \cdot \left\|\begin{matrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{matrix}\right\| \qquad (1.8)$$

або

$$[S] = [s^E][T] + [d]^t[E] \qquad (1.9)$$

На практиці процес розрахунку спрощується тим, що в залежності від ступеня анізотропії (відмінність властивостей матеріалу в різних його напрямках), окремі компоненти (компоненти тензора) стають рівними один одному або нулю. В результаті спрощення, матриця пружної податливості $\boldsymbol{s^E}$ для поляризованої сегнетокераміки має наступний вигляд:

$$\|s_{ij}^E\| = \begin{Vmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(s_{11}^E - s_{12}^E) \end{Vmatrix} \tag{1.10}$$

Незалежних компонент всього 5: $s_{11}^E, s_{12}^E, s_{13}^E, s_{33}^E, s_{55}^E$.

Матриця модулів $\boldsymbol{d}$ в даному випадку має вигляд:

$$\|d_{ij}\| = \begin{Vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix} \tag{1.11}$$

Незалежних компонент три: d_{31}, d_{33} та d_{15}.

Так, п’єзоелектричний модуль d_{33} описує взаємозв’язок електричного поля, направленого вздовж полярної осі (вісь 3, тобто вісь Z або вісь поляризації) і повздовжньої деформації вздовж цієї осі.

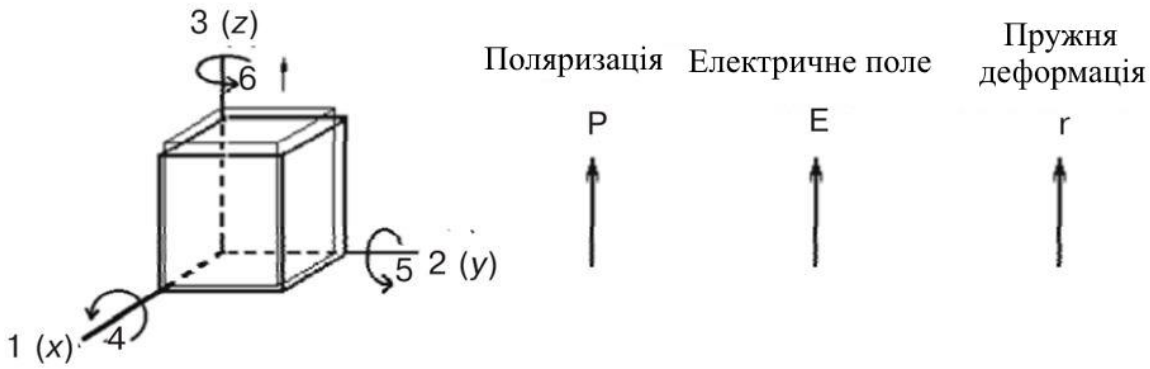


Рис. 1.9 – Просторове розміщення векторів поляризації, електричного поля і напрямку пружньої деформації для випадків використання п’єзомодуля d_{33} [11].

П’єзоелектричний модуль d_{31} встановлює зв’язок між електричним полем вздовж полярної осі і повздовжньої деформації в будь-якому напрямку, нормальних до полярної вісі ($d_{31} = d_{32}$).

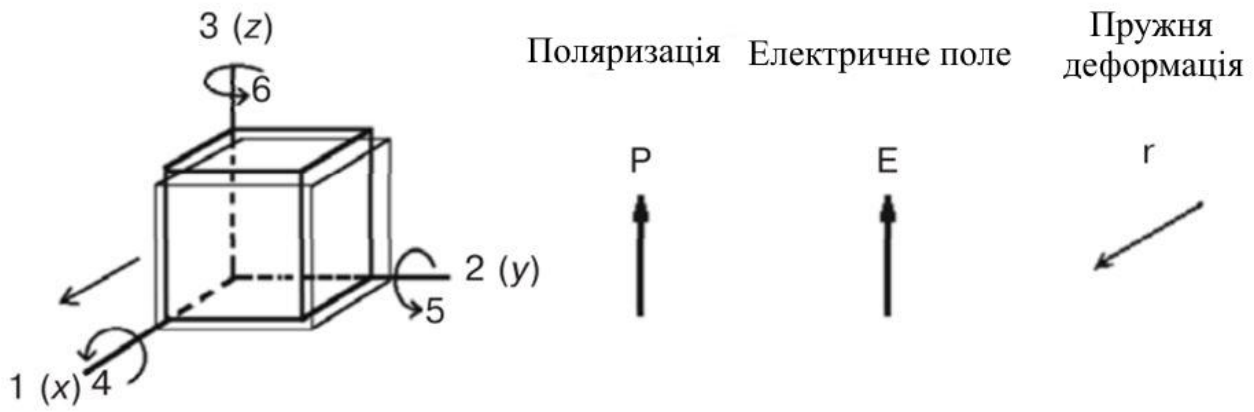


Рис. 1.10– Просторове розміщення векторів поляризації, електричного поля і напрямку пружної деформації для випадків використання п’єзомодуля d_{31} [11].

П’єзомодуль d_{15} зв’язує електричне поле, яке направлено перпендикулярно до полярної вісі з деформацією зсуву в площині, яка проведена через полярну вісь в напрямку електричного поля. Тому, для збудження деформації зсуву електричне поле повинно бути прикладене перпендикулярно до полярної вісі.

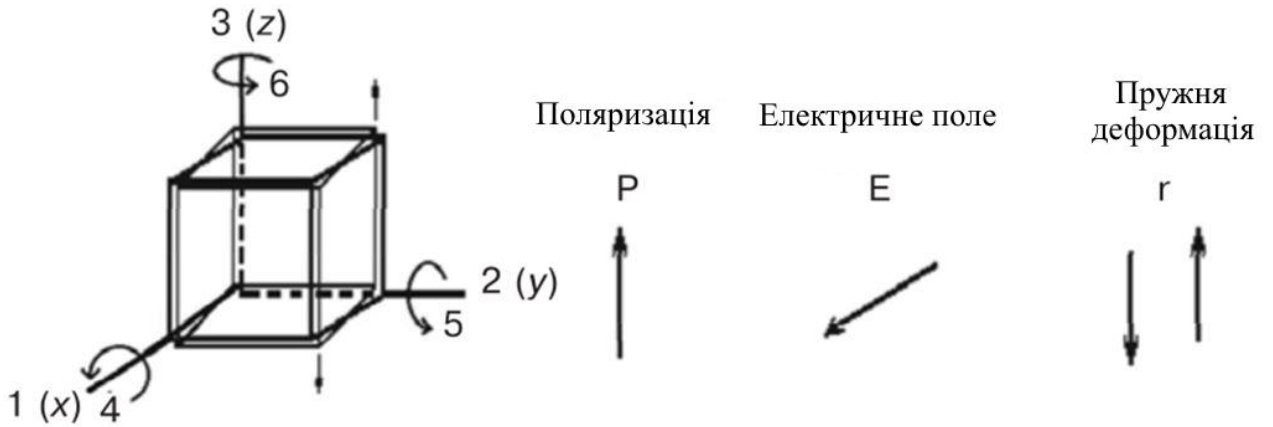


Рис. 1.11 – Просторове розміщення векторів поляризації, електричного поля і напрямку пружної деформації для випадків використання п’єзомодуля d_{15} [11].

Ще один важливий параметр – коефіцієнт зв’язку k. Широко використовується в якості характеристики величина п’єзоефекту. У кераміки на

основі $BaTiO_3$ k становить 15-35%, у кераміки в системі ЦТС (цирконат титанат свинцю) – 40-70%, в монокристалів SbSI може досягати 90%. Коефіцієнт k також має індекси аналогічні, наприклад, d_{ij}, тобто значення коефіцієнта k є різним для кожного напрямку [17, 26].

Хвилі деформації

Візьмемо вузький п’єзоелектричний брусок з двома металевими (зазвичай срібними або нікелевими) електродами. Представимо його у вигляді ланцюга елементарних п’єзоелектричних комірок, які зв’язані між собою пружинками. Прикладемо до електродів постійну напругу. Під електродами всі комірки практично миттєво, наприклад, стиснуться, розтягнувши пружинки (рис.1.12).

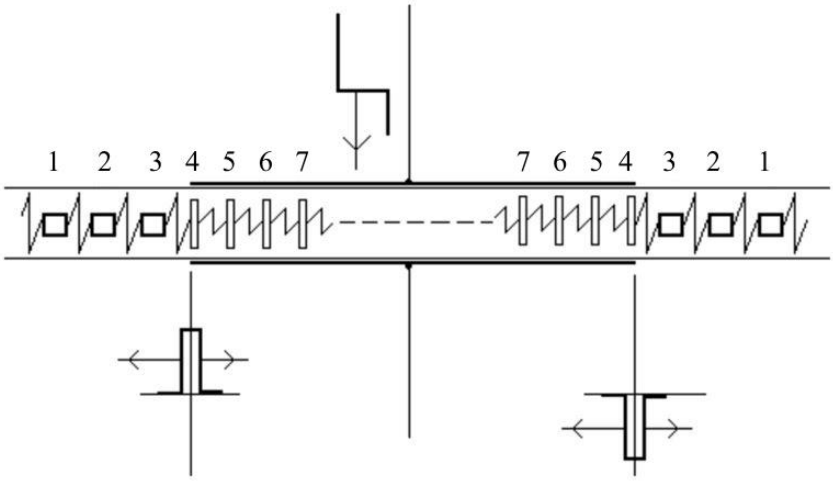


Рис. 1.3 – Модель вузького п’єзоелектричного бруска [6]

В момент прикладання електричного поля комірки з номерами 5,6,7 врівноважуються з двох сторін рівними силами, які діють зі сторони сусідніх комірок. Неврівноважені комірки 4 під дією сили почнуть рух вправо з однієї сторони п’єзоелемента та вліво – з іншої сторони, штовхаючи комірки 3, 2 та 1. Одночасно порушується рівновага комірок 5. Вони почнуть рухатися порушуючи рівновагу комірок 6 і так далі.

Отже, при прикладанні електричної напруги до електродів п’єзоелемента на кожній з його меж зароджуються дві пружні хвилі деформації, які рухаються в протилежних напрямках.

В розглянутому прикладі, деформація комірок і напрямок розповсюдження пружних хвиль співпадає. Тому ці хвилі називаються поздовжніми по довжині бруска з поперечним способом їх збудження, так як напрямок електричного поля є поперечно напрямку розповсюдження хвиль.

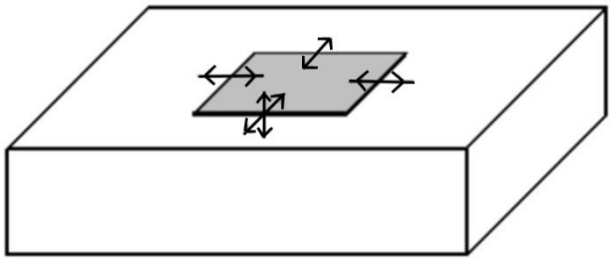


Рис. 1.4 – П’єзоелектрична пластина з нанесеними електродами [6]

В загальному випадку, якщо взяти замість бруска пластину, то поздовжні хвилі одночасно будуть генеруватися з усіх меж електродів. Тобто, окрім поздовжніх по довжині , будуть збуджуватися поздовжні по ширині і поздовжні хвилі по товщині п’єзоелемента.

Поздовжні хвилі по товщині п’єзоелемента збуджуються поздовжнім способом, так як електричне поле по напрямку співпадає з напрямком розповсюдження хвиль.

Прикладемо до електродів вузького, довгого та однорідного п’єзоелектричного бруска змінну електричну напругу з частотою F та періодом T. З кожного його кінця почне збуджуватися акустична хвиля деформації. Очевидно, що параметри цієї хвилі (амплітуда та швидкість розповсюдження) будуть залежати від властивостей матеріалу, а саме від щільності (густини) матеріалу ρ і пружності *C*.

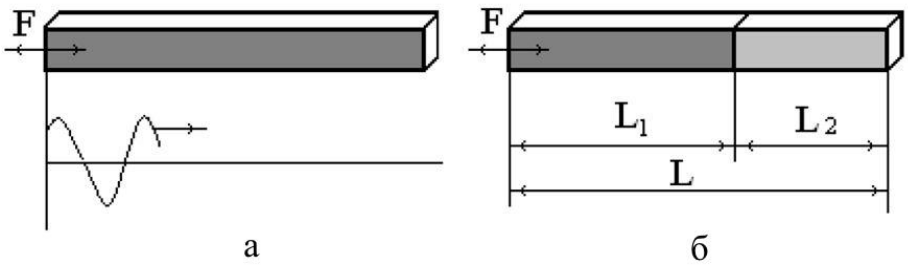


Рис. 1.5 – Вузький, довгий п’єзоелектричний брусок. *а* – однорідний брусок, *б* – не однорідний брусок [6]

Пружність матеріалу визначається за допомогою матриць коефіцієнтів Cij, виміряних в електричному полі і без нього.

Швидкість розповсюдження хвилі Cs розраховується за формулою

$$C_s = \sqrt{\frac{C}{\rho}} \tag{1.12}$$

Хвильовий опір Z розраховується за формулою

$$Z = S \cdot \sqrt{C \cdot \rho} \tag{1.13}$$

де S – площа поперечного перерізу бруска

Довжина хвилі λ – це мінімальна відстань між двома однаковими фазами зміщення. Розраховується за наступною формулою:

$$\lambda = \frac{C_s}{F} = C_s \cdot T \tag{1.14}$$

Якщо брусок буде виконаний з двох матеріалів, то хвиля дійде до межі матеріалів і частково відіб’ється від неї, а частково пройде крізь неї. Відбита хвиля не змінить своєї фази на протилежну якщо $Z_1<Z_2$ і змінить, якщо $Z_1>Z_2$. Якщо ж $Z_2=0$ (тобто брусок обрізаний і знаходиться в повітрі), то хвиля деформації відіб’ється повністю змінивши свій знак на протилежний.

Механічний резонанс

Резонанс механічних коливань може бути для всіх типів деформацій при майже однакових їх особливостях. Тому обмежимося розглядом простого варіанту резонансу поздовжніх коливань в довгому бруску (рис.1.15).

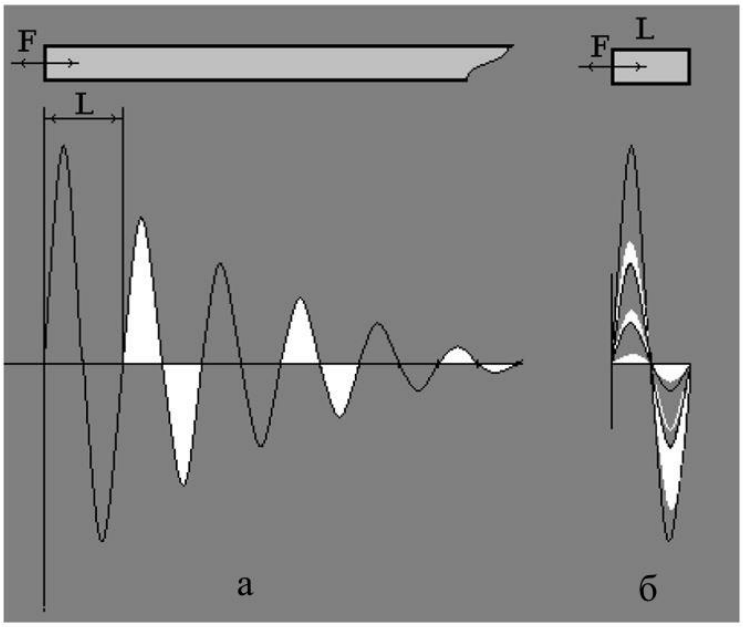


Рис. 1.6 – Розповсюдження хвилі деформації в бруску. а - брусок нескінченної довжини; б - брусок фіксованої довжини L=T [6]

З одного кінця бруска збудемо хвилю синусоїдальних коливань. По мірі просування цієї хвилі вздовж бруска енергія коливань буде передаватися від одного перерізу до іншого переріз бруска в напрямку розповсюдження хвилі. Така хвиля називається біжуча хвиля. Нелінійність зв'язків між атомами і наявність макро дефектів в матеріалі призведе до розсіювання акустичної енергії в хвилі по мірі її просування вздовж довжини бруска і, на якійсь відстані від кінця бруска, її енергія практично стане рівною нулю.

Графік зміщення по довжині бруска, для деякого проміжного моменту часу, показано на рис. 1.15а.

В момент часу, рівний періоду коливань T, відріжимо частину бруска (рис.1.15б). На відстані L утворюється межа, від якої хвиля відбивається (зображена білим кольором) і продовжить рух в зворотному напрямку. Дійшовши до межі збудження хвилі коливань, вона знову відіб'ється і так далі до тих пір, поки не згасне.

В резонаторах, виготовлених із високодобротних матеріалів, кількість таких відбивань може бути сотні разів, а в резонаторів із кварцу — міліони разів. Такий параметр називається механічною добротністю матеріалу $Q_м$. Змінюючи L можна

досягти того, що пряма хвиля і всі відбиті хвилі будуть знаходитися в одній фазі. Тоді, складаючись, вони збільшать амплітуду механічних коливань в рази.

В результуючої хвилі, названій стоячою, вже не можливо виділити напрямок передачі енергії від перерізу до перерізу бруска. Прямі і відбиті хвилі будуть мати однакову фазу тоді, коли довжина бруска буде кратною половині довжини хвилі λ. Відповідно, при відсутності загасання в бруску можна було б збудити необмежену кількість резонансів – мод коливань.

Першу моду коливань, коли довжина бруска рівна половині довжини хвилі, прийнято називати основною модою, а інші 2,3,4 і так далі – вищими модами коливань.

Частота резонансу F_r поздовжніх по довжині бруска коливань основної моди залежить від швидкості звука в матеріалі, з якого виготовлений п’єзоелемент.

$$F_r = \frac{C_s}{L}, \tag{1.15}$$

де L - довжина бруска

Збудимо в п’єзоелектричному бруску резонанс основної моди поздовжніх по довжині коливань. В результаті суперпозиції хвиль отримаємо синусоїдальний розподіл відносно центру п’єзоелемента деформацій елементарних об’ємів в стоячій хвилі в сталому режимі (рис.1.16).

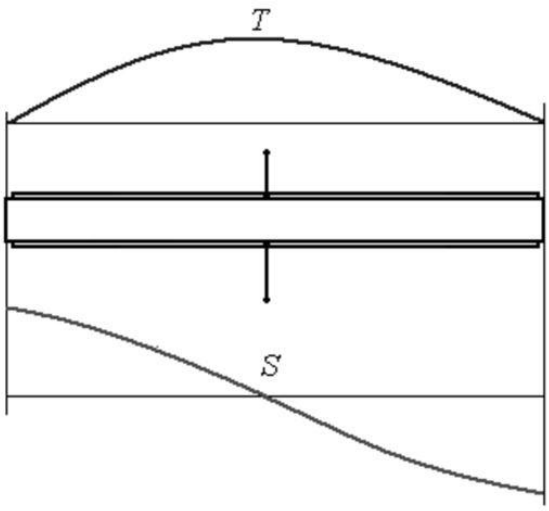


Рис. 1.7 – Резонанс основної моди поздовжніх по довжині коливань. Т-механічна напруга, S - зміщення точок п’єзоелемента [6]

При цьому максимум зміщення точок п’єзоелемента буде на кінцях бруска. Відповідно і точки кінців п’єзоелемента будуть рухатися з максимальними по відношенню до інших точок коливальними швидкостями.

З іншої сторони, якщо виділити в бруску деякий елементарний об’єм, то цей об’єм буде відчувати розтягування і стискання зі сторони об’ємів, які сусідні з ним. Максимальна величина цього зусилля характеризує механічну напруженість Т в п’єзоелементі. На його кінцях вона рівна нулю при будь-яких умовах і це очевидно. В інших точках вона визначається як похідна від швидкості коливань. Тобто, зміна механічної напруженості по довжині бруска відбувається по синусоїдальному закону і для основної моди коливань вона буде максимальною в центрі п’єзоелемента.

П’єзоелектричний брусок, який збуджено на першій моді коливань при перенавантаженні розірветься в центрі, тобто там, де максимальна механічна напруженість. Параметр, який характеризує межу механічної напруженості позначається σ. Даний параметр визначається властивостями матеріалу п’єзоелемента [6].

Електричний резонанс. Зв'язок механічного та електричного резонансу

Узагальнену електричну схему п'єзоелектричного резонатора двигунаможна представити у вигляді n паралельно ввімкнених послідовних коливальних контурів, які відповідають модам коливань, зашунтованих статичною ємністю C_0 (рис.1.17).

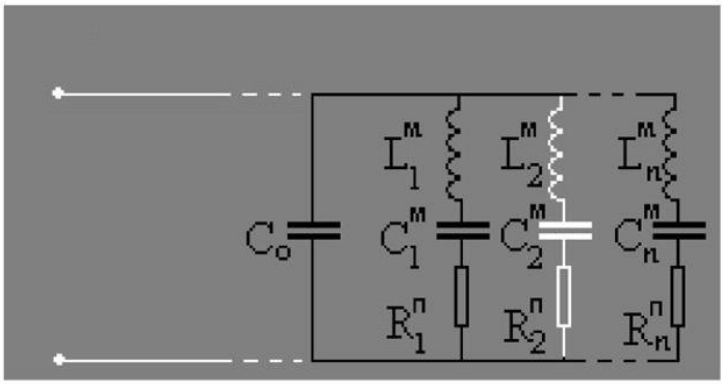


Рис.1.8 – Еквівалентна електрична схема п'єзоелектричного резонатора (двигуна) [6]

Один з них (можливо і два) є робочими (наприклад показано білим кольором) [6].

Існує еквівалентність між диференційними рівняннями, які описують гармонійні демпфовані коливання механічної системи, що збуджується синусоїдальною силою, і рівняннями, що описують коливальний процес в плечах L1,C1,R1 і C0 контуру, зображеного на рис.1.18.а, збудження якого відбувається синусоїдальною напругою:

- індуктивність L1 є еквівалентом інертної маси механічної системи;
- ємність C1 – еквівалент механічної жорсткості;
- резистор R1 слугує еквівалентом механічних втрат;
- ємність C0 – електрична ємність зразку.

Розглянемо еквівалентну електричну схему п'єзоелектричного резонатора на одній з мод коливань.

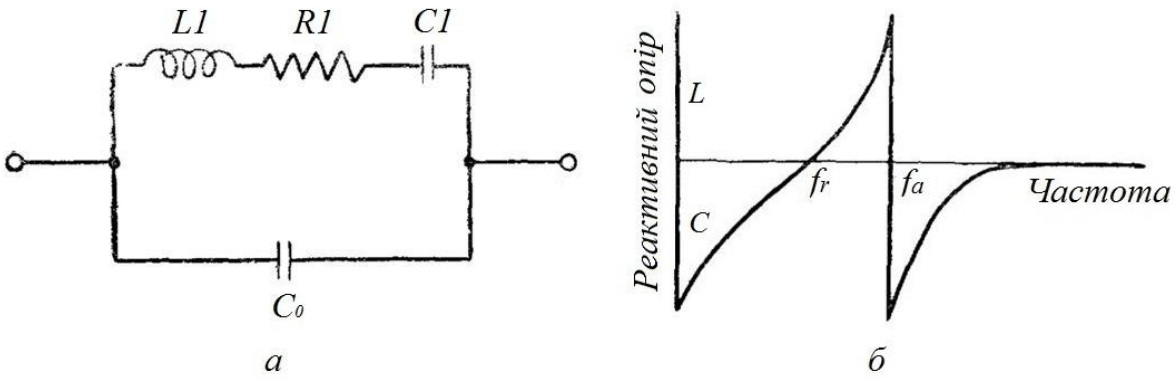


Рис.1.9 – Еквівалентна електрична схема п’єзоелектричного резонатора на одній з мод коливань (а); залежність реактивного опору кристалу від частоти (б) [30]

Як видно з графіку залежності реактивного опору кристалу від частоти, в більшій частині спектру реактивна провідність має ємнісний характер і тільки в вузькому діапазоні частот f_a–f_r резонатор поводить себе подібно індуктивності. На частотах f_a і f_r реактивна складова повної провідності рівна нулю. Частоту f_r прийнято називати частотою резонансу, а f_a — частотою антирезонансу. Також існують дві додаткові резонансні частоти f_s та f_p, які не вказані на графіку:

- f_s – частота, при якій спостерігається максимум провідності в динамічній гілці L, C, R.

- f_p – частота, при якій спостерігається мінімум провідності в динамічній гілці L, C, R.

Частоту f_s називають частотою послідовного резонансу. Ця частота співпадає з частотою механічного резонансу резонатора і, таким чином, характеризує найбільш точно механічні властивості п’єзоелектричного резонатора. Оскільки частоти f_r та f_a не суттєво відрізняються від частот f_s та f_p, для спрощення будемо вважати, що f_r=f_s та f_a=f_p [31].

Значення частоти електричного (та механічного) резонансну розраховується за наступною формулою:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \tag{1.16}$$

Електрична добротність Q_e коливального контуру залежить від величини тангенсу кута діелектричних втрат, який визначається властивостями матеріалу резонатора.

$$Q_e = \frac{1}{tg\,\delta} \tag{1.17}$$

На рис.1.19 представлено графік залежності струму через резонатор від частоти збудження.

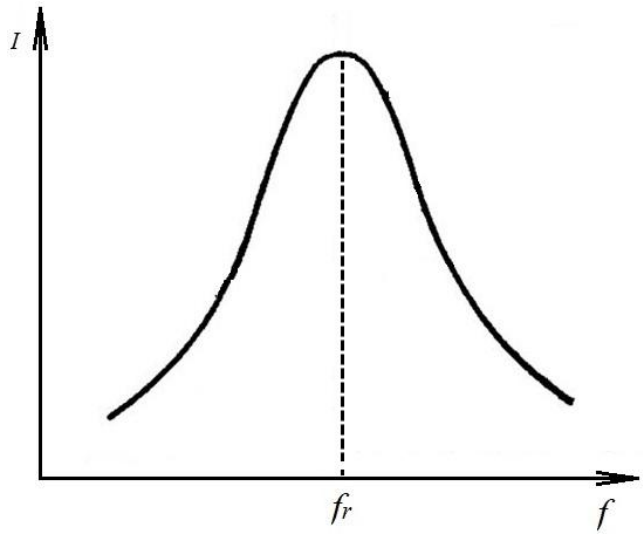


Рис.1.19 – Графік залежності струму через резонатор в залежності від частоти збудження [7]

Амплітуда струму при частоті f_r визначається тільки величиною активного опору R.

Види деформацій

Основними видами коливань п’єзоелектрика як будь-якого пружного тіла є:

- розтягу-стискання;
- зсуву;
- вигину;
- кручення.

При коливаннях **розтягу-стискання** (їх також називають поздовжніми коливаннями) рух частинок кристалу відбувається паралельно напрямку розповсюдження хвилі, тобто перпендикулярно до її фронту.

Коливання зсуву характеризуються спотворенням кутів в площині, яка відчуває зсув. Рух частинок кристалу при цьому відбувається перпендикулярно напрямку хвилі, тобто паралельно її фронту.

При **коливаннях вигину** кристал вигинається в деякій площині. При цьому одні частини кристалу розтягуються, інші – стискаються.

Коливання кручення характеризуються відносними кутовими зміщеннями суміжних перерізів кристалу, які відбуваються навколо деякої вісі. Ця вісь кручення паралельна напрямку розповсюдження хвилі, тобто перпендикулярна її фронту.

Характер деформацій п’єзоелементів для деяких видів деформацій представлено на рис.1.20.

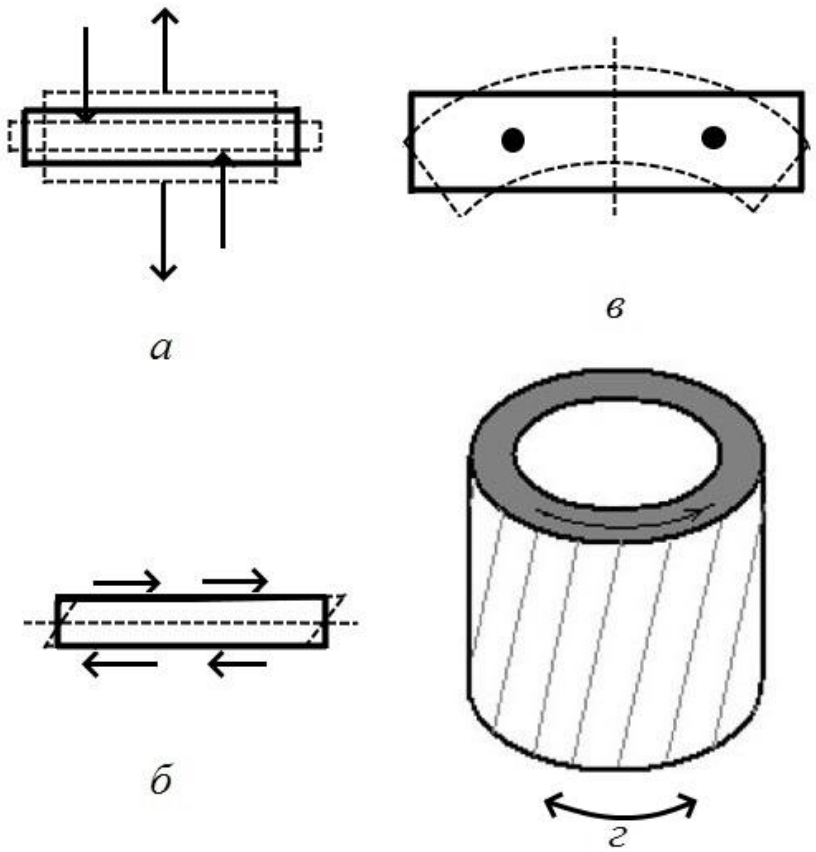


Рис.1.10 – Деформації п’єзоелементів: *а* - розтягу-стискання; *б* - зсув по товщині; *в* - вигин по товщині бруска; *г*-кручення [6, 20]

Основні характеристики матеріалів резонатора

Таблиця 1.2 – Основні параметри п’єзокерамічних матеріалів [17, 32]

Марка матеріалу	PZT-4	PZT-5A	PZT-5H	PZT-6A	PZT-6B	PZT-7A	PZT-8	PZT-2
Діелектрична проникність $\varepsilon^{T}_{33}/\varepsilon_0$	1300	1700	3400	1050	460	425	1000	450
Тангенс кута діелектричних втрат в слабких полях	0,004	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,004	0,005
Змінне поле, при якому tg δ = 0,04, *кв/см*	3,9	0,45	0,3	3,2	11,0	2,6	6	1,8
Температура Кюрі T_K, °*C*	328	365	193	335	350	350	300	370
П’єзомодуль $-d_{31}\cdot 10^{12}$, *к/н*	123	171	274	80	27	60	93	60
П’єзомодуль $d_{33}\cdot 10^{12}$, *к/н*	280	374	593	189	71	150	218	152
Температурний коефіцієнт частоти $TKf_г\cdot 10^6$, 1/°*C*	660	320	1200	28	28	400	270	210
Механічна добротність Q_M	500	75	65	450	1300	600	1000	680
Швидкість звуку $\upsilon_{зв}\cdot 10^{-3}$, *м/сгк*	4,6	4,3	4,6	4,6	4,8	4,8	--	4,4
Густина, ρ, *т/м*^{3}	7,5	7,75	7,5	7,45	7,55	7,6	7,6	7,6

Форма резонатора та види коливань

Як пояснювалося раніше (підрозділ 1.2.1), для виникнення наноеліпсу в зоні фрикційного контакту необхідне виконання двох умов:

1.Збудження двох взаємно-перпендикулярних коливань з тіл фрикційного контакту без взаємної передачі енергії.

2.Зсув по фазі взаємно-поперечних коливань.

Пояснення пункту 1 виходить за рамки даної роботи.

Розглянемо детальні реалізації пункту 2, а саме забезпечення зсуву фаз між двома взаємно поперечних (перпендикулярних) механічними коливаннями рівним 90°.

На рис.1.21 показано залежність амплітуди зміщення S і зсуву фаз φ між зміщенням і електричною напругою п`єзоелемента в залежності від частоти збудження резонатора.

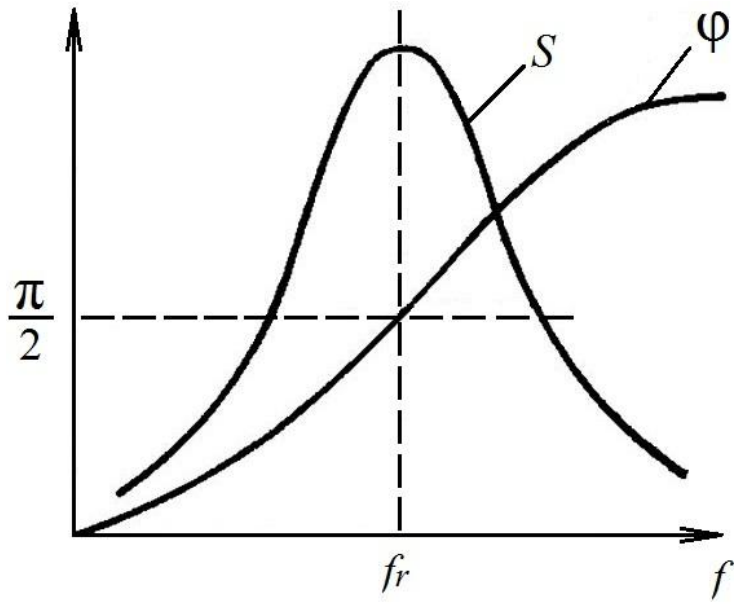


Рис.1.11 – Частотна залежність амплітуди зміщення S і зсуву фаз φ між зміщенням і електричною напругою п`єзоелемента [7]

В околицях резонансу зсув фаз змінюється від нуля до 180° (π).

У зв`язку з цим, для забезпечення зсуву фаз рівним 90° між двома механічними резонансами необхідно реалізувати зсув двох електричних резонансів. Частота резонансу по ширині резонатора повинна бути на ~2% вищою

від частоти резонансу по довжині. В результаті, робоча частота f_r повинна знаходитися між вище згаданими частотами (рис.1.22).

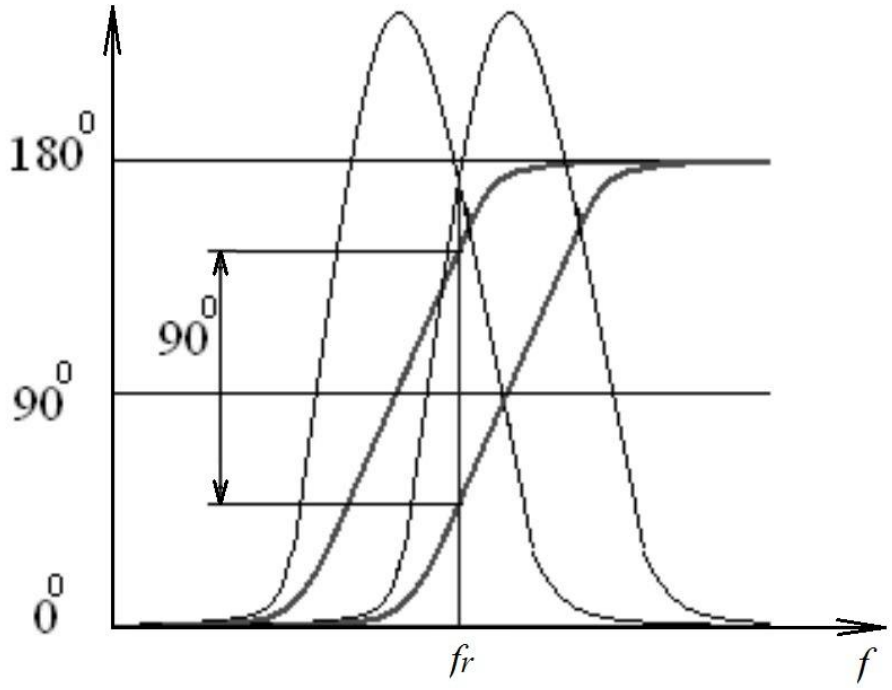


Рис.1.12 – Частотна залежність амплітуди зміщення S і зсуву фаз φ між зміщенням і електричною напругою п`єзоелемента для двох механічних коливань [6]

Коригування частот здійснюється шляхом корекції пропорції між довжиною та шириною резонатора.

П`єзоелектричний двигун, який розглядається в даній роботі працює на першій повздовжній моді по ширині резонатора та другій моді по довжині. Таким чином, довжина резонатора повинна бути в ~2 рази більшою від ширини (рис.1.23).

П`єзоелектричний резонатор має 3 обкладки (електроди): 2 знаходяться з однієї сторони резонатора (E1 та E2), третя (на рисунку не показано) – з іншої.

Для вимірювання першої моди по ширині резонатора (частота резонансу F_W) необхідно з`єднати джерело змінної напруги до електрода E3 та електродів E1, E2, які повинні буди замкнені між собою.

Для вимірювання другої моди коливань по довжині резонатора (частота резонансу F_L) необхідно під`єднати джерело змінної напруги до електродів Е1 та Е2.

Для вимірювання результуючої (першої моди по ширині та другої моди коливань по довжині) резонансної характеристики необхідно з`єднати джерело змінної напруги з електродами Е3 (спільний електрод) та Е1. В результаті “зуб” резонатора буде рухатися проти годинникової стрілки та описувати наноеліпс.
При даному з`єднанні каретка двигуна буде рухатися вліво.

Аналогічно, з`єднавши джерело змінної напруги з електродами Е3 (спільний електрод) та Е2, “зуб” резонатора буде рухатися за годинниковою стрілкою. При даному з`єднанні каретка двигуна буде рухатися вправо.

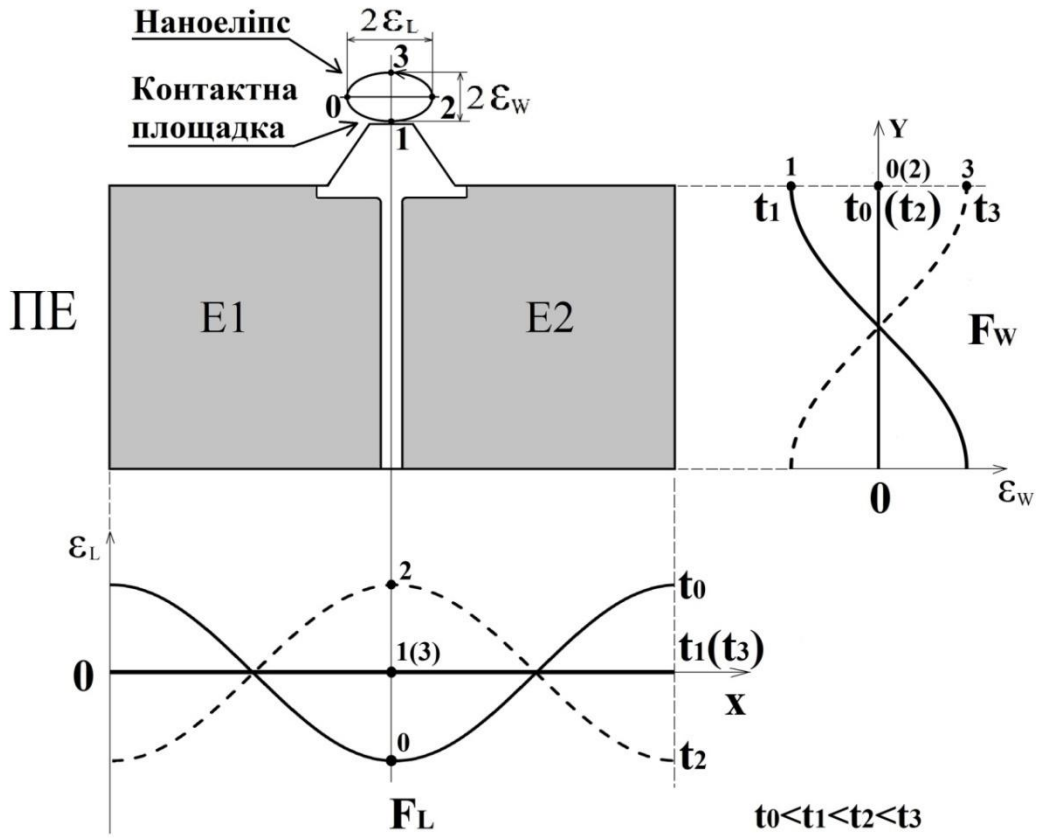


Рис.1.13 – Фазові переходи при формуванні наноеліпсу руху

Фазові точки 0, 1, 2, 3 на наноеліпсі відповідають синхронізуючим моментам наноколивань t0, t1, t2, t3 для ортогональних повздовжніх хвиль з частотами F_L, F_W та амплітудами ε_L та ε_W відповідно.

За допомогою формули 1.15 можна оцінити частоту f_r знаючи швидкість розповсюдження хвилі $\boldsymbol{Cs}$ (визначається матеріалом п`єзоелемента) та довжину резонатора L [6, 7, 33].

1.2.2.2. Каретка (направляюча)

Одним з основних складових компонентів лінійного п’єзоелектричного двигуна (як наслідок і маніпулятора) є направляюча (каретка), яка також є і основним виконавчим елементом. Оскільки мова йде про мікро- та нанодіапазони швидкості руху мікроманіпулятора, то обов’язковою вимогою є використання прецизійних складових таких пристроїв, до яких ставляться дуже жорсткі вимоги по точності роботи.

Направляючими називають пристрої, за допомогою яких здійснюється взаємне переміщення елементів механізму по траєкторії.

До направляючих, які працюють в точних кінематичних ланцюгах приладів, висувають наступні основні вимоги:

- висока точність прямолінійності руху;
- мінімальний люфт;
- легкість руху;
- плавність руху;
-стабільність характеристик направляючої під дією температурних коливань.

Направляючі класифікують за видом руху на лінійні та кутові. Зосередимо увагу на направляючих лінійного руху [34, 35].

Класифікація лінійних направляючих представлена на рис.1.24.

В залежності від виду тертя лінійні направляючі поділяються на:

- направляючі з тертям ковзання;
- направляючі з тертям кочення;
- направляючі з тертям пружності.

По формі направляючих розділяються на циліндричні та призматичні.

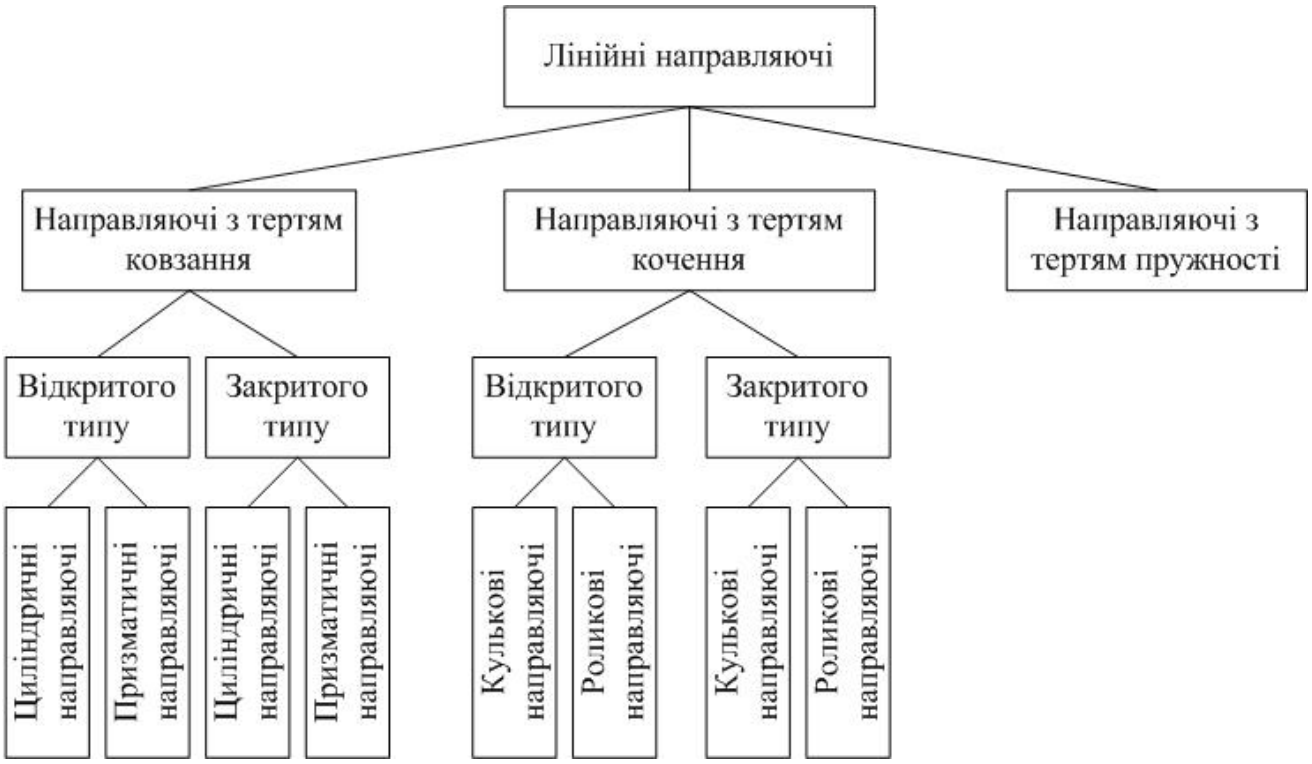


Рис.1.14 – Класифікація направляючих лінійного руху [36]

Зазвичай, вибір конструктивної схеми направляючої обумовлюється наступним:

- необхідною точністю направлення та величиною зносу;
- величиною сили тертя і допустимого навантаження;
- чутливістю до температурних змін;
- вартістю їх виготовлення.

В точних приладах переважне поширення отримали направляючі з тертям кочення. Такі направляючі використовуються в механізмах, які працюють при незначному коливанні температури і приводяться в рух рукою або двигуном з достатнім запасом потужності для того, щоб подолати підвищений момент тертя, що виникає в направляючих при зміні температури та застигання мастила.

Направляючі для прямолінійного руху з тертям ковзання

Направляючі з тертям ковзання, в залежності від форми робочих поверхонь пари деталей направляючої та направної, розділяють на направляючі по циліндричним поверхням і направляючі по плоским поверхням. Крім того,

застосовуються комбіновані направляючі, а в спеціальних випадках направляючі, переріз яких має криволінійну форму. Циліндричні направляючі у виробництві простіші, ніж інші і можуть бути виготовлені з високою точністю. Недоліком циліндричних направляючих є неможливість зменшення проміжку між робочими поверхнями при їх зносі.

Направляючі з тертям ковзання по плоским поверхням не знайшли широкого застосування в точних механізмах, здебільшого внаслідок залежності їх роботи від температурних умов та ступеню змащення.

Направляючі для прямолінійного руху з тертям кочення

В таких направляючих тертя ковзання замінено на тертя кочення, шляхом застосування кульок або роликів, які закріплюються на одній з деталей і виступають в ролі опори для інших. В останньому випадку, тертя ковзання виключається лише частково, оскільки залишається тертя ковзання ролика відносно його осі.

Заміна роликів на кульки (шарикопідшипники) дозволяє виключити тертя ковзання ролика відносно вісі. Направляючі на кульках компактні, мають велику легкість ходу та добре сприймають навантаження в різних напрямках. В більшості конструкцій профіль канавок для кульок створений прямими лініями, оскільки обробка таких канавок є простішою порівняно з обробкою канавки іншої форми. Для утримання кульок в канавках застосовуються плоскі прямі сепаратори. Сепаратор має отвори для кульок і виріз, в якому розташований штифт, що обмежує переміщення сепаратора [30, 31].

Сучасні виробники направляючих пропонують направляючі для широкого кола застосувань різноманітних типів та з різними характеристиками, які відрізняються розмірами та виконанням.

Так, широкої популярності отримали рейкові направляючі з елементами кочення.

Прецизійні рейкові направляючі для широкого ряду станків, оброблювальних центів, спеціального обладнання, а також вимірювальних машин

представляють собою пару направляючи рейок з розміщеними між ними сепаратором та елементами кочення. Діапазон руху таких направляючих визначається довжиною рейок та сепаратора.

Лідерами по виробництву лінійних прецизійних направляючих кочення є компанії “NB” [37], “IKO” [38], “PM Bearings” [39], “HIWIN” [40].

В лінійному п’єзоелектричному двигуні, на базі якого розроблено маніпулятор, використовується кулькова направляюча з тертям кочення BSP-1540SL фірми “IKO” з діапазоном переміщення 24мм.

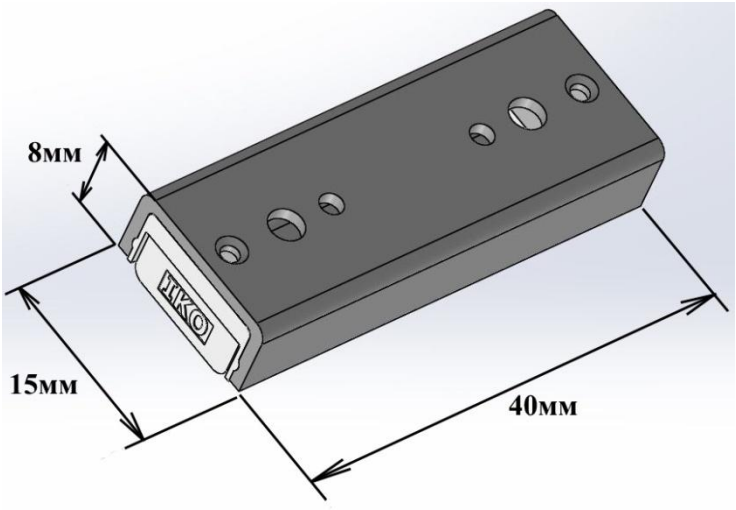


Рис.1.15 – Лінійна направляюча BSP-1540SL фірми “IKO”

Направляюча складається з 2-х П-подібних металевих профілів (верхнього та нижнього) 1, 4-х заглушок 2 та 2-х пластикових сепараторів 3 з кульковими підшипниками 4 (Додаток Б).

1.2.2.3. Підвіска

В ролі пружного елемента, який забезпечує необхідну силу притискання “зуба” п’єзоелектричного резонатора до каретки, виступає силіконова трубка. Більш точне регулювання сили притискання здійснюється за рахунок установчих гвинтів. Для того, щоб резонатор щільно розміщувався в картриджі, використовуються дві додаткові трубки, які встановлюються вздовж ширини резонатора.

1.2.3. Конструкція двигуна

В основі лінійного п’єзоелектричний двигун, на базі якого побудований маніпулятор, лежить алюмінієва пластина 1, на яку монтується картридж 2, каретка (направляюча) 3 та бампер 4, завдяки якому довжина та ширина двигуна стають однаковими. Ця особливість забезпечує використання для всіх осей маніпулятора двигун однакової конструкції, що зменшує вартість виробництва в подальшому та підвищує ремонтопридатність.

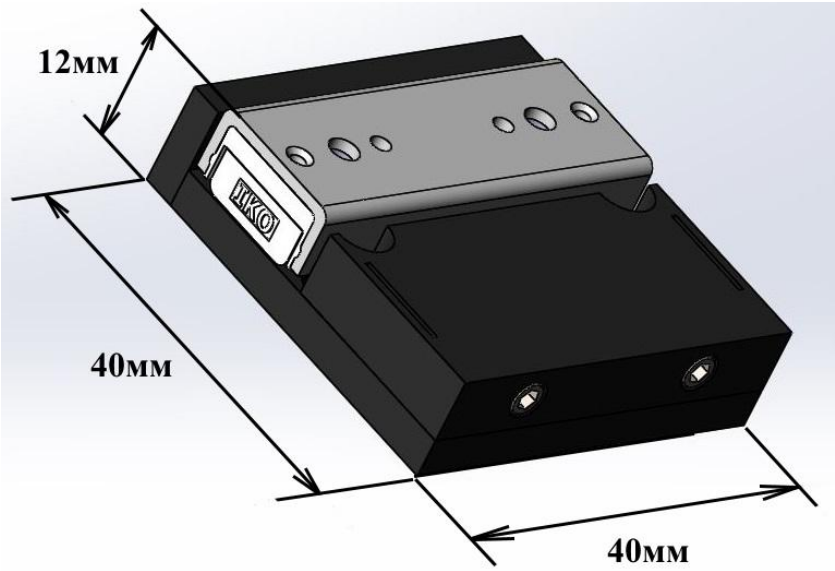


Рис.1.16 – Лінійний п’єзоелектричний двигун з прямокутним резонатором на базі направляючої BSP-1540SL

Як картридж, так і кришка 5, виготовлені з пластика. Кришка забезпечує електричну ізоляцію між п’єзоелементом 6 та основою двигуна, а також визначає взаємне розміщення “зуба” п’єзоелемента та робочої поверхні на каретці по висоті.

Для мінімізації руху п’єзоелемента в картриджі по горизонталі використовуються дві силіконові трубки 7, які встановлюються вздовж ширини резонатора.

Притиск “зуба” п’єзоелектричного резонатора до каретки забезпечують дві силіконові трубки 8, які встановлюються між п’єзоелементом та опорною пластиною 9. Точне регулювання сили притиску забезпечується за допомогою

установчих гвинтів 10, які опираються на опорну пластину. Закручуючи гвинти сила притиску буде збільшуватися. Оскільки для кожної з вісей маніпулятора необхідна різна сила, яку повинен розвивати двигун, то дана функція є досить важливою. В першу чергу це стосується двигуна вісі Z, оскільки він працює в вертикальній площині і притиск повинен бути достатнім, щоб за рахунок фрикційного контакту між “зубом” п’єзоелемента та поверхнею каретки утримувати масу робочого інструмента маніпулятора та його навантаження.

Для мінімізації розмірів маніпулятора енкодер 11, плату 12, на якій він розміщений, а також скейл (лінійка енкодера) 13 розміщено безпосередньо в лінійній направляючій. Для зручності кріплення плати енкодер та лінійки до корпусу направляючої використовуються перехідні пластикові пластини 14. Також товщина даних пластин забезпечує необхідний проміжок між енкодером та його лінійкою для коректної роботи оптичного енкодер.

Електричне з’єднання між платою енкодер, п’єзоелементом та роз’ємом двигуна 15 забезпечується за допомогою гнучких плат (Flexible PCB) 16.

З’єднання основних елементів конструкції здійснюється за допомогою гвинтів 17 (Додаток В).

Висновки по розділу 1

1.Досліджено принцип роботи п’єзоелектричного двигуна з прямокутним резонатором та елементів конструкцій мікроманіпуляційної системи та з’ясовано, що резонатор п`єзоелектричного двигуна виготовляють з полікристалічних п’єзоелектриків, які в свою чергу, можуть бути отримані тільки з сегнетоелектричних з’єднань, так як тільки у сегнетоелектриків можлива зміна напрямку спонтанної поляризації під дією прикладеного поля і, як наслідок, наявності залишкової поляризації в напрямку цього поля.

2.Розглянуто принцип формування механічних коливань в п`єзоелектричному елементі та встановлено, що лінійний п’єзоелектричний двигун працює за рахунок гладкого фрикційного контакту між кареткою двигуна та штовхачем (“зубом”) п’єзоелектричного елемента. “Зуб” здійснює коливальні

рухи по траєкторії еліпса. Для виникнення даного руху повинні виконуватися дві умови:

- збудження двох взаємно-перпендикулярних механічних коливань в резонаторі п’єзоелектричного двигуна.

- зсув по фазі взаємно-поперечних механічними коливань повинен становити близько 90°.

При виконанні даних умов фрикційний контакт грає роль випрямляча механічних коливань, тобто, за рахунок фрикційного контакту, рух “зуба” по траєкторії еліпса перетворюється в лінійних рух каретки двигуна.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ КОНСТРУКЦІЇ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПЕРЕМІЩЕННЯ РОБОЧОГО ОРГАНУ МІКРОМАНІПУЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Використання лінійних п'єзоелектричних двигунів в мікроманіпуляційних системах [1, 2] потребує дослідження їх кутової стабільності в процесі руху лінійного двигуна, оскільки, наприклад, при маніпулюванні в мікро- та нанопросторі кутова нестабільність може призводити до значних похибок.

З метою врахування даних похибок необхідно скласти математичну модель, яка б враховувала характеристики направляючих п'єзоелектричних двигунів, а саме характеристики відхилень від прямолінійності – кутових переміщень Pitch, Yaw та Roll.

З метою покращення характеристик руху робочого органу мікроманіпуляційної системи необхідно дослідити та оцінити параметри мертвого ходу, що виникає при реверсі руху двигуна.

2.1. Мертвий хід

Мертвий хід – це характеристика двигуна, яка проявляється (виникає) при реверсі руху механічних систем. Величина мертвого ходу визначається проміжком між ротором (п'єзоелементом) та поверхнею, на яку від опирається при русі.

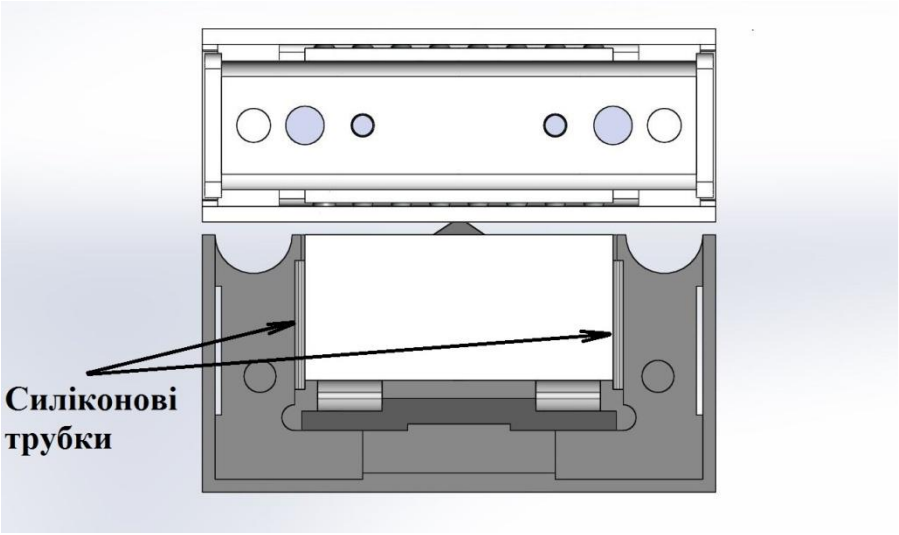


Рис.2.1 – Конструкція кріплення п'єзоелемента в картриджі двигуна

Фіксація п’єзоелемента в картриджі забезпечується за рахунок силіконових трубок (рис.2.1).

Трубки виконую також додаткові функції:

- використовуються в ролі підвіски, яка згладжує нано коливання резонатора при русі по нерівній поверхні (в нанометровому діапазоні);

- незважаючи на фіксацію п’єзоелемента, не суттєво погіршує механічну та електричну добротність резонатора.

Так як силіконова трубка є пружнім елементом, то при початку руху двигуна резонатор опирається на одну з трубок (в залежності від напрямку руху), в результаті чого її товщина (проміжок між резонатором та картриджем) зменшується замість того, щоб рухати каретку. При реверсі руху цей проміжок є дещо більшим, ніж при русі в одному напрямку і для двигуна, який використовується в представленому маніпуляторі становить близько 100мкм.

Даний параметр не є критичним в маніпуляційних системах на базі лінійних п’єзоелектричних двигунів оскільки енкодер, який визначає положення каретки та робочого інструмента, розміщений безпосередньо на каретці (направляючій) (порівняно, наприклад, з маніпулятор PSF-3, в якому лінійне переміщення каретки забезпечується за рахунок гвинта-гайки, а енкодер, який відслідковує переміщення каретки, встановлений на двигуні).

Основна мета опису даного параметра є пояснення однієї з причин затримки відклику (початку руху) двигуна на сигнали керування. Хоча, порівняно з іншими типами двигунів, п’єзоелектричний двигун знаходиться в лідерах по даному параметру.

Також, даний параметр використовується системою керування двигуна (маніпулятора) при розрахунку тривалості імпульсу керування для досягнення мінімального кроку двигуна.

Відсутність силіконової трубки призводить до необхідності точного виготовлення картриджу двигуна, що підвищує вартість конструкції та не

вирішую проблему зі згладжуванням нано коливання резонатора при русі по нерівній поверхні (мова йде про манометровий діапазон).

2.2. Кутова стабільність мікроманіпуляційної системи

2.2.1. Математична модель впливу кутів Pitch, Yaw та Roll на відхилення від прямолінійної траєкторії руху направляючої п'єзоелектричного двигуна

Параметрами прямолінійності руху лінійного п'єзоелектричного двигуна є кутові переміщення Roll(θx), Pitch(θy) та Yaw(θz) (рис.2.2). Roll(θx) – кут розвороту каретки двигуна при переміщенні її вздовж вісі X навколо координати X. Pitch(θy) – кут розвороту каретки двигуна при переміщенні її вздовж вісі X навколо координати Y, а Yaw(θz) – кут розвороту каретки двигуна при переміщенні її вздовж вісі X навколо координати Z.

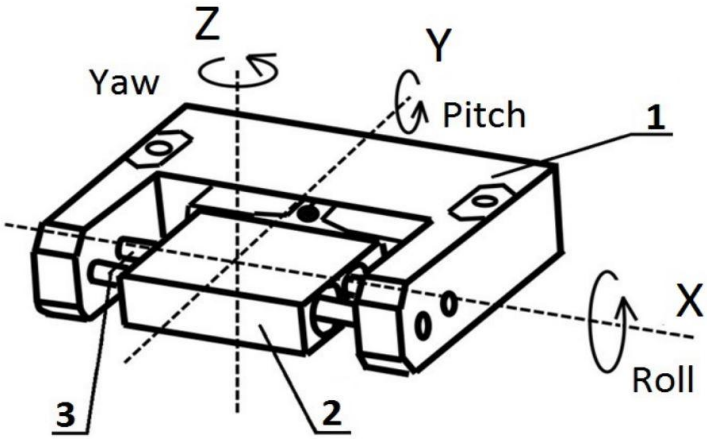


Рис.2.2 – Схема лінійного двигуна: 1 – основа п'єзоелектричного двигуна з резонатором; 2 – рухома каретка; 3 – направляюча

Згадані вище кутові переміщення Roll(θx), Pitch(θy) та Yaw(θz) змінюються в просторі по всій довжині лінійної направляючої п'єзоелектричного двигуна і суттєво впливають на додаткові зміщення робочого інструменту мікроманіпуляційної системи.

Контроль цих кутів є досить складною технічною задачею.

Робочий інструмент (наприклад, капілярний ін'єктор) може розміщуватися на значній відстані (наприклад, з метою маніпулювання під мікроскопом) від

мікроманіпуляційної системи (100-150) мм. При цьому незначні кутові зміщення направляючої лінійного двигуна можуть призвести до значних похибок при лінійному маніпулюванні.

Для прикладу нижче на рис.2.3 показано вплив кута Yaw(θz) на зміщення робочого інструменту мікроманіпуляційної системи при русі вздовж вісі X. Наведена схема включає лінійний п'єзоелектричний двигун 1, який містить рухому каретку 2 із закріпленим на ній кварцовим ін'єктором 4 через тримач 3. При цьому $l_{трим}$ – довжина тримача та інструмента, які закріплені на каретці лінійного п'єзоелектричного двигуна, $l_{Xтрим}$ – довжина проекції тримача на вісь переміщення при кутовому зміщенні каретки лінійного п'єзоелектричного двигуна. Фактично величина $l_{Xтрим}$ відображає реальне переміщення кінця робочого інструмента вздовж вісі лінійного переміщення (вісі X). Кут α – величина кутового зміщення каретки, l_Y – лінійне зміщення робочого кінця інструмента по вісі Y.

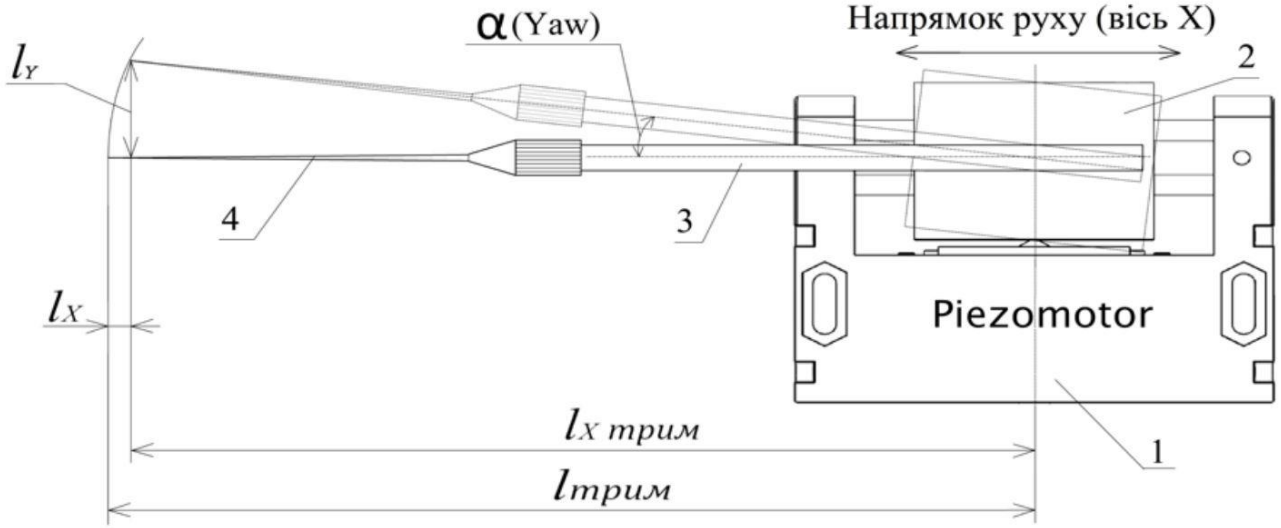


Рис.2.3 – Схема лінійного двигуна з робочим інструментом: 1 – лінійний п'єзоелектричний двигун; 2 – рухома каретка; 3 – тримач

Як видно з рис.2.3 величина $l_{Xтрим}$ дорівнюватиме:

$$X_{трим} = l_{трим} \cdot \cos a \tag{2.1}$$

При цьому відхилення робочого інструменту l_X по вісі X буде дорівнювати:

$$l_x = l_{трим} - l_{Xтрим} \tag{2.2}$$

Зміщення l_Y по вісі Y:

$$l_Y = l_{трим} \cdot \sin a \tag{2.3}$$

В результаті, при зміщенні каретки двигуна на величину $l_{зад}$ з урахуванням кутових відхилень кінець робочого інструменту буде переміщено по вісі X на відстань $\boldsymbol{l}_{Xреал}$, що розраховується за наступною формулою:

$$l_{Xреал} = l_{зад} - l_{трим} \cdot \cos a \tag{2.4}$$

Так як робочий інструмент, який закріплено на каретці двигуна, при здійсненні лінійного переміщення вздовж вісі переміщення за рахунок наявності кутових переміщень (відхилень) Pitch(θy) та Yaw(θz) здійснює переміщення в просторі, то кут a буде представляти собою сумарний кут відхилень $a_{сум}$, який складається з кутів Pitch(θy) та Yaw(θz), а також залежить від заданого лінійного переміщення направляючої (каретки). Тоді величина переміщення робочого інструмента вздовж осі X розраховуються за наступною формулою:

$$l_{Xреал} = l_{зад} - l_{трим} \cdot \cos(a_{сум}(l_{зад})) \tag{2.5}$$

Визначимо сумарний кут зміщення лінійної направляючої. Для цього розглянемо просторову схему руху лінійної направляючої, яку представлено на рис 2.4. З рисунку видно, що під дією кутових переміщень Pitch(θy) та Yaw(θz) реальне переміщення $l_{реал}$ відрізняється від заданого $l_{зад}$. Разом з величиною загального зміщення $l_{зм}$ вони формують трикутник, в якому кут $a_{сум}$ і буде сумарним кутом відхилення реального переміщення від заданого.

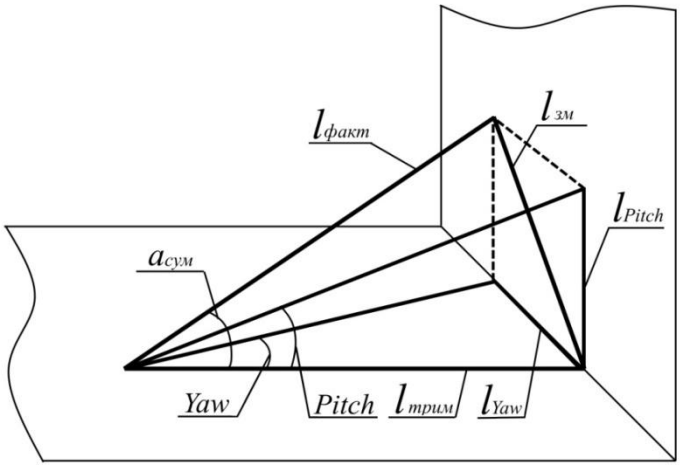


Рис.2.4 – Просторова схема руху лінійної направляючої

Отже, з прямокутного трикутника (який утворений переміщеннями $l_{зм}$, $l_{трим}$ та $l_{реал}$) визначимо тангенс сумарного кута:

$$\mathrm{tg}\, a_{сум} = \frac{l_{зм}}{l_{трим}}\,. \tag{2.6}$$

Загальне зміщення робочого інструмента $l_{зм}$ відповідно до рисунку можна визначити за формулою:

$$l_{зм} = \sqrt{l_{Pitch}^2 + l_{Yaw}^2}, \tag{2.7}$$

де l_{Pitch} – зміщення, яке вносить в систему через наявність розвороту каретки (направляючої) навколо координати Y, тобто Pitch(θy);

l_{Yaw} – зміщення, яке вносить в систему через наявність розвороту каретки (направляючої) навколо координати Z, тобто Yaw(θz).

Для визначення величин l_{Pitch} та l_{Yaw} розглянемо два трикутника, сторонами яких вони є. В результаті отримаємо:

$$l_{Pitch} = l_{трим} \cdot \mathrm{t}g(Pitch(l_{зад}))^2, \tag{2.8}$$

$$l_{Yaw} = l_{трим} \cdot \mathrm{t}g(Yaw(l_{зад}))^2, \tag{2.9}$$

де кути Pitch(θy) та Yaw(θz) є безпосередньо кутами відхилень від прямолінійності рухливого столику направляючої (каретки), які є функціями переміщення.

Використовуючи формули (2.7)-(2.9), визначимо величини загального (результуючого) зміщення:

$$l_{зм} = \sqrt{(l_{трим} \cdot \mathrm{t}g(Pitch(l_{зад})))^2 + (l_{трим} \cdot \mathrm{t}g(Yaw(l_{зад})))^2}, \tag{2.10}$$

$$l_{зм} = l_{трим} \cdot \sqrt{tg^2(Pitch(l_{зад})) + tg^2(Yaw(l_{зад}))}. \tag{2.11}$$

Отже:

$$\boldsymbol{tg(a_{сум}) = \frac{l_{трим} \cdot \sqrt{tg^2(Pitch(l_{зад})) + tg^2(Yaw(l_{зад}))}}{l_{трим}}}, \tag{2.12}$$

$$tg(a_{сум}) = \sqrt{tg^2(Pitch(l_{зад})) + tg^2(Yaw(l_{зад}))}. \tag{2.13}$$

Тоді, сумарний кут відхилення каретки (направляючої) від прямолінійності буде рівним:

$$a_{\text{сум}} = arctg\sqrt{tg^2\big(Pitch(l_{\text{зад}})\big) + tg^2\big(Yaw(l_{\text{зад}})\big)}. \quad (2.14)$$

Таким чином, відповідно до формули (2.5) з врахуванням формули (2.14) вираз (2.4) матиме вигляд:

$$l_{Xреал} = l_{зад} - l_{трим} \cdot \cos\left(arctg\sqrt{tg^2\left(Pitch\big(l_{\text{зад}}\big)\right) + tg^2\left(Yaw\big(l_{\text{зад}}\big)\right)}\right). \quad (2.15)$$

Тобто, при здійсненні кареткою (направляючою) переміщення вздовж осі X, відбувається зміщення робочого інструменту в просторі по координатам Y та Z. З рис. 2.4 видно, що зміщення робочого інструменту по осі Y відповідає розвороту каретки (направляючої) навколо осі Z, тобто відхилення по Yaw(θz). Аналогічно, зміщення по вісі Z – розворот направляючої навколо осі Y, тобто відхилення по Pitch(θy). Таким чином, відповідно до рис. 2.4 зміщення по вісі Y $\boldsymbol{l_y}$ матиме вигляд:

$$l_Y = l_{трим} \cdot \sin\big(Yaw(l_{зад})\big), \quad (2.16)$$

а зміщення по вісі Z $\boldsymbol{l_Z}$:

$$l_Z = l_{трим} \cdot \sin\big(Pitch(l_{зад})\big). \quad (2.17)$$

Таким чином, при виконанні лінійного переміщення направляючою з п’єзоелектричним двигуном лінійного переміщення вздовж вісі X, її реальне переміщення буде визначатися наступною системою рівнянь:

$$\begin{cases} l_{Xреал} = l_{зад} - l_{трим} \cdot \cos\left(arctg\sqrt{tg^2\left(Pitch\big(l_{\text{зад}}\big)\right) + tg^2\left(Yaw\big(l_{\text{зад}}\big)\right)}\right) \\ l_Y = l_{трим} \cdot \sin\big(Yaw(l_{зад})\big) \\ l_Z = l_{трим} \cdot \sin\big(Pitch(l_{зад})\big) \end{cases}, \quad (2.18)$$

де перше рівняння описує переміщення робочого інструменту вздовж вісі руху X, друге та третє рівняння описують лінійне зміщення по осям Y та Z відповідно. При цьому, кутові відхилення Pitch(θy) та Yaw(θz) змінюються на всій дистанції руху каретки (направляючої) і є функціями лінійного переміщення.

2.2.2. Математична модель переміщення трьохосьової лінійної мікроманіпуляційної системи

Мікроманіпуляційна система представляє собою трьохосьову систему керування об’єктами в просторі. Тобто, такі системи дозволяють здійснювати переміщення по трьох координатах. В такому випадку, підчас розрахунку точності позиціонування мікроманіпуляційної системи її необхідно розглядати як трьохосьову, яка складається з трьох лінійних направляючих, що розміщені по трьох координатах.

При здійсненні маніпулятором лінійних переміщень по трьом координатам, відхилення кожного лінійного двигуна (направляючої) будуть впливати на точність переміщення по іншим осях. Для прикладу, при русі вздовж осі X кутове зміщення Pitch(θy) приведе до лінійних відхилень (зміщень) по вісі Z, а кутові зміщення Yaw(θz) – до відхилень по вісі Y (рис.2.5). Відповідно, при лінійних зміщеннях вздовж осей Y та Z, їх кутові відхилення Pitch(θy) та Yaw(θz) також призведуть до відхилень величини переміщення по вісі X. При цьому, якщо не враховувати цих зміщень, то реальне переміщення кінця робочого інструменту не відповідає очікуваним (бажаним). В залежно від поставлених завдань до маніпуляційної системи, дані відхилення можуть бути критичними (операції над біологічною клітиною).

Тому при розгляді трьохосьової системи необхідно проводити комплексне врахування кутових відхилень від прямолінійного руху направляючих за кожною з осей на лінійне переміщення по іншим осям.

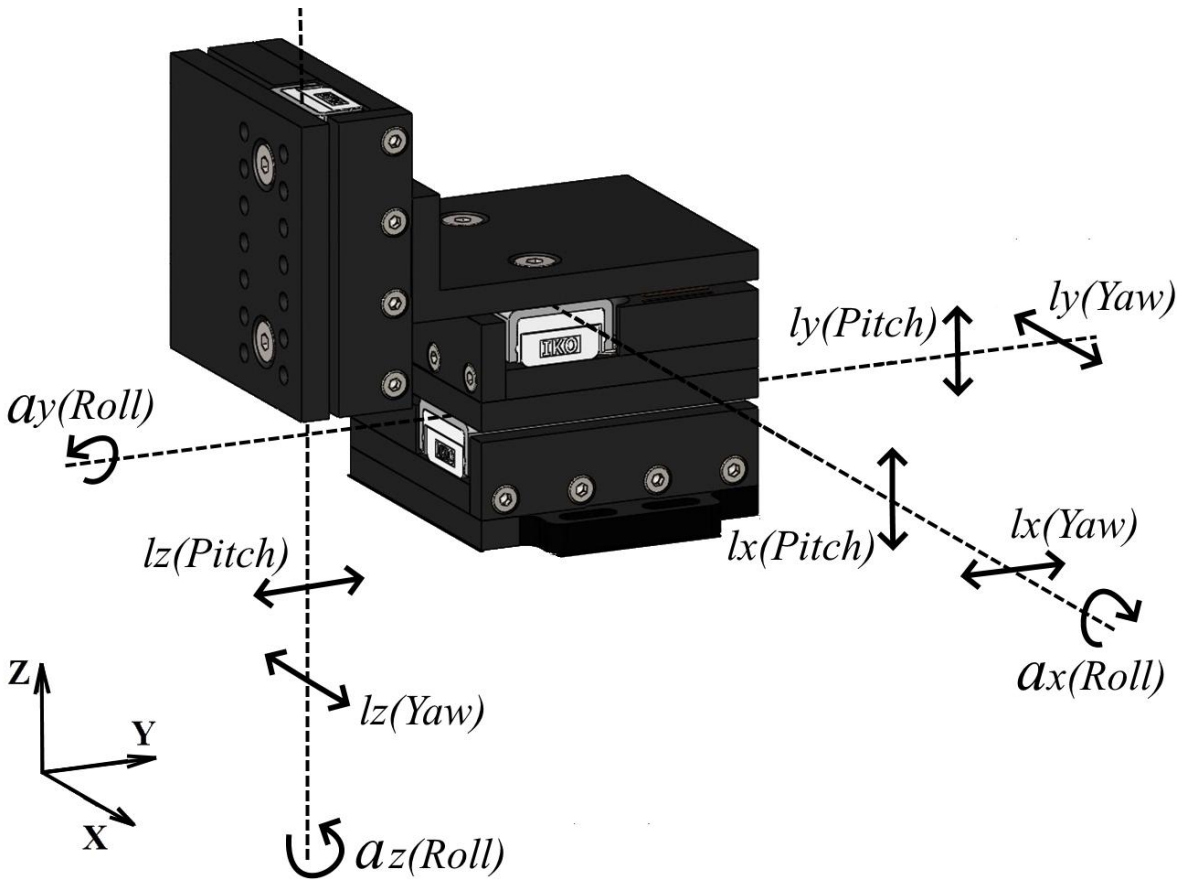


Рис.2.5 – Вплив кутових переміщень направляючих на лінійні переміщення за іншими осями

Так як маніпуляційна система, яка розглядається в даній роботі, складається з трьох однакових лінійних направляючих, то для складання результуючої моделі переміщення використовується математична модель лінійної направляючої, яка була отримана в попередньому пункті. Для спрощення моделі, кут Roll(θx) при дослідження відхилення кінця робочого органу мікроманіпулятора не враховувався. Таким чином, загальний вигляд математичної моделі переміщень, які описують трьохосьову систему позиціонування матиме вигляд:

$$\begin{cases} l^X_{реал} = l^x - l^X_y(Pitch) - l^X_z(Yaw) \\ l^Y_{реал} = l^y - l^Y_z(Pitch) - l^Y_x(Yaw), \\ l^Z_{реал} = l^z - l^Z_x(Pitch) - l^Z_y(Yaw) \end{cases} \quad (2.19)$$

де $l^X_{реал}$, $l^Y_{реал}$, $l^Z_{реал}$ – величини реальних переміщень по кожній з осей маніпулятора;

l^x, l^y, l^z – величини, які характеризують лінійні переміщення по кожній з осей;

$l_y^X(Pitch)$ та $l_z^X(Yaw)$ – відхилення (зміщення) робочого інструменту по вісі X через вплив кутових відхилень Pitch(θy) та Yaw(θz) при переміщенні по координатах Y та Z відповідно;

$l_z^Y(Pitch)$ та $l_x^Y(Yaw)$ – відхилення (зміщення) робочого інструменту по вісі Y через вплив кутових відхилень Pitch(θy) та Yaw(θz) при переміщенні по координатах Z та X відповідно;

$l_x^Z(Pitch)$ та $l_y^Z(Yaw)$ – відхилення (зміщення) робочого інструменту по вісі Z через вплив кутових відхилень Pitch(θy) та Yaw(θz) при переміщенні по координатах X та Y відповідно.

Для врахування лінійних переміщень вздовж однієї з осей переміщень за рахунок відхилень по іншим осям переміщень розглянемо приклад переміщення направляючої вздовж вісі X. На рис.2.6 зображено проекції лінійного переміщення кінця інструмента вздовж вісі X на площини XOY та XOZ відповідно.

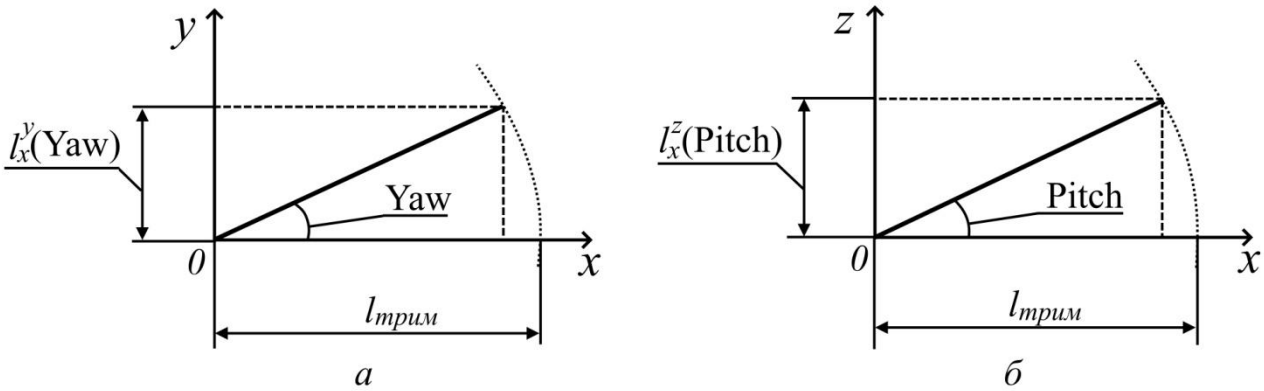


Рис.2.6 – Проекції лінійного переміщення кінця інструменту: *а* на площину XOY; *б* на площину XOZ

Згідно рис.2.6, лінійні зміщення по осям Y та Z, які спричинені впливом кутових зміщень Pitch(θy) та Yaw(θz), що виникають при переміщенні направляючої вздовж вісі X $l_x^Y(Yaw)$ та $l_x^Z(Pitch)$ визначаються наступними виразами:

$$l_x^Y(Yaw) = l_{трим} \cdot \sin\,(Yaw(l^x)) \tag{2.20}$$

та

$$l_x^Z(Pitch) = l_{трим} \cdot \sin\,(Pitch(l^x)) \tag{2.21}$$

де $l_{трим}$ – довжина робочого інструменту з тримачем;

$Yaw(l^x)$ – кутові відхилення Yaw(θz) каретки (направляючої) при переміщенні вздовж вісі X, що є функцією від лінійного переміщення вздовж вісі X;

$Pitch(l^x)$ – кутові відхилення Pitch(θy) каретки (направляючої) при переміщенні вздовж вісі X, що є функцією від лінійного переміщення вздовж вісі X.

Аналогічним чином, розглянувши вісі X та Z отримаємо відповідні вирази для лінійних відхилень $l_y^Z(Yaw)$, $l_y^X(Pitch)$, $l_z^X(Yaw)$ та $l_z^Y(Pitch)$:

$$l_y^Z(Yaw) = l_{трим} \cdot \sin\big(Yaw(l^y)\big), \tag{2.22}$$

$$l_y^X(Pitch) = l_{трим} \cdot \sin\big(Pitch(l^y)\big), \tag{2.23}$$

$$l_z^X(Yaw) = l_{трим} \cdot \sin\big(Yaw(l^Z)\big), \tag{2.24}$$

$$l_z^Y(Pitch) = l_{трим} \cdot \sin\big(Pitch(l^Z)\big). \tag{2.25}$$

Таким чином, на основі формул (2.19) та (2.22)-(2.25) загальна модель переміщення робочого інструменту трьохосьової мікроманіпуляційної системи матиме вигляд:

$$\begin{cases} l_{факт}^x = l^X - l_{трим} \cdot \cos\big(a_{сум}^x\big) - l_{трим} \cdot \sin\big(Pitch(l^y)\big) - l_{трим} \cdot \sin\big(Yaw(l^Z)\big) \\ l_{факт}^Y = l^Y - l_{трим} \cdot \cos\big(a_{сум}^y\big) - l_{трим} \cdot \sin\big(Pitch(l^Z)\big) - l_{трим} \cdot \sin\big(Yaw(l^X)\big), \\ l_{факт}^Z = l^Z - l_{трим} \cdot \cos\big(a_{сум}^z\big) - l_{трим} \cdot \sin\big(Pitch(l^X)\big) - l_{трим} \cdot \sin\big(Yaw(l^Y)\big) \end{cases} \tag{2.26}$$

де сумарний кут для кожної з вісі визначається наступним виразом:

$$a_{сум}^n = arctg\sqrt{tg^2\big(Pitch(l_{зад}^n)\big) + tg^2\big(Yaw(l_{зад}^n)\big)}, \tag{2.27}$$

де n – вісь, по якій здійснюється рух.

2.2.3. Дослідження кутової стабільності п’єзоелектричного двигуна на базі лінійної направляючої BSP-1540SL

Так як при відхиленні направляючої одного з двигунів маніпуляційної системи на одиниці кутових хвилин зміщення кінця робочого інструменту може

досягати десятки мікрометрів, що необхідно враховувати при маніпулюванні в мікро- та нанопросторі.

Вирішення даної проблеми може йти по шляху установки більш точних (дуже дорогих) прецизійних направляючих, хоча тут часто виникають масо-габаритні протиріччя, які пов'язані зі збільшенням габаритів системи. Але навіть встановивши такі направляючі не можна однозначно відповісти на питання, як поведе себе система щодо кутів Pitch, Yaw і Roll. Це завдання багатофакторне і визначається рівнем навантаження, ступенем збудження п’єзоелектричної системи, характером і рівнем прижиму п’єзоелемента до направляючої, пружністю самої системи, температурними ефектами і т.д. Тому, достовірна інформація про кутову стабільність може бути отримана тільки на основі натурних експериментальних досліджень.

Дослідження системи виконувалося на лінійному п’єзоелектричному двигуні класу LPM-5 [41, 42, 43] з лінійною направляючою IKO BSP-1540SL [38]. Схема такого двигуна наведена нижче на рис.2.7 [44].

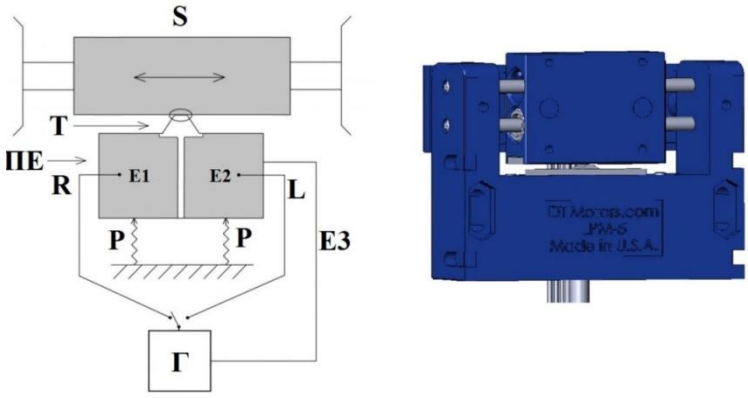


Рис.2.7 – Схема лінійного п`єзоелектричного двигуна класу LPM-5 з прямокутним резонатором: S – рухома каретка; ПЕ – п`єзоелемент; E1, E2, E3 – електроди п`єзоелемента; T – штовхач; P – пружина; Г – генератор збудження.

2.2.3.1. Опис експериментальної установки

З метою контролю кутів Yaw(θz), Pitch(θy) та Roll(θx) лінійного п’єзоелектричного двигуна розроблено спеціальну систему контролю, яка дозволяє вимірювати кутові відхилення каретки п’єзоелектричного двигуна в

залежності від її положення. Система основана на використанні відомого автоколімаційного методу [45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54], який забезпечує вимірювання кутової розбіжності між власною оптичною віссю автоколіматора та нормаллю до площини дзеркальновідбиваючої поверхні. Структурна схема розробленої системи наведена на рис.2.8.

Для вимірювання кутового відхилення каретки двигуна запропоновано використання автоколіматора АК-0,5У з оптичною роздільною знатністю 0,5 кут. с. Шкала автоколіматора проградуйована з кроком 0,5 кутових хвилин (30 кут. с), а його інформативний оптичний репер виконано у вигляді зеленого перехрестя. Ця особливість в подальшому використана для визначення його положення на зображенні, отриманого за допомогою CCD-матриці OV5647. Зображення, яке отримувалося з матриці, має роздільну здатність 1024x768 пікселів. На зображенні з матриці відстань між сусідніми мітками (кроком шкали автоколіматора) становить ~35 пікселів, тобто, електронна роздільна здатність матриці близька до ~1кут. с.

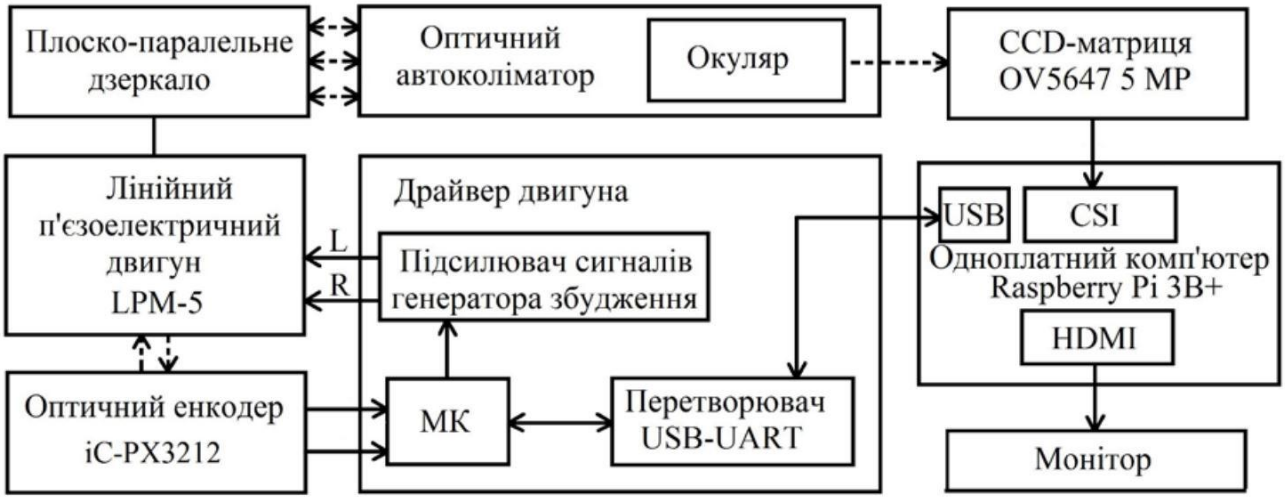


Рис.2.8 – Структурна схема системи контролю

Для керування швидкістю двигуна та контролю його положення використано оптичний енкодер iC-PX3212 [55] з роздільною здатністю 2,6мкм. В системі контролю використано також одноплатний комп’ютер RaspberryPi 3B+ [56], що дозволяє виконувати контроль двигуном через протокол передачі даних

USB, отримувати зображення через протокол передачі MIPI-CSI, обробляти зображення з матриці, а також виводити його на монітор через протокол HDMI.

Схема створена на основі запропонованої структури експериментальної установки системи наведена на рис.2.9.

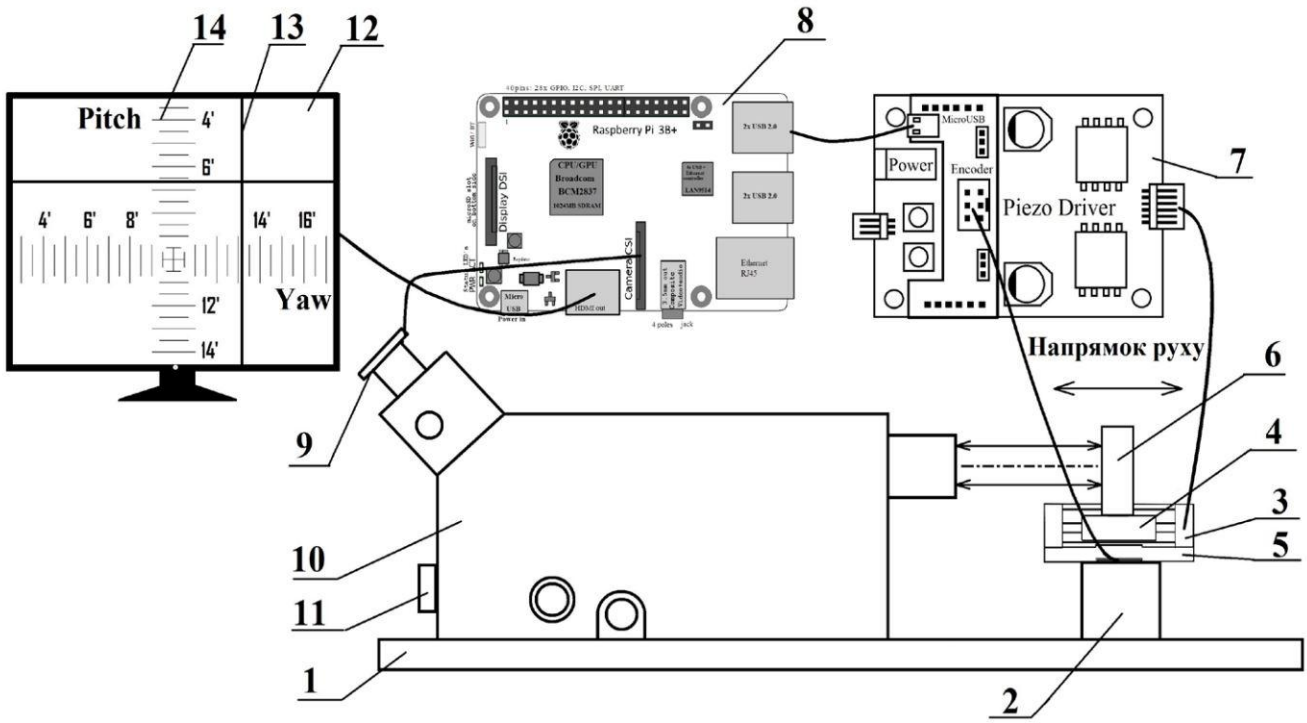


Рис.2.9 – Схема експериментальної установки системи: 1 – станина; 2 – стійка для юстування двигуна; 3 – лінійний п’єзоелектричний двигун; 4 – рухома каретка; 5 – датчик зворотного зв’язку (енкодер); 6 – плоско-паралельне дзеркало; 7 – драйвер п’єзоелектричного двигуна; 8 – одноплатний комп’ютер; 9 – CCD-матриця; 10 – автоколіматор; 11 – освітлювальна система; 12 – монітор; 13 – інформативний репер; 14 – шкала автоколіматора

Вимірювання кутових переміщень каретки п’єзоелектричного двигуна 3, тобто вимірювання прямолінійності ходу за допомогою автоколіматора 10 проводилось наступним чином. Плоско-паралельне дзеркало 6 закріплювалось на каретці 4 двигуна 3, який через стійку для юстування 2 кріпився до станини 1, де також розміщувався автоколіматор 10 з освітлювальною системою 11. Автоколімаційна зорова труба встановлювалась перпендикулярно віддзеркалюючій площині дзеркала. При юстуванні системи в полі зору формувалася шкала з кутовими поділками та інформативний репер 13

автоколіматора 10 у вигляді перехрестя. До зорової труби автоколіматора монтувалася CCD-матриця 9, яка перетворювала зображення, отримане за допомогою автоколіматора 10 і передавала його в одноплатний комп'ютер 8 для виведення зображення на монітор 12, а також для послідуючої обробки та аналізу. Драйвер 7 п'єзоелектричного двигуна, виконуючи команди комп'ютера 8, здійснював контроль напряму руху, положення та швидкості двигуна 4, які відслідковувалися за допомогою датчика зворотного зв'язку – енкодера 5, встановленого на двигуні. Для вимірювання кута Roll дзеркало 6 та двигун 4 було розвернуто на 90° відносно зорової труби автоколіматора 10.

Перед початком проведення експерименту каретка 4 двигуна 3 встановлювалася в центральне "0" положення, а перехрестя реперу 13 було суміщено зі шкалою автоколіматора 10 за допомогою гвинтів юстування.

2.2.3.2. Алгоритм проведення експерименту

Алгоритм проведення експерименту складався з 3 основних етапів Stage (рис.2.10):

1) –Stage I: виконувалася реєстрація зображення репера автоколіматора через кожні 260 мкм (100 імпульсів енкодера) вліво на відстань 12мм (47 циклів), починаючи від центрального положення ("0");

2) -Stage II: виконувалася реєстрація зображення репера автоколіматора через кожні 260 мкм (100 імпульсів енкодера) вправо на відстань 24мм (94 цикли);

3) -Stage III: виконувалася реєстрація зображення репера автоколіматора через кожні 260 мкм (100 імпульсів енкодера) вліво на відстань 12мм (47 циклів).

Швидкість двигуна вибрано рівною 0,1мм/с з метою зменшення ймовірності впливу ударно-вібраційних ефектів на результати вимірювання [44].

Визначення координат горизонтальної лінії реперу виконувалося шляхом пошуку максимального градієнту яскравості пікселів в двох стовпчиках зображення – вертикальних лініях, які знаходилися поблизу лівого (номер 190) та правого (номер 880) країв зображення. Обрані лінії не перетинали шкалу автоколіматора, оскільки це могло б ускладнити пошук.

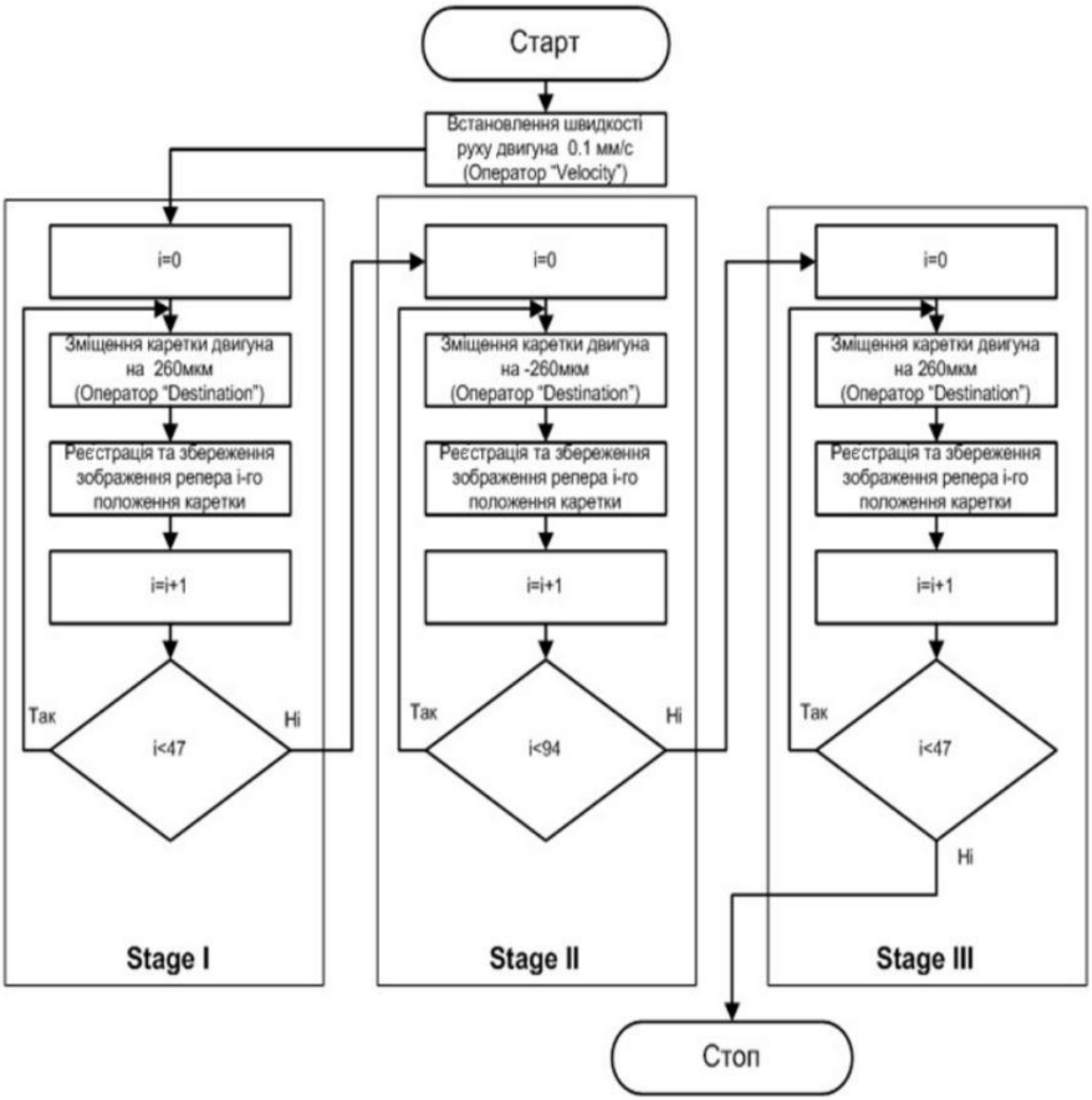


Рис.2.10 – Алгоритм проведення експерименту

Вздовж цих ліній по черзі, починаючи з 5-го пікселя і закінчуючи 763-м, за допомогою оператора Sobel-Feldman [57, 58, 59] розмірністю 3x3, виконувався пошук значення градієнту для кожного пікселя. Використання даного оператора обумовлено простотою його реалізації, швидкодією та достатньою точністю отриманого результату. Для кожної лінії визначалися координати пікселя, який містив максимальне значення градієнту. Для визначення результуючої координати положення горизонтального реперу розраховувалося середнє значення для двох прямих, що дозволило зменшити вплив можливого не

паралельного встановлення CCD-матриці по відношенню до реперу та шкали автоколіматора. При цьому оцінювана інструментальна похибка склала 5 кут. с., що повністю задовольняло умовам експерименту.

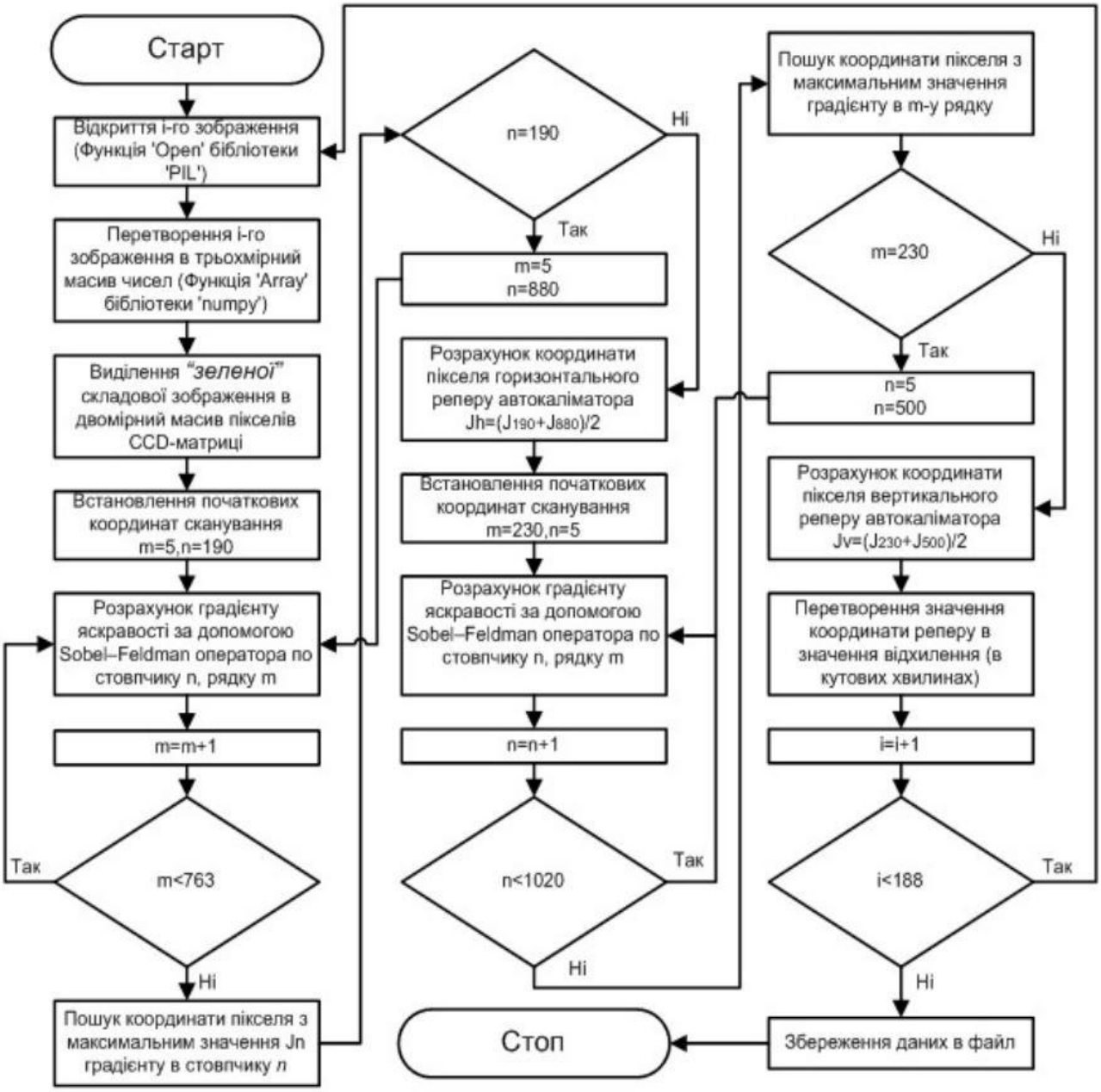


Рис.2.11 – Алгоритм встановлення координат реперу по зображенню з автоколіматора

Пошук вертикального реперу проводився аналогічним чином за однією лише відмінністю, що пошук максимального градієнту яскравості здійснювався по горизонтальним лініям (номери 230 та 500), починаючи з 5-го пікселя і закінчуючи 1020-м пікселем.

2.2.3.3. Результати експерименту

На основі проведених вимірювань та обробки інформації отримано графіки зміни кута відхилення Pitch (рис.2.12), Yaw (рис.2.13) та Roll (рис.2.14) в залежності від положення каретки двигуна.

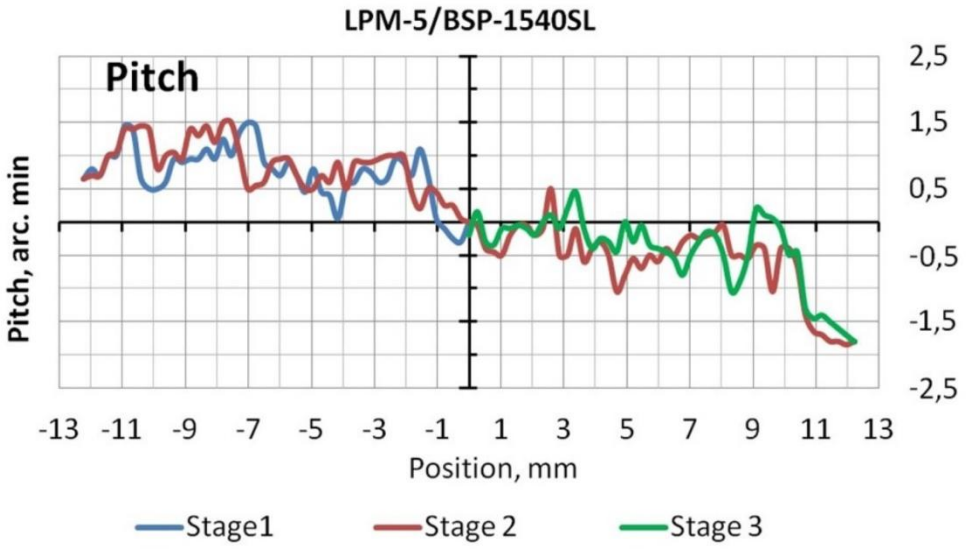


Рис.2.12 – Залежність кута Pitch від положення каретки

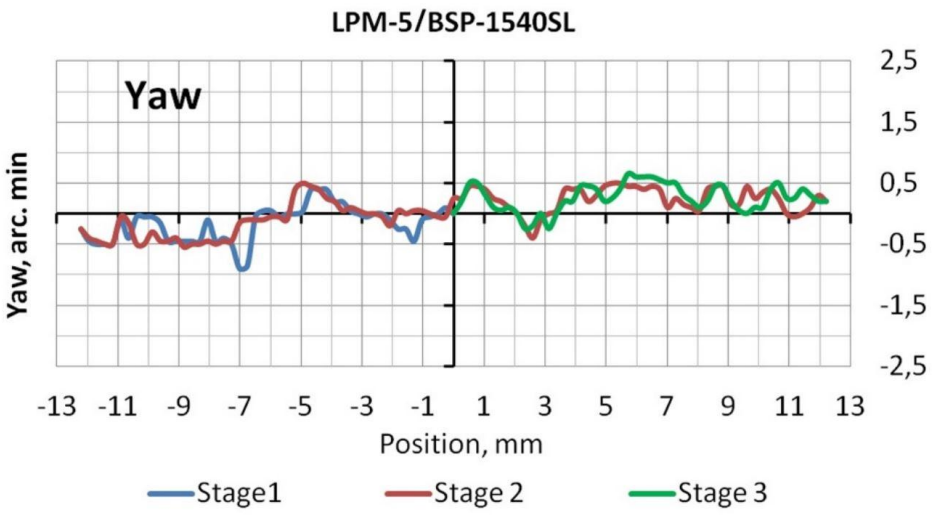


Рис.2.13 – Залежності кута Yaw від положення каретки

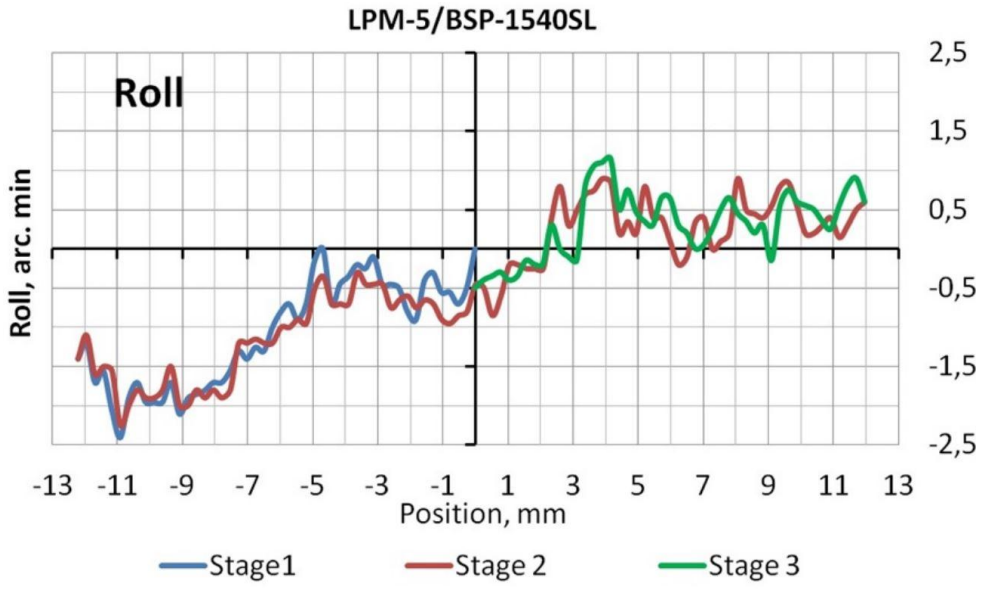


Рис.2.14 – Залежності кута Roll від положення каретки

Із отриманих результатів випливає, що найбільші зміни кута в крайніх положеннях каретки мають Roll і Pitch (~3 кут. хвилини), а флуктуації кута на дистанції ~1мм можуть досягати ~1 кут. хвилини. Для кута Yaw ці показники складають ~1 кут. хвилина та ~0,5 кут. хвилини відповідно.

Менші зміни для кута Yaw пояснюються додатковим піджимом каретки перпендикулярно напрямку руху з боку п’єзоелемента ПЕ за допомогою пружин Р (рис.2.7).

Із наведеного вище також слідує, що зміщення робочого інструменту l_Y для кута Yaw на дистанції 1 мм (при маніпулюванні в полі зору мікроскопа) може досягати ~20мкм, що необхідно враховувати при керуванні.

Врахування всіх кутів дозволяє отримати більш вагому модель похибок мікроманіпулятора при виконанні керування в мікро- та нанопросторі.

Висновки по розділу 2

1.Розроблено та досліджено систему контролю кутової стабільності лінійного п’єзоелектричного двигуна, яка забезпечила вимірювання його кутових переміщень Roll(θx), Pitch(θy) та Yaw(θz) із використанням автоколімаційного методу та подальшої цифрової обробки інформації з точністю ~ 5 кут. с, що дало

змогу оцінити величину кутових відхилень робочого інструменту мікроманіпуляційної системи.

2.Розроблено алгоритмічні та програмні рішення обробки зображень в створеній системі, що забезпечую вимірювання кутової нестабільності п’єзоелектричного двигуна в режимі реального часу тадало змогу суттєво скоротити час проведення експерименту.

3.На основі отриманих експериментальних результатів зміни кутів Pitch, Yaw та Roll встановлено, що найбільших змін зазнають кути Pitch та Roll (~3 кут.хвилин). Це обумовлено конструктивними особливостями досліджуваного п’єзоелектричного двигуна.

4.Розроблено математичну модель переміщення робочого інструменту маніпуляційної системи під впливом кутових відхилень Pitch та Yaw, що дозволяє алгоритмічно компенсувати дані відхилення для мінімізації похибки позиціонування мікроманіпулятора з врахуванням експериментальних даних, отриманих при дослідженні направляючих двигунів.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ ПРЯМОКУТНОГО РЕЗОНАТОРА ЛІНІЙНОГО П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА

Найважливішим елементом конструкції лінійного п`єзоелектричного двигуна є п'єзоелектричний резонатор. Від його характеристик залежить кінцеві властивості самого двигуна, а визначає ці характеристики безпосередньо матеріал, з якого створено резонатор та його габаритні розміри.

При створенні п'зоелектричного прямокутного резонатора, обравши його матеріал, з якого він буде створений, перед розробнику необхідно розрахувати розміри резонатора, причому повинні виконуватися наступні умови, описані попередньо в розділі 1, а саме:

1.Збудити першу повздовжню моду по ширині резонатора та другу моду по довжині. Таким чином, довжина резонатора повинна бути в ~2 рази більшою від ширини (рис.1.23).

2.Зсув по фазі взаємно-поперечних коливань повинен бути 90°. У зв`язку з цим, для забезпечення зсуву фаз рівним 90° між двома механічними резонансами необхідно реалізувати зсув двох електричних резонансів шляхом корекції габаритних розмірів резонатора. Частота резонансу по ширині резонатора повинна бути на ~2% вищою від частоти резонансу по довжині. В результаті, робоча частота f_r повинна знаходитися між вище згаданими частотами (рис.1.22).

Частота резонансу F_r поздовжніх по довжині бруска коливань основної моди залежить від швидкості звука в матеріалі C_s, з якого виготовлений п'єзоелемент та довжини резонатора L (формула 1.15) .

Незважаючи на те, що на даний час існують методи, які дозволяють виконати розрахунок п'єзорезонаторів різної форми (пластина, диск) [60], однак дані методи не дозволяють візуалізувати форму та характер механічних коливань, що в свою чергу не дозволяє обрати оптимальний розмір резонатора для кращої ефективності роботи двигуна.

3.1. Отримання резонансних характеристик резонатора

Для визначення оптимального розміру резонатора необхідно його виготовити певного розміру з високою точністю та провести дослідження його параметрів. Для цього використовується велика кількість часу та матеріалів, що ускладнює та уповільнює процес розробки двигунів. Тому останнім часом широкого розповсюдження набувають програмні засоби, які основані на розрахунку диференційних рівнянь частинних похідних (PDE) методом кінцевих елементів. Яскравим представником такого забезпечення є мультифізичний програмний комплекс Comsol Multiphysics, який останнім часом часто використовується для моделювання фізичних процесів в п’єзоелектриках [61].

За допомогою програми Comsol Multiphysics проведено моделювання п’єзоелектричного елементу, форма та розміри якого представлено на рис.3.1.

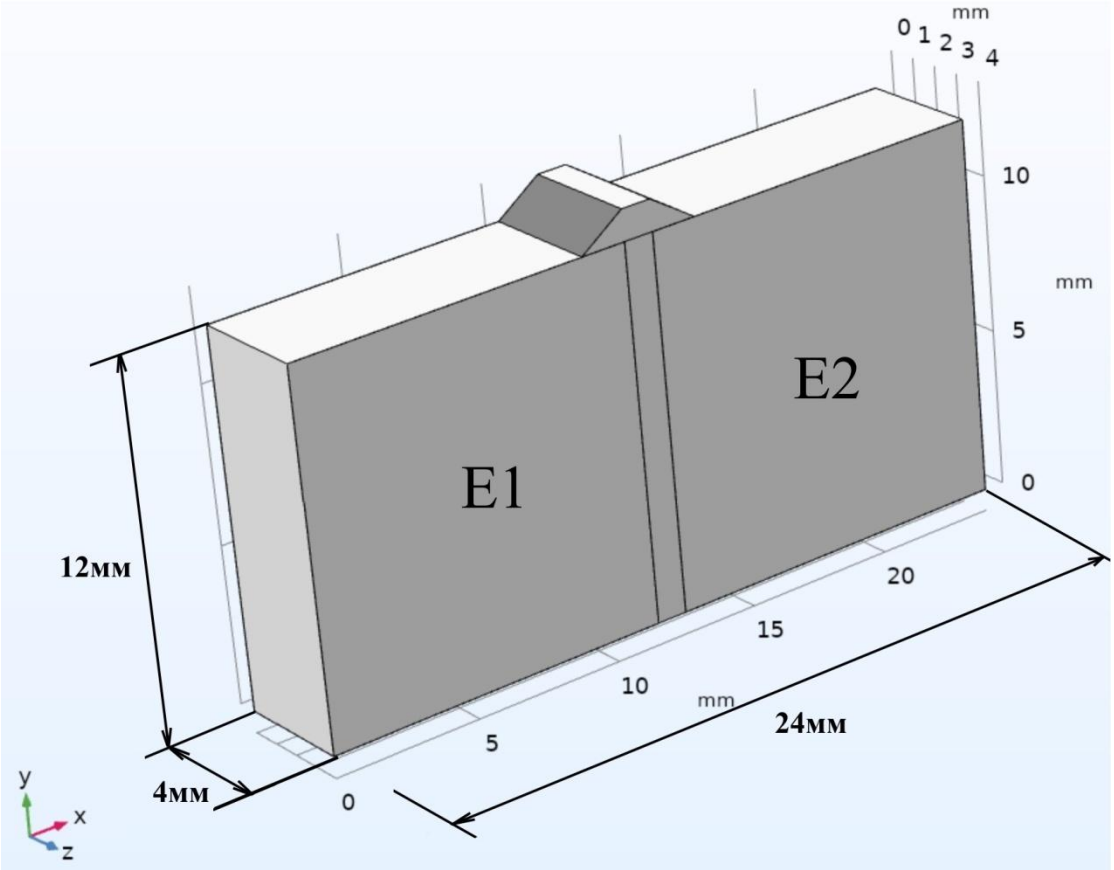


Рис.3.1 – П’єзоелектричний резонатор прямокутної форми зі штовхачем (“зубом”)

Представлений резонатор має 3 контактні поверхні E1, E2 та E3 (E3 знаходиться на тильній стороні резонатора). Штовхач є трапецеїдальної форми

з розмірами: висота 1мм, ширина нижньої основи 4мм, ширина верхньої основи 1мм. Матеріал резонатора обрано PZT-4.

На рис.3.2 представлені результати моделювання, а саме криві електричних резонансів резонатора.

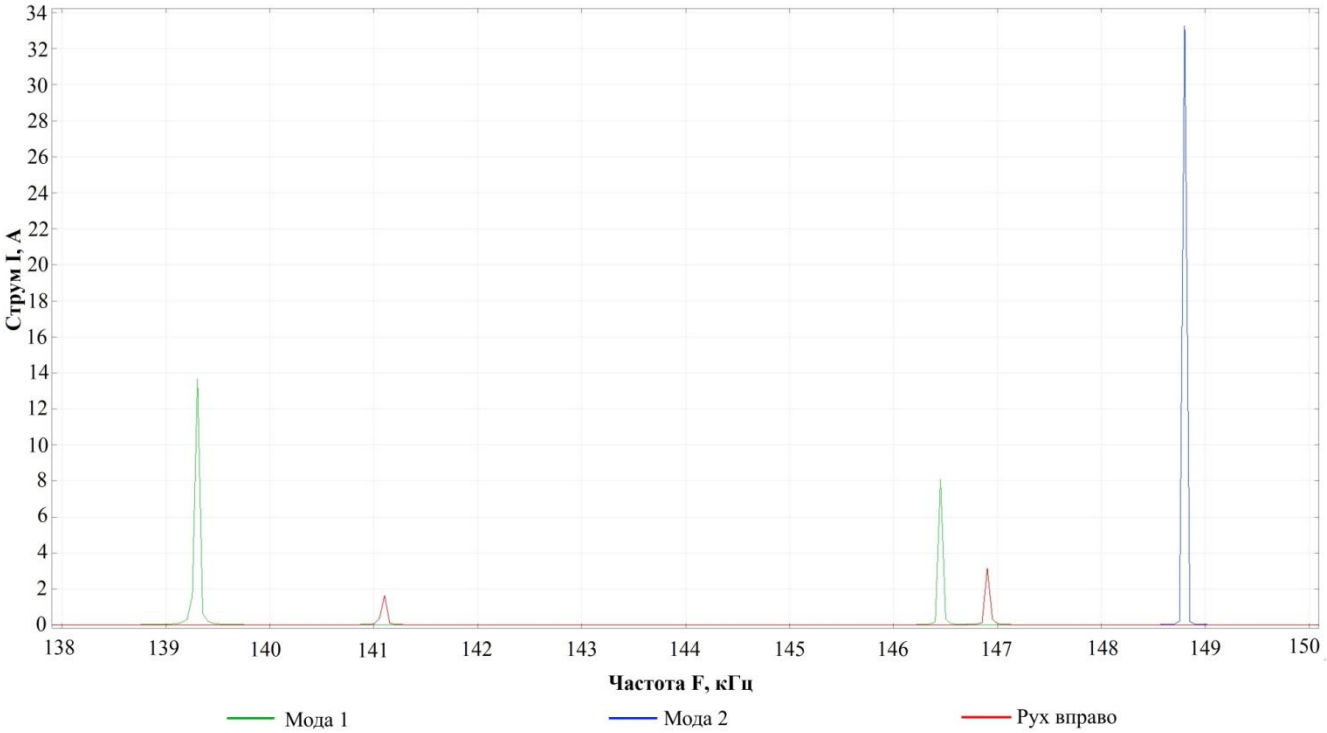


Рис.3.2 – Резонансні характеристики резонатора

Для отримання характеристики першої моди контактні поверхні E1, E2 було об’єднано. Сигнал з генератора надходив між контактними поверхнями E1(E2) та E3 (амплітудне значення напруги – 60В). В результаті спостерігалося 2 резонансні максимуми значення струму 139.25кГц та 146.45кГц (відбулося розщеплення основного резонансу на два складових). Значення струму 14А та 10А відповідно.

3.2. Форма механічних коливань резонатора

Форма механічних коливань резонатора при частоті першого резонансу представлено на рис.3.3, другого – рис.3.4.

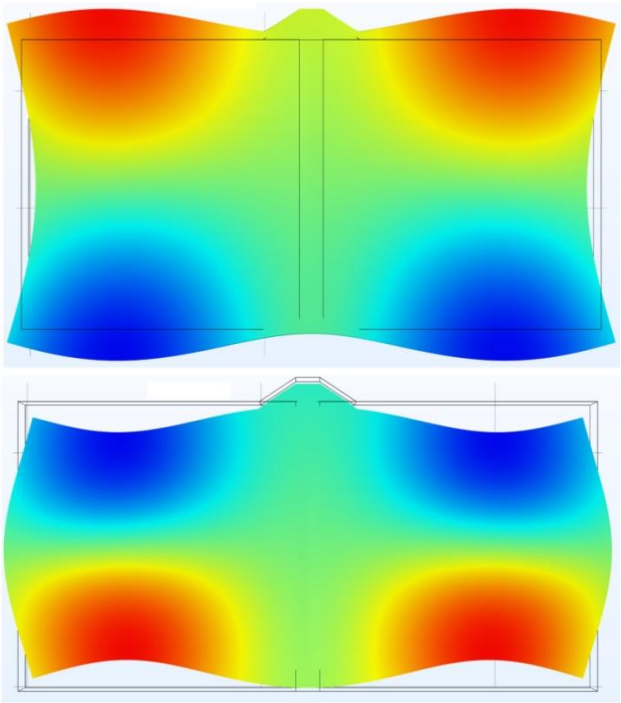


Рис.3.3 – Форма механічних деформації резонатора першої моди коливань на частоті резонансу 139.25кГц

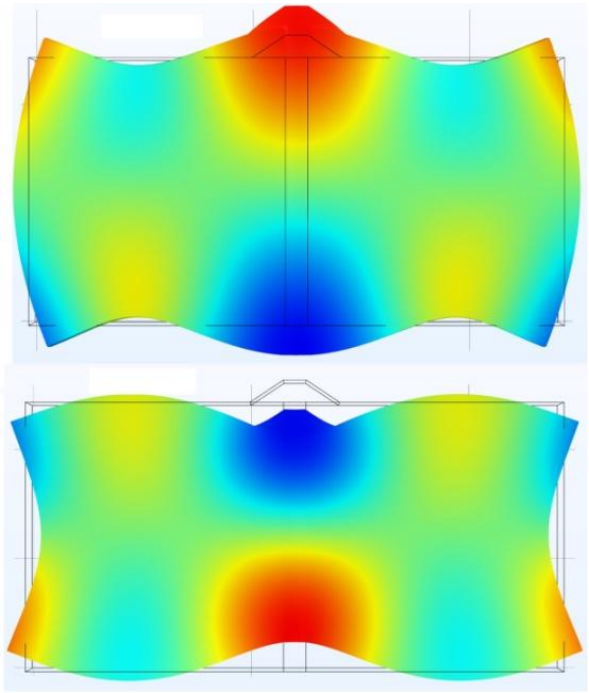


Рис.3.4 – Форма механічних деформації резонатора першої моди коливань на частоті резонансу 146.45кГц

Як видно з представлених рисунків, робочим резонансом є резонанс з частотою 146.45кГц, при якому штовхач рухається вверх-вниз (при резонансі з частотою 139.25кГц штовхач майже не рухається).

Для отримання характеристики другої моди контактні поверхні E1 та E2 було під’єднано до генератора змінної напруги синусоїдальної форми з амплітудним значенням напруги рівною 60В. В результаті максимальне значення струму (~33А) досягалося при частоті рівній 148.75кГц (частота резонансу). Форма механічних коливань резонатора при частоті резонансу представлено на рис.3.5.

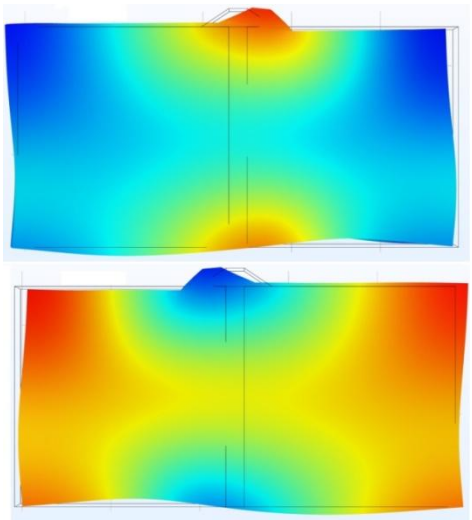


Рис.3.5 – Форма механічних деформації резонатора другої моди коливань на частоті резонансу 148.75кГц

Як видно з рис.3.5 штовхач (“зуб”) здійснює рух вправо-вліво.

Для отримання резонансної характеристики результуючої двох мод для руху вправо, контактні поверхні E1 та E3 було під’єднано до генератора змінної напруги синусоїдальної форми з амплітудним значенням напруги рівною 60 В (для руху вліво необхідно використовувати контактну поверхню E2 замість E1). В результаті максимальне значення струму (~4 А) досягалося при частоті рівній 146.9 кГц (резонанс на частоті 141.2 кГц є результатом об’єднання двох мод - 139.25кГц та 148.75кГц. Так як резонанс на частоті 139.25 кГц не є робочим, тому детально не розглядався). Форма механічних коливань резонатора при частоті резонансу представлено на рис.3.6.

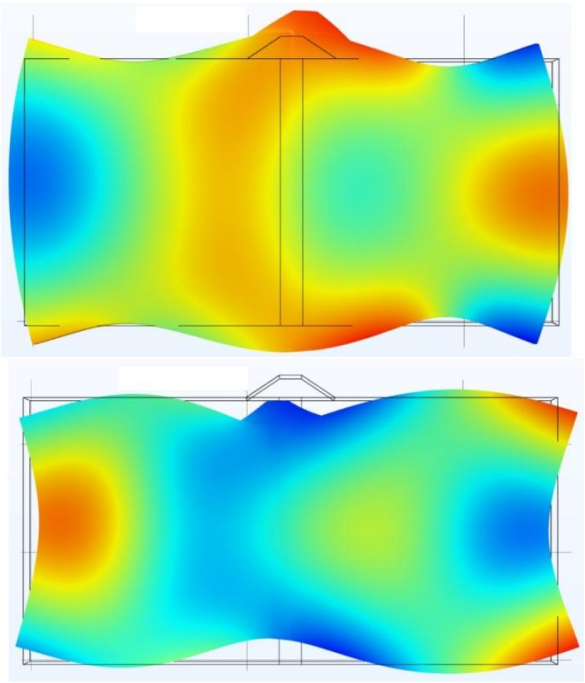


Рис.3.6 – Форма механічних деформації резонатора результуючої двох мод коливань на частоті резонансу 146.9 кГц (рух вправо)

Як видно з представленого рисунку, штовхач рухається по лінійній траєкторії по діагоналі очікуваного еліпсу, що вказує на те, що зсув фаз між коливаннями відсутній (0 градусів) і амплітуда другої моди коливань незначна порівняно з першою.

Незважаючи на те, що відношення сторін резонатора (довжини до ширини) як 2:1, зсув фаз між першою та другою модою становить 2.3 кГц (~1.6%) при рекомендованих ~2%, однак частота резонансу по ширині резонатора (перша мода) повинна бути на ~2% вищою від частоти резонансу по довжині (друга мода), а не навпаки як в результаті моделювання.

3.3. Корекція зсуву фаз між модами коливань

Для зміщення зсуву фаз між модами коливань змінено розміри резонатора, довжину змінено з 24 мм на 28 мм, а ширину з 12 мм на 11.5 мм.

При пошуку необхідної пропорції довжини та ширини резонатора для досягнення необхідного зсуву фаз між модами коливань встановлено, що для зсуву другої моди коливань вліво по частоті (відносно першої моди) необхідно збільшити довжину резонатора або зменшити його ширину. При цьому,

зменшення розміру резонатора призводить до збільшенні робочих частот резонатора, а збільшення розміру – навпаки.

В результаті нові криві електричних резонансів резонатора представлено на рис.3.7.

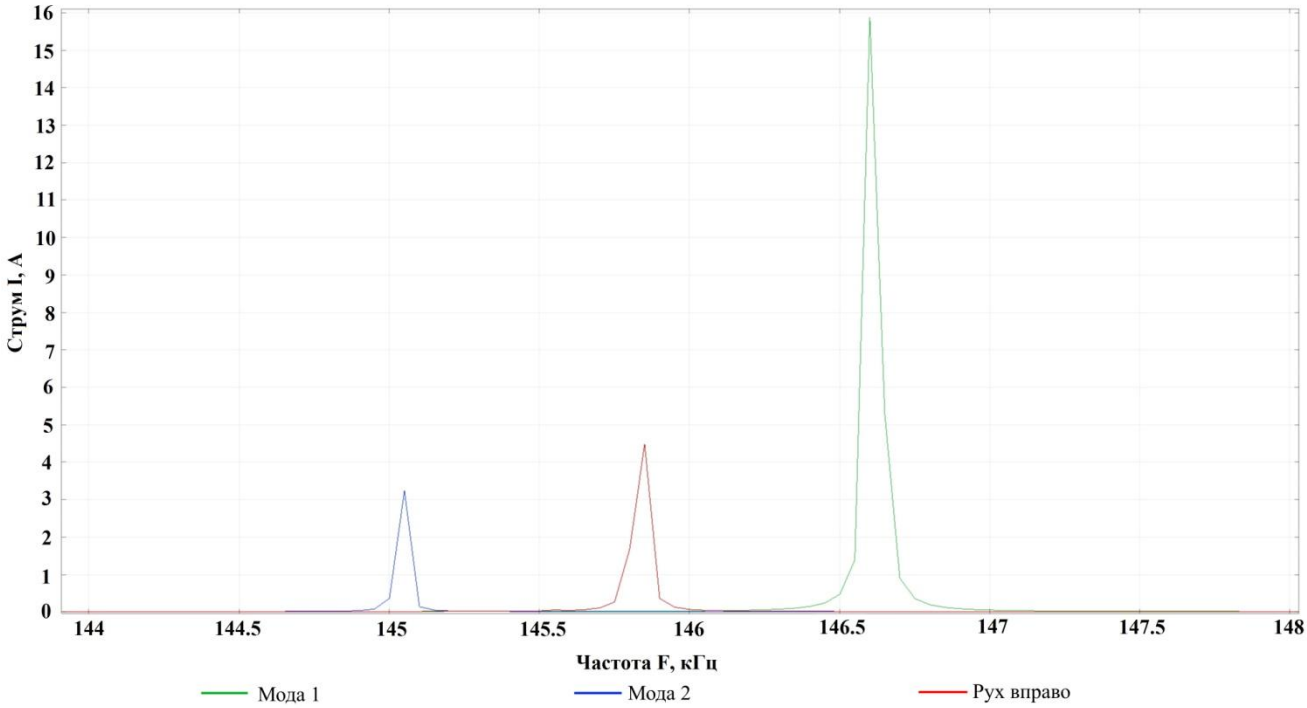


Рис.3.7 – Резонансні характеристики резонатора оновленого габаритного розміру

Резонанс першої моди коливань знаходиться на частоті 146.6 кГц. Форма механічних деформації резонатора першої моди коливань на частоті резонансу представлено на рис.3.8.

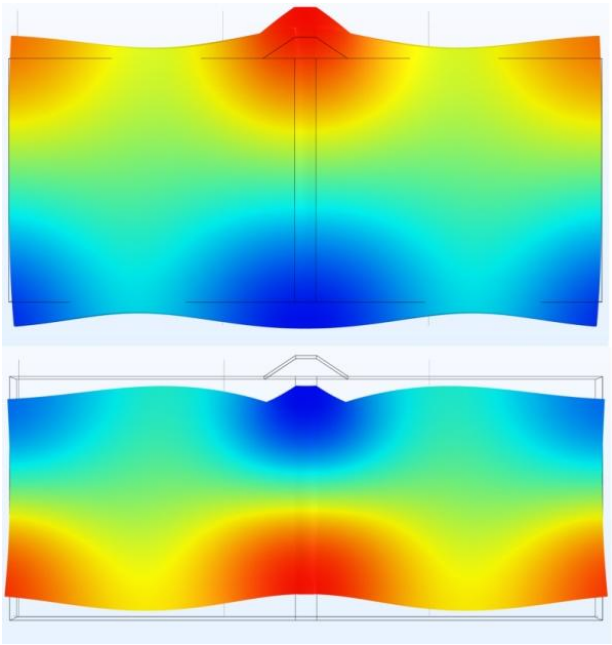


Рис.3.8 – Форма механічних деформації резонатора першої моди коливань на частоті резонансу 146.6 кГц

Резонанс другої моди коливань знаходиться на частоті 145 кГц. Форма механічних деформації резонатора другої моди коливань на частоті резонансу представлено на рис.3.9.

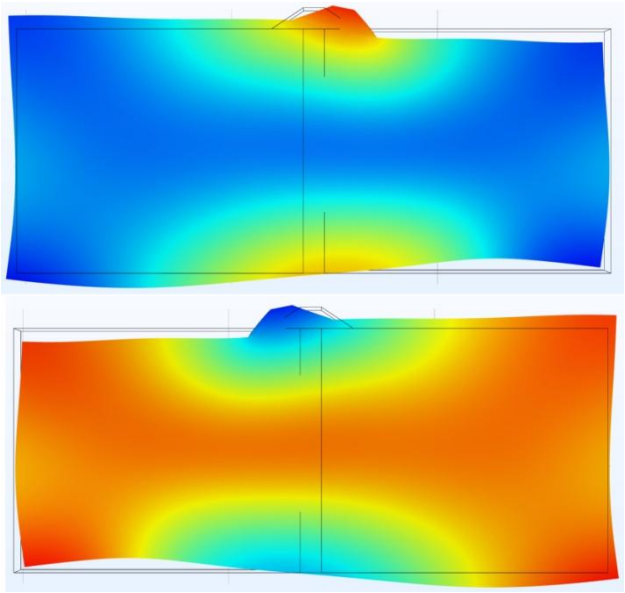


Рис.3.9 – Форма механічних деформації резонатора першої моди коливань на частоті резонансу 145 кГц

Резонанс результуючої двох мод знаходиться на частоті 145.8 кГц. Форма механічних деформації резонатора на частоті резонансу представлено на рис.3.10.

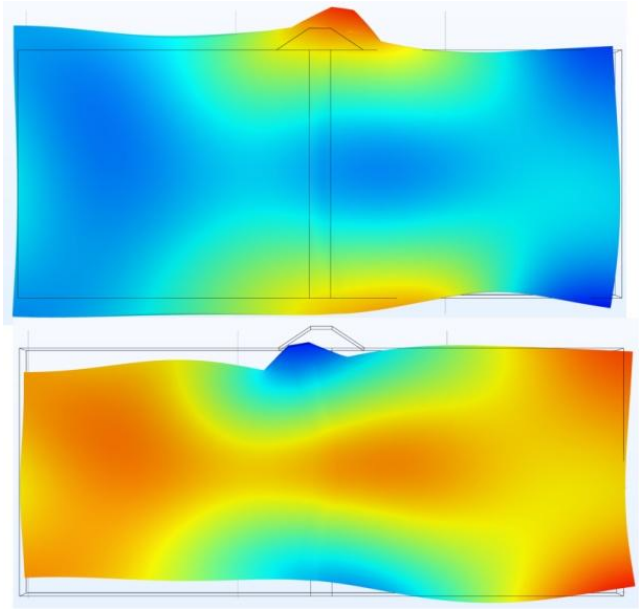


Рис.3.10 – Форма механічних деформації резонатора результуючої двох мод коливань на частоті резонансу 145.8 кГц (рух вправо)

Висновки по розділу 3

1.Проведено моделювання механічних коливань п’єзоелектричного резонатора двигуна за допомогою програмного комплексу Comsol Multiphysics та показана необхідність вибору саме правого електричного резонансного піка двигуна при його керуванні.

2.При виконанні порівняння резонансних характеристик (виміряних та змодельованих) можна виділити дві основні відмінності: амплітуда струму змодельованої характеристики важко корелюється з реальною та ширина резонансної характеристики – змодельована характеристика є дуже вузькою. Вказані зауваження можливо пояснити необхідністю внесення додаткових налаштувань для моделі, наприклад, вказати наявність металізації контактних поверхонь на резонаторі для збільшення жорсткості системи, що зменшить максимальний струм резонансу та збільшить його ширину.

РОЗДІЛ 4. МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ П’ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИМ МІКРОМАНІПУЛЯТОРОМ

Перспектива використання п’єзоелектричних двигунів в мікро- та нано-системах (мікроманіпулятори, мікророботи тощо), які використовуються в виробництві інтегральних мікросхем, в генній інженерії для маніпуляцій всередині окремих живих клітин, тощо робить актуальною проблему їх постійного вдосконалення [62, 63, 64]. При цьому потрібно постійно вдосконалювати систему керування п’єзоелектричним двигуном для забезпечення стабільності в безперервному, квазібезперервному і/або кроковому старт-стопному режимі [6].

4.1. Метод стабілізації швидкості в безперервному режимі

В п’єзоелектричних двигунах використовуються різні види резонаторів (п’єзоелементів), які працюють на різних типах коливань (радіальні, повздовжні, вигинальні, крутильні і т.д.). Найчастіше, це кільцевий п’єзоелектричний резонатор (п’єзоелемент у вигляді кільця), в якому формуються радіальні ультразвукові коливання, які в подальшому трансформуються в направлений рух ротора [62].

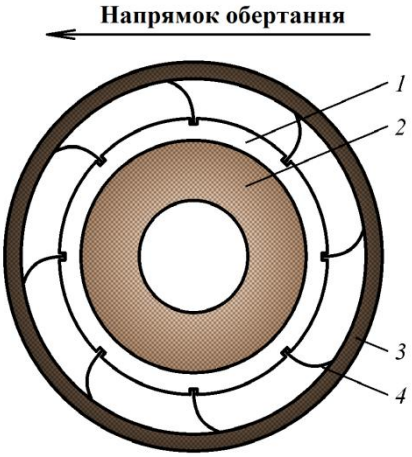


Рис.4.1 – Спрощена конструкція п’єзоелектричного двигуна з кільцевим резонатором: 1 – сталева оболонка, 2 – п'єзоелемент, 3 – ротор, 4 – штовхачі з пружинного матеріалу.

У розглянутій конструкції ПД для отримання обертового руху ротора, в штовхачі збуджують коливання по двох взаємно перпендикулярним напрямам. При цьому поздовжні коливання в штовхачі збуджуються за рахунок радіальних коливань п'єзоелемента, а поперечні коливання збуджуються механічним шляхом за рахунок взаємодії штовхача з внутрішньою поверхнею ротора.

Основною характеристикою такого двигуна є частотна характеристика п’єзоелемента – залежність струму ***I*** через п’єзоелемент (або на виході генератора збудження) від частоти ***F*** збудження п’єзоелемента. Для кільцевих резонаторів ця характеристика має явно виражений резонансний характер (рис. 4.2а), а резонанс струму практично співпадає з резонансом швидкості обертання ***V*** двигуна (рис. 4.2б). Керування таким двигуном здійснюється шляхом підстроювання робочої точки (частоти) збудження п’єзоелемента ***F*** на максимум резонансної характеристики (точка 1, рис. 4.2а). Такий метод керування завжди дозволяє підтримувати максимальну швидкість обертання.

Недоліком такого методу керування є те, що він не дозволяє змінювати швидкість в широких межах, або компенсувати зсув резонансної характеристики, наприклад, при температурному впливі. Для цього необхідно змінювати зовнішню напругу живлення, що значно ускладнює систему керування двигуна.

Найбільш перспективним методом керування, який і вибрано в якості прототипу є, так званий амплітудний спосіб керування [66].

Згідно цього методу керування вибір робочої точки (робочої частоти) здійснюється на правому схилі частотної характеристики п’єзоелемента двигуна (точка 2, рис. 4.2а), і в цьому випадку статичні характеристики двигуна подібні характеристикам двигуна постійного струму. Цей спосіб дозволяє регулювати швидкість в широких межах, змінюючи положення точки 2 на правому схилі частотної характеристики і компенсувати різні зміни самої частотної характеристики двигуна, наприклад, викликані температурним впливом.

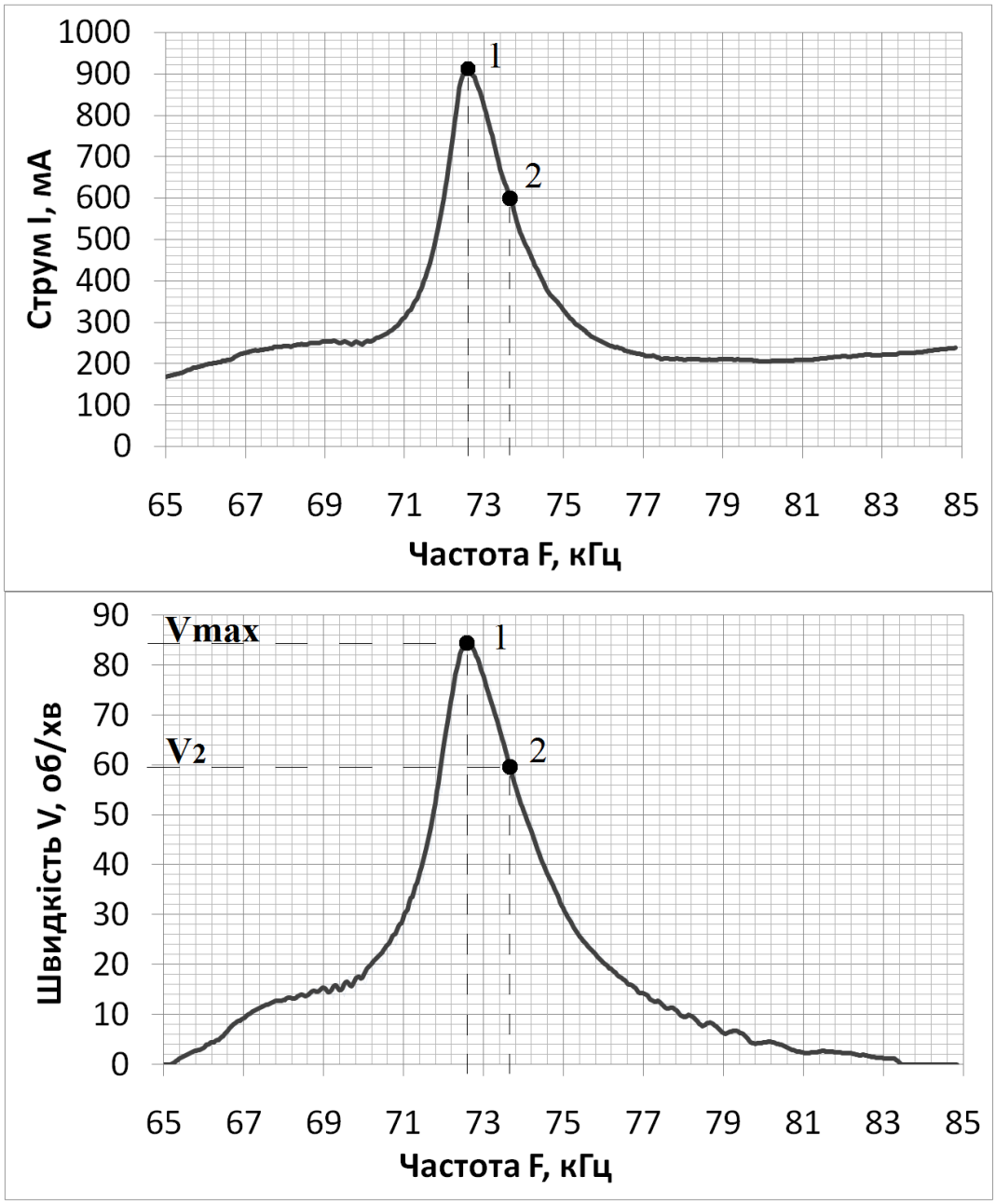


Рис.4.2 – Типові частотні характеристики п’єзоелектричного двигуна з кільцевим резонатором (наприклад PM-20R [65]): *а* – частотної характеристики п’єзоелемента двигуна; *б* – швидкісна характеристика двигуна

Однак, недоліком цього методу є те, що він не охоплює питань керування п’єзоелектричними двигунами з прямокутним резонатором.

На відміну від регулярних частотних характеристик, властивих кільцевим резонаторам з радіальною модою коливань, частотна характеристика п’єзоелектричного двигуна з прямокутним резонатором має (принаймні) два характерних близько розміщених резонансних піка – правий і лівий. Фізично –

відбувається розщеплення основного резонансу на два (або більше) складових, а відповідно виникає і два (або більше) правих схили резонансної характеристики, що ускладнює керування за вищевказаному прототипі, знижує точність керування, а інколи може призводити й до катастрофічних відмов (повній зупинці двигуна).

Метою вдосконалення методу керування є вирішення задачі підвищення точності керування, а саме за струмом і швидкістю за рахунок вдосконалення існуючих і введення нових операцій керування і їх послідовності у часі з урахуванням специфіки частотної характеристики п’єзодвигуна з прямокутним резонатором.

Порівняно з відомим методом керування п’єзоелектричним двигуном, основаному на виборі робочої частоти на правому схилі частотної характеристики п’єзоелемента двигуна, вдосконалення методу керування забезпечувалося за рахунок наступних нововведень:

1.При першому ввімкненні двигуна встановлюється початкова частота “вкидання” на правому схилі правого піка частотної характеристики п’єзоелемента, вимірюється сигнал керування, який порівнюється з його опорним значенням шляхом віднімання вимірюваного сигналу із опорного, і збільшують частоту при негативній різниці, або зменшують при позитивній різниці.

2.В якості сигналу керування обрано робочий струм через п’єзоелемент.

3.В якості сигналу керування обрана швидкість руху п’єзоелектричного двигуна.

4.Ліву межу частотного діапазону відпрацювання обмежено резонансною частотою правого піка частотної характеристики п’єзоелемента.

5.Праву межу частотного діапазону відпрацювання обмежено зоною нечутливості п’єзоелектричного двигуна.

6.В якості зони нечутливості обрана частота зупинки двигуна при збільшенні частоти від лівої межі частотного діапазону відпрацювання.

7.Запам’ятовується робоча частота попереднього напрямку руху і в якості частоти “вкидання” реверсивного напрямку використовується запам’ятована робоча частота протилежного напрямку.

Розглянемо більш детальніше принцип роботи вдосконаленого методу.

Як було встановлено експериментально, для двигуна з прямокутним резонатором відбувається розщеплення поздовжньої моди по ширині, тобто замість однієї власної частоти F_W виникає дві близько розміщені частоти F_{W1}, F_{W2}, які обумовлені різною швидкістю звука (жорсткістю) в центрі п’єзоелемента і по краях (механічна жорсткість в центрі завжди вище, ніж по краях). Таким чином, якщо частота F_{W1} відповідає центральній жорсткості резонатора, а частота F_{W2} – жорсткості по краях, то F_{W1} більше F_{W2}. Тому і на результуючій частотній характеристиці п’єзоелемента двигуна – залежності струму I через п’єзоелемент від частоти збудження F (рис. 4.3а), виникає правий резонансний пік з частотою F_{right} (яка відповідає резонансній частоті F_{W1} в центрі, там де контактна площадка) і лівий резонансний пік з частотою F_{left} (яка відповідає резонансній частоті F_{W2} по краях п’єзоелемента).

Експериментально було підтверджено, що більш ефективнішим для роботи двигуна є правий резонансний пік з частотою F_{right} і його правий схил (гілка). Це підтверджується частотною характеристикою і самого двигуна – залежністю швидкості двигуна V від частоти збудження F (рис. 4.3б).

Тому вся подальша ідеологія побудови пропонованого способу керування будується на правому схилі правого резонансного піка частотної характеристики п’єзоелемента. Наприклад, заданий струм стабілізації (керування) Io буде реалізовуватися при робочій частоті збудження п’єзоелемента F_E (рис. 4.3а), який відповідає правому схилу правого резонансного піка частотної характеристики.

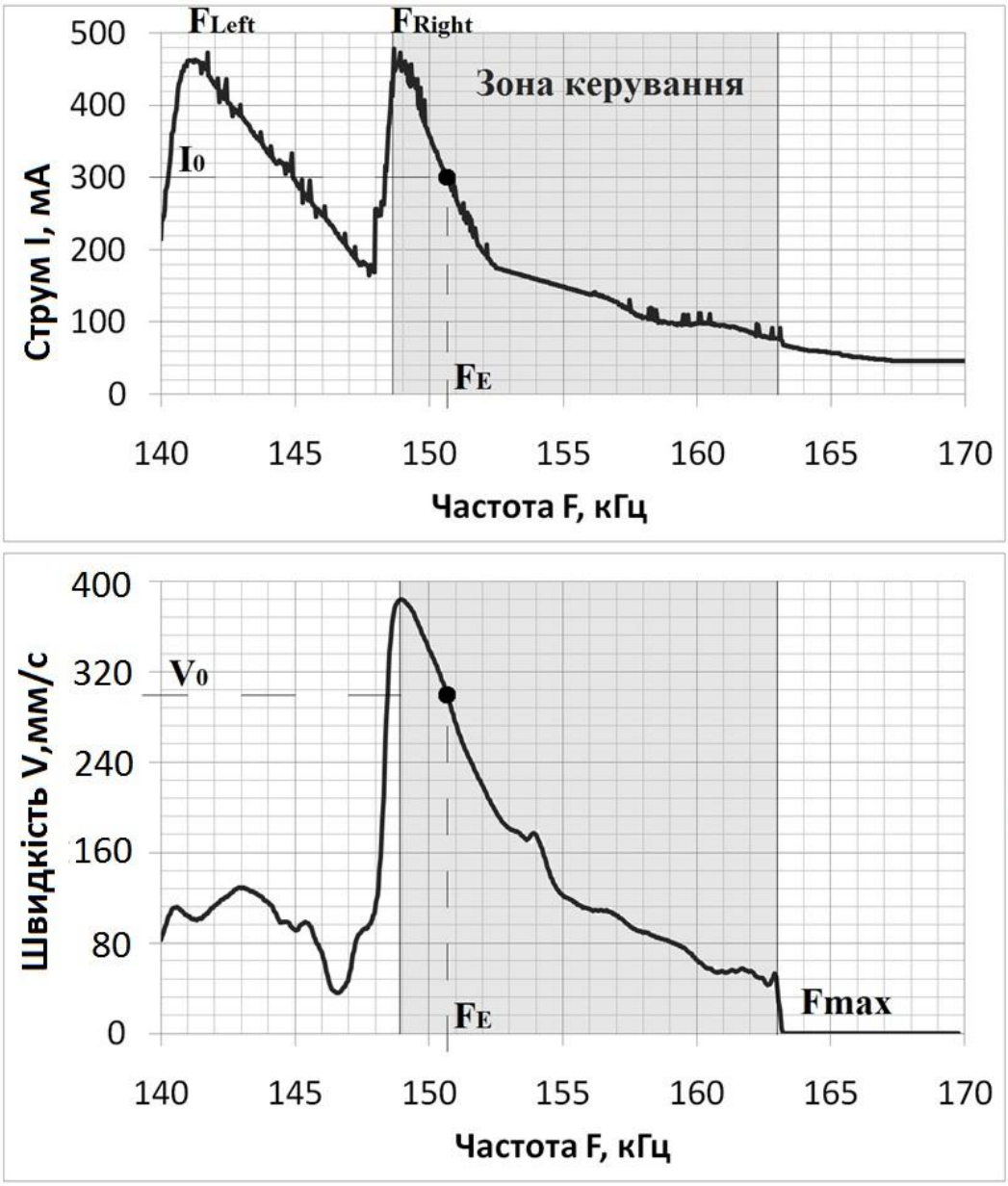


Рис.4.3 – Частотні характеристики п’єзоелектричного двигуна з прямокутним резонатором (LPM-5 [67]): *а* – частотної характеристики п’єзоелемента двигуна; *б* – швидкісна характеристика двигуна

Аналогічно, задана швидкість $\boldsymbol{Vo}$ буде відповідати частоті $\boldsymbol{F_E}$ правого схилу правого резонансного піка частотної характеристики (рис. 4.3б).

На рис.4.4 представлена спрощена структура пристрою, яка реалізує керування двигуном за струмом через п’єзоелемент. Дана схема включає послідовно з’єднані керований генератор 1, який формує робочу частоту збудження п’єзоелемента, два незалежних виходи яких приєднані до двох ідентичним підсилювачам 2 і 3, які через вимірювачі струмів 4, 5 приєднані до

відповідних електродів ***E1, E2*** п’єзоелектричного двигуна 6. Виходи вимірювачів струму 4, 5 приєднані до схеми порівняння 7, на другий вхід якої надходить заданий сигнал керування ***Io***.

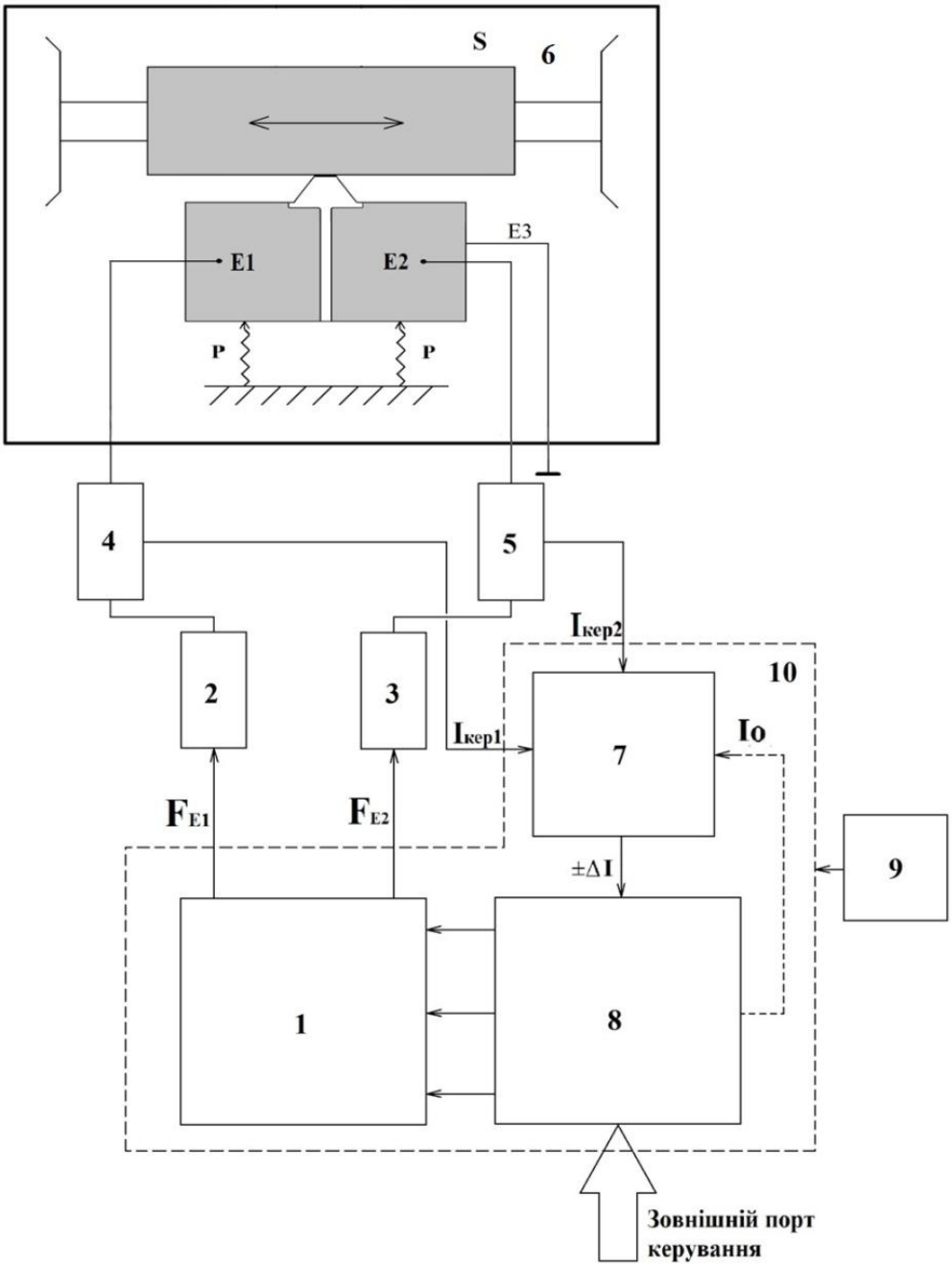


Рис.4.4 – Структурна схема пристрою, яка реалізує керування двигуном за струмом через п’єзоелемент

Вихід схеми порівняння приєднано до одного з входів схеми керування 8, керуючі виходи якої приєднані до керуючого генератора 1 і блоку порівняння 7. Схема керування 8 також містить зовнішній порт керування, через який надходять

команди керування. Джерело живлення 9 приєднано до всіх пристроїв керуючого модуля 10 і підсилювачів 2, 3.

Керування п’єзоелектричним двигуном відбувається наступним чином. При надходженні команди на ввімкнення двигуна через зовнішній порт керування, на виході схеми керування 8 виробляється сигнал, який запускає одне з пліч генератора 1, на виході якого формується сигнал частоти збудження п’єзоелемента, наприклад F_{E1}, це так звана початкова частота “вкидання”, яка знаходиться на правому схилі правого піка частотної характеристики п’єзоелемента.

Далі цей сигнал з частотою F_{E1} підсилюється, проходячи через підсилювач 2, проходить через вимірювач струму 4 і надходить на електрод ***E1*** п’єзоелемента. За рахунок зворотного п’єзоелектричного ефекту в п’єзоелементі відбувається збудження взаємно ортогональних механічних коливань, суперпозиція яких здійснює рух каретки двигуна вправо. При цьому значення струму через п’єзоелемент ***Ікер1*** (сигнал керування), виміряне за допомогою вимірювача струму 4, надходить на вхід схеми порівняння 7, порівнюється з опорним заданим значенням ***Іо*** і на виході блока порівняння 7 формується сигнал помилки **Δ= (*Іо* - *Ікер1*),** який надходить на схему керування 8. При цьому на виході схеми керування формується сигнал на збільшення частоти генератора 1 при негативному результаті (сигнал помилки), або на зменшення частоти при позитивному результаті. Процес продовжується до тих пір, поки сигнал помилки не стане рівним нулю, тобто частота F_{E1} стане рівною частоті F_E (рис. 4.3а).

На рис.4.5 представлена спрощена блок-схема пристрою, де в якості сигналу керування вибрана лінійна швидкість п’єзоелектричного двигуна. Дана схема включає послідовно з’єднані керований генератор 1, який формує робочу частоту збудження п’єзоелемента, два незалежних виходи якого приєднано до двох ідентичним підсилювачам 2 і 3, виходи підсилювачів приєднані до відповідних електродів ***E1, E2*** п’єзоелектричного двигуна 6. До рухомої каретки *S* лінійного двигуна приєднаний датчик швидкості 11, вихід якого приєднаний до схеми порівняння 7, на другий вхід якої надходить задане значення сигналу

керування швидкістю ***Vo***. Вихід схеми порівняння підключений до одного з входів схеми керування 8, керуючі виходи якої підключені до керуючого генератора 1 і блоку порівняння 7. Схема управління 8 також містить зовнішній порт керування, через який надходять команди керування. Джерело живлення 9 приєднано до всіх пристроїв керуючого модуля 10, підсилювачам 2, 3 і датчику швидкості 11.

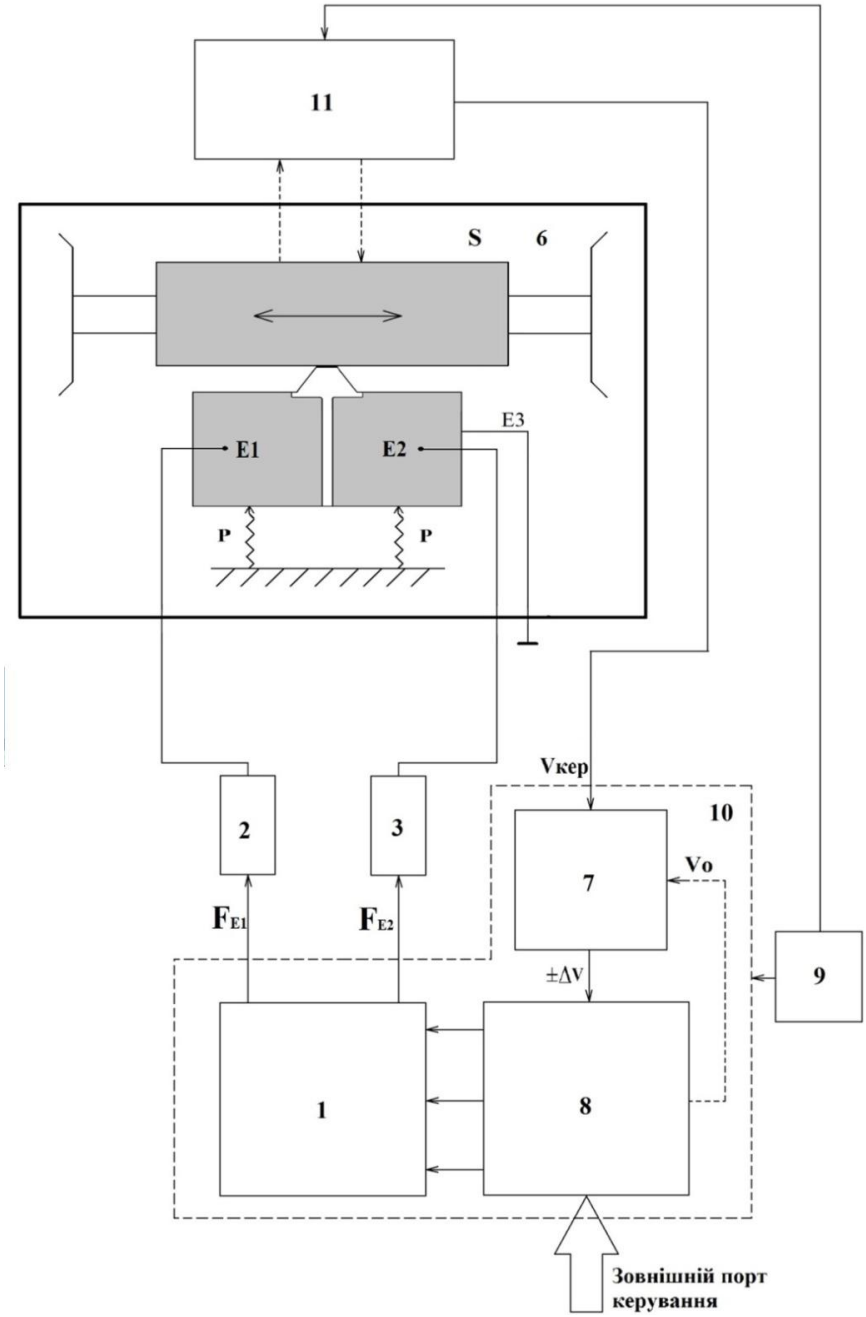


Рис.4.5 – Структурна схема пристрою, яка реалізує керування двигуном за швидкістю руху

Робота запропонованого пристрою відбувається аналогічно керуванню двигуном за струмом через п'єзоелемент, за тим лише винятком, що в якості сигналу керування ***Vкер*** використовується швидкість двигуна, яка вимірюється за допомогою датчика швидкості 11. Сигнал керування ***Vкер*** надходить на вхід схеми порівняння 7, порівнюється з опорним заданим ***Vзад*** і на виході блока порівняння 7 формується сигнал помилки **Δ = (*Vo-Vкер*),** який надходить на схему керування 8.

При цьому на виході схеми керування формується сигнал на збільшення частоти генератора 1 при негативному результаті (сигналі помилки), або на зменшення частоти при позитивному результаті. Процес продовжується до тих пір, поки сигнал помилки не стане нулевим, тобто частота F_{E1} стане рівною частоті F_E (рис. 4.3б).

З метою не порушення закону керування, а саме – при негативному сигналі помилки (розбіжності) відбувається збільшення частоти, при позитивному сигналі помилки – зменшення частоти, ліву границю частотного діапазону керування обмежують резонансною частотою F_{right} правого піка частотної характеристики п'єзоелемента, рис. 4.3а. В цьому випадку система не потрапляє в зону від'ємного схилу правого піка, або в зону лівого піка.

З метою підвищення точності управління при малих швидкостях руху двигуна, праву границю частотного діапазону керування обмежують зоною нечутливості п'єзоелектричного двигуна. При цьому під зоною нечутливості п'єзоелектричного двигуна розуміється максимальна частота ***Fmax*** в зоні керування (рис. 4.3б), при якій немає руху п'єзоелектричного двигуна (***V=0***). Якщо не ввести таке обмеження, то двигун буде потрапляти в зону зупинки, що знижує його точність керування при малих швидкостях руху.

Однак, як було встановлено експериментально, зона нечутливості за швидкістю має частотний гістерезис (рис.4.6б), на відміну від струмової характеристики (рис.4.6а). Суть цього полягає в тому, що зупинка руху (частота $F_Г$) при збільшенні частоти в зоні керування, і початок руху (частота ***Fmax***) при зменшенні частоти від $F_Г$, рознесені між собою (рис.4.6б). Як було підтверджено

експериментально, гістерезис, в деяких випадках може досягати до 10 кГц. Тому ціллю розширення діапазону відпрацювання за швидкістю в сторону менших швидкостей і підвищення точності обробки, в якості зони нечутливості може бути вибрана частота $\boldsymbol{F_Г}$ зупинки двигуна при збільшенні частоти від лівої границі частотного діапазону.

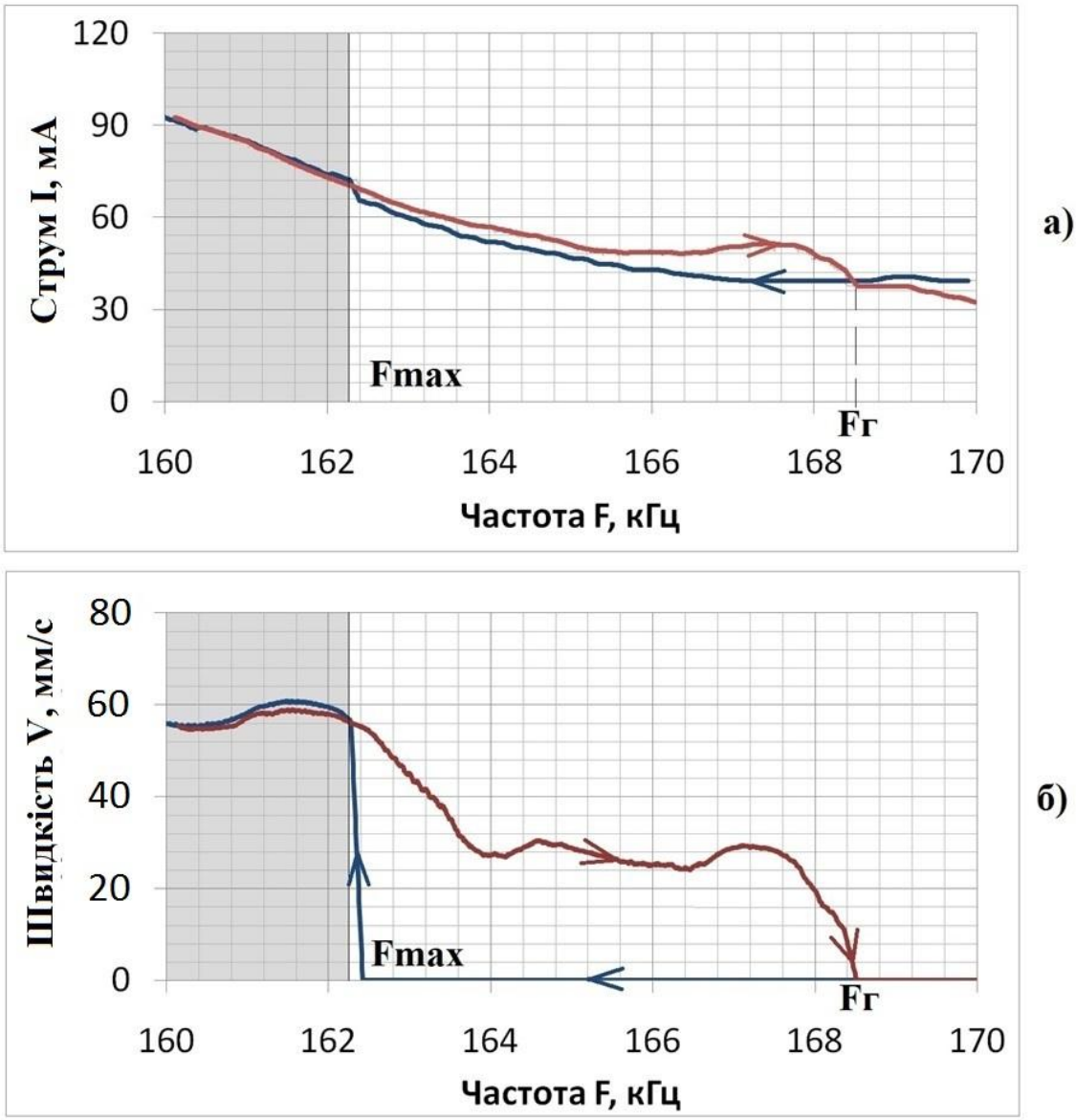


Рис.4.6 – Частотний гістерезис зони нечутливості двигуна

З ціллю підвищення швидкодії керування при зміні напрямку руху двигуна, запам’ятовують робочу частоту попереднього напрямку (наприклад $\boldsymbol{F_{E1}}$, рис.4.4, рис.4.5) і в якості частоти “вкидання” (початкової частоти) реверсивного напрямку використовують запам’ятовану робочу частоту протилежного напрямку, тобто встановлюють $\boldsymbol{F_{E2}=F_{E1}}$. При цьому ми практично відразу для

реверсивного напрямку потрапляємо в необхідну частоту збудження, оскільки це один і той же резонатор, а отже, і частотні характеристики у них практично однакові.

4.2. Метод розширення динамічного діапазону руху за швидкістю

Максимальна швидкість п’єзоелектричного двигуна визначається не тільки значенням великої вісі наноеліпсу (величина кроку) двигуна помноженої на його частоту збудження, а також і характеристиками фрикційного контакту між поверхнею “зуба” та каретки двигуна. Може виникнути ситуація, коли при збільшенні амплітуди “зуба” швидкість двигуна збільшуватися не буде, що пов’язано з недостатньою силою притискання “зуба” до каретки – “зуб” починає проковзуватися й суттєвого зростання швидкості не відбувається. Сила притискання обирається в залежності від бажаної несучої здатності (навантаження) двигуна.

Тому, розширення динамічного діапазону руху за швидкістю буде здійснюватися в напрямку зони малих швидкостей.

4.2.1. Принцип базового методу керування

За основу використано метод керування швидкістю двигуном постійного струму.

Двигун постійного струму має два основних параметра для керування: напрямок та швидкість обертання. Швидкість обертання регулюється шляхом зміни напруги живлення двигуна, а напрямок руху визначається напрямком струму, що протікає через нього. Системи керування двигуном постійного струму складається з (рис.4.7): контролера (наприклад Arduino та йому подібних), який здійснює керування напрямком руху двигуна та його швидкістю; драйвер двигуна, який виконує функцію перетворення команд контролера в рух двигуна; двигун постійного струму.

Рис.4.7 – Узагальнена структурна схема системи керування двигуном постійного струму

Типова структурна схема драйвера двигуна постійного струму представлено на рис.4.8 (на прикладі мікросхеми TA7291 [68]).

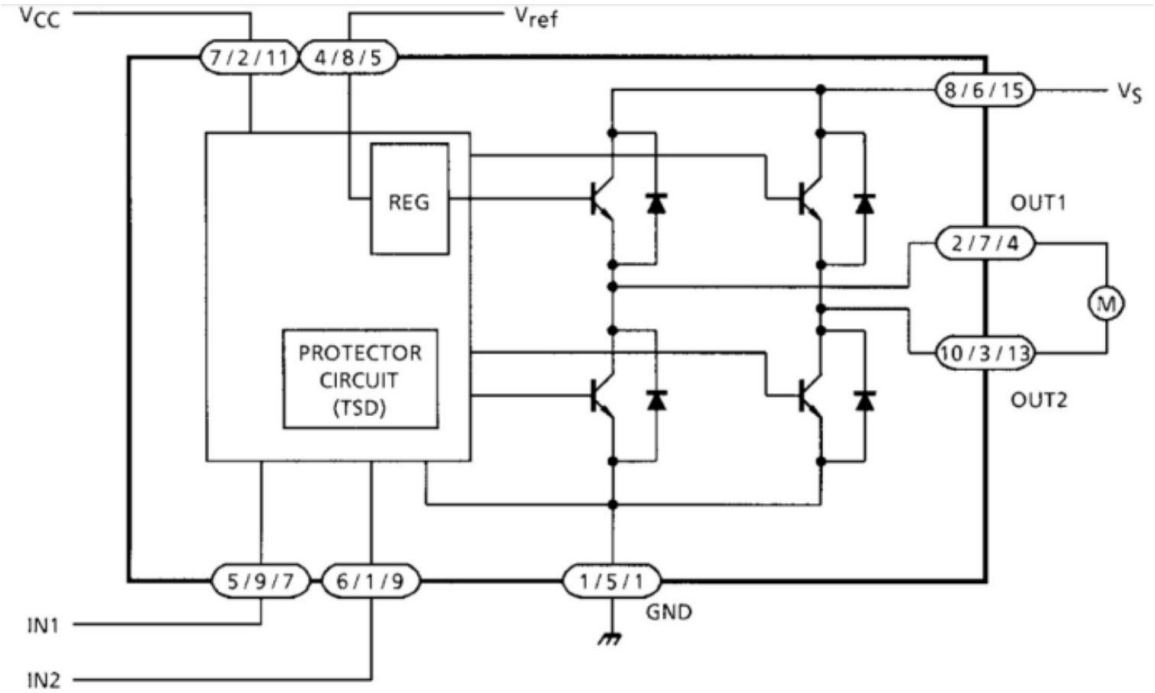


Рис.4.8 – Структурна схема драйвера двигуна постійного струму TA7291

В основі драйвера є Н-міст (рис. 4.9 [69]), який забезпечує не тільки відділення сигналів керування драйвера від силової частини, а й реалізації реверсу руху двигуна. Схема містить два входи (INA та INB), за рахунок яких здійснюється керування напрямком руху двигуна.

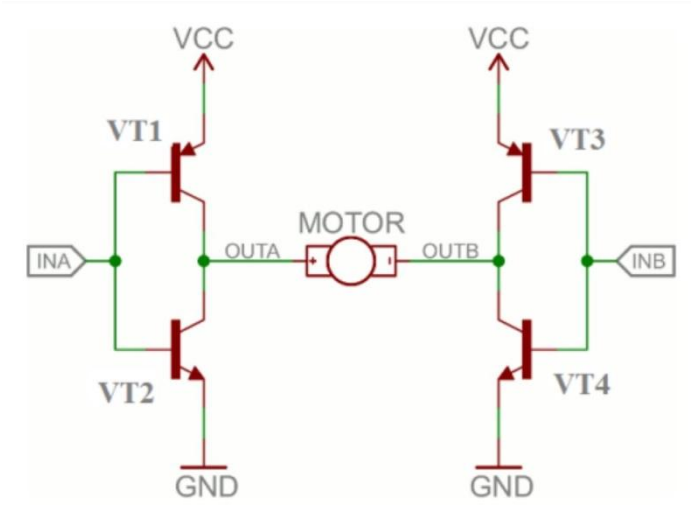


Рис.4.9 – Н-міст на біполярних транзисторах

Схему роботи Н-моста представлено в роботі [70]. В залежності від того, на який з входів надходить позитивний сигнал (логічна одиниця), двигун буде обертатися в одну чи іншу сторону (рис.4.10).

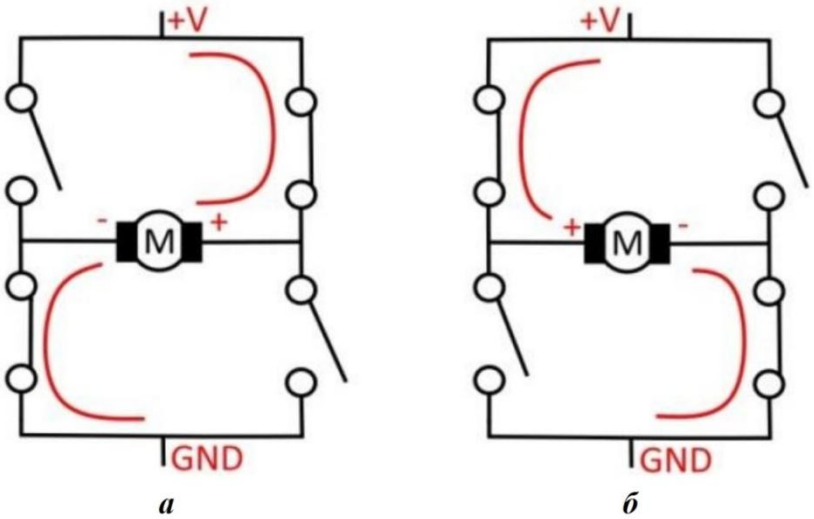


Рис.4.10 – Схема роботи Н-моста: рух за годинниковою стрілкою (а), проти годинникової стрілки

Регулювання швидкості обертання двигуна здійснюється шляхом використання широтно-імпульсної модуляції, яку генерує контролер. Приклад такого сигналу представлено на рис.4.11.

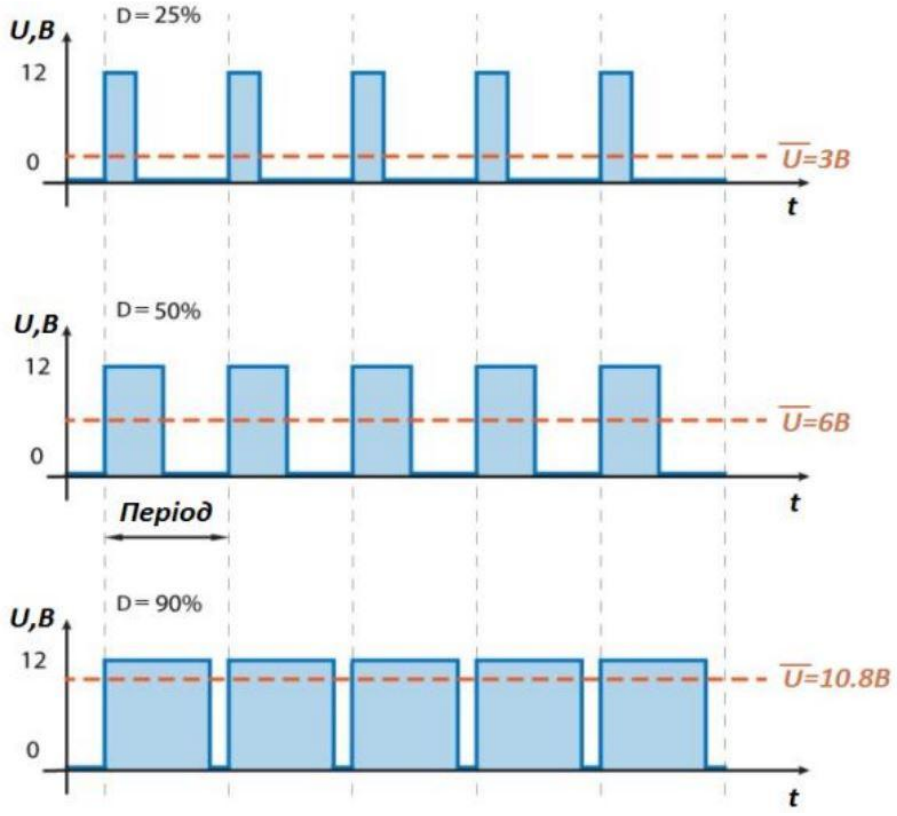


Рис.4.11 – Сигнали керування швидкістю двигуном постійного струму в режимі широтно-імпульсної модуляції

В даному режимі регулювання швидкістю відбувається інтегрування імпульсного сигналу, що надходить на двигун. Збільшення коефіцієнта заповнення сигналу D (відношення тривалості імпульсу до періоду сигналу) призводить до зростання середньої напруги і, як наслідок, швидкість обертання двигуна зростає. Таким чином, завдання драйвера двигуна постійного струму полягає в комутації виводів двигуна для регулювання напрямку руху двигуна та підсилення сигналів керування широтно-імпульсною модуляцією, які надходять з контролера.

4.2.2. Вдосконалений метод керування швидкості

Порівняно з відомим методом керування двигуном постійного струму, а саме за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), вдосконалення методу керування при застосуванні до п’єзоелектричного двигуна з прямокутним резонатором забезпечувалося за рахунок наступних нововведень:

1.Швидкість двигуна визначається не тільки коефіцієнтом заповнення сигналу керування D, а й частотою збудження п’єзоелектричного елемента двигуна та безпосередньо частотою сигналу ШІМ.

2.Частота збудження п’єзорезонатору регулюється за рахунок вимірювання та стабілізації струму споживання двигуна по аналогії з методом стабілізації швидкості в безперервному режимі (підрозділ 4.1) з врахуванням особливостей роботи системи вимірювання струму в імпульсному режимі, а саме:

- вимірюється тривалість імпульсу керування, що задає тривалість роботи двигуна, яка порівнюється з заданою тривалістю і здійснюється керуванням частотою двигуна після перевищення тривалістю імпульсу керування заданої тривалості.

- вимірювання струму споживання здійснюється не відразу при надходженні фронту сигналу керування (ШІМ) високого рівня, а після проходження деякого часу, значення якого задається;

- задана тривалість визначається як час встановлення перехідного процесу за робочим струмом через п’єзоелемент при ввімкненні двигуна.

Розглянемо особливості роботи стабілізації струму в режимі ШІМ.

Робота двигуна в кроковому (імпульсному) режимі відбувається наступним чином. Крок двигуна задається тривалістю керуючого імпульсу керування (стробу), який формується на виході схеми 8 (рис.4.4, рис.4.5) по команді зовнішнього керування. Цей імпульсу керування запускає відповідний вихід генератора 1 на час дії імпульсу керування. Таким чином, за час дії імпульсу керування на виході генератора з’являється частота, наприклад *FE1*, яка і формує певний крок двигуна. Чим більша тривалість імпульсу керування, тим більше кроків зробить двигун (рис.4.12).

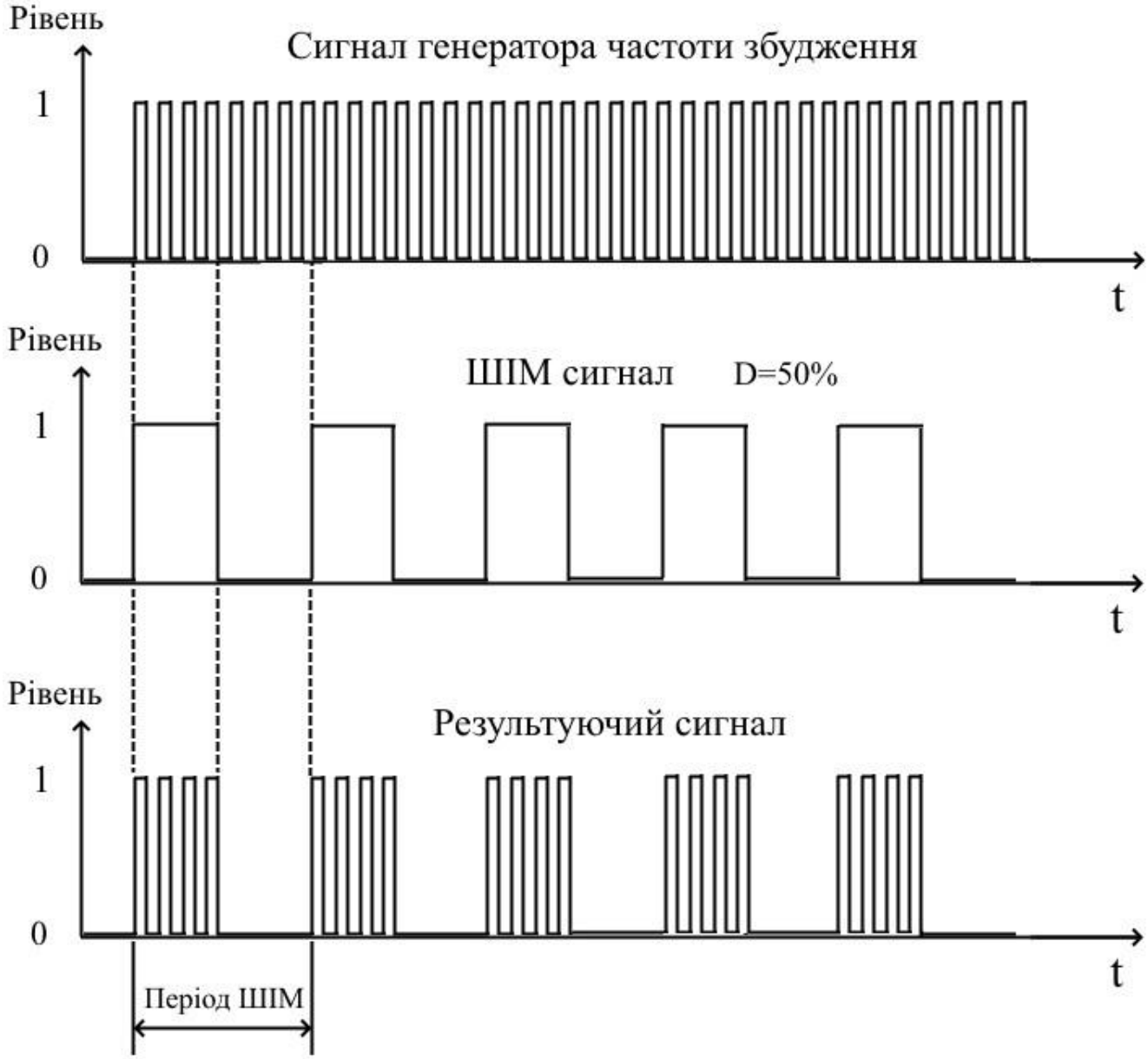


Рис.4.12 – Часові діаграми сигналів керування двигуна в режимі роботи ШІМ

Однак, як було встановлено експериментально, в початковий момент ввімкнення спостерігається перехідний процес за струмом через п’єзоелемент, реєстрований одним із вимірювачів струму (в даному випадку вимірювачем 4, рис.4.4). Тривалість перехідного процесу визначається інерційними властивостями як самого п’єзоелемента, так і системою керування. Типова осцилограма такого процесу представлена на рис.4.13.

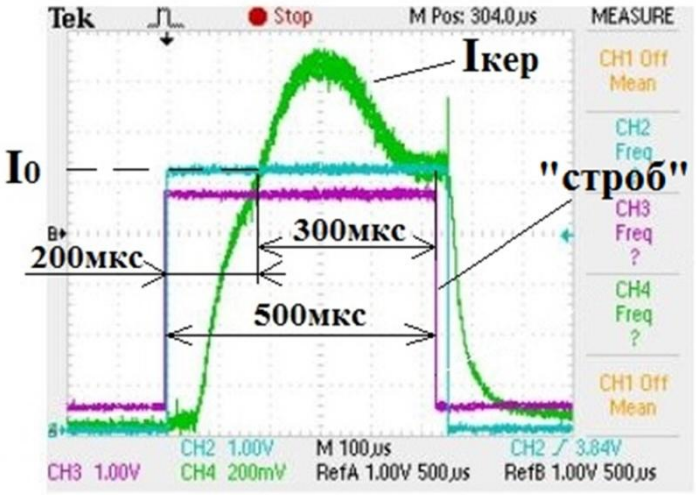


Рис.4.13 – Осцилограма перехідного процесу за струмом через п’єзоелемент при роботі двигуна в імпульсному (кроковому) режимі

Із представленої осцилограми слідує, що на ділянці перехідного процесу можливі перерегулювання (*Ікер>0*), обумовлені не самим керуванням, а саме перехідним процесом в початковий момент часу. А це, в свою чергу, може порушити принцип керування, якщо тривалість керуючого імпульсу буде близька з тривалістю перехідного процесу, аж до повної зупинки двигуна. Дійсно, для конкретного прикладу (рис.4.13), тривалість імпульсу керування становить 500 мкс. При цьому, команда керування на збільшення струму триває 200мкс, а команда на зменшення струму 300мкс. Таким чином, буде результуюча команда на зменшення струму протягом 100 мкс в кожному імпульсі. В результаті, в кожному наступному імпульсі буде команда на збільшення частоти, що призведе (в кінцевому результаті) до зупинки двигуна – його виходу із зони керування і переходу в зону нечутливості. Що і було підтверджено експериментально.

Тому, з метою не порушення принципу керування в кроковому (імпульсному) режимі роботи двигуна, вимірюється тривалість імпульсу керування, що вказує крок двигуна, порівнюється (тривалість) з заданою тривалістю і здійснється керування частотою двигуна після перевищення тривалості імпульсу керування заданої тривалості.

Тобто в схемі керування 8 (рис.4.4), додатково аналізується тривалість імпульсу керування, і при необхідності – закривається вхід на надходження

сигналу від схеми 7 (тобто формується еквівалент нулевого сигналу помилки). А на виході генератора 1 формується частота *FE1,* яка відповідає оптимальному, не керованому режиму роботи. При цьому, задану тривалість доцільно визначити як час встановлення перехідного процесу за робочим струмом через п’єзоелемент при ввімкненні двигуна.

Таким чином, змінюючи тривалість імпульсів керування, частоту їх слідування по кожному каналу керування, а також регулюванням струму споживання двигуна або робочою частотою збудження, дозволяє досягати 4-6 порядків глибини регулювання за швидкістю.

4.2.3. Дослідження ефективності вдосконаленого методу

Виконувалося дослідження залежності швидкості обертання двигуна залежно від частоти та коефіцієнту заповнення сигналу (D) ШІМ при стабілізації струму через п’єзоелектричний двигун.

Для експериментальних досліджень змакетована схема керування п’єзоелектричним двигуном по аналогії зі схемою керування двигуном постійного струму (рис.4.7). Дослідження проводилися з використання обертального п’єзоелектричного двигуна PM-1124R [42] з прямокутним резонатором. Даний резонатор також використовується в двигунах мікроманіпулятора, тому результати експерименту можна використовувати і у відношенні до лінійних п’єзоелектричних двигунів. З’єднання п’єзоелектричного двигуна, драйвера та контролера Arduino для керування швидкістю п’єзоелектричним двигуном представлено на рис.4.14.

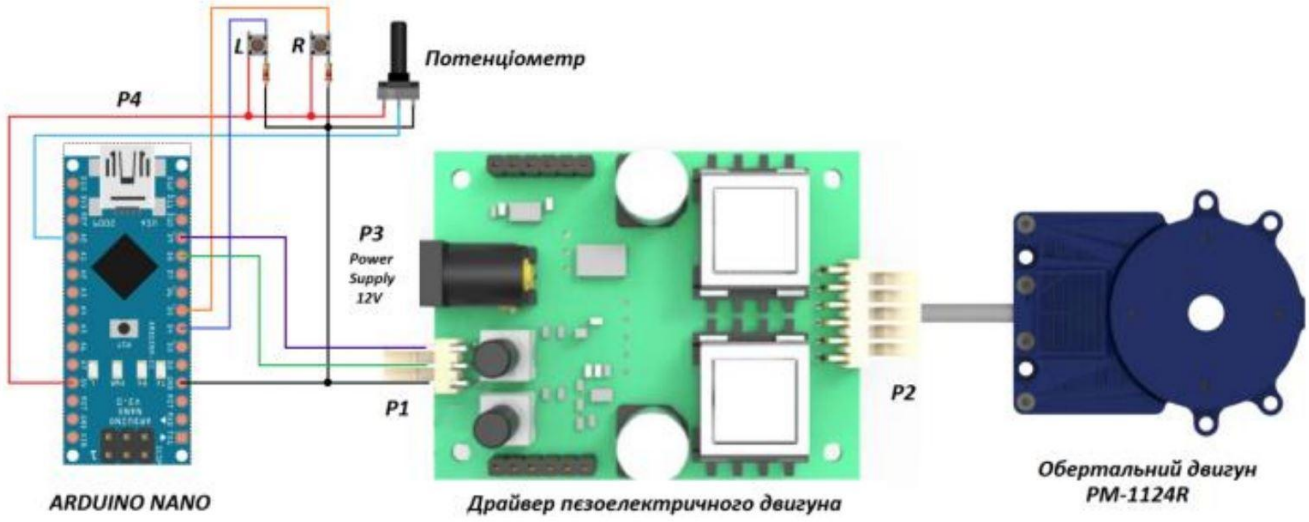


Рис.4.14 – Схема з’єднань п’єзоелектричного двигуна, драйвера та контролера Arduino

4.2.3.1. Драйвер п’єзоелектричного двигуна

Перш ніж розглянути драйвер п’єзоелектричного двигуна слід врахувати специфічні положення, які властиві практично всім п’єзоелектричним двигунам:

- п’єзоелектричний двигун (здебільшого) можна представити як два незалежних однонаправлених двигуна, виконаних в єдиному корпусі, кожен з яких незалежно працює в свою сторону;

- виходячи з цього, управління такими двигунами здійснюється за допомогою двоканального драйвера, кожен канал якого працює на свою сторону руху, адаптованого по резонансній частоті збудження до відповідного типу двигуна. Напруга живлення (наприклад 12 В) надходить на стандартний роз’єм драйвера (P3), а підключення двигуна до драйвера здійснюється через роз’єм (P2) (рис.4.15).

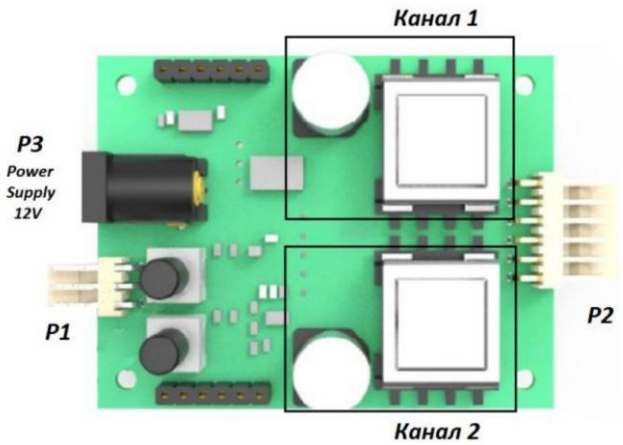


Рис.4.15 – Двоканальний драйвер п’єзоелектричного двигуна (DTI) [42]

Зовнішнє керування п’єзоелектричним двигуном (DTI) здійснюється по двох незалежних лініям (роз’єм P1, 1-й та 2-й контакти), електричним сигналом з рівнем напруги ТТЛ: контакт 1 – обертання проти годинникової стрілкою (ліве обертання для обертального двигуна та рух вправо для лінійного); контакт 2 – обертання за годинниковою стрілкою (праве обертання для обертального двигуна та рух вліво для лінійного); контакт 3 – “спільний” (рис.4.14). На двигун подається напруга живлення, а керування двигуном здійснюється по двом незалежним лініям (шинам) керування. Двигун керується рівнем логічного нуля, тобто щоб ввімкнути двигун необхідно подати логічний нуль на 1-й або 2-й контакт роз’ємну P1 (в залежності від бажаного напрямку руху). Переходячи до керування в режимі двійкового коду, організація обертання буде наступною: “01” – ліве обертання (рух вправо для лінійного двигуна), “10” – праве обертання (рух вліво для лінійного двигуна), “11” – стоп. У деяких типах п’єзоелектричних двигунів можливий диференційний режим – “00”. Якщо рівень логічного нуля подається імпульсно – маємо імпульсний (кроковий) режим роботи, якщо безперервно – то маємо безперервний рух. При цьому відразу слід зауважити, що тривалість імпульсу керування (“строба”) не прив’язана жорстко до кроку двигуна (похибка 5-10 %) і залежить від частоти збудження п’єзоелементу та номер імпульсу збудження від початку руху.

Драйвер складається з п’яти основних блоків (рис.4.16):

- direction control Unit, який включає кнопки та роз’єм, за рахунок яких відбувається керування драйвером;

-microcontroller виконує обробку вхідних сигналів та генерацію частоти збудження резонатора;

-current sense виконує вимірювання струму споживання двигуна;

-driver здійснює підсилення сигналу частоти збудження, містить 2 незалежних канали для кожного з напрямку руху;

-power Supply відповідає за живлення драйвера.

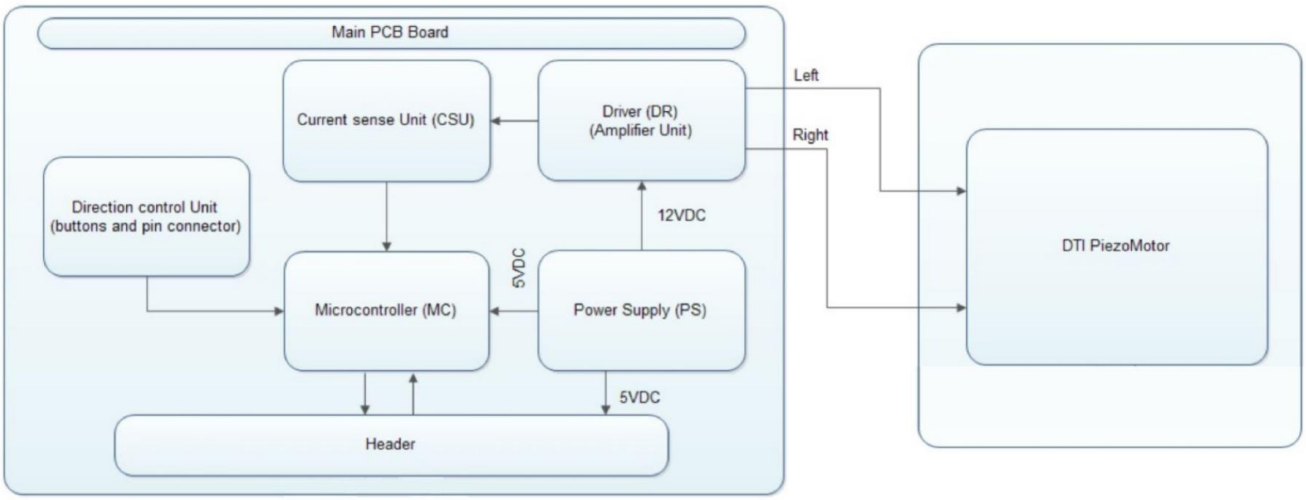


Рис.4.16 – Структурна схема драйвера ПД (DTI) [42]

4.2.3.2. Принцип роботи стенду

Генерацію широтно-імпульсної модуляцієї сигналу здійснювала плата Arduino. Струм стабілізації п’єзоелектричного двигуна встановлений рівним 360мА. При натисканні на кнопку L сигнал широтно-імпульсною модуляції з плати Arduino надходив на 1-й контакт (“синій”) роз’єму P1, що призводило до руху двигуна проти годинникової стрілки. Кнопка R відповідала за генерацію сигналу на 2-й контакт (“оранжевий”) роз’єму P1, що призводило до руху двигуна за годинниковою стрілкою. Регулювання коефіцієнту заповнення сигналу здійснювалось за допомогою потенціометра. Для цього розроблена програма, яка

змінювала коефіцієнт заповнення сигналу широтно-імпульсної модуляції в залежності від положення регулятора потенціометра.

4.2.3.3. Результати досліджень

Мінімальну тривалість сигналу логічного нуля (що відповідала мінімальній швидкості обертання двигуна), яку вдалося досягти за допомогою цієї схеми становила ~ 150 мкс. Ця тривалість повинна була відповідати кутовому кроку двигуна порядку декілька кутових хвилин (при діаметрі ротора 32 мм, лінійна дистанція еквівалентна 5 мкм – 10 мкм).

На рис.4.17 представлено результати експериментальних досліджень, а саме залежність швидкості п’єзоелектричного двигуна в залежності від параметрів широтно-імпульсної модуляції сигналу (частоти та коефіцієнту заповнення сигналу D) при стабілізованому струмі живлення п’єзоелектричного двигуна рівним 360мА.

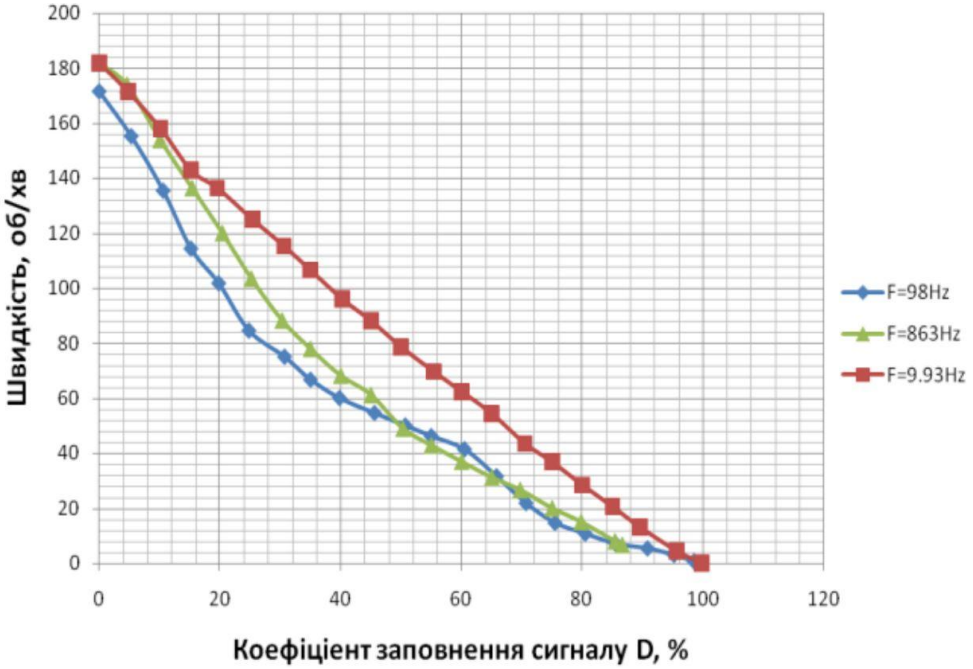


Рис.4.17 – Залежність швидкість двигуна від коефіцієнту заповнення та частоти сигналу широтно-імпульсної модуляції при фіксованому струмі живлення двигуна

Так як довжина ротора двигуна становить 100.5 мм, то для перетворення значень швидкості об/хв. необхідно помножити значення швидкості на 100 (якщо

округлити) для отримання значень мм/хв. або помножити на 1.675 для отримання мм/с.

Із результатів експериментального дослідження видно, що характер швидкості близький до лінійного для різних частот широтно-імпульсної модуляції. При цьому, мінімальна швидкість, яку вдалося отримати для частоти широтно-імпульсної модуляції ~ 1 кГц склала 6,6 об/хв. (11 мм/с), для ~ 100 Гц склала 0.68 об/хв. (1.14 мм/с), для ~ 10 Гц склала 0,06 об/хв. (0.1мм/с), що добре узгоджувалася з фізичним принципом роботи п’єзоелектричного двигуна (кутовий крок для мінімальної тривалості сигналу логічного нуля склав ~ 2 кут.хв (10 мкм)).

Незважаючи на те, що вдосконалений алгоритм відкриває широкі можливості налаштування швидкості двигуна в широкому діапазоні, моменту сили, яку розвиває двигун та струмі споживання за рахунок зміни не тільки коефіцієнта заповнення сигналу D, частотою сигналу ШІМ, а також безпосередньо частоти генератора збудження, даний алгоритм має недолік, який не є допустимим в мікроманіпуляційних системах –вібрації, які виникають при кожному початку руху та зупинці двигуна у зв’язку з високими старт-стопними характеристиками (миттєвий старт та зупинка двигуна). У зв’язку з цим, даний метод потребує подальших вдосконалень.

4.3. Методи мінімізації ударно-вібраційних характеристик п’єзоелектричного двигуна

Створено стенд для вимірювання ударно-вібраційних характеристик п’єзоелектричного двигуна та пошуку методів зменшення ударно-вібраційних ефектів.

4.3.1. Стенд для вимірювання ударно-вібраційних характеристик п’єзоелектричного двигуна

Структурна схема стенду для вимірювання параметрів двигуна в процесі дослідження представлена на рис.4.18.

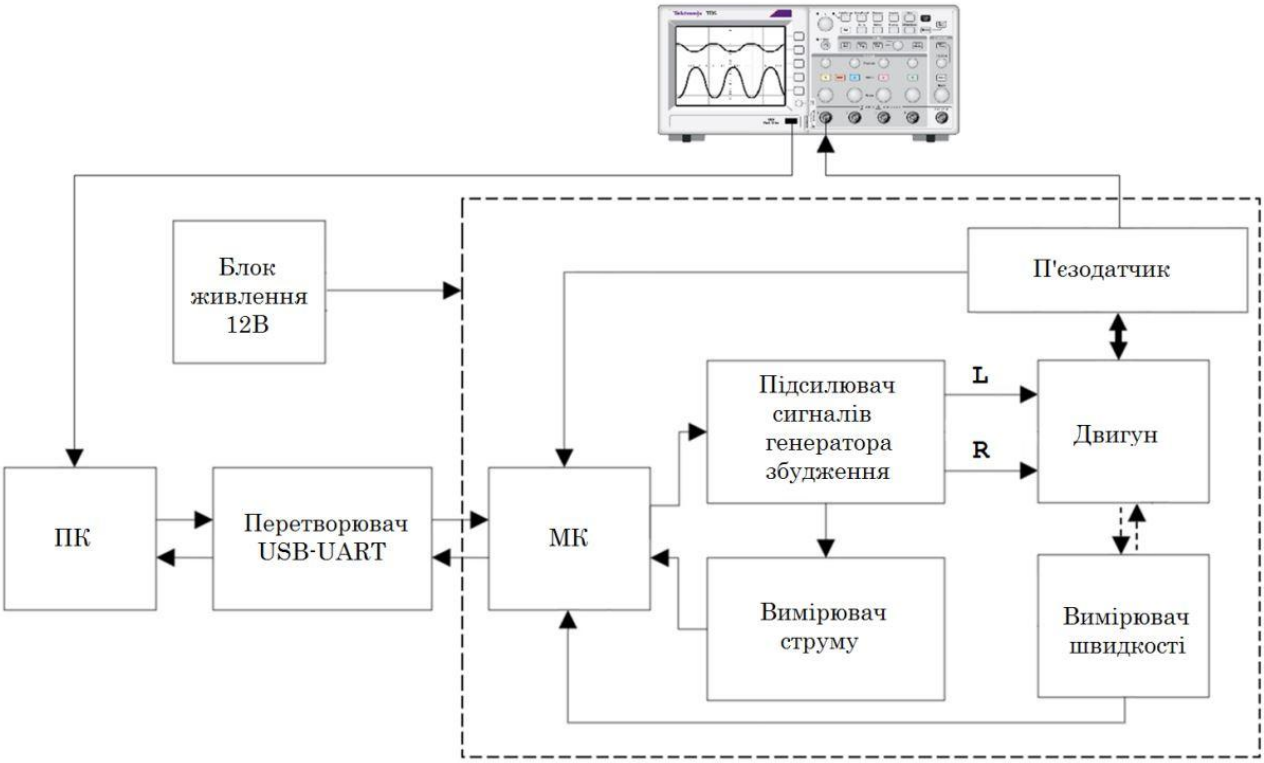


Рис.4.18 – Структурна схема стенду для вимірювання параметрів двигуна

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

П’єзоелектричний датчик вібрацій 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 здійснювався контроль струму п’єзодвигуна за допомогою вимірювача струму, а весь стенд живився від джерела постійного струму 12В. Вимірювач швидкості був виконаний на основі оптичного енкодера iC-PX3212 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 ~5В) 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 циакріновій основі. Власний шум вібродатчика і його вимірюючого каналу знаходився на рівні ~5 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, наприклад, для клітинних технологій на базі оптичного мікроскопу, граничний рівень роздільної здатності якого ~0,6 мкм.

В процесі роботи персональний комп’ютер надсилав параметри керування на мікроконтролер PIC16F18325, а саме режим роботи двигуна (ШІМ або заданий алгоритм), значення необхідної швидкості, напрямок руху двигуна. У відповідності з цими командами керування на виході мікроконтролера формувався 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 рівня вібрацій двигуна, який надходив на персональний комп’ютер для подальшої обробки.

4.3.2. Дослідження ударно-вібраційного ефекту

Для дослідження і аналізу вдосконалених методів керування п’єзоелектричним двигуном в режимі мікро- та наношвидкостей використано лінійний мікродвигун класу LPM-5 [42].

Для початку досліджено ударно-вібраційний ефект при формуванні одиночного імпульсу керування двигуном. Типова осцилограма виникаючих вібрацій на корпусі двигуна при імпульсному керуванні представлена на рис.4.19.

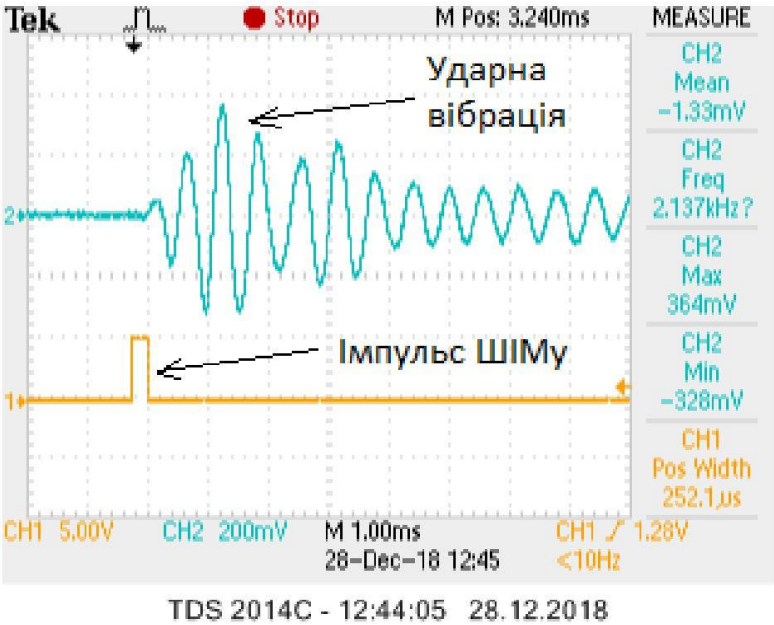


Рис.4.19 – Осцилограма ударно-вібраційного ефекту на корпусі двигуна при імпульсному збудженні

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 прискорюється 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-сотнями мікросекунд [62]. Графік залежності миттєвої швидкості двигуна від часу руху, який представлено на рис.4.20 підтверджують вищесказану інформацію.

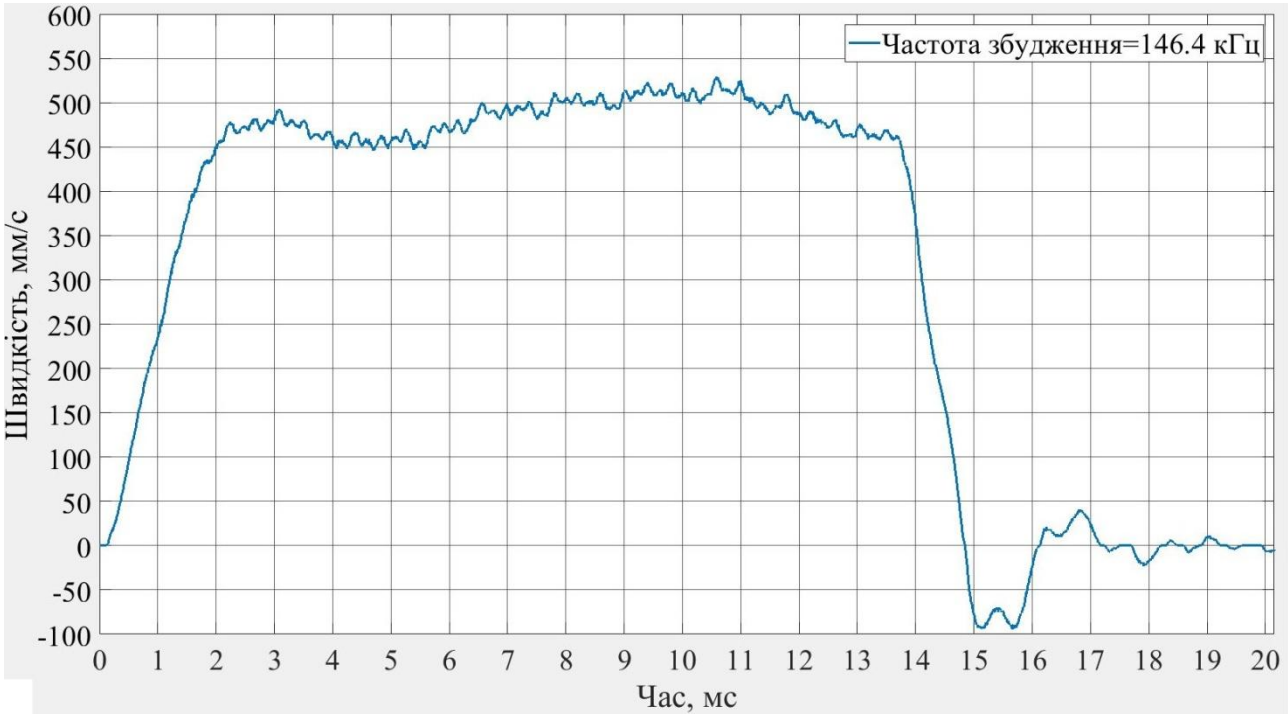


Рис.4.20 – Старт-стопна характеристика двигуна LPM-2M на частоті резонансу

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.

4.3.3. Частотно-безперервний метод керування

Основи роботи даного методу описано в підрозд. 4.1, однак в даному пункті досліджено роботу даного методу саме в діапазоні швидкостей 1 мм/с–10 мм/с. Характерною особливістю роботи алгоритму в даному діапазоні швидкостей було те, що працював гістерезис двигуна з шириною (5–10) кГц (рис.4.6). Тобто двигун працював в зоні збудження (160–170) кГц, а це зона нечутливості (як згадувалося раніше, робоча зона 150 кГц –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 (реалізованого на основі досліджуваного частотно-безперервного методу керування) і широтно-імпульсної модуляції в інтервалі швидкостей 1мм/с –10 мм/с представлено на рис.4.21.

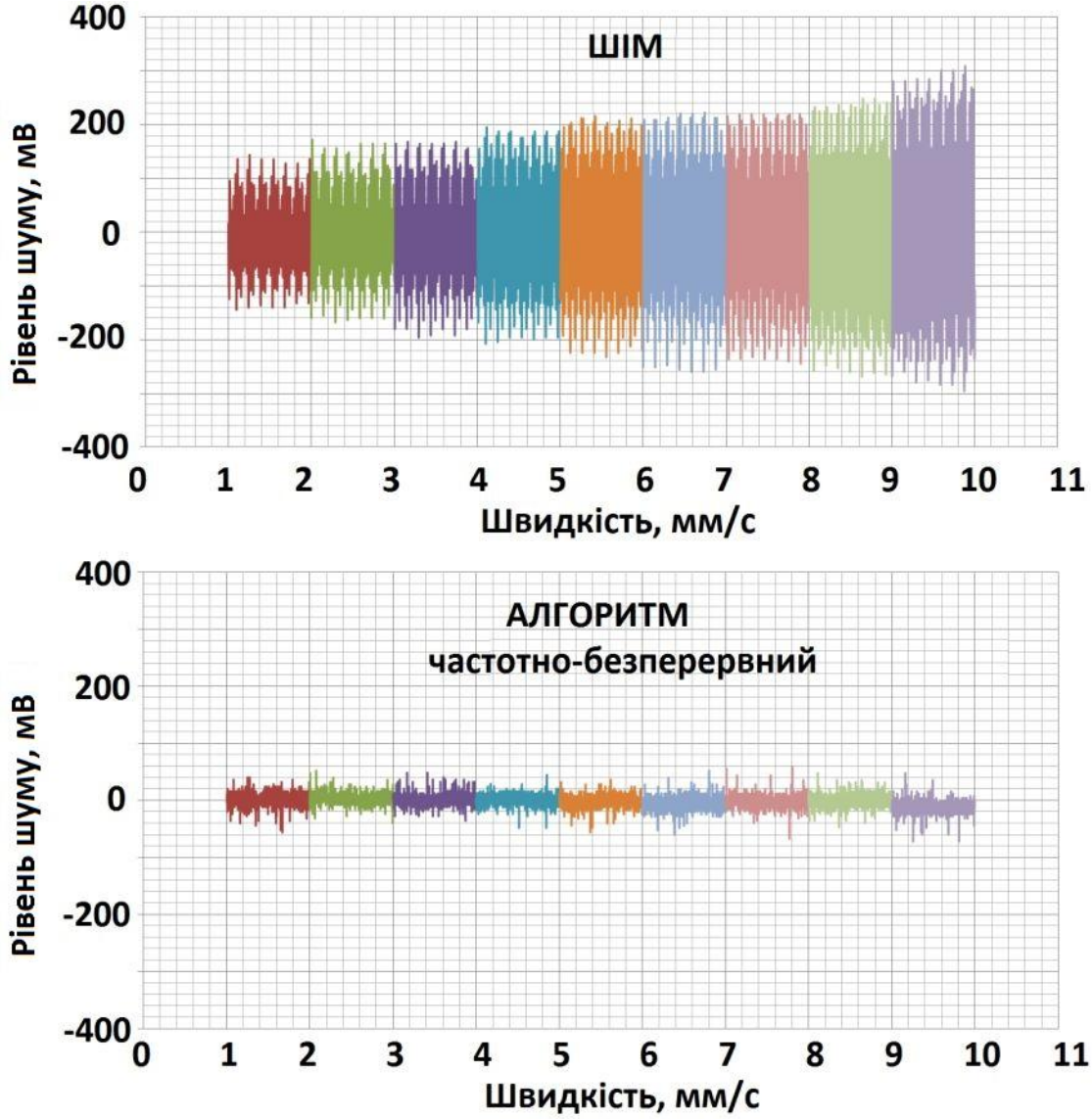


Рис.4.21 – Рівень шуму при керуванні в режимі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) і при керуванні частотно-безперервним алгоритмом в діапазоні швидкостей 1–10мм/с (частота ШІМу – 278 Гц, діапазон зміни тривалості імпульсів ШІМу – 80–270 мкс (D=2.2-7.5%)).

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.

4.3.4. Імпульсно-гармонійний метод керування

Даний метод досліджувався в діапазоні швидкостей 0.1 мм/с – 1 мм/с.
В основі даного методу лежить вдосконалений метод керування на базі ШІМ (п.4.2.2) з деякими змінами, а саме:

1.Використовується фіксоване значення частоти ШІМ (частота слідування пакетів) та тривалість імпульсу керування (визначаються експериментально).

2.При надходженні переднього фронту імпульсу керування частота генератора збудження рівна F_{WR} (права межа вікна). В точці часу, яка рівна половині тривалості імпульсу, частота генератора рівна F_{WL}. В точці часу, коли на двигун надходить задній фронт імпульсу керування, частота генератора рівна F_{WR}. Величина $\mathbf{F_{Wmax}}$ перевищує значення $\mathbf{F_{max}}$ на 5–10кГц.

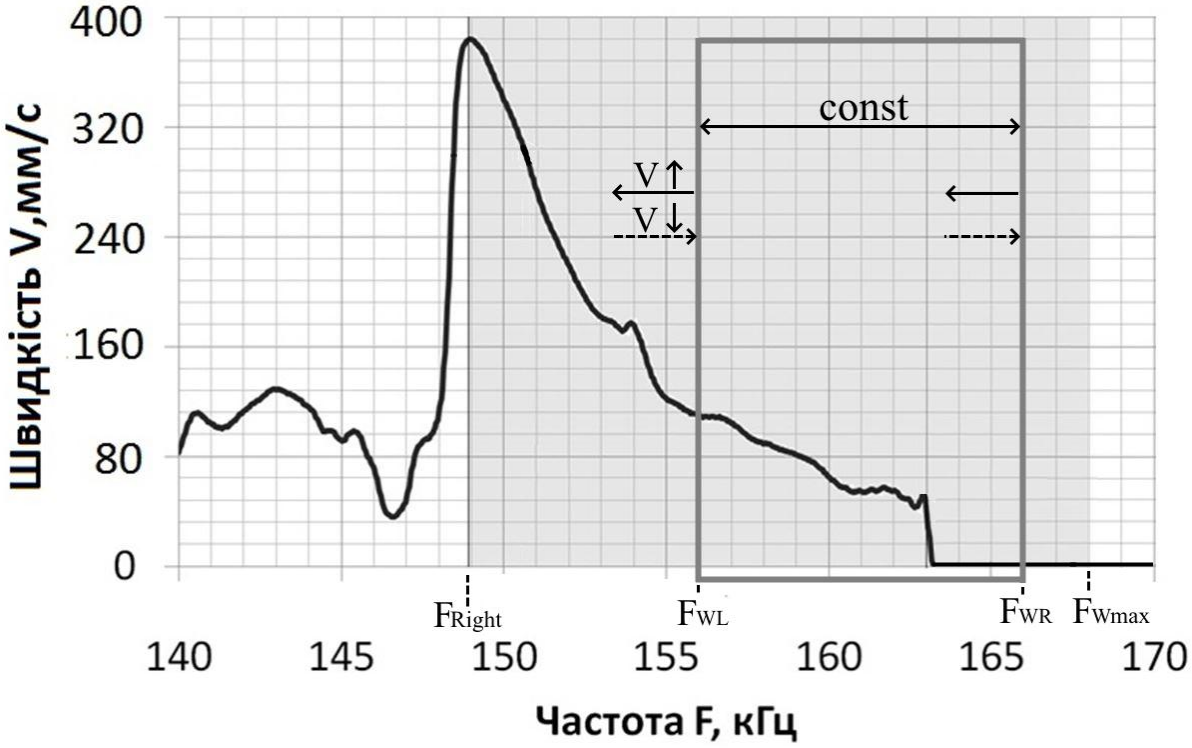


Рис.4.22 – Зона руху вікна регулювання швидкості двигуна

Тобто, в часовому діапазоні імпульсу керування частота генератора змінюється від частоти правої границі вікна до лівої і повертається на початкове значення. Крок зміни частоти генератора, а також час утримання частоти визначається експериментально. В даному випадку (рис.4.23) зміна частоти генератора змінювалася по лінійному закону.

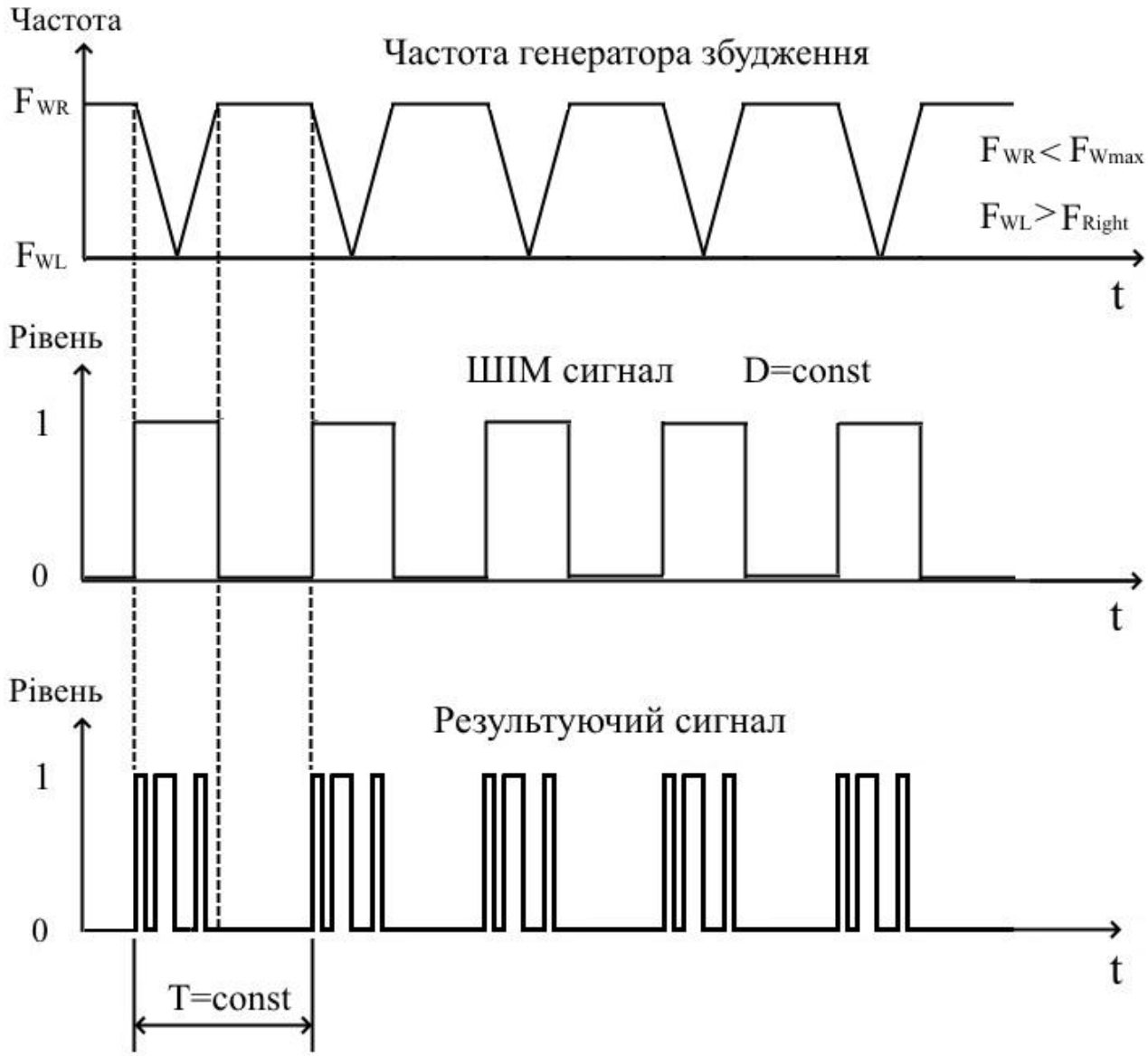


Рис.4.23 – Часові діаграми сигналів керування двигуна при імпульсно-гармонійному методі керування

3.Регулювання швидкістю здійснюється шляхом зміни значення частот F_{WL} та F_{WR} (різниця даних частот є значення фіксоване і визначається також експериментально в залежності від бажаних характеристик руху двигуна). Тобто

дані частоти формують вікно фіксованого розміру, яке рухається по частотній характеристиці (вліво для збільшення швидкості, вправо – для зменшення), стабілізуючи швидкість ($F_{WL} < F_{WR}$).

4.В якості сигналу корегування положення вікна (швидкості) виступає датчик швидкості, який порівнює задане значення швидкості з виміряним (фактичним). Напрямок руху вікна визначається знаком результату різниці значень заданого та виміряного значення швидкості.

5.Частота опитування датчика швидкості (отримання значення переміщення двигуна) визначається частотою ШІМ (частотою слідування пакетів періодів генератора збудження).

6.Вимірюється струм двигуна, що використовується для обмеження руху вікна, тобто в разі перевищення значення струму за допустиме, рух вікна ліворуч (в напрямку резонансу) обмежується.

Зменшення ударно-вібраційних ефектів забезпечується за рахунок того, що початок руху (прискорення) двигуна та його зупинка (уповільнення) відбувається на більшій частоті (при меншій амплітуді руху штовхача (“зуба”) п'єзоелемента, відповідно і швидкості двигуна), ніж посередині імпульсу керування.

На рис.4.24 показано залежність швидкості руху двигунавід номеру періоду збудження при різних частотах генератора збудження.

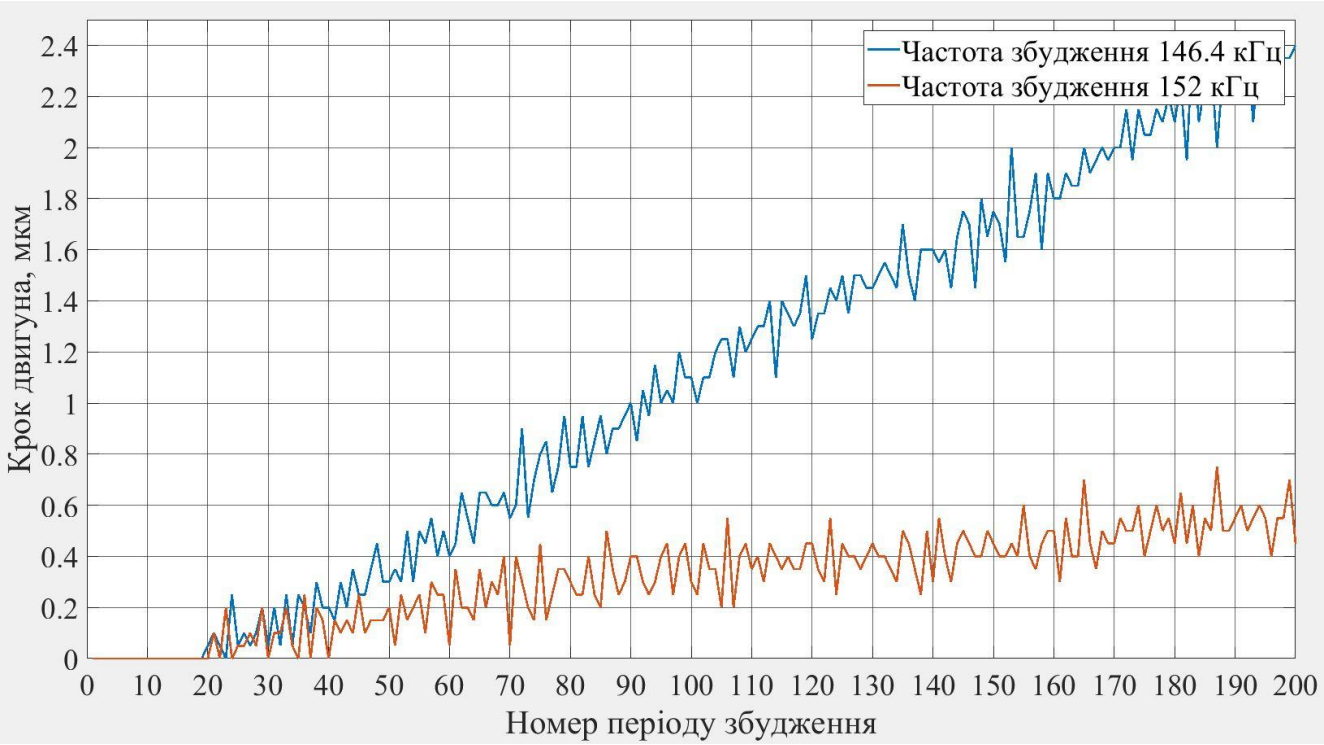


Рис.4.24 – Крок двигуна в залежності від кількості періодів збудження при різних частотах збудження

З графіка видно, що швидкість розгону двигуна зростає по мірі наближення до частоти резонансу (частота резонансу для даного двигуна становить 146.4 кГц).

Порівняльний експериментальний результат ударно-вібраційного ефекту для досліджуваного алгоритму (реалізованого на основі розробленого імпульсно-гармонійного методу) і в режимі широтно-імпульсної модуляції в інтервалі швидкостей 1 мм/с–0,1 мм/с представлено на рис.4.25.

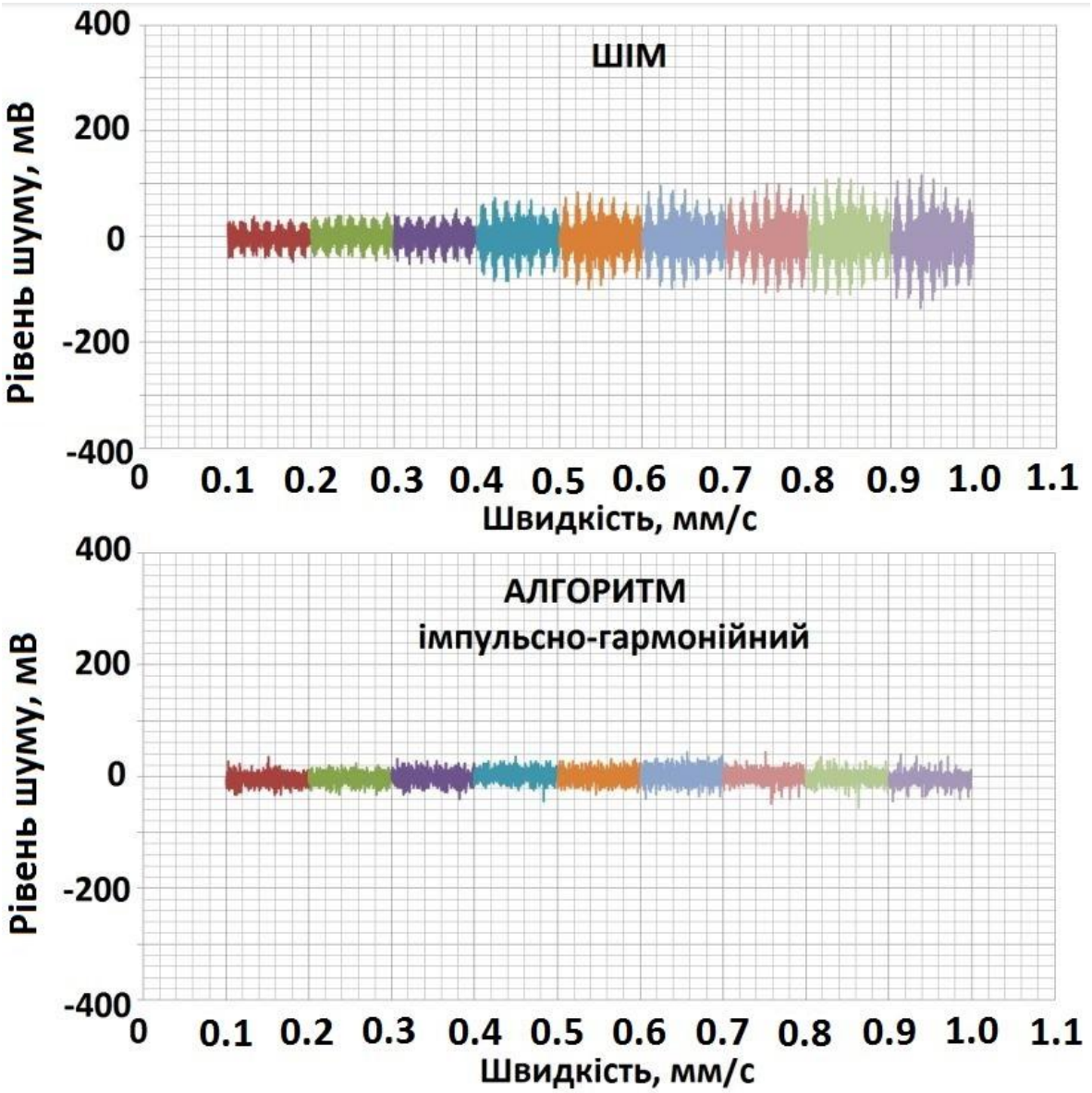


Рис.4.25 – Рівень шуму при керуванні в режимі широтно-імпульсної модуляції та імпульсно-гармонійним алгоритмом реалізованому на основі ШІМ в діапазоні швидкостей 0.1мм/с - 1мм/с (частота ШІМу – 278 Гц, діапазон зміни тривалості імпульсу ШІМу – 36 – 80 мкс (D=1–2.2%), частотна ширина пакету (F_{WR}–F_{WL}) – 10 кГц, час зміни частоти збудження в пакеті (тривалість імпульсу ШІМ) – 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 значно зменшити акустичний шумовий ефект, супутній ударно-вібраційному.

4.3.5. Частотно-імпульсний метод керування

Даний метод досліджувався в діапазоні швидкостей 10мкм–100мкм.

В основі даного методу покладено попередній метод керування, а саме імпульсно-гармонійний, але відмінність методів полягає в способі задання швидкості руху (рис.4.26).

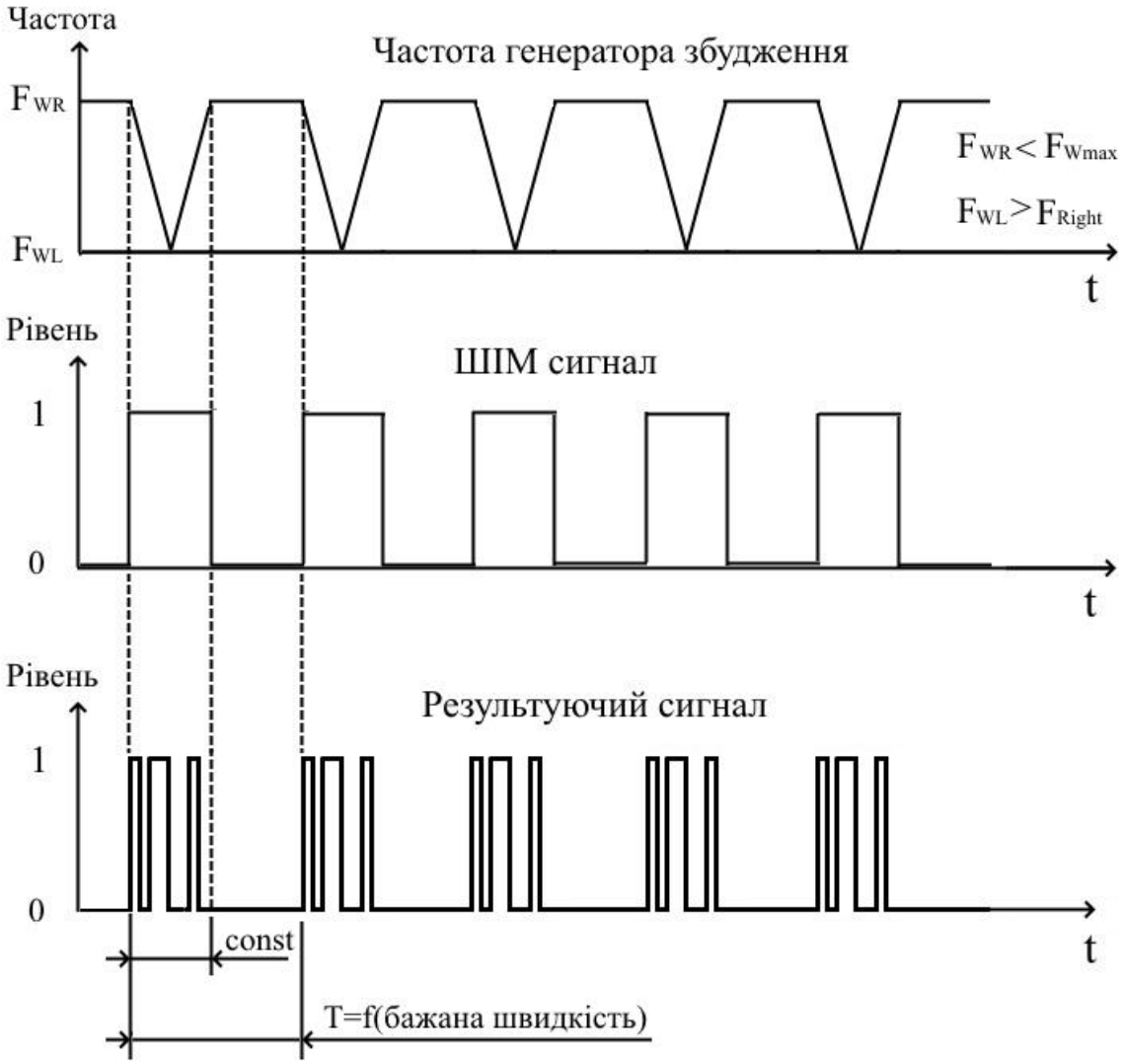


Рис.4.26 – Часові діаграми сигналів керування двигуна при частотно-імпульсному методі керування

Оскільки фактична швидкість двигуна (переміщення двигуна) визначається і порівнюється з бажаною після кожного періоду ШІМ (після кожного пакету

імпульсів генератора частоти збудження), то зменшуючи частоту ШІМ (зберігаючи при цьому тривалість пакету імпульсів збудження) можна зменшувати швидкість двигуна пропорційно зміні частоти ШІМ. При чому, стабілізація швидкості виконується аналогічно імпульсно-гармонійному методі керування – зміною положення вікна на частотній характеристиці.

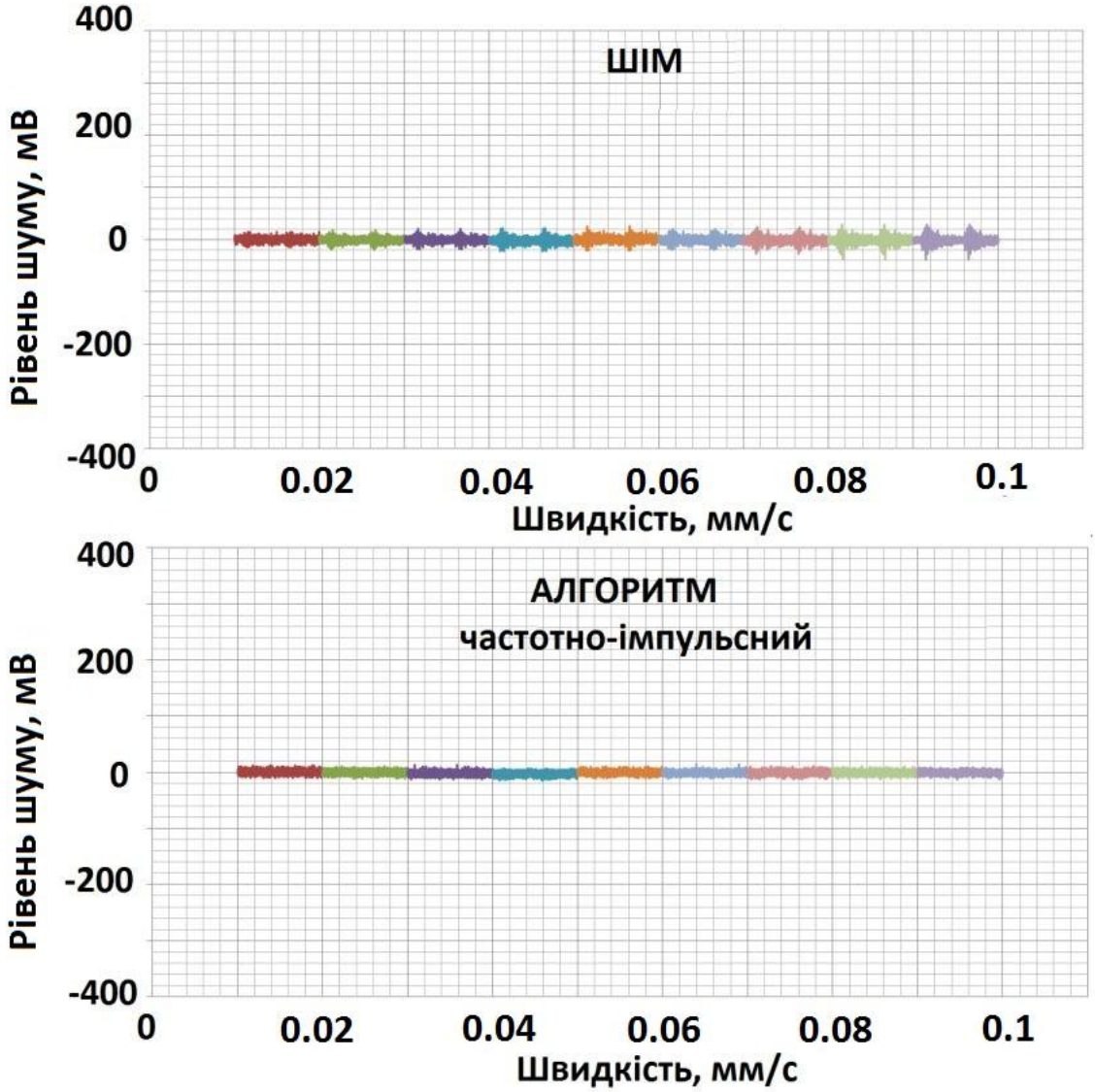


Рис.4.27 – Рівень шуму при керуванні в режимі широтно-імпульсної модуляції і при керуванні частотно-імпульсним алгоритмом в діапазоні швидкостей 10 мкм/с –100 мкм/с (частота ШІМу – 28 Гц, діапазон зміни тривалості імпульсу ШІМу – 36 мкс–80 мкс (D=0.1–0.22%), частотна ширина пакета (F_{WR}–F_{WL}) – 10 кГц, час зміни частоти збудження в пакеті (тривалість імпульсу ШІМ) – 1 мс, частота слідування пакетів – 12 Гц –120 Гц).

В нашому випадку діапазон зміни частоти становив від 120 Гц до 12 Гц, тобто в 10 разів. Порівняльний експериментальний результат ударно-вібраційного ефекту для досліджуваного алгоритму (реалізованого на основі розробленого частотно-імпульсному методу) і широтно-імпульсної модуляції в інтервалі швидкостей 10 мкм/с –100 мкм/с представлено на рис.4.27.

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’єзоелемента (20–35) мкс. За цей час двигун не встигає розігнатися і швидкість гальмування на порядки менше максимальної [62]. Як результат – ступінь ударно-вібраційного впливу різко зменшується.

4.4. Метод підвищення маневреності мікроманіпулятора

Під маневреністю розуміється мінімальна по тривалості або зовсім відсутня затримка реакції системи (маніпулятора) на дії органу керування (зазвичай механічного), а також дублювання без спотворень мікроманіпуляційною системою рухів органу керування.

Запропонований методу базується на основних перевагах п’єзоелектричного двигуна, а саме унікальних старт-стопних характеристиках (майже миттєвий початок та зупинка руху), а також високої роздільної здатності кроку двигуна.

У зв’язку з цим, маневреність буде досягатися за рахунок наступних факторів:

1.Двигун працював в кроковому режимі (тривалість імпульсу керування обмежена по тривалості (до 20 періодів збудження), що забезпечує допустимий рівень безвібрацій при роботі двигуна в даному режимі).

2.Швидкість двигуна регулювалася частотою слідування імпульсів керування (з додатковою можливістю регулювання тривалості імпульсу керування).

3.Частота збудження генератора збудження є фіксованою і знаходиться в зоні резонансу.

Так як даний метод керування орієнтований на використання механічного органу керування (в якого миттєве значення сигналу керування не є постійним в часі), то за рахунок керування швидкістю шляхом зміни частоти слідування імпульсів керування (кроків двигуна) вирішувалася можлива проблема механічного виникнення резонансу конструкції мікроманіпулятора.

На рис.4.28 показано залежність швидкості руху двигуна в залежності від частоти слідування імпульсів керування при фіксованій тривалості імпульсу.

Тривалість імпульсу (послідовності імпульсів) збудження двигуна була фіксованою і відповідала 5 періодам збудження (в даному випадку ~35 мкс), що відповідало одному кроку двигуна ~100 нм, а частота слідування пакетів збудження змінювалася в залежності від швидкості від 10 Гц до 100 Гц. Двигун збуджувався фіксованою резонансною частотою ~150 кГц.

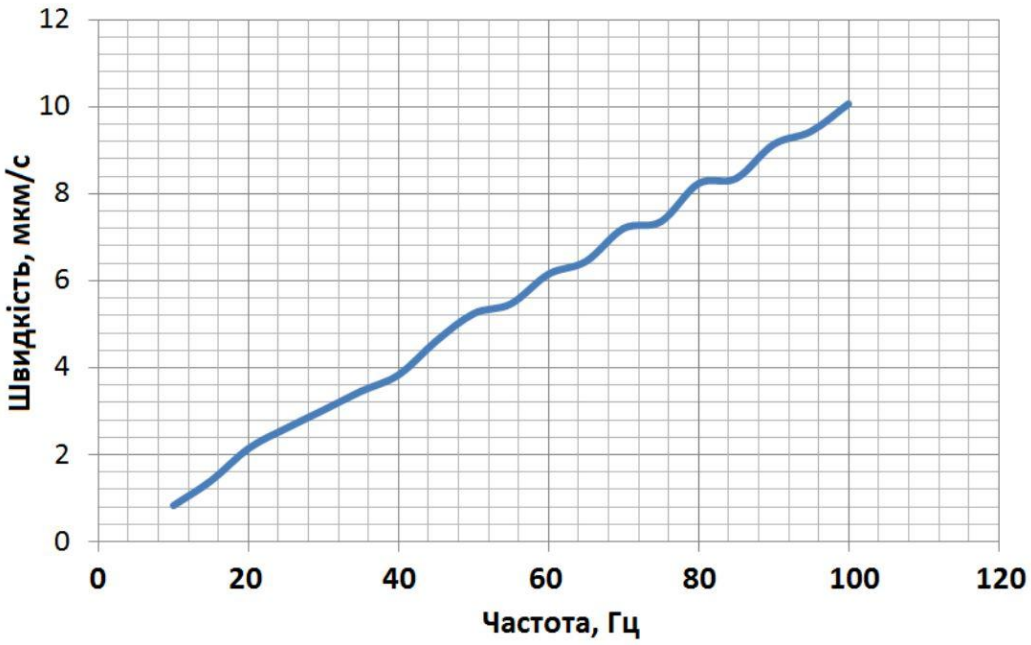


Рис.4.28 – Частотне керування двигуном в діапазоні швидкостей 1 мкм/с – 10 мкм/с при фіксованій тривалості імпульсу ~35 мкс

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.

Часова діаграми сигналів керування двигуна представлена на рис.4.26 за виключенням того, що частота генератора збудження є фіксованою та тривалість імпульсу керування вимірюється десятками мікросекунд, а не мілісекунд.

На рис.4.29 показано залежність швидкості руху двигуна в залежності від частоти слідування імпульсів керування при фіксованій тривалості імпульсу збудження рівному ~20 мкс, що відповідало одному кроку двигуна ~20 нм. Частота слідування імпульсів становила від 5 Гц до 50 Гц.

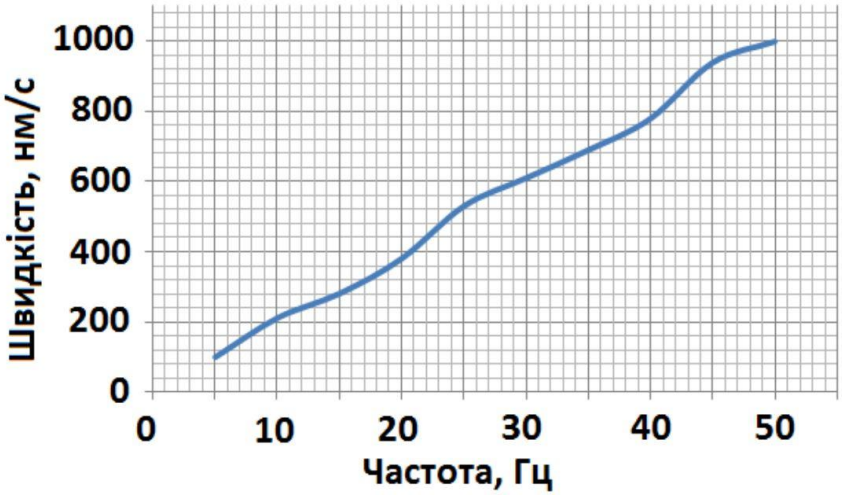


Рис.4.29 – Частотне керування двигуном в діапазоні швидкостей 0.1 мкм/с – 1 мкм/с при тривалості імпульсу керування ~20 мкс.

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.

На рис.4.30 представлено залежність лінійного переміщення каретки двигуна в залежності від переміщення механічного елементу керування, в даному випадку, куту нахилу кулі трекболу.

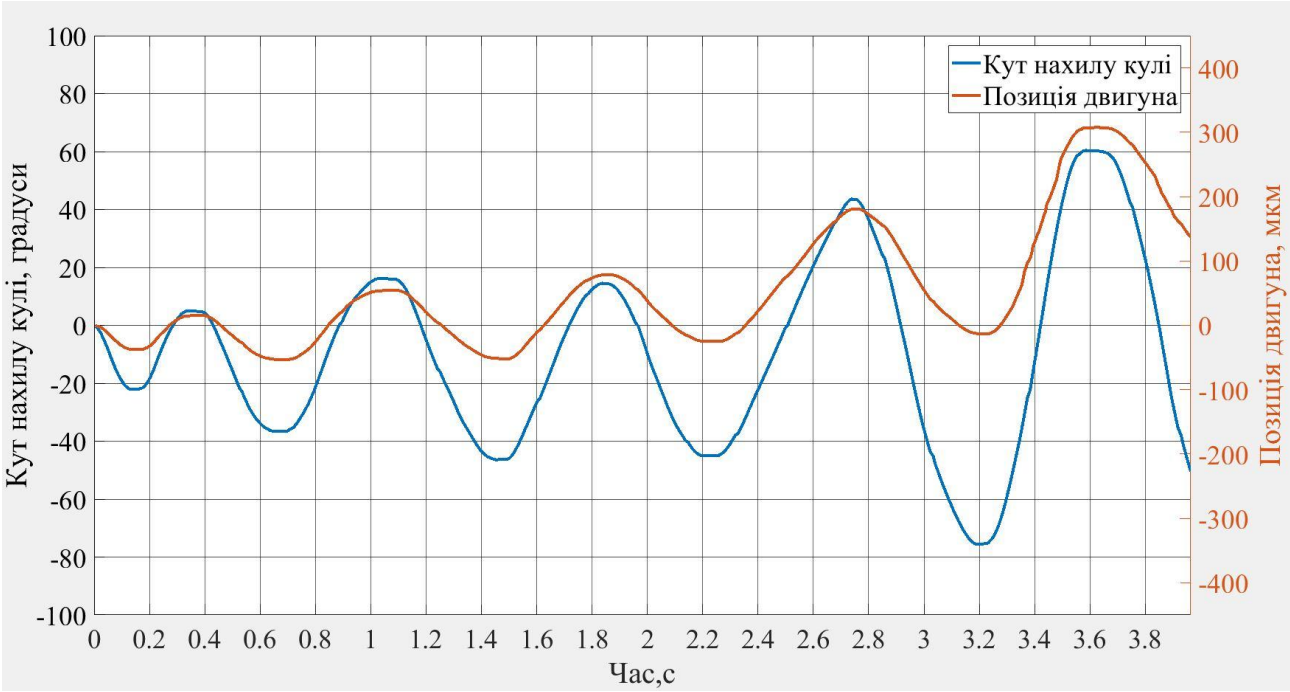


Рис.4.30 – Залежність позиції двигуна LPM-2M від кута нахилу кулі трекболу

При виконанні дослідження частота збудження двигуна була фіксована і становила 147 кГц. Послідовність імпульсів збудження була фіксована (9 періодів збудження).

Частота опитування елементу керування становить 200 Гц.

Отримані результати підтверджують схожість форми сигналів переміщення кулі трекболу та двигуна, однак спостерігається різна швидкість руху двигуна при різних напрямках руху, що вирішується шляхом калібруванням кроку двигуна шляхом зміни кількості імпульсів збудження.

4.5. Метод підвищення точності позиціонування мікроманіпулятора

Незважаючи на те, що п’єзоелектричний двигун є позиціонером (здатним утримувати фіксоване положення завдяки фрикційному контакту між штовхачем (“зубом”) п’єзоелемента та кареткою двигуна не прикладаючи при цьому додатково енергії, а також не змінюючи положення під впливом зовнішніх факторів, наприклад, температури), а також завдяки унікальним старт-стопним характеристикам, не спроможний миттєво зупинятися у зв’язку з наявності

інерційного навантаження, яке суттєво впливає на точність позиціонування маніпулятора.

На рис.4.31 представлено залежність миттєвої швидкості та позиції двигуна в залежності від час (з навантаженням 50 грам та без нього) при фіксованій частоті збудження (в зоні резонансу).

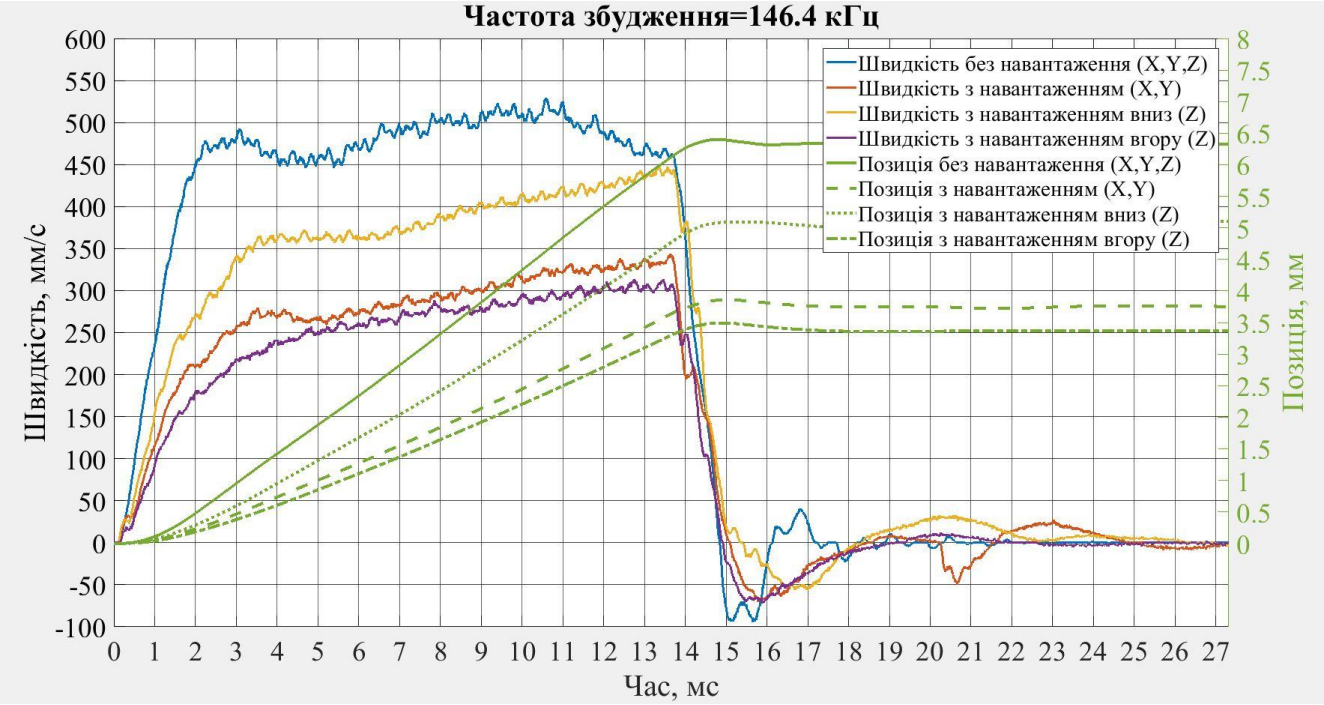


Рис.4.31 – Навантажувальна характеристика двигуна LPM-2M

Також дані характеристики дозволяють оцінити швидкість зупинки двигуна, дистанцію перельоту позиції в залежності від навантаження та розміщення двигуна в просторі (X та Y означає, що двигун розміщений в просторі аналогічно координатам X та Y маніпулятора, тобто в горизонтальній площині; Z означає, що двигун розміщений в просторі аналогічно координаті Z маніпулятора, в вертикальній площині).

На рис.4.32 показана залежність пройденої дистанції двигуном від навантаження двигуна, його розміщення у просторі та частоти збудження.

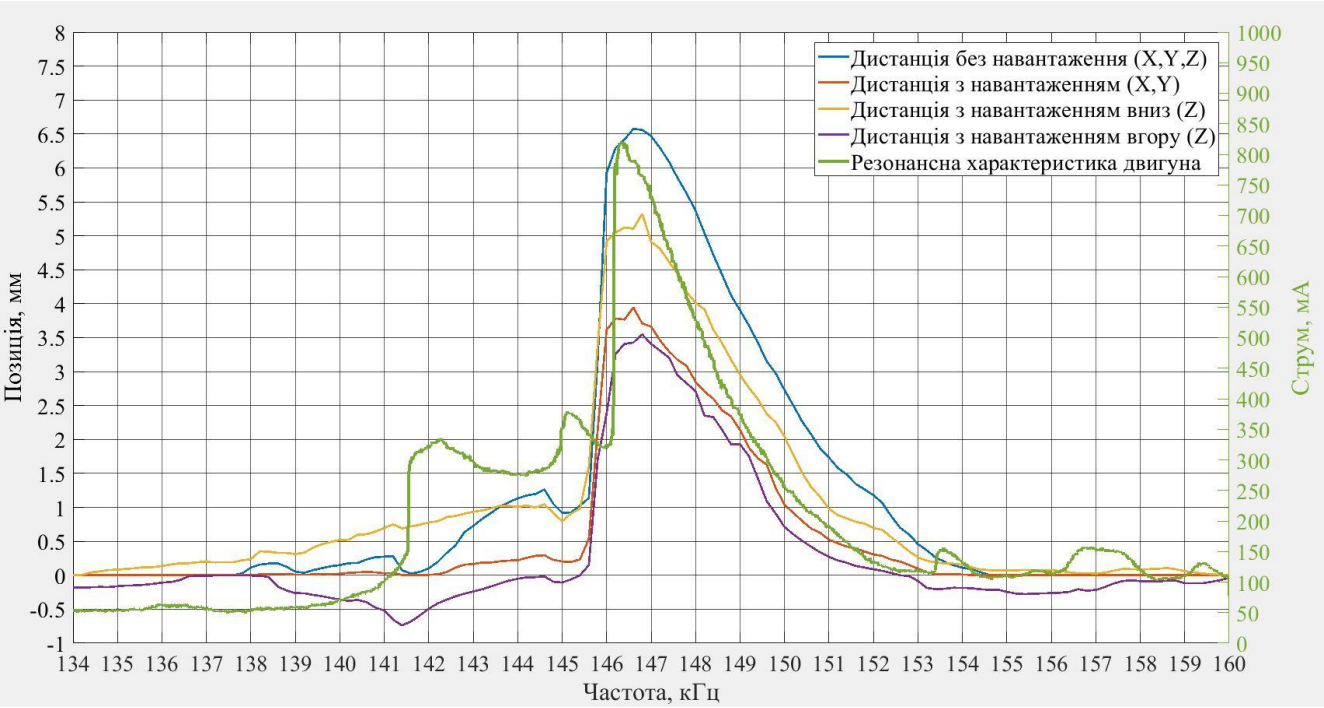


Рис.4.32 – Навантажувальна характеристика двигуна LPM-2M в залежності від частоти збудження

Даний графік також показує властивості фрикційного контакту. Так, наприклад, в діапазоні частот 138 кГц–145 кГц при русі двигуна вгору з навантаженням двигун проковзується й рухається в зворотному напрямку. Графіки своєю формою аргументують актуальність здійснювати регулювання швидкістю саме на правому схилі частотної характеристики (що було озвучено на початку розділу).

Порівнюючи графік струму двигуна та пройдену дистанцію двигуном видно, що максимальна дистанція переміщення знаходиться правіше піку резонансної характеристики.

Підвищення точності позиціонування п’єзоелектричного мікроманіпулятора в автоматичному режимі роботи забезпечується за рахунок уникнення перерегулювань шляхом зміни переміщення маніпулятора при безперервному русі до крокового режиму руху з подальшою зупинкою в точці позиціонування. Точність позиціонування визначається не тільки величиною роздільної здатності датчика швидкості/позиції двигуна, а й величиною мінімального кроку, який здатний зробити двигун. На рис.4.33 представлено графік залежності середнього

значення кроку двигуна від кількості періодів збудження двигуна при різних напрямках руху та прикладеного навантаження.

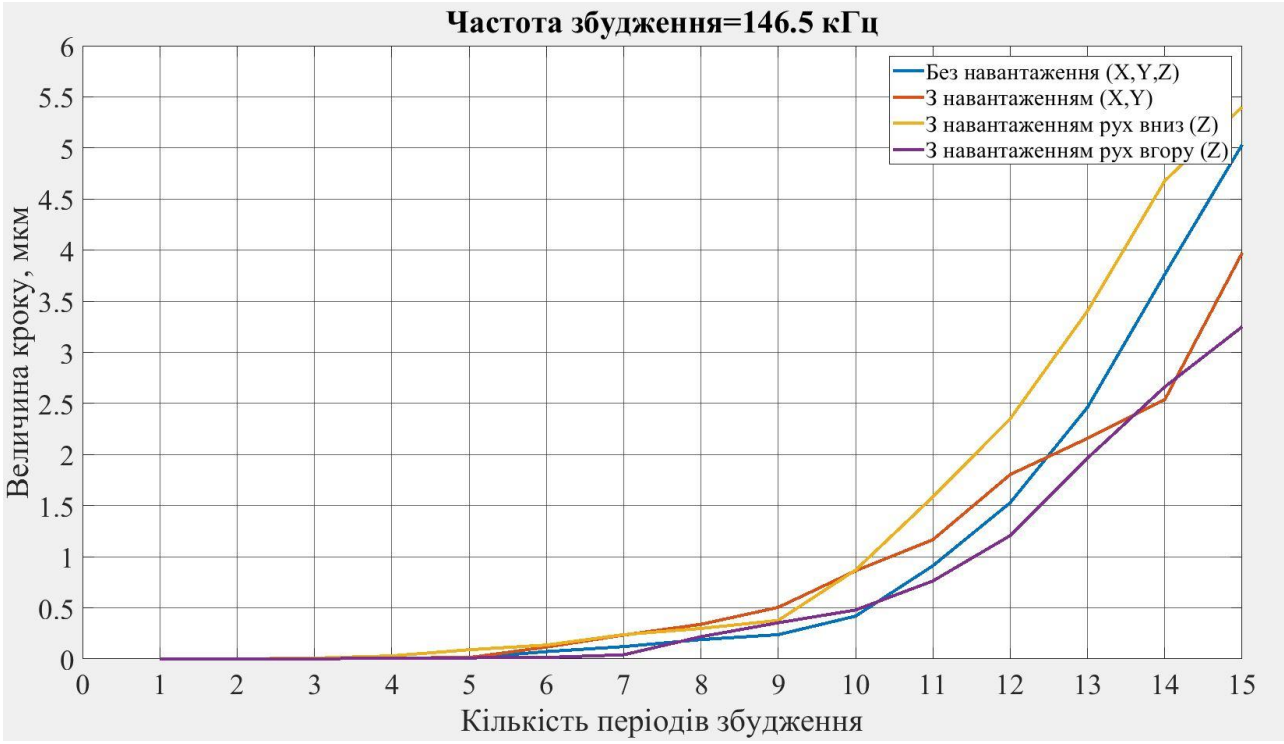


Рис.4.33 – Залежності середнього значення кроку двигуна від кількості періодів збудження двигуна LPM-2M

Як видно з представленого графіка, величина кроку не суттєво залежить від навантаження.

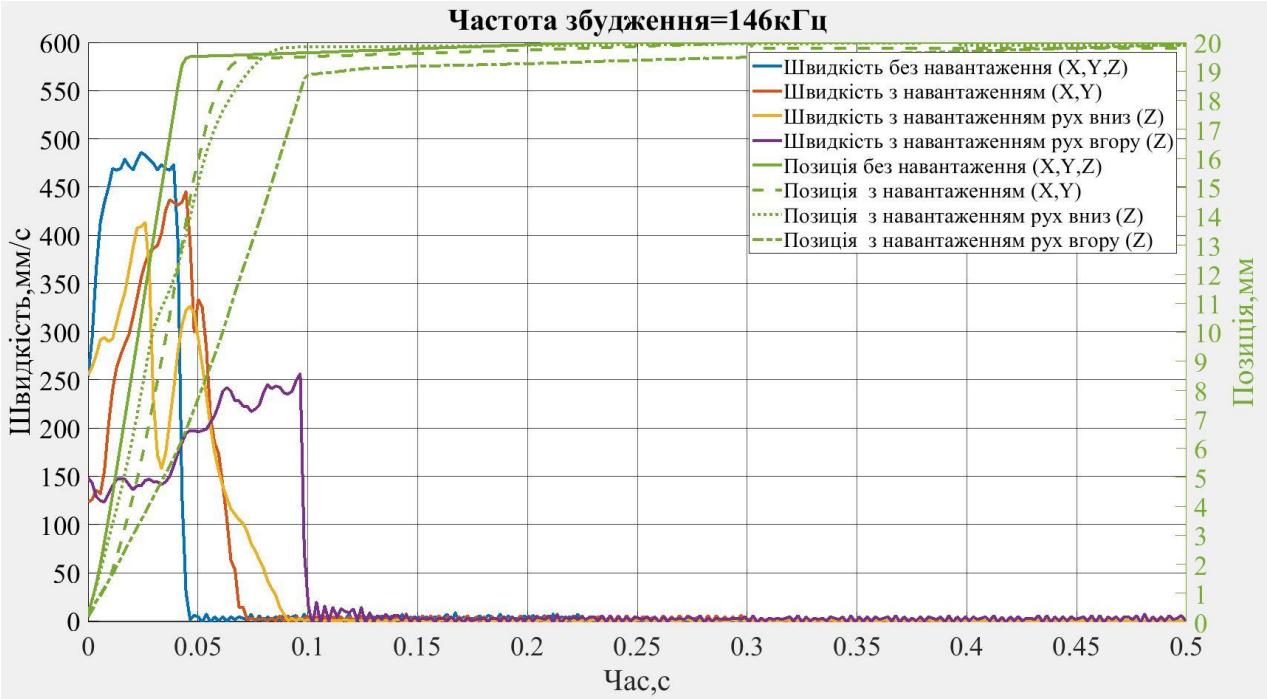


Рис.4.34 – Результати роботи методу підвищення точності позиціонування двигуна LPM-2M

При проведенні експерименту встановлювалася точка позиціонування рівна 20мм, однак в залежності від навантаження, напрямок руху двигуна та позиціонування його у просторі встановлювалися різні значення дистанції сповільнення, протягом якої двигун працював у кроковому режимі. Частота кроків була фіксованою і становила 300 Гц. Час, який витрачався на досягнення точки позиціонування відрізнявся в залежності від встановленої дистанції сповільнення.

При русі в горизонтальній площині без навантаження та з навантаженням крок визначався 30 періодами збудження.

При русі в вертикальній площині з навантаженням вгору крок визначався 70 періодами збудження, при русі в вертикальній площині з навантаженням вниз - 5 періодами збудження.

Досягнуто рівень точності позиціонування декілька імпульсів енкодера (5-10мкм). Для зменшення часу сповільнення необхідно адаптивно змінювати крок руху двигуна в залежності від швидкості уповільнення.

4.6. Оціночні характеристики двигуна

Для оцінки ефективності роботи розроблених методів роботи маніпулятора /двигуна проведено дослідження базових характеристик двигуна.

4.6.1. Стабільність швидкості руху

На рис.4.35 представлено залежності миттєвої швидкості двигун від його позиції при різних частотах збудження. Представлені характеристики дозволяють оцінити наступні параметри двигуна:

1.Характер та величину відхилення миттєвої швидкості двигуна від середнього значення.

2.Якість поверхні направляючої, з якою контактує штовхач (“зуб”) п’єзоелемента та якість направляючої в цілому.

3.Ефективність роботи штовхача (“зубу”) при різних частотах збудження.

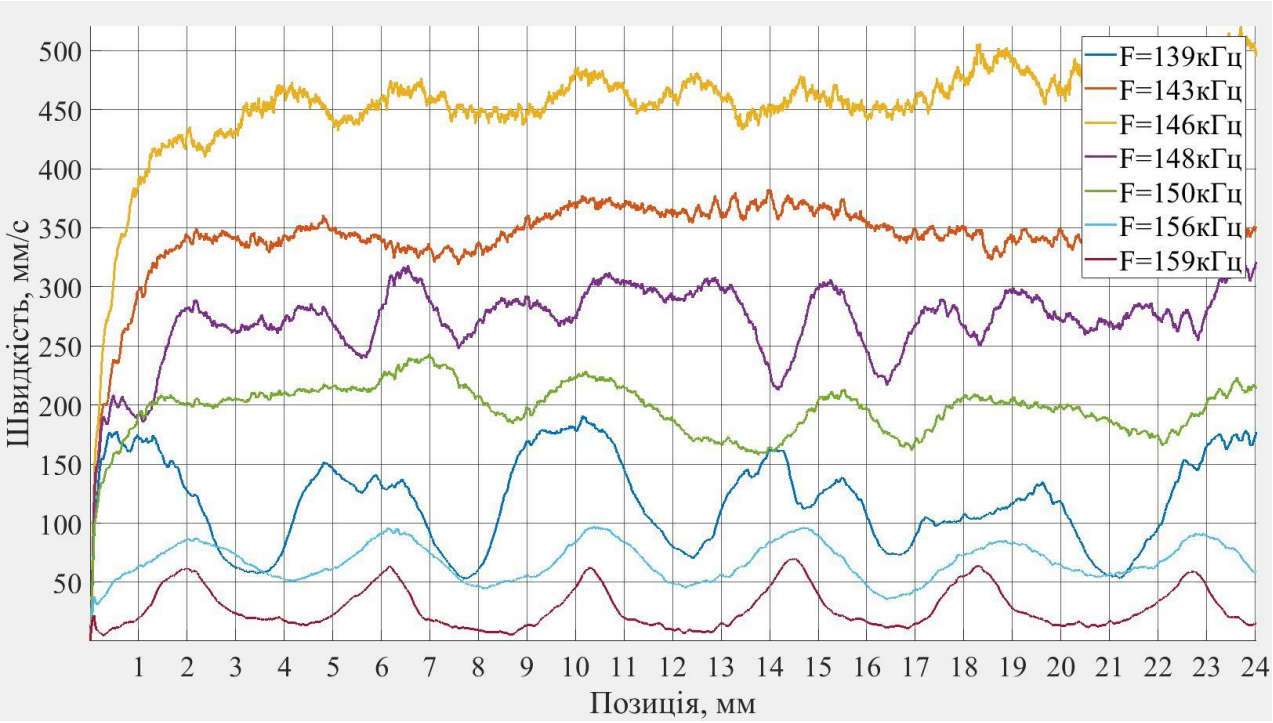


Рис.4.35 – Швидкість двигуна в залежності від його позиції при різних частотах збудження

4.6.2. Девіація швидкості двигуна

На рис.4.36 представлено графік залежностей середньої швидкості на всій дистанції направляючої, девіації цієї швидкості в залежності від частоти збудження, а також резонансної характеристики двигуна.

Аналізуючи дані характеристики можна зробити декілька висновків:

1.Максимальна швидкість двигуна досягається на частоті дещо більшій від частоти резонансу.

2.Мінімальне значення девіації швидкості знаходиться в діапазоні 145.5кГц–153кГц (знаходиться на правій гілці частотної характеристики).

3.Незважаючи на те, що в діапазоні частот 141 кГц–144.4 кГц девіація має також мінімальне значення, в даному діапазоні частот значення фрикційного контакту є суттєво меншим в порівнянні з діапазоном на правій гілці характеристики. Даний вивід підтверджує навантажувальна характеристика двигуна в даному діапазоні частот (рис.4.32).

4.В високочастотній області резонансної характеристики (153 кГц–160 кГц) двигун прагне зупинитися. Цим підтверджується підвищена флуктуація швидкості руху.

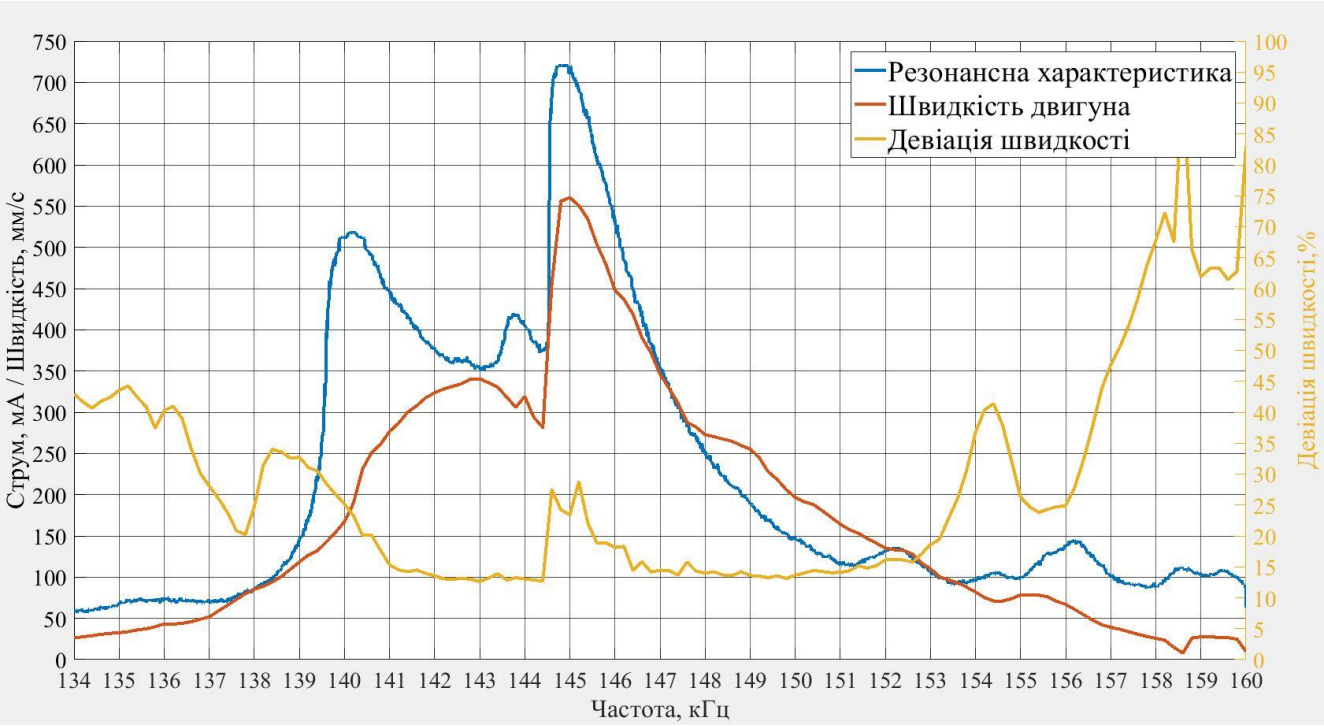


Рис.4.36 – Девіація швидкості двигуна

4.6.3. Моди резонатора та резонансні характеристики

На рис.4.37 представлено перша повздовжня мода по ширині резонатора (мода 1) та друга мода по довжині резонатора (мода 2), а також результуючі резонансні характеристики двигуна (при русі вліво та вправо).

Згідно теорії, яка розглядалася в першому розділі, частота резонансу по ширині резонатора повинна бути на ~2% вищою від частоти резонансу по довжині. Як видно з графіку, зсув фаз становить трішки менше рекомендованого значення та результуючі характеристики (рух вліво та вправо) не розміщуються між частота двох мод, на що вказує теорія з розділу 1. З цього можна зробити висновок, що необхідно збільшити зміщення між модами та знову перевірити розміщення результуючих характеристик або погодитися з тим, що п’єзоелектричний резонатор – це багатогранна та складна система, яку далі потрібно продовжувати вивчати та описувати більш складними залежностями.

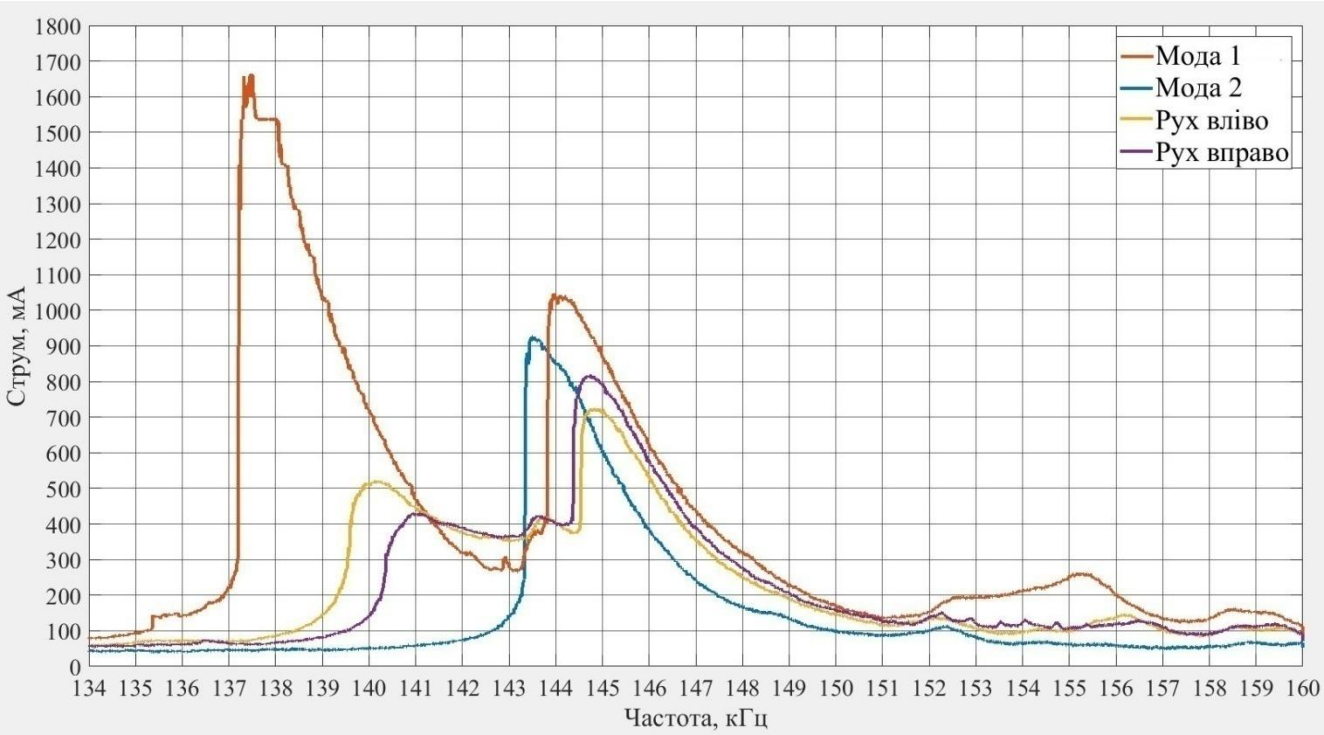


Рис.4.37 – Моди резонатора та резонансні характеристики

4.7. Стенд для дослідження представлених характеристик

Для дослідження параметрів п’єзоелектричних двигунів, а також їх кількісної оцінки проводилися експериментальні вимірювання, в яких використовувався стандартний драйвер керування п’єзоелектричним двигуном фірми DTI (рис.4.15). Додатково встановлювалася плата розширення, за допомогою якої в’являлася можливість під’єднувати датчик швидкості/позиції – енкодер. Дана система використовувалася при дослідженні шумових ефектів (структурна схема стенду представлена на рис.4.18). При вимірюванні різних характеристик двигуна змінювалося зазвичай лише програмне забезпечення.

При створенні мікроманіпулятора, розроблено прототип лінійного п’єзоелектричного двигуна (рис.4.38). Основні експериментальні характеристики даного двигуна представлено в роботі.

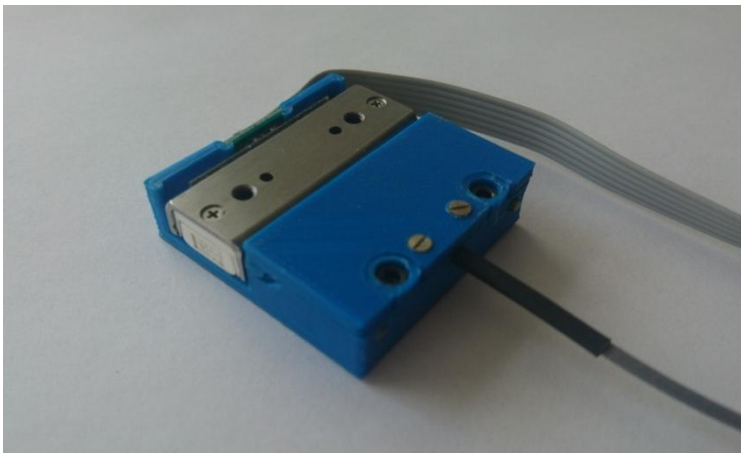


Рис.4.38 – Лінійний п’єзоелектричний двигун на базі направляючої BSP-1540SL

Цей двигун обладнаний оптичним енкодером з роздільною здатністю 2.6 мкм.

Однак для дослідження параметрів, значення яких є меншими роздільної здатності енкодера (наприклад, величина кроку двигуна) використовувався двигун LPM-2M (рис.4.39), який містить аналогічний резонатор (однаковий розмір та матеріал) попередньому двигуну, тому було коректно порівнювати отримані результати, при умові невеликої різниці частот резонансу.

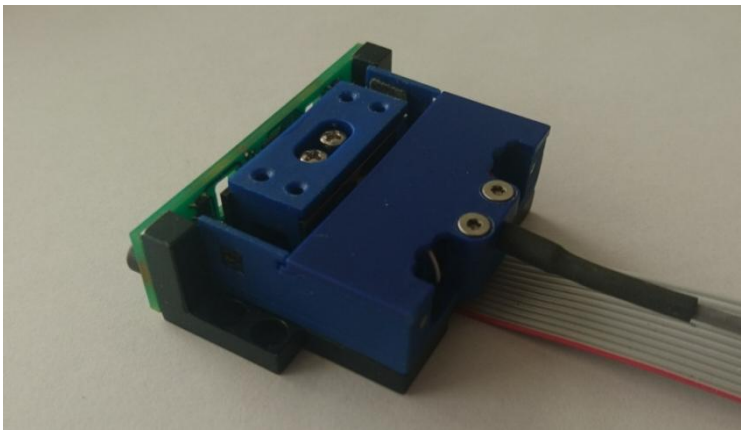


Рис.4.39 – Лінійний п’єзоелектричний двигун LPM-2M

Даний двигун встановлений на алюмінієву пластину, до якої також прикріплений оптичний енкодер з роздільною здатністю 50нм. Результати вимірювання представлено на рис.4.20, рис.4.24, рис.4.30, рис.4.31, рис.4.32, та рис.4.33.

При дослідженні навантажувальних характеристик використовувалося навантаження масою 50 г.

4.8. Система керування п’єзоелектричним мікроманіпулятором

Структурна схема мікроманіпуляційної системи представлена на рис.4.40.

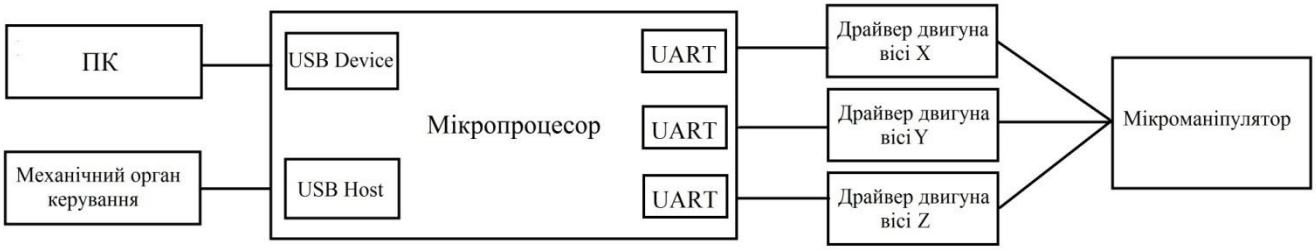


Рис.4.40 – Структурна схема мікроманіпуляційної системи

Мікроманіпуляційна схема містить такі основні компоненти:

-мікроманіпулятор, який виконує лінійні переміщення по трьох вісях X, Y та Z;

-драйвери двигунів, які перетворюють команди на переміщення робочого інструменту маніпулятора за допомогою сигналів керування, що визначаються

алгоритмами керування кожного з двигунів, які реалізовані на основі розроблених методів;

-мікропроцесор, який містить три послідовні інтерфейси передачі даних (UART), за допомогою яких здійснюється обмін інформацією з драйверами двигунів. Також мікропроцесор має USB інтерфейси (Device для зв'язку з персональним комп'ютером та Host можливості надсилати запити до органів керування);

-персональний комп'ютер, за рахунок якого реалізується керування мікроманіпулятором в автоматичному режимі, тобто маніпулятор рухається з заданою швидкістю та в задану позицію за допомогою використання датчика зворотного зв'язку – енкодера;

-механічний орган керування (джойстик, миша, трекбол) – забезпечує рух маніпулятора в ручному режимі. Мікроманіпулятор рухається в кроковому режимі. Частота слідування кроків, а відповідно і швидкість маніпулятора визначається швидкістю руху органу керування.

4.9. Прототип системи керування п'єзоелектричним мікроманіпулятором

Фото прототипу системи керування п'єзоелектричним мікроманіпулятором представлено в Додатку Г.

Представлений прототип складається з мікроманіпулятора 1, який в свою чергу складається з 3-х лінійних п'єзоелектричних двигунів, які створені на базі лінійних направляючої BSP-1540SL (рис.4.38). Сигнали керування для кожного з двигуна здійснює драйвер 2, який містить в своєму складі силовий каскад для підсилення сигналів керування та мікропроцесор, в якому реалізовані алгоритми керування двигуна, що створені на основі запропонованих вдосконалених методів.

Мікроманіпулятор може працювати в автоматичному та ручному режимі.

Для керування маніпулятором в автоматичному режимі використовується персональний комп'ютер (в даному випадку Raspberry Pi 3B+) 3, який з'єднано з

драйверами двигунів через проміжний мікропроцесор (в даному випадку налагоджувальну плату STM32F429 Discovery) 4, що має інтерфейс USB Device. Для керування, користувач створює виконавчу програму для керування маніпулятором, яку послідовно надсилає на виконання кожному драйверу та очікує відповідь про її виконання.

Для керування маніпулятором в ручному режимі використовується механічний орган керування (в даному випадку трекбол) 5, який з'єднано з проміжним мікропроцесор через інтерфейс USB Host. Система працює наступним чином: кожен 5мс мікропроцесор надсилає запит до органу керування (трекболу), на який отримує дані про величину зміну позиції кулі трекболу для координати X та Y. Отримане значення знаходиться в діапазоні від -127 до 127 вказує на величину переміщення протягом періоду опитування. Знак числа визначає напрямок руху кулі трекболу. За керуванням вісі Z відповідає кільце 6, що забезпечує покроковий рух. Для швидкого руху використовуються дві клавіші 7. Отримане значення переміщення органу керування отримує кожен з драйверів. Дане значення визначає, скільки кроків здійснить двигун протягом наступних 5мс. Драйвер виконує керування двигуном таким чином, щоб кроки виконувалися рівномірно протягом відведеного часу. Вибір швидкості двигуна здійснюється шляхом налаштування розміру кроку шляхом зміни кількості імпульсів збудження в послідовності. Налаштування здійснюються за допомогою ПК (Raspberry Pi 3B+ в даному випадку).

Контроль роботи системи здійснюється за допомогою мікроскопу 8, на який встановлено відеокамеру 9. Зображення з відеокамери відображається на моніторі 10 ПК, до якого під'єднана камера, яка в свою чергу, спостерігає за робочим інструментом маніпулятора (в даному випадку голкою 11). На моніторі відображається робочий інструмент маніпулятора 11 в збільшеному вигляді. Кінчик робочого інструменту (голки) має розмір ~1 мкм. Зона видимості мікроскопу складає 500 мкм.

Висновки по розділу 4

1.На основі експериментальних досліджень характеристик двигуна встановлено, що резонансна характеристика двигуна має два резонансні піки, керування швидкістю двигуна здійснюється шляхом регулювання частоти збудження в зоні керування, яка знаходиться на правому схилі правого резонансного піка.

2.Удосконалено метод підвищення точності позиціонування п’єзоелектричного мікроманіпулятора в автоматичному режимі за рахунок уникнення перерегулювань шляхом зміни переміщення маніпулятора при безперервному русі до крокового режиму руху з подальшою зупинкою в точці позиціонування, що дало змогу підвищити точність позиціонування до рівня (5-10) мкм.

3.Запропоновано удосконалений метод керування п’єзоелектричним двигуном з прямокутним резонатором на основі ШІМ шляхом мінімізації швидкості двигуна при його старті та зупинці, що дозволило зменшити рівень шумів та вібрацій в 2-10 разів при роботі в мікродіапазоні.

4.Подальшого розвитку отримав метод керування п’єзоелектричним двигуном, який забезпечив режим керування швидкістю в нанодіапазоні за рахунок використання фіксованої кількості імпульсів збудження (до 20 в послідовності) з регулюванням частоти слідування цих послідовностей, яка формувалася механічним засобом керування мікроманіпулятором (джойстик, трекбол), що дозволило підвищити маневреність керування більше, ніж у 2 рази.

5.Розроблено систему керування мікроманіпуляційною системою на основі запропонованих методів керування лінійним п’єзоелектричним двигуном. Керування маніпуляційної системою може здійснюватися в двох режимах:

-ручного керування – в даному режимі роботи органом керування системою виступає джойстик чи трекбол, двигуни мікроманілятора працюють в кроковому режимі. З періодичністю в 5 мс система керування маніпуляційної системою здійснює опитування органу керування, отримані значення визначають, скільки

кроків здійснить кожна з осей мікроманіпулятора в наступні 5 мс і в якому напрямку.

-автоматичному – в даному режимі роботи команди на здійснення руху маніпулятора задаються персональним комп’ютером, який входить в склад мікроманіпуляційної системи. За допомогою датчика зворотного зв’язку, який встановлено на кожній з осей маніпулятора визначається положення кожної з вісей маніпулятора, а також при надходженні команди на рух в певну позицію, дозволяє встановити дистанцію, на яку потрібно перемістити каретку двигуна та його напрямок.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальну та важливу науково-практичну задачу підвищення ефективності керування п’єзоелектричним мікроманіпулятором в мікро- та нанодіапазонах швидкостей руху на базі лінійних п’єзоелектричних двигунів на стоячих акустичних хвилях з прямокутним резонатором шляхом подальшого вдосконалення існуючих методів керування п’єзоелектричним двигуном, розробки програмно-апаратних засобів для дослідження властивостей двигунів та створення системи керування мікроманіпулятором.

В результаті виконання досліджень отримано наступні нові наукові та практичні результати:

1.Проведено аналіз конструкції мікроманіпулятора, а також його базового компоненту – лінійного п’єзоелектричного двигуна. Досліджено властивості резонатора п’єзоелектричного двигуна, а також умови утворення двох взаємно-перпендикулярних механічних коливань в ньому для виникнення еліпсу руху. Це дало змогу оцінити можливості двигуна, переваги та недоліки в контексті застосування його в мікроманіпуляційній системі, а також визначити шляхи отримання покращених характеристик кінцевого пристрою. Встановлено, що основними перевагами даного типу двигунів є здатність утримувати положення без прикладання додаткової енергії та високі старт-стопні характеристики (можливість майже миттєвого старту та зупинки двигуна).

2.Проведено дослідження лінійних направляючих п’єзоелектричних двигунів, а саме кутів відхилення Pitch, Yaw та Roll від прямолінійного руху каретки двигуна (робочого інструменту маніпулятора), що дало змогу оцінити величину відхилення робочого інструменту маніпулятора в залежності від його довжини. Розроблено математичну модель переміщення робочого інструменту маніпуляційної системи під впливом кутових відхилень Pitch та Yaw, що дає можливість алгоритмічно компенсувати дані відхилення для мінімізації похибки

позиціонування мікроманіпулятора з врахуванням експериментальних даних отриманих при дослідженні направляючих двигунів.

3.За допомогою програмного комплексу Comsol Multiphysics проведено моделювання механічних коливань п’єзоелектричного резонатора двигуна, що дозволило підтвердити необхідність вибору саме правого електричного резонансного піка двигуна при його керуванні.

4.На основі експериментальних досліджень характеристик двигуна підтверджена модель механічних коливань резонатора, а саме, що резонансна характеристика двигуна має два резонансні піки і найбільш ефективним методом керування швидкістю двигуна є регулювання частоти збудження в зоні правого схилу правого резонансного піка.

5.Удосконалено метод керування п’єзоелектричним двигуном з прямокутним резонатором на основі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) шляхом мінімізації швидкості двигуна при його старті та зупинці, що дозволило зменшити рівень шумів та вібрацій в 2-10 разів при роботі в мікродіапазоні.

6.Подальшого розвитку отримав метод керування п’єзоелектричним двигуном, який забезпечив режим керування швидкістю в нанодіапазоні за рахунок використання фіксованої кількості імпульсів збудження (до 20 в послідовності) з регулюванням частоти слідування цих послідовностей, яка формувалася механічним засобом керування мікроманіпулятором (джойстик, трекбол), що дозволило підвищити маневреність керування більше, ніж у 2 рази.

7.Удосконалено метод підвищеної точності позиціонування п’єзоелектричного мікроманіпулятора в автоматичному режимі за рахунок уникнення перерегулювань шляхом зміни переміщення маніпулятора при безперервному русі до крокового режиму руху з подальшою зупинкою в точці позиціонування.

8.Розроблено алгоритмічні та програмні рішення реалізації удосконалених методів керування п’єзоелектричним мікроманіпулятором / двигуном та систему керування на їх основі, що дозволило досягти діапазон керування по швидкості 140 мм/с - 0.05 мм/с, точність позиціювання з енкодерною версією (5-10) мкм і, як

наслідок, в середньому підвищило ефективність мікроманіпуляторної системи у порівнянні з існуючими рішеннями у 2 рази.

9.Створено засоби контролю параметрів нових п’єзоелектричних двигунів, які дозволяють вимірювати характеристики п’єзоелектричного резонатора, досліджувати точність переміщень лінійних направляючих та здійснювати вимірювання вібраційних ефектів при дослідженні нових методів керування п’єзодвигуном та скоротити час їх тестування в середньому в 1.5-2 рази.

Таким чином, можна стверджувати, що поставлені задачі вирішені, а основна мета роботи досягнута.

Одержані в дисертаційній роботі результати досліджень впроваджено в системах керування мікроманіпуляторними п’єзоелектричними двигунами LPM-2M, LPM-5, LPM-1 на підприємстві ТОВ “Лілея” (м. Київ), що засвідчено відповідним Актом впровадження (див. Додаток Е).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] “Narishige,” [Online]. Available: https://products.narishige-group.com/. [Accessed: 14 09 2021].

[2] “Eppendorf,” [Online]. Available: https://www.eppendorf.com/. [Accessed: 14 09 2021].

[3] “Wpiinc,” [Online]. Available: https://www.wpiinc.com/. [Accessed: 10 06 2022].

[4] “Piezotech,” [Online]. Available: http://piezotech.com.ua/. [Accessed: 30 11 2021].

[5] С.Ф.Петренко, А.В.Омелян, “Мікроманіпулятор на базі лінійних п'єзоелектричних двигунів”, Збірник статей VII Міжнародної науково-технічної конференції “Датчики, прилади та системи - 2018” (ДПС-2018),” Черкаси – Херсон - Лазурне, вересень 2018, с.78-79.

[6] В.В.Лавриненко, “Принципы построения пьезоэлектрических моторов”, Lambert, 2015, 227с.

[7] В.В.Лавриненко, И.А.Карташев, В.С.Вишневский, “Пьезоэоектрические двигатели”, Энергия, 1980, 112с.

[8] К.М.Рабе, Ч.Г.Ан, Ж.М.Трискон, “Физика сегнетоэлектриков. Современный взгляд,” Москва: Бином, 2011, 440с.

[9] М.С.Желудев, “Основы сегнетоэлектричества,” Москва: Атом, 1973, 472с.

[10] М.С.Желудев, “Физика кристаллических диэлектриков,” Наука, 1968, 463с.

[11] В.А.Головнин, И.А.Каплунов, О.В.Малышкина, Б.Б.Педько, А.А.Мовчикова, “Физические основы, методы исследования и практическое применение пьезоматериалов,” Москва: Техносфера, 2013,272 с.

[12] А.Г.Смагин, М.И.Ярославский, “Пьезоєлектричество кварца и кварцевые резонаторы,” Москва: Энергия, 1970, 488 с.

[13] Н.Дж, “Физические свойства кристаллов,” Мир, 1965.

[14] Ю.М.Поплавко, “Физика диэлектриков,” Київ: Вища школа, 1980, 400 с.

[15] С.Жуков, “О пьезокерамике и перспективах ее применения,” Компоненты и технологии, № 1, 2001.

[16] Ф.Иона, Д Ширане, “Сегнетоэлектрические кристаллы,” Москва: Мир, 1965, 555 с.

[17] Е.Г.Смажевская, Н.Б.Фельдман, “Пьезоэлектрическая керамика,” Москва: Советское радио, 1971, 200с.

[18] Б.А.Струков, А.П.Леванюк, “Физические основы сегнетоэлектрических явлений в кристаллах,” Москва: Наука, 1995, 301 с.

[19] Г.А.Смоленский, Н.Н.Крайник, “Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики,” Наука, 1968.

[20] И.А.Глозман, “Пьезокерамические материалы в электронной технике,” Москва: Энергия, 1965, 192 с.

[21] У.Кэди, “Пьезоэлектричество и его практические применения,” Издательство иностранной литературы, 1949, 721 с.

[22] Б.Яффе, У.Кук, Г.Яффе, “Пьезоэлектрическая керамика,” Москва: Мир, 1974, 288 с.

[23] Jay Tichy, Jiri Erhart, Erwin Kittinger, Jana Privratska, “Fundamentals of Piezoelectric Sensorics,” London: Springer, 2010, 207 с.

[24] И.А.Серова, В.С.Случевский, П.Л.Стрелец, “Производство керамических пьезоэлементов,” Судпромгиз, 1952.

[25] П.О.Грибовский, “Горячее литье керамических изделий,” Госєнергоиздат, 1956.

[26] К.Окадзаки, “Технология керамических диэлектриков,” Москва: Энергия, 1976, 335 с.

[27] М.Лайнс, А.Гласс, “Сегнетоэлектрики и родственные им материалы,” Москва: Мир, 1981.

[28] Р.Я.Попильский, Ф.В.Кондрашов, “Прессование керамических порошков,” Металлургия, 1968.

[29] А.Г.Смагин, “Пьезоєлектрические резонаторі и их применение,” Издательство стандартов, 1967, 256 с.

[30] У.Мэзон, “Пьезоэлектрические кристаллы и их применение в

ультраакустике,” Москва: Издательство иностранной литературы, 1952.

[31] В.В.Малов, “Пьезорезонансные датчики,” Москва: Энергия, 1978, 248 с.

[32] ГОСТ13927-68, Материалы пьезокерамические, типы и марки, технические требования.

[33] С.Ф.Петренко, А.В.Омелян, “Спосіб керування п`єзоелектричним двигуном. Патент UA123316, 17 03 2021.

[34]И.Я.Левин, “Справочник конструктора точных приборов,” Москва: Машиностроение, 1967.

[35] Ф.Л.Литвин, “Справочник конструктора точных приборов,” Москва: Машиностроение, 1964.

[36] А.В.Бєлова, “Вимірювання параметрів мікропереміщень п'єзоелектричних мікроманіпуляційних систем для клітинних технологій”, дис. канд. наук, НТУУ “Київський політехнічний інститут”, Київ, 2008.

[37] “NIPPON BEARING,” [Online]. Available: https://www.nbcorporation.com/. [Accessed: 10 10 2020].

[38] “IKO International,” [Online]. Available: https://www.ikont.com/. [Accessed: 10 10 2020].

[39] “PM,” [Online]. Available: https://www.pm.nl/. [Accessed: 10 10 2020].

[40] “HIWIN,” [Online]. Available: https://www.hiwin.com/. [Accessed: 10 10 2020].

[41] V. Zhelyaskov, “Piezoelectric Quasi-Resonance Linear Motors Based on Acoustic Standing Wave With Combined Resonator”. Патент USA 8,710,719 B2, 2014.

[42]“Digita International Technology,” [Online]. Available: http://www.dtimotors.com/. [Accessed: 20 01 2020].

[43] S. Petrenko, “Piezoelectric linear motor,” Патент USA 9,705,425 B2, 2017.

[44] С.Ф.Петренко, А.В.Омелян, О.М.Лисенко, В.С.Антонюк, “Дослідження супутнього ударно-вібраційного шуму п’єзоелектричного двигуна в режимі мікро- та наношвидкостей,” Вісник НТУУ ”КПІ”. Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування, № 78, 2019, с.67-73.

[45] Р.Фатыхова, “Контроль оптико-механических приборов: учебное пособие,”

Москва: машиностроение, 1988.

[46] Е.В.Леун, “Устройство для измерения отклонений от прямолинейности,” Патент RU МПК 6 G01B11/26, 20 04 1998.

[47] Е.В.Леун, «Устройство для контроля отклонений от прямолинейности». Патент RU 4945624/28, 28 02 1994.

[48] А.С.Батраков, М.М.Бутусов, Г.П.Гречка, “Лазерные измерительные системы,” Москва: Радио и связь, 1981, 456 с.

[49] В.Е.Привалов, “Применение лазеров для измерения линейных и угловых перемещений: учебное пособие,” ЛИТМО, 1987.

[50] Н.Е.Конюхов, “Оптоэлектронные и контрольно-измерительные устройства,” Москва: Машиностроение, 1985.

[51] Ю.Г.Городецкий, “Конструкции, расчет и эксплуатация измерительных инструментов и приборов,” Москва: Машиностроение, 1972.

[52] Ю.В.Якушенко, “Высокоточное измерения углов,” Москва: Машиностроение, 1987.

[53] Ю.В.Коломийцев, “Оптические приборы для измерения длин и углов,” Москва: Машиностроение, 1968.

[54] Б.М.Сорочкин, “Средства для линейных измерений,” Москва: Машиностроение, 1980.

[55] “iC-Haus,” [Online]. Available: www.ichaus.de. [Accessed: 1 02 2020].

[56] “Raspberry Pi Foundation,” Online]. Available: www.raspberrypi.org. [Accessed: 1 02 2020].

[57] Р. Гонсалес, Р. Вудс., “Цифровая обработка изображений,” Москва: Техносфера, 2005, 1072 с.

[58] А.Д.Гринберг, “Цифровые изображения: практическое руководство,” Минск: Попурри, 1997, 400 с.

[59] Г.Ю.Шлихт, “Цифровая обработка цветных изображений,” Москва: ЭКОМ, 1997.

[60] С. Жуков, “Пьезоэлектрическая керамика: принципы и применение,” Мінськ: ООО "ФУАинформ", 2003.

[61] V.Y.Halchenko, S.A.Filimonov, A.V.Batrachenko, “Increase the Efficiency of the Linear Piezoelectric Motor,” Journal of Nano- and Electronic Physics, т. 10, № 4, pp. 04025-1. doi: 10.21272/jnep.10(4).04025, 2018.

[62] С.Ф.Петренко, “Пьезоэлектрический двигатель в приборостроении, Киев: Корнійчук, 2002, 96 с.

[63] А.Г.Новаковский, В.С.Антонюк, С.Ф.Петренко, “Применения пьезоэлектрических актуаторов в микроманипуляторах,” Вісник Черкаського державного технологічного університету: Серія технічних наук., № 4, pp. 5-10, 2017.

[64] В. С. Антонюк, А. В. Бєлова, С. Ф. Петренко, “Підвищення точності позиціювання лінійних направляючих мікроманіпуляційних систем з п’єзоелектричним двигуном,” Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць Харків: НТУ “ХПІ”., № 2 (17), pp. 12-20, 2008.

[65] “Piezomotor,” [Online]. Available: https://piezomotor.com.ua/. [Accessed: 18 10 2021].

[66] В.А.Коваленко “Пьезоэлектрический двигатель вращения, [Online]. Available: https://www.dissercat.com/content/pezoelektricheskii-dvigatel-vrashcheniya-kak-element-avtomaticheskikh-sistem#ixzz4zYaREaLI [Accessed: 18 10 2019].

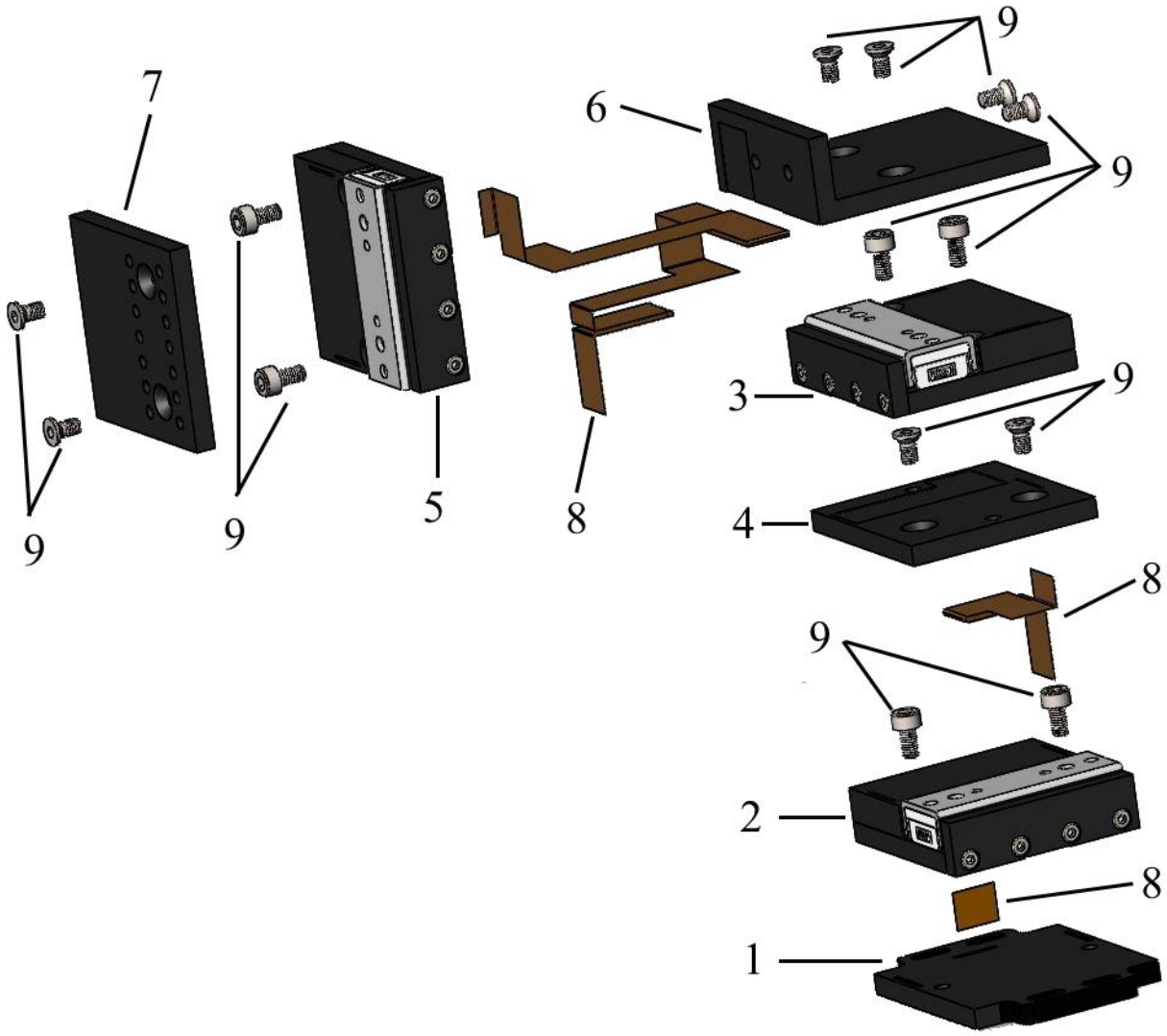
[67] Piezomotion.”[Online]. Available: https://piezomotion.com/. [Accessed: 10 02 2022].

[68] “Toshiba,”[Online].Available:toshiba.semicon-storage.com.[Accessed: 1 06 2018].

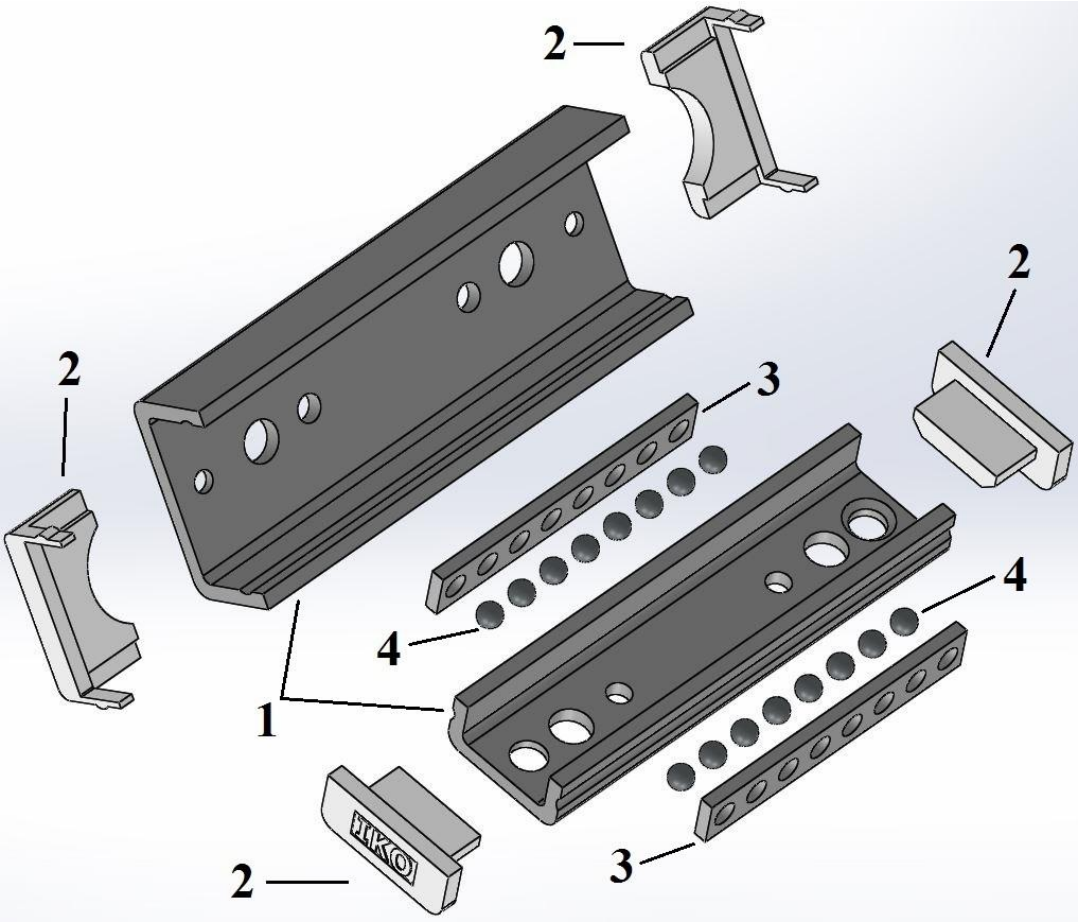
[69] Robotclass, “Ардуино: управление двигателем постоянного тока, L293D,” [Online]. Available: robotclass.ru. [Accessed: 1 06 2018].

[70] Farhek, “DC MOTOR DRIVING USING H BRIDGE,” [Online]. Available: http://farhek.com. [Accessed: 1 06 2018].

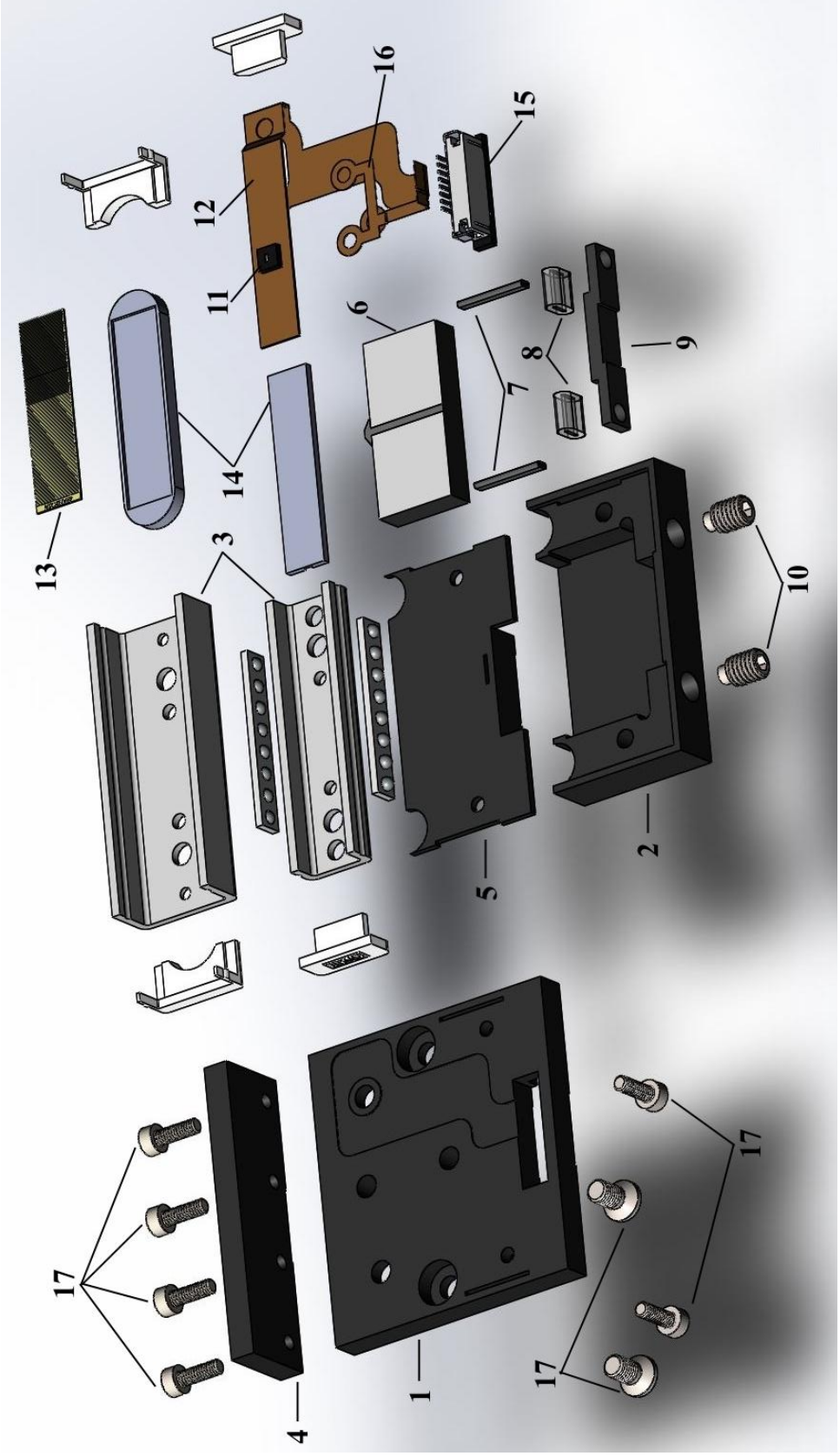
ДОДАТОК А. 3D МОДЕЛЬ МІКРОМАНІПУЛЯТОРА



ДОДАТОК Б. 3D МОДЕЛЬ ЛІНІЙНОЇ НАПРАВЛЯЮЧОЇ BSP-1540SL



ДОДАТОК В. 3D МОДЕЛЬ ЛІНІЙНОГО П’ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА



ДОДАТОК Г. ПРОТОТИП СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ П’ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИМ МІКРОМАНІПУЛЯТОРОМ

ДОДАТОК Д. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1.С.Ф.Петренко, А.В.Омелян, В.С.Антонюк, та О.Г.Новаковський, «Система керування п’єзоелектричним двигуном», *Вісник НТУУ ”КПІ”. Серія Приладобудування,* №55, с.5-10, 2018. doi:10.20535/1970.55(1).2018.135857 (фахове видання категорії Б).

2.С.Ф.Петренко, А.В.Омелян, В.С.Антонюк, та О.Г.Новаковський, «Порівняння принципів керування п’єзоелектричним двигуном та двигуном постійного струму», *Журнал нано- та електронної фізики*, т.10, №5, с.05032-1 - 05032-4, 2018. doi:10.21272/jnep.10(5).05032 (фахове видання категорії А).

3.С.Ф.Петренко, А.В.Омелян, О.О.Горбатюк, та В.С.Антонюк, «Дослідження ресурсних характеристик п’єзоелектричного двигуна залежно від ресурсного стану», *Наукові вісті КПІ*, №1, с.59-66, 2019. doi: 10.20535/kpi-sn.2019.1.157272 (фахове видання категорії Б).

4.С.Ф.Петренко, А.В.Омелян, О.М.Лисенко, та В.С.Антонюк, «Дослідження супутнього ударно-вібраційного шуму п’єзоелектричного двигуна в режимі мікро- та наношвидкостей», *Вісник НТУУ ”КПІ”. Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування*, №78, с.67-73, 2019. doi: 10.20535/RADAP.2019.78.67-73(фахове видання категорії А).

5.А.В.Омелян, О.М.Лисенко, та С.Ф.Петренко, «Система контролю кутової стабільності лінійного п’єзоелектричного двигуна», *Мікросистеми, Електроніка та Акустика: науково-технічний журнал*, т.24, №6(113), с.22-28, 2019. doi: 10.20535/2523-4455.2019.24.6.196684 (фахове видання категорії Б).

6.С.Ф.Петренко, та А.В.Омелян, «Спосіб керування п’єзоелектричним двигуном»,UA123316, 17.03.2021 (патент на винахід).

7.А.В.Омелян, «Стенд для аналіза вібраційно-шумових характеристик п’єзоелектричних двигунів», на *XI Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених «Електроніка-2018» (ELCONF-2018)*, Київ,2018, с.206-209 (матеріали конференції).

8.А.В.Омелян, С.Ф.Петренко, та О.Г.Новаковський, «Стенд для дослідження резонансних характеристик осциляторів п’єзоелектричних двигунів», на *VII Міжнародній науково-технічній конференції “Датчики, прилади та системи - 2018” (ДПС-2018),* м.Черкаси, 17-21 вересня 2018, с.22-24 (матеріали конференції).

9.А.В.Омелян, та С.Ф.Петренко, «Мікроманіпулятор на базі лінійних п’єзоелектричних двигунів», на *VII Міжнародній науково-технічній конференції “Датчики, прилади та системи - 2018” (ДПС-2018),* м.Черкаси, 17-21 вересня 2018, с.78-79 (матеріали конференції).

10.А.В.Омелян, С.Ф.Петренко, О.Г.Новаковский та В.С.Антонюк, «Исследования резонансные характеристик осциллятора пьезоэлектрических двигателей», на *11-й Международной научно-технической конференции “Приборостроение – 2018”*, г.Минск, 14-16 ноября 2018, ст.145-147 (матеріали конференції).

11.А.В.Омелян, та С.Ф.Петренко, «Алгоритмічні рішення керування п’єзоелектричним двигуном в режимі мікро- та наношвидкостей», на *VIII Міжнародній науково-технічній конференції “Датчики, прилади та системи-2019”*, Черкаси – Херсон – Лазурне, вересень 2019, с.39-41 (матеріали конференції).

12. А.В.Омелян, «Керування швидкістю п’єзоелектричного двигуна в мікро- та нанодіапазонах», на *XVIII Міжнародній науково-технічній конференції “Приладобудування: стан і перспективи”*, м.Київ, 15-16 травня 2019, с.92-93 (матеріали конференції).

ДОДАТОК Е. АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

У К Р А Ї Н А

МАЛЕ НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ ПІДПРИЄМСТВО ТОВ„ЛІЛЕЯ”

Київ-02002, вул. Андрія Шептицького 3Г. Тел./Факс **(380-44) 502-13-76**
E-mail: **tyl1@naverex.kiev.ua**

Вих.лист № 2
від 23.09.2022 р.

АКТ

ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

«Методи та система підвищеної ефективності керування п’єзоелектричним мікроманіпулятором »

Аспіранта кафедри КЕОА, ФЕЛ, КПІ імені Ігоря Сікорського,

Омеляна Анатолія Васильовича

Цим підтверджую, що результати дисертації аспіранта Омеляна Анатолія Васильовича впроваджені в системах керування мікроманіпуляторних п’єзоелектричних двигунів LPM-2M, LPM-5, LPM-1, а саме:

- Driver Rev.J, Rev.H – програмне забезпечення, за рахунок якого в системі керування мікроманіпулятором досягнуто діапазон керування по швидкості 140мм/с-0.05мм/с, точність позиціювання з енкодерною версією 5-10мкм., що в середньому підвищило ефективність мікроманіпуляторної системи по цим параметрам у 2 рази;
- Метод контролю параметрів п’єзоелектричного двигуна, а саме резонансної характеристики осцилятора, що дозволило скоротити час тестування резонаторів в середньому в 1.5-2 рази;

- Метод керування швидкістю (патент UA123316) з компенсацією вібраційно-шумових характеристик двигуна при роботі мікроманіпулятора в мікро- та нанодіапазонах, що дозволило зменшити амплітуду шуму в 2.5 рази;
- Метод динамічного контролю лінійних параметрів направляючих мікроманіпулятора (кутів Pitch, Yaw, Roll) на основі комп'ютеризованої обробки оптичного зображення реперної мітки автоколіматора, що дозволило прискорити загальний процес контролю більше, ніж у 3 рази.

Директора
ТОВ «Лілея»,
д.т.н. Петренко С.Ф.