

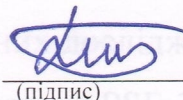
**Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова**

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматики
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри


(підпис)

І. С. Білюк

« 15 » 12 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код та назва спеціальності)

освітня програма Електромеханічні системи автоматизації та електропривод
(назва освітньої програми)

на тему: «Розробка системи керування прецизійного робота
маніпулятора»

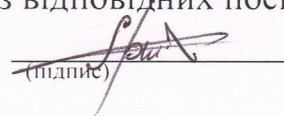
Виконав: студент групи 6371м
Архипенко Сергій Анатолійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник доц. каф. автоматики, к.т.н.,
доц. Надточій А.В.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Рецензент доц. каф. СЕЕС, к.т.н.,
доц. Ставинський Р.А.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Засвідчую, що у цій кваліфікаційній
роботі немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент


(підпис)

м. Миколаїв – 2025 року

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 100с., 5 розд., 6 табл., 42 рис., 1 дод., 15 джерел.

Ключові слова: мікроманіпулятор, п'єзоелектричний привод, двигун, передаточна функція, принципова схема, структурна схема, функціональна схема, стійкість системи.

Об'єкт дослідження – процеси, які протікають в п'єзоелектричному приводі.

Мета роботи – на основі існуючих теоретичних досліджень провести синтез системи керування п'єзоприводом мікроманіпулятора PSF-3.

Перший розділ присвячений аналізу основних технічних характеристик п'єзоелектричних приводів. У другому розділі здійснено розрахунок та вибір елементів електропривода. У третьому розділі наведено розрахунок системи керування п'єзоелектричним приводом мікроманіпулятора.

У четвертому та п'ятому розділах розглянути питання з охорони праці та довкілля.

Додатки містять слайди мультимедійної презентації.

ABSTRACT

Qualification work: 100p., 5 chapters, 6 tables, 42 figures, 1 appendix, 15 sources.

Keywords: micromanipulator, piezoelectric drive, motor, transfer function, block diagram, structural diagram, functional diagram, system stability.

The object of study is the processes occurring in a piezoelectric drive.

The aim of the work is to synthesise a control system for the PSF-3 micromanipulator piezo drive based on existing theoretical research.

The first section is devoted to the analysis of the main technical characteristics of piezoelectric drives. In the second section, the calculation and selection of electric drive elements are carried out. The third section presents the calculation of the control system for the piezoelectric drive of the micromanipulator.

The fourth and fifth sections deal with occupational health and safety and the environment.

The appendices contain slides of a multimedia presentation.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 КОНСТРУКЦІЙНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА ОСНОВНІ ВУЗЛИ	
П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ПРИВОДІВ.....	8
1.1 Стан питання.....	8
1.2 П'єзоелектричні приводи і перетворювальні елементи.....	10
1.3 П'єзоелектричні приводи мехатронних модулів.....	11
1.4 Механізм роботи п'єзоелектричного двигуна.....	18
1.5 Постановка задачі.....	29
РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ П'ЄЗОПЕРЕТВОРЮВАЧА.....	30
2.1 Розрахунок параметрів п'єзоелемента.....	30
2.2 Розрахунок параметрів осцилятора.....	34
2.3 Розрахунок параметрів штовхачів.....	42
2.4 Розрахунок параметрів ротора.....	44
2.5. Технічні характеристики спроектованого п'єзоелектричного двигуна.....	48
РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	56
3.1 Розробка принципової схеми системи керування	56
3.2 Дослідження стійкості системи керування	62
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ	80
4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів	80
4.2 Розрахунок захисного заземлення.....	86
4.3 Заходи з техніки безпеки	88
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....	92
5.1 Забруднення навколишнього середовища	93
5.2 Розрахунок виділень (викидів) забруднюючих речовин	94
5.3 Основні заходи захисту атмосфери.....	94
ВИСНОВКИ.....	98
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	99
Додаток А.....	101

ВСТУП

Актуальність проблеми. П'єзокерамічні елементи знайшли широке застосування у системах мікропереміщень (СМП) мініатюрних об'єктів, які використовуються в приладобудуванні протягом багатьох десятиліть і пов'язані в основному з оптико-механічними приладами і годинниковими механізмами [1-7]. Колосальний стрибок в кінці 20 і початку 21 століть в розвитку технологій, що відносяться до виробництва комп'ютерної техніки, дозволив створити принципово нові пристрої мікросистемної техніки.

Якщо в 60-80 роках минулого століття електронні компоненти були вже створені і шляхи подальшої мініатюризації були вже чітко визначені, то перспективи мініатюризації електромеханічних систем були туманні. Як найкращими досягненнями в цій області були переносні засоби протиповітряної оборони типу «Ігла» і «Стінгер», мініатюрні годинникові механізми, механізми мініфотоапаратів і магнітофонів для спецслужб, а також мініатюрні електромагнітні реле (наприклад, поляризоване реле РЕС 45 об'ємом 250 мм³). Проте якісного стрибка в зменшенні розмірів механічних пристроїв при тому рівні традиційного машинобудування і приладобудування не могло відбутися – механіка підходила до своєї «фізичної» межі. Робототехнічні комплекси, що включали у собі СМП для автоматичної збірки мініатюрних виробів, були ненадійні, громіздкі, вимагали постійної присутності операторів і налагоджувальників. До 70 – 80 років 20 століття виникла явна суперечність між високорозвинутим виробництвом електронної техніки і відсталим виробництвом мініатюрних електромеханічних систем, яке гальмувалося традиційними технологіями точного машинобудування і приладобудування і низьким рівнем автоматичного управління. Збільшені вимоги військової і космічної техніки, медицини, моніторингу навколишнього середовища і безпеки атомних електростанцій дали поштовх до розвитку мініатюрних і мікроелектромеханічних систем (МЕМС). Тут потрібно уточнити, що розуміється під термінами «мініатюрні» і «мікро-». До

мініатюрних електромеханічних систем умовно можна віднести пристрої, розміри яких лежать в межах від 10x10x10 мм до 50x50x50 мм, все, що має менші габарити можна віднести до мікросистем, СМП включають пристрої, що забезпечують рух вихідної ланки на відстань до міліметра з мінімальним кроком до десятих долей мікрометра. Крім того, MEMS можуть бути елементами СМП, зокрема робочими органами.

Мета і завдання дослідження. На основі існуючих теоретичних досліджень провести синтез системи керування п'єзоприводом мікроманіпулятора PSF-3.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Провести конструктивний аналіз основних вузлів п'єзоелектричних приводів.
2. Провести розрахунок параметрів п'єзоперетворювача.
3. Розрахувати систему керування п'єзоелектричного привода мікроманіпулятора PSF-3.

Об'єкт дослідження — процеси, які протікають в п'єзоелектричному приводі.

Предмет дослідження — показники якості, що забезпечують швидкодію та плавність протікання перехідних процесів.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Виявлені закономірності, що зв'язують параметри п'єзо електропривода зі ступенем його.
2. Подальший розвиток отримав алгоритм розрахунку параметрів п'єзоелектричного привода.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Система керування п'єзоелектричного привода мікроманіпулятора PSF-3..
2. Схеми моделювання параметрів п'єзоелектричного привода.

Апробація результатів роботи. Основні результати магістерської роботи доповідалися та обговорювалися на XVI Міжнародній науково технічній

конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (м. Миколаїв, 2025 р).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано наукову тезу у збірнику матеріалів міжнародній науково-технічній конференції Національного університету кораблебудування: «Корекція системи керування з використанням перемикаючих сигналів» (2025р.).

Структура та обсяг магістерської роботи. Магістерська робота складається з вступу, 5 розділів, загальних висновків та списку використаних джерел. Робота викладена на 100 сторінках і містить 6 таблиць та 42 рисунків.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Стан питання

Величезні фінансові вкладення у виробництво мікроелектронної техніки і зокрема у виробництво великих інтегральних схем на базі кремнію дозволили знайти перспективний шлях і для мікромеханічних пристроїв і систем. Поверхнева і об'ємна мікрообробка напівпровідникових матеріалів, заснована на методах фото- і рентгенолітографії (LIGA-технологія), дозволяє створити мікрооб'єкти практично будь-якої форми з розмірами до одиниць мікрометрів. Ці технології, що дають можливість точного керування глибиною тругнення, формуванням бічних стінок і каналів усередині масиву напівпровідникового матеріалу, дозволяють проводити об'ємні механічні структури, які мають відносно висока міцність і жорсткість, необхідні для передачі зусиль і крутних моментів, в мікромеханічних передачах.

Таким чином, основою розвитку MEMS є мікроелектронна технологія [1-7], яка застосовується практично у всіх виробках на основі кремнію. Надмініатюризація електромеханічних систем за рахунок інтегруючого ефекту при поєднанні в єдиному об'ємі пристрою, як приводних елементів, так і елементів, що керують, є наочним прикладом ефективності принципів мехатроніки. Цьому сприяє загальна технологія виготовлення електронних компонентів і механічних деталей.

Починаючи з останнього десятиліття 20 століття, відбувається стрімке зростання числа експериментальних і впроваджуваних проєктів, об'єднаних єдиним технологічним підходом до виготовлення всіх компонентів мікросистемної техніки, – приводів з передачею механічної енергії до робочого органу (вихідній ланці системи), сенсорній, такій, що керує і обчислювальній. Важливим результатом такого комплексного підходу до розробок є те, що в

порівняно малому об'ємі знаходяться більшість елементів автоматизованої системи. Стає прогнозованим наступний логічний крок в розвитку СМП; перехід до біонічних по суті структур, що мають загальні ознаки з біологічними об'єктами. Як відомо, найбільш розвинені живі організми мають ієрархічну структуру керування рухом окремих частин тіла: центральну і периферичну нервові системи. Причому периферична нервова система забезпечує керування на рівні елементарних рухів, центральна нервова система здійснює цільове керування, вносячи корективи до руху виходячи з інформації, отриманої від органів чуття (сенсорів). Побудовані по цій аналогії з біологічними організмами мехатронні СМП матимуть якості живих організмів, що пройшли еволюцію і природний відбір протягом мільйонів років.

Враховуючи вище сказане, потрібно підкреслити, що створення СМП ґрунтується не тільки на технологіях виробництва електронних компонентів, але і на традиційних технологіях точного машинобудування і приладобудування. Модулі грубих переміщень цих систем, а також відносно великогабаритні механічні елементи економічно вигідніше виготовляти традиційними технологіями.

Аналізуючи патентні і літературні джерела, можна визначити основні перспективні напрями розвитку СМП. По своєму призначенню і функціональним можливостям ці системи можна розділити на мікроманіпуляційні системи (ММС), автономні мікророботи (АМР) і приладові СМП.

ММС – це автоматизовані електромеханічні системи, призначені для здійснення технологічних операцій або для переміщення (маніпулювання) міні-і мікрооб'єктів. До них відносяться ММС для механічної збірки мікромеханічних пристроїв. Такі системи, аналогічні по своїх функціях і особливостях роботи складальним роботам-маніпуляторам точного машинобудування, відрізняються вищою точністю позиціонування і меншими ходами. Залежно від об'єктів збірки хід робочого органу може варіюватися в межах 0,2 мм до 5 мм, а точність позиціонування (або ступінь дозволу) від 0,5

мкм до 0,05 мм. ММС для технологічних операцій призначені для мікрозварки, паяння, склеювання мікрооб'єктів, а також для операцій контролю і тестування параметрів мікропристроїв (наприклад, вимірювання опору електричних мікроланцюгів). Їх характеристики аналогічні попередньому випадку, специфіка їх полягає в тому, що робочий орган повинен чинити на об'єкт певний і контрольований силовий тиск в межах від 10^{-3} Н до 0,1 Н.

В даний час набули широкого поширення ММС, які призначені для біологічних технологій і досліджень. Операції штучного запліднення яйцеклітини стали можливими, починаючи з дев'яностих років минулого століття, завдяки застосуванню таких ММС. У цитології для дослідження електричних потенціалів клітинних мембран застосовують ММС з вищим дозволом, ніж у попередньому випадку (ступінь дозволу близько 0,05 мкм).

1.2 П'єзоелектричні приводи і перетворювальні елементи

Залежно від швидкодії, ходів і точності відробітку рухів робочих органів ММС, а також вихідних ланок приладових СМП, застосовують різні електромеханічні перетворювачі, що є приводними елементами систем [4-7]. Для СМП характерні наступні типи елементів, що перетворюють енергію електромагнітного поля в механічну енергію. Їх можна розділити на дві групи:

- приводи безпосереднього перетворення електричної енергії в механічну;
- приводи багатоступінчатого перетворення електричної енергії в механічну: спочатку в теплову або іншу, наприклад, хвильову енергію (або механічних хвиль, або електромагнітних хвиль, зокрема хвиль оптичного діапазону), а потім в механічну енергію однонаправленого руху вихідної ланки СМП. Приводи безпосереднього перетворення енергії досить широко застосовують в мікротехнічних системах, до них відносяться наступні (вони розташовані по зростаючому значенню швидкодії).

1. Міні- і мікроелектродвигуни постійного струму і крокові оберտального і лінійного типів.

2. Електромагнітні приводи.
3. Магнітострикційні приводи.
4. П'єзоелектричні і електрострикційні приводи.
5. Електростатичні приводи.
6. Електроосмотичні приводи.
7. Електрогідродинамічні приводи.

Як правило, ці приводи мають високу швидкодію. Якнайгірша швидкодія у систем, що перетворюють енергію електромагнітного поля в механічну енергію (постійна часу $\tau = 10 - 50$ мс). Це пов'язано з проявом інерційності індуктивною складовою перетворювача і щодо великої маси ротора. Магнітострикційні перетворювачі мають кращі показники швидкодії, проте вони потребують живлення відносно великими струмами (1 – 5 А), що приводять до омичного нагріву мікросистеми, що в більшості випадків небажано. П'єзоелектричні і електрострикційні перетворювачі мають кращу швидкодію; $\tau = 1 - 20$ мс. У цих пристроях на швидкодію робить вплив відносно велика електрична місткість сполучених паралельно п'єзо- або електрострикційних елементів. Електричні струми в них на один-два порядки нижче, ніж у електромагнітних приводів, тому теплові деформації в них незначні. По своїх силових характеристиках вони випереджають решту всіх типів приводів. Їх істотним недоліком є наявність гістерезису залежності напруга – переміщення. Зусилля, викликане стовпчиком, що складається з дисків п'єзоелектрика, може бути вельми великим, але хід при цьому малий. Наприклад, тиск близько 35 МПа при прикладеній напрузі в 150 В було отримано набором 64-х тонких п'єзокерамічних дисків з розміром 1,4x3x9 мм. Цей стовпчик має час спрацьовування близько 0,1 мс і максимальний хід близько 0,8 мкм.

1.3 П'єзоелектричні приводи мехатронних модулів

Як приводи мікропереміщень в основному використовують три типи

перетворювачів:

- багатошарові пакети, які набрані з п'єзокерамічних шайб або дисків, що працюють на розтягування-стиснення;
- трубчасті п'єзоперетворювачі; вони можуть працювати як на розтягування-стиснення, так і на вигин;
- біморфні п'єзоперетворювачі, що складаються із склеєних п'єзокерамічних пластин, між якими може знаходитися металева ресора, вони працюють на вигин.

Перший тип п'єзоперетворювачів має високі силові характеристики, які обмежуються в основному міцністю п'єзокераміки. Такі приводи мають високу жорсткість, відповідну жорсткості стрижня при стисканні.

Другий тип п'єзоперетворювачів є відрізок тонкостінної циліндрової або конічної п'єзокерамічної трубки, електроди якої розташовані на концентричних поверхнях. Ці трубчасті п'єзоперетворювачі відрізняються простотою і малою вартістю. Проте при однакових подовжніх розмірах з багатошаровими п'єзоперетворювачами їх переміщення на порядок менше. Жорсткість таких перетворювачів також нижче, ніж у багатошарових.

Третій тип п'єзопроводів характеризується переміщеннями, які на 1-2 порядки вище за переміщення, що розвиваються приводами першого і другого типів, проте, жорсткість і силові характеристики їх на 2-3 порядки гірше, ніж у першого типу. Таким чином, якщо необхідно створити пристрій мікропереміщень, що має малі габарити і що не вимагає високих силових характеристик, то вибір можна зупинити на біморфних п'єзоперетворювачах.

П'єзоелектричні приводи мікропереміщень (ППМ) мають ряд безсуперечних переваг перед іншими приводами. Це високі питомі силові характеристики, малі значення електричних струмів і втрат, висока надійність і технологічність виготовлення, радіаційна і температурна стійкість. До недоліків ППМ можна віднести порівняно високу напругу, що подається на електроди, прояв гістерезису, нестабільність п'єзоелектричних параметрів, вплив зміни вологості на електричні параметри. Шляхи подолання цих недоліків наступні:

- вибір відповідних п'єзоактивних матеріалів;
- зменшення товщини п'єзоелектричних шарів;
- введення зворотних зв'язків по положенню вихідної ланки;
- програмні методи керування;
- застосування технологій виробництва інтегральних схем.

Зменшення впливу гістерезису на роботу п'єзоелектричного мехатронного ММ може бути досягнуте за рахунок застосування певних видів п'єзокерамічних матеріалів. Різні огляди показують, що для багатьох типів п'єзокераміки в основному петля гістерезису функції переміщення – електрична напруга, що прикладається, має коефіцієнт гістерезису h близько 10-12%, що явно погано для точних приводів мікропереміщень. Останнім часом з'явилися нові матеріали, що мають низькі значення коефіцієнта гістерезису – від 2% до 5% при кімнатній температурі. До них відноситься, наприклад, п'єзокераміка «PIEZOTITE» типу P-5E і P-7 японської компанії MURATA (рис. 1.1, 1.2).

Для подальшого розрахунку п'єзокерамічного двигуна обираю складений п'єзопривод. Вітчизняна промисловість випускає п'єзоприводи широкої номенклатури. АТ «ЕЛПА» проводить п'єзопакети, набрані і склеєні з п'єзокерамічних шайб завтовшки 0,6 мм.

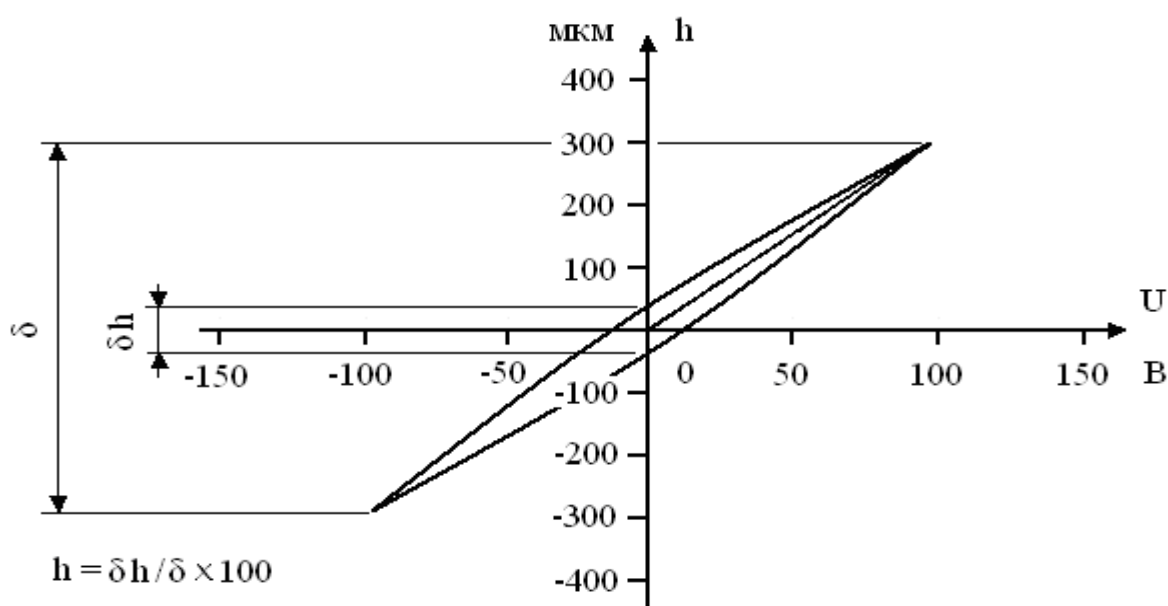


Рисунок 1.1– Петля гістерезисна для п'єзокераміки P-7

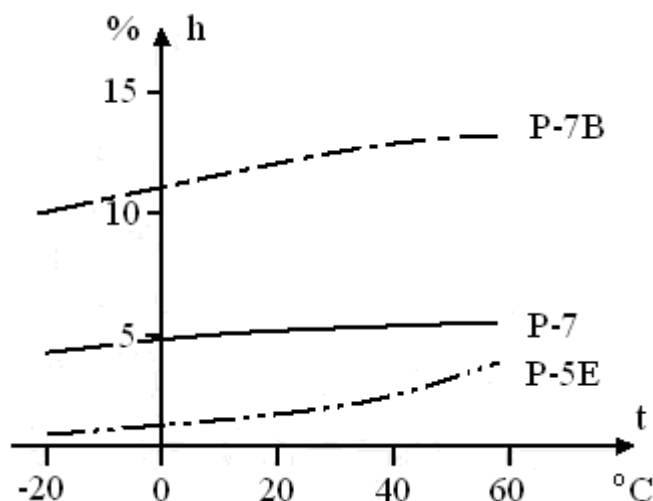


Рисунок 1.2—Залежність коефіцієнту гістерезисна від температури для п'єзокераміки «PIEZOTITE »

З цих п'єзопакетов збираються складені п'єзоприводи (СПП), які стягуються гвинтом. П'єзоприводи ППУ-1, ППУ-2, ППУ-5, ППУ-6, ППУ-8 стягнуті шпилькою; п'єзоприводи ППУ-3, ППУ-4, стягнуті зовнішнім корпусом (прорізною пружиною). Сила стягування – $P_0 = 2500 \text{ Н} \pm 300 \text{ Н}$. Стягування п'єзопакетів у конструкціях п'єзоприводів здійснюється для зменшення гістерезису і підвищення опору приводу радіальним навантаженням. Одними із специфічних характеристик СПП є максимальна сила $P_{\max}$, коефіцієнт жорсткості c_A та накопичувальна енергія $W_{\max}$. Під максимальною силою (або блокуючою силою) $P_{\max}$ розуміється сила, яку розвиває привід (або сила зовнішнього навантаження) при загальмованому вільному кінці перетворювача, при подачі максимальної напруги $U_{\max}$. Сила P , що розвивається приводом, залежить від переміщення ξ його робочого торця. Коефіцієнт жорсткості, що характеризує кут нахилу характеристики $P = f(\xi)$ приводу, обчислюється за формулою

$$c_A = \frac{P_{\max}}{\xi_{\max}}, \quad (1.1)$$

де $\xi_{\max}$ – максимальне переміщення вільного кінця перетворювача при зовнішній силі $P = 0$. Чим вище жорсткість приводу, тим більшу силу розвиває

привід при заданому переміщенні. Максимальна енергія, яку може накопичити привід в загальмованому стані, є комплексним критерієм оцінки його силових можливостей

$$W_{\max} = \frac{c_A \xi_{\max}^2}{2}. \quad (1.2)$$

Прикладом виконання СПП може бути зразок (рис. 1.3), що складається з пакету секцій 1 тонких п'єзокерамічних шайб (ПКШ) і що має по кінцях два фланці 2, стягнутих гвинтовою шпилькою 3 з тонкою середньою частиною за допомогою двох гайок 4. Стягування секцій необхідне для вибірки зазорів і люфтів між ПКШ, підвищення жорсткості п'єзоелектричного приводу і зменшення петлі гістерезису. Тонкостінна пластмасова втулка 5 служить як ізолятор і елемент, що центрує весь пакет секцій ПКШ. Слюдяні шайби 6 також є ізоляторами, що володіють високою жорсткістю при стисненні. Зазвичай секція 1 складається з 10-20 ПКШ товщиною 0,5–1 мм з срібляними електродами, що нанесені на плоскі торцеві поверхні, які електрично-паралельно сполучені між собою (рис. 1.4), а вектори поляризації $\vec{P}_1$ і $\vec{P}_2$ п'єзокерамічних елементів направлені назустріч один одному.

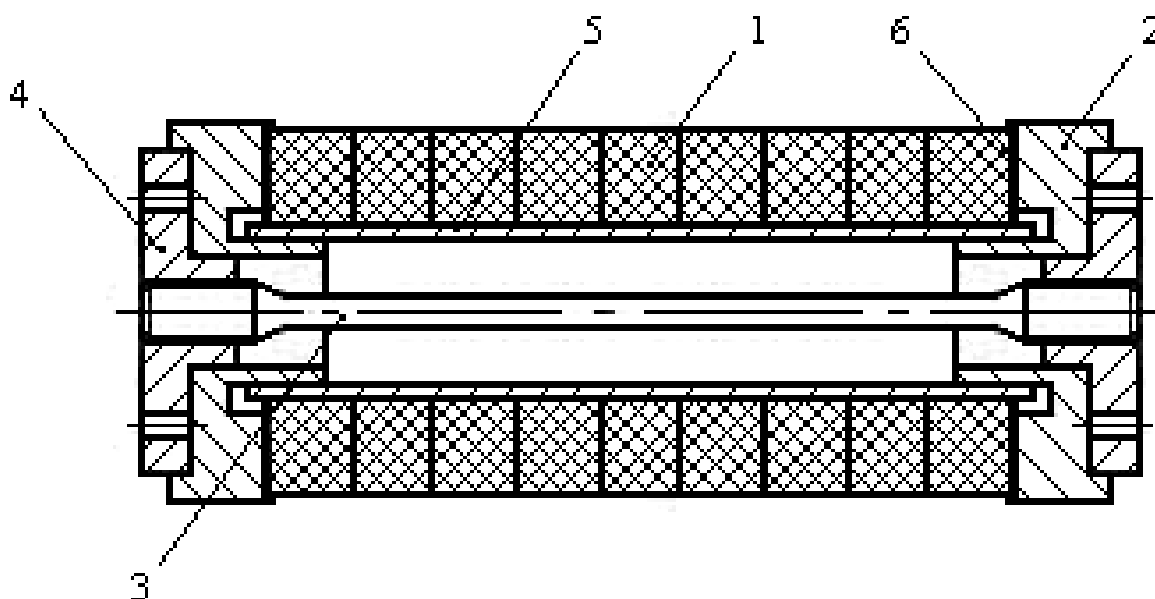


Рисунок 1.3– Складений п'єзоперетворювач

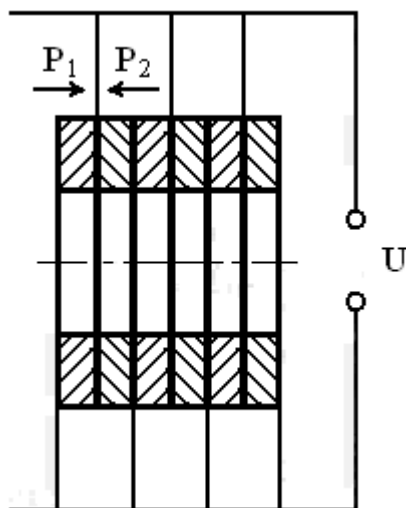


Рисунок 1.4—З'єднання п'єзокерамічних шайб в секцію.

Таке паралельне електричне з'єднання ПКШ дає збільшення переміщення торця СПП, пропорційно кількості ПКШ, проте істотно зростають габарити, маса і вартість такого пристрою. При розмірах $\text{Ø}23 \times 65$ максимальне переміщення складе 5,2 мкм при напрузі 300 В, максимальне зусилля, що розвивається пристроєм, може досягти $1,7 \cdot 10^3$ Н.

Зменшення напруги, що подається на електроди, здійснюється за рахунок зменшення товщини п'єзокерамічних пластинок. Японська компанія MEGACERA випускає п'єзокерамічні диски завтовшки від 0,035 мм до 0,8 мм при діаметрі від 9 до 60 мм. Така мала товщина дозволяє понизити напругу до 10-20 В, що відповідно приводить до зменшення габаритів самих мехатронних модулів і полегшує завдання подачі електроживлення до п'єзоелементів.

Реверсивний п'єзокерамічний двигун та системи на його основі. У прецизійних вимірювальних і слідкуючих системах, регульованими величинами яких є кутові і лінійні переміщення, як виконавчі елементи використовуються електромагнітні двигуни (крокові, безперервного обертання, моментні тощо.) різних типів. Крокові двигуни, що найбільш широко використовуються, мають крок близько 1 кут. град при незначному моменті на валу.

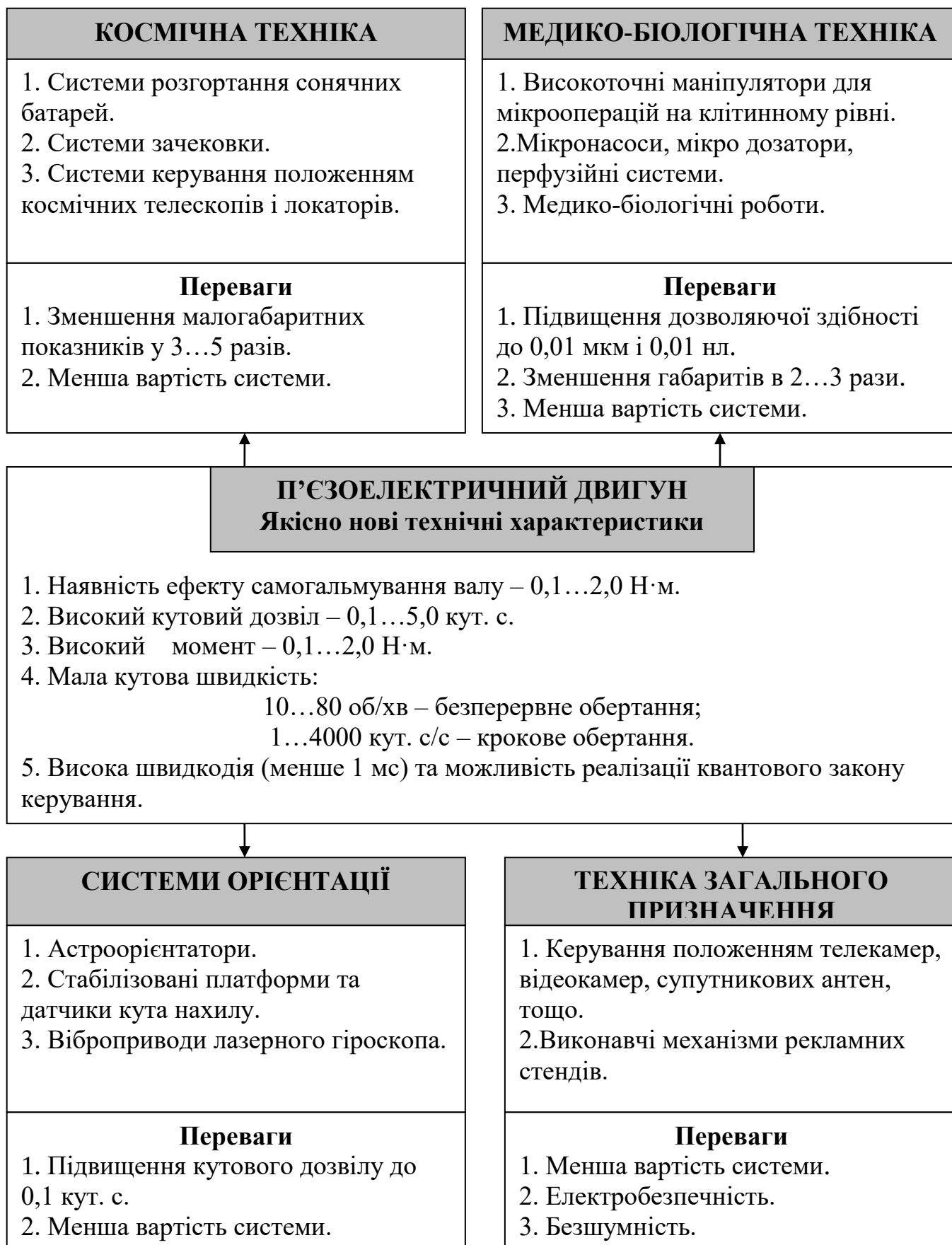


Рисунок 1.5–Області використання п'єзoeлектричних двигунів

Сучасні технічні вимоги, що висуваються до високоточних систем, часто припускають, що виконавчі елементи таких систем повинні мати кутовий дозвіл (мінімальний кутовий розворот валу) близько 1 кут. с (лінійний дозвіл порядку одиниць нанометрів) при порівняно більшому моменті на валу, близько 0,1...1,0 Н·м. При цьому такі системи повинні забезпечувати фіксацію кутового положення валу значним моментом і володіти високими динамічними характеристиками (час розгону і гальмування порядку однієї мс, швидкості до 1 об/с). Забезпечення таких характеристик стандартними методами пов'язане з великими технічними і як наслідок – фінансовими труднощами.

Таким чином, вельми актуальною стала проблема оптимізації сучасних технічних пристроїв та систем такого класу шляхом пошуку нових фізичних рішень. Для цих завдань вельми успішно застосовують в даний час п'єзоелектричні двигуни, що володіють незаперечними перевагами в порівнянні з традиційними двигунами. Області використання таких п'єзоелектричних двигунів представлені на рис. 1.5.

У п'єзоелектричному двигуні поступальна або обертальна хода ротора здійснюється шляхом перетворення електричної енергії в механічну за рахунок зворотного п'єзоелектричного ефекту. Саме створення таких високоточних п'єзоелектричних двигунів найбільш, виправдано їх набором специфічних характеристик, властивих тільки двигунам такого класу.

1.4 Механізм роботи п'єзоелектричного двигуна

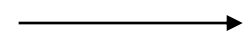
За принципом роботи п'єзоелектричні двигуни, умовно можна розділити на дві великі групи. До першої групи відносяться двигуни хвильового типу. У таких двигунах в п'єзоелементі (статорі) збуджується хвиля, що біжить, яка примушує обертатися ротор. По своїх функціональних можливостях вони наближаються до швидкохідних електромагнітних двигунів малої і середньої потужності. До другої групи відносяться двигуни ударного типу. У таких двигунах в п'єзоелементі (резонаторі) формується стояча хвиля, характер

коливань якої передається в штовхачі. У даній дипломній роботі будуть розглянуті двигуни ударного типу, оскільки саме вони набули широкого розповсюдження як двигуни прецизійного типу.

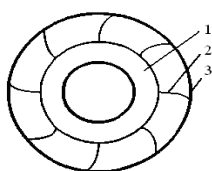
У приводі ударного типу здійснюється ударна взаємодія статора і ротора в зоні контакту і рухома частина приводиться в рух під дією ударних імпульсів, що подаються з частотою коливань п'єзоелемента. Частота коливань п'єзоелемента обчислюється десятками кГц, отже ці п'єзоприводи характеризуються високою рівномірністю руху (при безперервному живленні), хоча в кожен період коливань T імпульс сили діє протягом його певної частини τ_k , $\tau_k/T \approx 0,05...0,70$. Ця група п'єзоприводів в певному значенні аналогічна електричним двигунам постійного струму, оскільки якір в останніх також отримує високочастотні періодичні «поштовхи» від взаємодії поля, з тією лише різницею, що в електромагнітних двигунах передача моменту робочому органу відбувається безконтактно, а в п'єзоелектричних – контактно, а звідси і всі властивості контактної взаємодії, обумовлені силами тертя в контакті. Спрощена конструкція п'єзодвигуна представлена на рис. 1.6.а, яка містить п'єзоелемент 1, закріплений на основі, на зовнішній циліндровій стороні якого жорстко встановлені штовхачі 2 з пружинного матеріалу, що упираються у внутрішню частину ротора 3. За рахунок пружної деформації штовхачі притискаються з силою F до внутрішньої частини ротора. Формування відповідної статичної картини деформації штовхачів здійснюється за рахунок того, що діаметр кола, що описується виступаючими частинами штовхачів 2 дещо більше внутрішнього діаметру ротора 3, рис. 1.6.б. Тому при збірці штовхачі згинаються і встановлюються похило з певною механічною напругою щодо внутрішньої частини ротора, на яку вони спираються, рис. 1.6.а.

У пропонуваній конструкції п'єзодвигуна для отримання обертового руху ротора, в штовхачі порушують коливання по двом взаємно перпендикулярним напрямкам. При цьому подовжні коливання в штовхачі збуджуються за рахунок радіальних коливань п'єзоелемента, а поперечні коливання, що вигибаються збуджуються механічним шляхом за рахунок

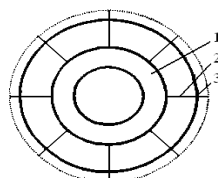
взаємодії штовхача з внутрішньою поверхнею ротора. При цьому точка (лінія) дотику (сполучення) штовхача з ротором починає рухатися по деякій кривій, яка названа кривою взаємодії. У момент контакту штовхача з поверхнею ротора, за рахунок сил тертя, відбувається заклинювання і ротору повідомляється однонаправлений імпульс руху. При зміні співвідношення частот, амплітуд і фаз коливань штовхачів, крива взаємодії міняє свою форму. Нас цікавитиме лише випадок, коли частоти коливань рівні. В цьому випадку дотичні крапки рухаються по еліпсу, рис. 1.7.а, частина якого лежить на поверхні ротора. У такому режимі можливі різні окремі випадки. 1. Велика вісь еліпса паралельна дотичній площині, що проходить через точку дотику ротора, рис. 1.7.а. В цьому випадку двигун розвиває максимальний момент і має найоптимальнішу характеристику навантаження. Цей режим найбільш ефективний, оскільки штовхач в прямому напрямі руху (коли п'єзоелемент збільшується по радіусу) максимальний час взаємодії з ротором, а у зворотному напрямі (коли п'єзоелемент зменшується по радіусу) віджаний від нього. 2. Велика вісь еліпса перпендикулярна дотичній площині, що проходить через точку дотику ротора, рис. 1.7.б. У цьому випадку двигун розвиває максимальну швидкість в режимі холостого руху при незначному моменті на валу. 3. Еліпс вироджений в коло, рис. 1.7.в. В цьому випадку виходять середні параметри між першим і другим випадком. 4. Еліпс вироджений в пряму лінію, рис. 1.7.г. Цей режим розглядається як у край небажаним із-за високих втрат на тертя і низький ККД.



Напрямок руху



а)



б)

Рисунок 1.6– Спрощена (а) та статична (б) конструкція п'єзодвигуна:

1 – п'єзоелемент; 2 – штовхачі; 3 – ротор.

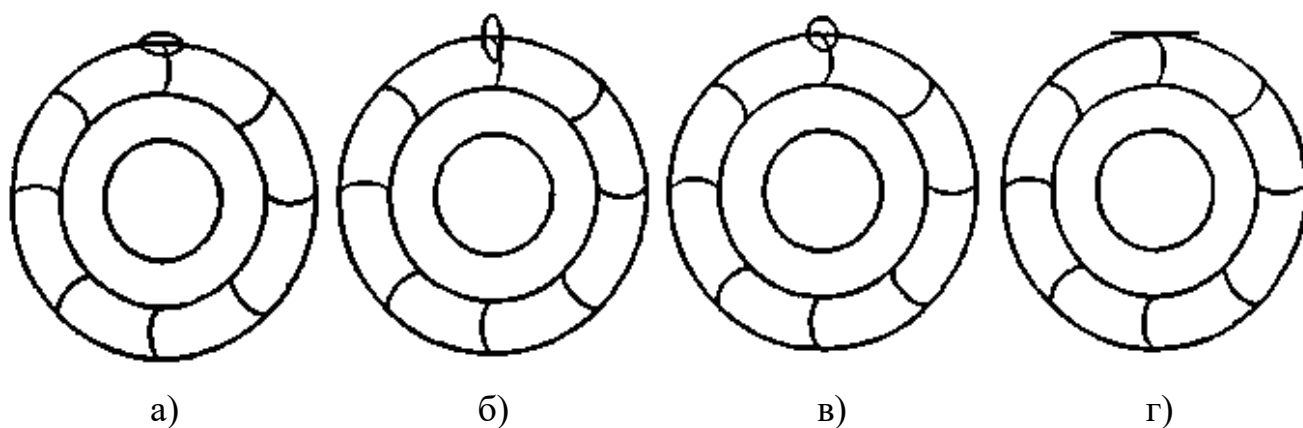


Рисунок 1.7– Характер сполучення контактної точки штовхача з ротором

Конструкція п'єзоелектричного двигуна реверсивного обертання. По суті справи п'єзоелектричний двигун реверсивного обертання складається з двох незалежних двигунів однонаправленого обертання, акустично розв'язаних між собою.

Такий двигун володіє властивістю обертати вал за годинниковою стрілкою і навпаки. Це забезпечується специфічністю конструкції, суть якої полягає в установці на одному валу два фрикційно-розв'язаних приводів, кожний з яких працює тільки в одному напрямі. Керування двигуном проводиться роздільно по двох ланцюгах, кожна з яких відповідає розвороту валу по і проти годинникової стрілки.

Конструктивною особливістю реверсивного двигуна є вбудована фрикційна муфта, яка реалізована на елементах самого двигуна. П'єзоелектричний двигун реверсивного обертання містить два окремі осцилятори: нижній 10 і верхній 7, рис. 1.8.

Нижній осцилятор встановлений на нерухомій основі 11 корпусу. Положення валу за віссю 5 фіксується підшипниками, встановленими в корпусі 6 і в основі 11. Верхній осцилятор 7 кріпиться до рухомої основи 8, яке напресоване на вал 5 і обертається разом з ним. Обидва осцилятори вставляються в рухомий ротор 9, який через підшипники ковзання посаджений на вал 5 і додатково фіксується штовхачами 2, 4. Штовхачі, притискаючись з деяким зусиллям до внутрішньої поверхні ротора, створюють сумарний момент

самогальмування $M_{\text{сам}}$. При подачі напруги збудження на один з п'єзoeлементов, наприклад осцилятора 10, він збуджується і створює ротору через штовхачі 2 момент обертання, наприклад, за годинниковою стрілкою. Вал двигуна, запресований в основу 8, яке фрикційно сполучене через штовхачі верхнього осцилятора з рухомим ротором, також обертатиметься за годинниковою стрілкою. Таким чином обертання у вал передається через фрикційну муфту «штовхачі верхнього осцилятора – ротор».

При підключенні напруги збудження до п'єзoeлементу верхнього осцилятора 7 через струмозйомник 3, в ньому збудяться коливання, унаслідок чого в точках сполучення штовхачів 4 з ротором виникнуть сили, які відштовхують верхній осцилятор від ротора. Оскільки ротор при цьому загальмований нижнім осцилятором, формується момент обертання проти годинникової стрілки. В цьому випадку ротор загальмований через фрикційну муфту «штовхачі нижнього осцилятора – ротор». Таким чином, в першому випадку нерухомий нижній осцилятор, закріплений на нижній основі корпусу, приводить в обертання рухомий ротор з верхнім осцилятором і валом за годинниковою стрілкою. А в другому випадку верхній осцилятор при загальмованому роторі, обертає вал, запресований в основі 8, проти годинникової стрілки.

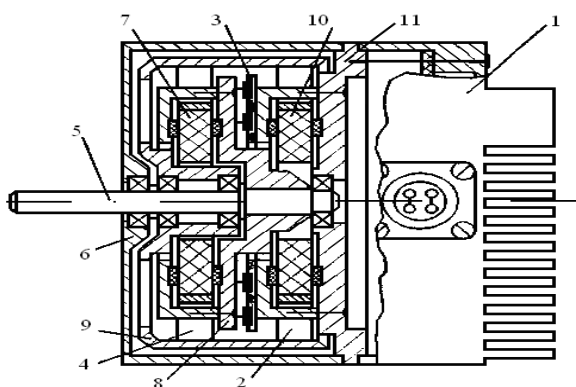


Рисунок 1.8– Конструктивне виконання двигуна реверсивного обертання:

1 – захисна кришка блоку живлення; 2 – штовхачі нижнього осцилятора; 3 – пристрій, що знімає струм; 4 – штовхачі верхнього осцилятора; 5 – вал; 6 – корпус; 7 – верхній осцилятор; 8 – рухлива основа; 9 – ротор; 10 – нижній осцилятор; 11 – основа.

На рис. 1.9. приведена типова характеристика навантаження для реверсивного і нереверсивного двигуна, з якої виходить, що максимальний момент обертання реверсивного двигуна завжди менше нереверсивного і обмежений власним моментом самогальмування двигуна [2-4].



Рисунок 1.9—Типова навантажувальна характеристика п'єзодвигуна (ω – швидкість обертання, M_H – навантажувальний момент)

Блок живлення п'єзоелектричного двигуна. Оскільки виконавські елементи в приладобудуванні харчуються стандартною напругою 12В або 27В постійного струму, то п'єзоелектричні, двигуни забезпечуються блоком живлення, який є перетворювачем постійної напруги в напругу збудження з резонансною частотою осцилятора. Перетворювач напруги (блок живлення), може розміщуватися окремо від двигуна, або може бути вбудованим в двигун. Для живлення реверсивного двигуна використовується зазвичай два ідентичні незалежні перетворювачі.

Принципова електрична схема перетворювача напруги зазвичай стандартна для всіх двигунів і представлена на рис. 1.10. Перетворювач напруги є генератором синусоїдального сигналу, налаштованим на резонансну частоту осцилятора.

До складу перетворювача входять транзистори $VT1$ і $VT2$, що працюють в ключовому режимі. Конденсатор $C2$ і дросель $L2$ утворюють послідовний резонансний « LC » контур, а $C3$ і $L1$ – паралельний резонансний « LC », контур.

П'єзоелемент ПЕ (осцилятор) підключається до генератора через трансформатор Тр, що підвищує, оскільки подвійна амплітуда синусоїдального сигналу, необхідного для роботи двигуна, перевищує напругу джерела живлення двигуна і складає близько 100 В.

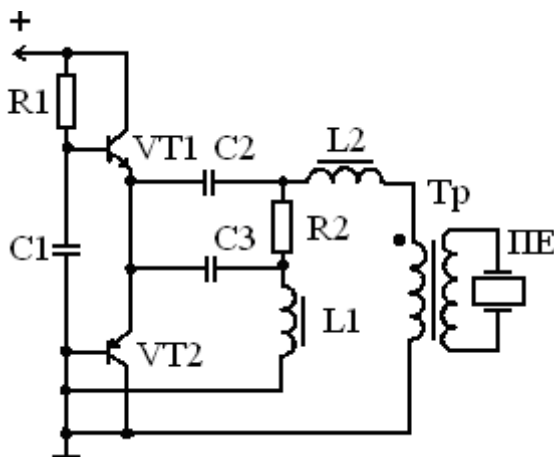


Рисунок 1.10– Перетворювач напруги

Резистори $R1$ і $R2$ служать для вибору робочої точки транзисторів $VT1$ і $VT2$ по постійному струму.

Принципи налагодження блоку живлення. Розглянемо типову частотну характеристику двигуна без перетворювача. Двигун навантажувався робочим моментом 0,1 Н·м. Напруга збудження підтримувалася постійною. В процесі експерименту контролювали робочий струм через двигун і швидкість обертання двигуна. Результати експерименту представлені на рис. 1.11.

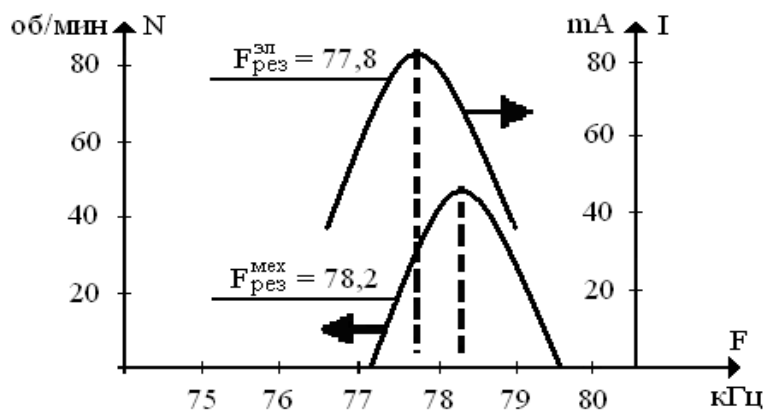


Рисунок 1.11– Частотна характеристика п'єзоелектричного двигуна

З представлених даних виходить, що резонанс струму і резонанс швидкості не співпадають, або інакше кажучи, резонанс електричної і резонанс механічної потужностей рознесені по частоті. Звідси може бути сформоване основне правило налагодження п'єзоелектричного двигуна: двигун повинен налагоджуватися шляхом зміни частоти по резонансу механічної потужності. Інакше кажучи, при налагодженні, двигун повинен навантажуватися робочим моментом і шляхом зміни параметрів ланцюгів перетворювача, що задають частоту добиваються максимальної швидкості обертання.

Таким чином, резонансний контур перетворювача настроюється на частоту, близьку до частоти механічного резонансу

$$F_{\text{рез}}^{\text{мех}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (1.3)$$

При настроюванні двигуна налагоджувальними елементами паралельного резонансного контуру ($C3$ або $L1$) добиваються максимально можливих обертів двигуна при робочому навантаженні, тим самим, настроюючи його на $F_{\text{рез}}^{\text{мех}}$.

Після цього, варіюючи параметрами елементів послідовного резонансного контуру (частіше всього $L2$), який виконує роль частотного фільтру, добиваються безпосередньо синусоїдального сигналу на навантаженні (п'єзоелементі).

Режими роботи двигуна. Режим безперервного обертання здійснюється подачею на блок живлення постійного живлення $U_{\text{жив}}$ при цьому на п'єзоелемент подаватиметься безперервний гармонійний сигнал збудження $U_{\text{зб}}$, рис. 1.12.

Кроковий режим обертання здійснюється шляхом подачі імпульсів живлення, при цьому на п'єзоелемент поступають «пачки» гармонійного сигналу збудження тривалістю τ_i , рис. 1.13.

Зміна параметрів імпульсній послідовності призводить, до зміни величини кутового позиціонування і його швидкості. При збільшенні шпаруватості

середня швидкість двигуна зменшується і в граничному випадку може досягати нуля. Це такий стан, коли вал двигуна розгортається з малим кутовим кроком і це відбувається з малою частотою. Навпаки при зменшенні шпаруватості, інтервали між «пачками» зменшуються, кутовий крок розвороту валу двигуна збільшується, і середня швидкість наближається до максимальної.

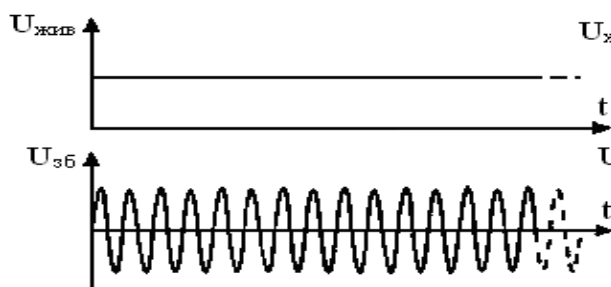


Рисунок 1.12–Режим безперервного обертання п'єзодвигуна

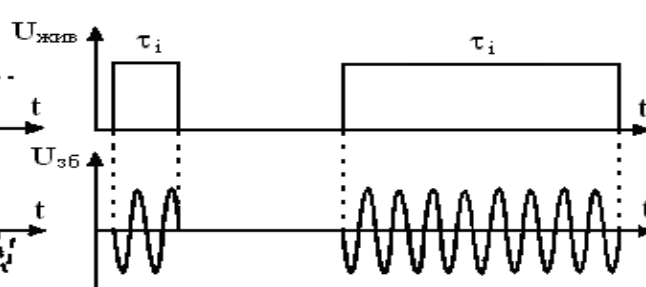


Рисунок 1.13– Режим крокового старт-стопного обертання п'єзодвигуна

Мікроманіпулятор з п'єзоелектричним приводом. У медикобіологічній техніці широко використовуються мікроманіпулятори (далі просто маніпулятори), наприклад, для виконання мікрооперацій на клітинному рівні, мембранні технології, технології зі штучного запліднення тощо. За допомогою таких маніпуляторів здійснюється маніпулювання в мікронних і субмікронних діапазонах, причому такі маніпулятори не повинні створювати вібрацій і бути стабільними позиціонерами. У табл. 1.1 представлені технічні характеристики трьохкоординатного маніпулятора PSF-3, виконаного на базі п'єзоелектричних двигунів РМ-20R, а на рис. 1.14. представлений його зовнішній вигляд [7].

Таблиця 1.1– Технічні характеристики маніпулятора PSF-3

Параметр	Значення
Діапазон переміщення	10 мм (по всіх трьох осях)
Максимальна швидкість руху	500 мкм/с
Дозвіл в режимі безперервного руху	0,5 мкм
Дрейф (при 20 °С)	< 2 нм/год
Напруга живлення	12 В
Потужність, що споживається	не більше 5 Вт
Загальна вага	1,7 кг



Рисунок 1.14– Мікроманіпулятор PSF-3

Сьогодні в клітинних мікротехнологіях за допомогою маніпуляторів виконується унікальна послідовність мікро операцій. По-перше, виконується автоматичний пошук необхідної клітини в полі зору мікроскопа ($\sim 200 \times 300$ мкм), яке в сучасних засобах виводиться на монітор керуючого комп'ютера (як і все керування комплексом), виконується наведення маніпулятора на клітину (це може бути як статичний, так і динамічний процес). Далі здійснюється пуск маніпулятора і, наздогнавши клітину, маніпулятор повинен різко загальмувати перед ній на близькій ($\sim 2 \dots 5$ мкм) фіксованій відстані. З точки зору динаміки це дуже складна задача.

По-друге, виконується операція дуже делікатної «стиковки» з клітиною та утримання її протягом необхідного часу. Ця операція виконується здебільшого у ручному режимі через керуючий монітор, який нагадує пульт керування космічним апаратом. Цю операцію можна порівняти зі стиковкою двох космічних кораблів у космічному просторі, але при цьому один корабель намагається це зробити, а другий йому протидіє та заважає. Маніпулятор, який виконує ці мікрооперації, зветься Clamp (зажим) маніпулятор, а робоча піпетка зветься Holder. Коли виконується технологія клонування, то як мінімум використовується два Clamp маніпулятора, один з яких утримує клітину-донор,

а другий клітину-реципієнт. При штучному заплідненні використовується один Clamp маніпулятор.

Далі вступає в дію так званий внутрішньоклітинний маніпулятор. Традиційно його звуть IVF маніпулятор. На цьому маніпуляторі встановлюється мікропіпетка-ін'єктор, або мікропіпетка-скальпель, які виконують внутрішньоклітинні операції за заданою програмою. При виконанні мікрооперацій зі штучного запліднення цей маніпулятор підходить до клітини (яка утримується Clamp маніпулятором), кінцем мікроін'єктора натягує еластичну мембрану клітини і за допомогою мікроударів, які традиційно формуються спеціальним п'єзотранслятором (в наших системах таку функцію бере на себе сам маніпулятор) проколює мембрану і проникає в цитоплазму з метою виконання подальшої ін'єкції сперматозоїдів або того чи іншого розчину. При виконанні операції з клонування, маніпулятор за допомогою спеціального режиму «ультразвуковий скальпель» (що є присутнім тільки на нашому маніпуляторі), робить розтин мембрани за заданою програмою, виконує «чистку» ядра клітини-реципієнта, і здійснює переніс ядерної маси з клітини донора в клітину-реципієнта.

Такий маніпулятор може застосовуватися не тільки в клітинних технологіях, а й в інших областях науки та техніки, оскільки на його платформу можна встановлювати робочий інструмент вагою до 3 кілограмів. Його можна використовувати для стиковки оптичних модулів волоконно-оптичних ліній зв'язку, для виготовлення деталей з унікальною точністю, для виготовлення інтегральних мікросхем. Дійсно, сучасний рівень фотолітографії при виготовленні мікроелектронних компонентів дозволяє використовувати глибоке ультрафіолетове випромінювання з метою отримання канавок "орнаменту" завширшки всього 50...70 нм. Встановивши на такий маніпулятор джерело рентгенівського або гамма-випромінювання, можна значно підвищити рівень такої роздільної здатності. А це вже класичні нанотехнології.

1.5 Постановка задачі

Аналіз відомих конструкцій та вузлів п'єзоелектричних приводів та умов мікрооперацій для високоточних маніпуляторів дозволили визначити наступну постановку задачі:

- розрахувати параметри п'єзоелемента ($\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$, ρ_v , V_1^ε , d_{31}) для маніпулятора, що працює на клітинному рівні;
- спроектувати п'єзодвигун для цього маніпулятора ($d_{зобн}^0$, l/a , $F_{\text{виг}}^n$, $F_{\text{г}}^0$);
- дослідити роботу двигуна для типових навантажень;
- розрахувати систему керування, яка дозволяла б здійснювати реверс, а також змінювати тривалість кроку;
- дослідити стійкість системи керування п'єзоелектричного приводу.

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ П'ЄЗОПЕРЕТВОРЮВАЧА

2.1 Розрахунок параметрів п'єзоелемента

Базовим елементом будь-якого п'єзоелектричного двигуна є п'єзоелемент. П'єзоелементи можуть мати різну конфігурацію, яка визначається специфікою використання п'єзоелемента в тій або іншій конструкції.

У приводі, що проектується використовуються кільцеві п'єзоелементи з п'єзокераміки ЦТБС-3. Матеріал ЦТБС-3 особливий тип силової п'єзокераміки з основними хімічними компонентами цирконат – титанат барію – свинця. Даний матеріал призначений для виготовлення елементів, що працюють в режимі випромінювання і (або) прийому в умовах дії сильних електричних полів і механічної напруги в рекомендованому діапазоні температур $-60...+85^{\circ}\text{C}$.

Типова конструкція п'єзоелемента, який використовується, представлена на рис. 2.1.

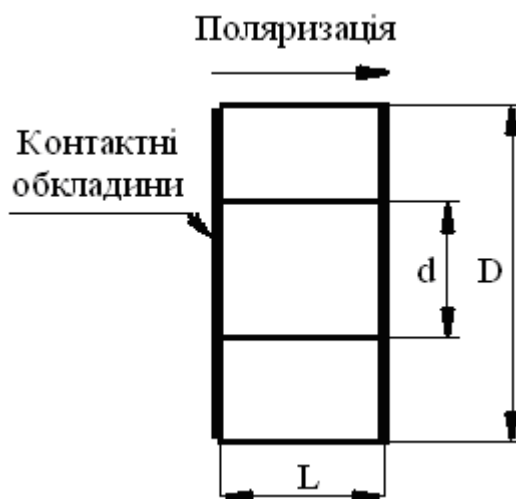


Рисунок 2.1– Конструкція п'єзоелемента

Цей п'єзоелемент характеризується наступними основними параметрами

$$\frac{\varepsilon_{33}^T}{\varepsilon_0} = 143,9 \cdot 10^9 \frac{C_0 L}{D^2 - d^2} = 2026,3, \quad (2.1)$$

$$\rho_v = 0,785 \frac{D^2 - d^2}{L} R_v = 1,18 \cdot 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{м}, \quad (2.2)$$

$$V_1^\varepsilon = \frac{1,57}{t} (D + d) F_r = 3275 \text{ м/с}, \quad (2.3)$$

$$d_{31} = 2,68 \cdot 10^{-6} \eta \sqrt{\frac{\varepsilon_{33}^T \Delta f}{\varepsilon_0 \rho F_r^3 (D + d)^2}} = 100,7 \cdot 10^{-12} \text{ Кл/Н}, \quad (2.4)$$

де L – довжина, м;

D – діаметр наружний, м;

d – діаметр внутрішній, м (геометричні параметри взяті з табл. 2.1.1, п'єзоелемент № 20);

$C_0 = 845$ пФ – ємність статична;

$\rho = 7,2 \cdot 10^3$ кг/м³ – щільність;

$\varepsilon_{33}^T / \varepsilon_0$ – відносна діелектрична проникність;

ρ_v – питомий об'ємний електричний опір, Ом·м;

$R_v = 2,5 \cdot 10^9$ Ом·м – опір ізоляції;

d_{31} – п'єзомодуль у динамічному режимі, Кл/Н;

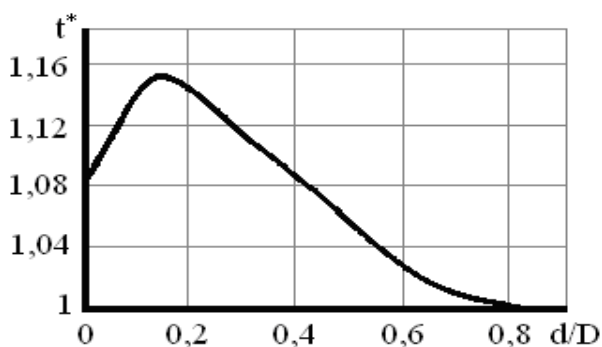
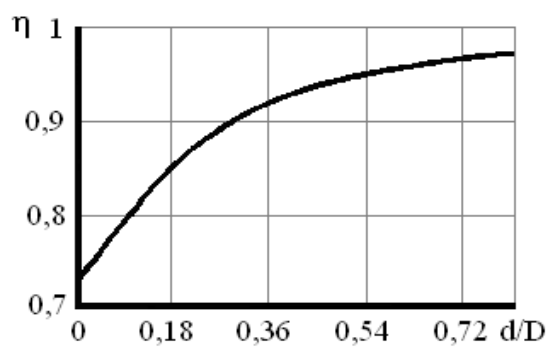
$F_r = 73$ кГц – частота резонансу (радіальних коливань);

$\Delta f = 2$ кГц – резонансний проміжок між частотою резонансу та антирезонансу;

V_1^ε – швидкість звуку, м/с;

t^* – поправка, що вводиться відповідно до рис. 2.2;

η – поправка, що вводиться відповідно до рис. 2.3.

Рисунок 2.2—Поправка t^* для швидкості звуку V_1^e Рисунок 2.3—Поправка η для модуля d_{31}

На практиці якість п'єзoeлементa перевіряється шляхом вимірювання параметрів його електричного резонансу по схемі, представлений на рис. 2.4. Шляхом зміни частоти генератора, настраюють його на резонансну частоту п'єзoeлементa по максимальній величині струму через п'єзoeлемент. При цьому величина струму контролюється по мілівольтметру ВЗ-38. Регулюванням вихідною напругою генератора доводять величину струму I через п'єзoeлемент до 100 мА (50 мА), що відповідає 100 мВ (50 мВ) за мілівольтметром ВЗ-38.

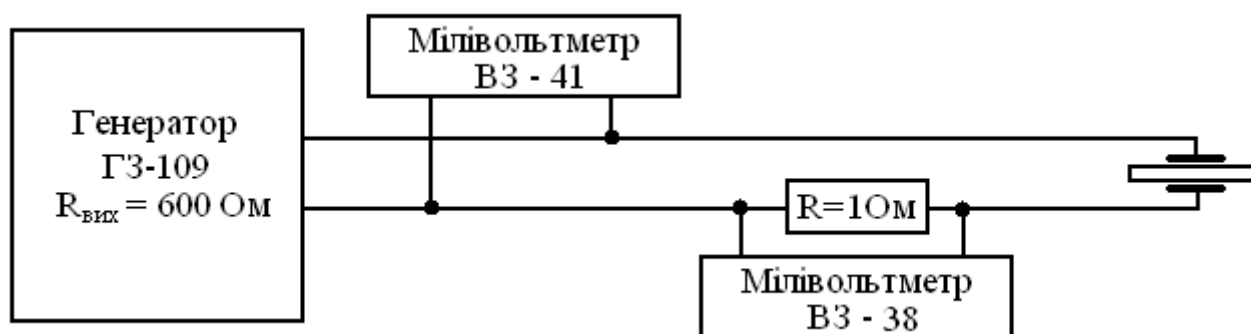


Рисунок 2.4—Схема для вимірювання електричної добротності резонатора

За величиною напруги на п'єзoeлементі, який контролюється за допомогою мілівольтметра ВЗ-41, судять про електромеханічні параметри п'єзoeлементa. П'єзoeлемент вважається придатним до експлуатації в п'єзoeлектричному двигуні, якщо величина падіння напруги на п'єзoeлементі U знаходиться в заданих межах, представлених в табл. 2.1.

Таблиця 2.1– Падіння напруги на п'єзоелементі

№	Тип п'єзоелементу	F_r , кГц	I , мА	U , В
1	П'єзоелемент № 46 $D = 46 \text{ mm}$ $d = 16 \text{ mm}$ $L = 6 \text{ mm}$	36...38	100	3...10
2	П'єзоелемент № 28 $D = 28 \text{ mm}$ $d = 13 \text{ mm}$ $L = 6 \text{ mm}$	55...58	100	6...16
3	П'єзоелемент № 20 $D = 20 \text{ mm}$ $d = 10 \text{ mm}$ $L = 5 \text{ mm}$	70...82	50	6...12
4	П'єзоелемент № 12 $D = 12 \text{ mm}$ $d = 10 \text{ mm}$ $L = 5 \text{ mm}$	123...126	50	10...12
5*	П'єзоелемент № 20 Матеріал ЦТСС _Т - 3 $D = 20 \text{ mm}$ $d = 10 \text{ mm}$ $L = 5 \text{ mm}$	71...73	50	10...12

Примітка: у таблицю як порівняння доданий п'єзоелемент з матеріалу ЦТСС_Т – 3 (цирконат – титанат свинця – стронцію), який набуває в даний час широкого розповсюдження.

2.2 Розрахунок параметрів осцилятора

Під осцилятором надалі буде матися на увазі статор п'єзоелектричного двигуна, який включатиме п'єзоелемент зі встановленими на ньому пластинами-штовхачами. Основна технологічна проблема, з якою стикаються розробники п'єзоелектричних двигунів – це сполучення пластин-штовхачів з п'єзоелементом. Традиційно, пластини-штовхачі вклеюються в пази, які нарізані на зовнішній (внутрішній) стороні п'єзоелемента. В процесі нарізки пазів під штовхачі в п'єзоелементі виникають мікротріщини, які отримують розвиток в процесі експлуатації за рахунок великої внутрішньої напруги в працюючому п'єзоелементі. Швидкість розвитку мікротріщин визначається ступінню механічних напруг, що залежать від потужності накачування п'єзоелемента, що не дозволяє збільшити потужність п'єзоелектричного двигуна і значно знижує його технічний ресурс унаслідок розтріскування п'єзоелемента, рис. 2.5 а.

Відомі п'єзоелектричні двигуни, в яких зовнішня циліндрова поверхня п'єзоелемента поміщена в оболонку зі встановленими на ній штовхачами, причому різниця між зовнішнім і внутрішнім діаметрами оболонки кратна половині довжині хвилі резонансної моди подовжніх акустичних коливань, рис. 2.5 б. У даному п'єзоелектричному двигуні виключена нарізка пазів в п'єзоелементі і отже, виключено основне джерело виникнення мікротріщин за рахунок установки оболонки. Проте ККД такого двигуна різко знижується за рахунок зменшення добротності і коефіцієнта електромеханічного зв'язку (КЕС). Наприклад, для п'єзоелемента № 28 з $F_r = 57\text{кГц}$ та довжиною хвилі подовжніх акустичних коливань $\alpha \approx 60\text{ мм}$ (швидкість звуку $V_1^e \approx 3460\text{ м/с}$), різниця між внутрішнім і зовнішнім діаметрами оболонки для першої основної резонансної моди подовжніх (радіальних) акустичних коливань складає 30мм, що відповідає товщині оболонки 15 мм.

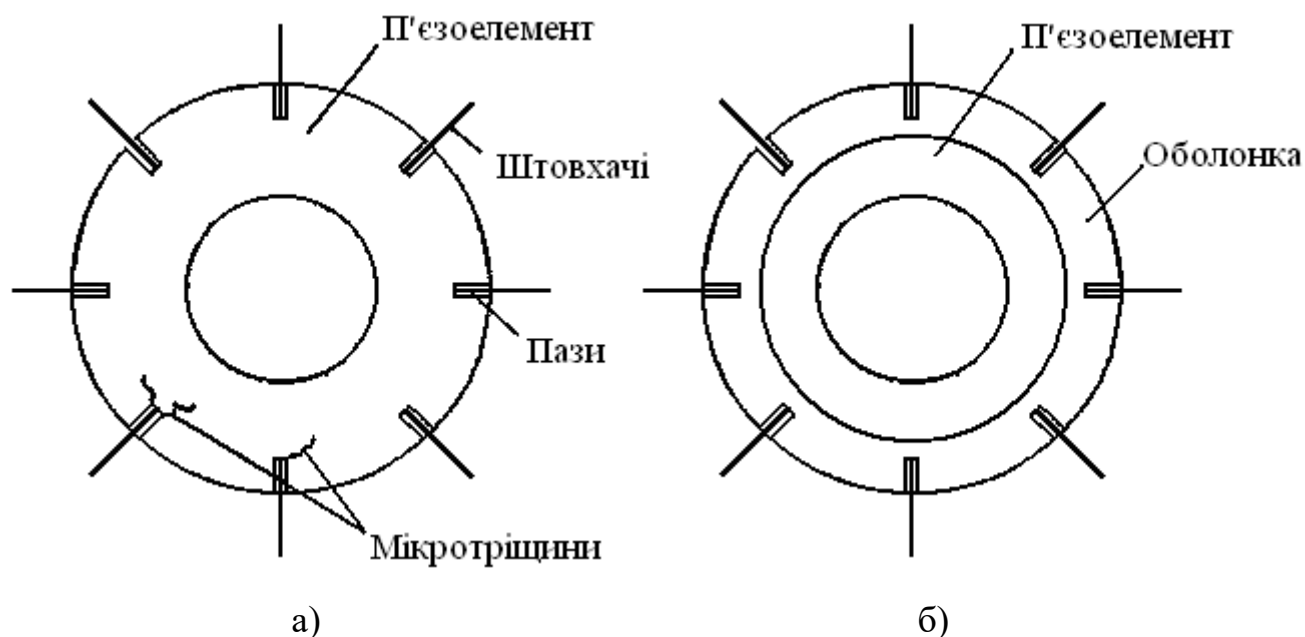


Рисунок 2.5— Кріплення штовхачів: а — до п'єзоелемента, б — до оболонки

Оскільки оболонка металева, то такий осцилятор буде непрацездатним унаслідок того, що висока жорсткість кільця в радіальному напрямі (за рахунок більшого поперечного перетину оболонки) придушить практично всі резонансні моди акустичних коливань, що еквівалентно різкому зниженню добротності і КЕС. При кільцевій оболонці, якщо осцилятор працює на поперечній моді акустичних коливань, при товщині п'єзоелемента 6 мм, що відповідає половині довжини хвилі першої поперечної моди акустичних коливань, товщина оболонки складає 3 мм. Проте поперечна мода коливань з погляду ККД п'єзоелектричного двигуна є менш ефективною, ніж подовжня (для кільцевих п'єзоелементів – радіальна). Таким чином, проблема підвищення ККД повинна вирішуватися за рахунок узгодження власних резонансних частот кільцевої оболонки і п'єзоелемента.

Дослідним шляхом встановлено, що найбільша ефективність складеного осцилятора досягається при суворо певній товщині оболонки (з урахуванням її жорсткого кріплення до п'єзоелемента), яка варіювалася в межах одиниць мм (а не десятків міліметрів, як було вказано вище).

Найбільша ефективність настає тоді, коли резонансна частота на першій моді радіальних коливань п'єзоелемента відповідає резонансній частоті

радіальних коливань оболонки. Для випадку радіальних коливань оболонки справедливе співвідношення

$$\frac{\pi(d_{\text{зовн.}}^0 + d_{\text{внутр.}}^0)}{2m} f_p^0 = V^0,$$

де $d_{\text{зовн.}}^0$, $d_{\text{внутр.}}^0$ – зовнішній і внутрішній діаметри оболонки;

V^0 – швидкість звуку в оболонці;

f_p – резонансна частота оболонки;

m – номер моди радіальних коливань оболонки.

Проте дане співвідношення справедливе для випадку $\frac{d_{\text{внутр.}}^0}{d_{\text{зовн.}}^0} \rightarrow 1$.

При мінімізації п'єзоелектричного двигуна, і як наслідок – оболонки, це співвідношення виконується з урахуванням виправного коефіцієнта t_0 , експериментально встановлена залежність якого має вигляд

$$t_0 = 1,2 - 0,33 \frac{d_{\text{внутр.}}^0}{d_{\text{зовн.}}^0} \text{ для } \frac{d_{\text{внутр.}}^0}{d_{\text{зовн.}}^0} < 0,6; \quad t_0 = 1 \text{ для } \frac{d_{\text{внутр.}}^0}{d_{\text{зовн.}}^0} \geq 0,6.$$

Тоді співвідношення для радіальних коливань оболонки перетвориться в співвідношення

$$\frac{\pi(d_{\text{зовн.}}^0 + d_{\text{внутр.}}^0)}{2mt_0} f_p^0 = V^0.$$

Якщо в оболонці зроблені пази під штовхачі, тоді вводиться поправка $2l$, (де l – глибина нарізного паза в оболонці), оскільки по контуру на глибину паза звукова хвиля не розповсюджується, рис. 2.6.

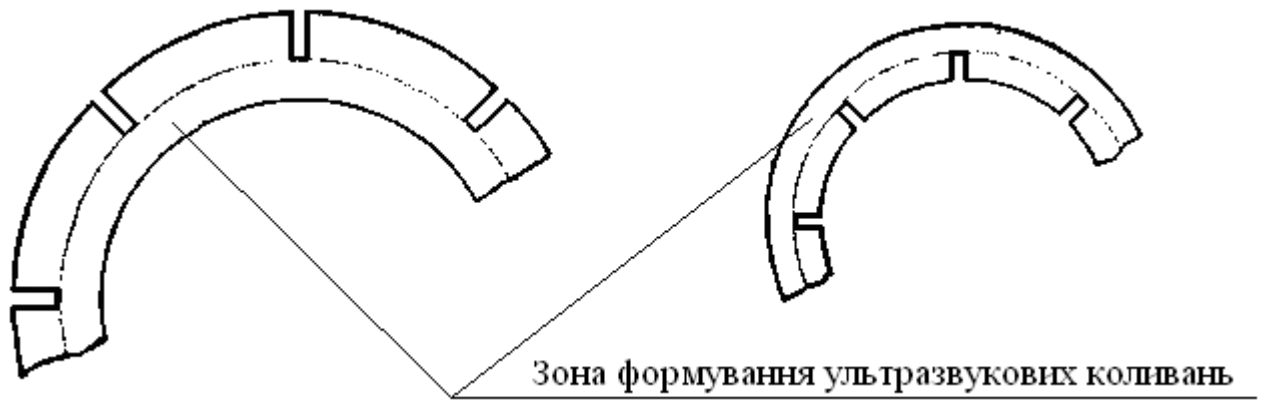


Рисунок 2.6– Оболонка п'єзoeлементa

При цьому співвідношення для заданих коливань оболонки перетвориться до вигляду

$$\frac{\pi(d_{\text{зовн.}}^0 + d_{\text{внутр.}}^0 \pm 2l)}{2mt_0} f_p^0 = V^0,$$

причому знак «+» відповідає внутрішній оболонці, а знак «-» зовнішній.

Замінивши в останньому співвідношенні f_p^0 на F_r п'єзoeлементa, отримаємо повне співвідношення режиму резонансного узгодження осцилятора

$$\pi(d_{\text{зовн.}}^0 + d_{\text{внутр.}}^0 \pm 2l) F_r = 2mt_0 V^0, \quad (2.5)$$

$$t_0 = 1,2 - 0,33 \frac{d_{\text{внутр.}}^0}{d_{\text{зовн.}}^0} \text{ для } \frac{d_{\text{внутр.}}^0}{d_{\text{зовн.}}^0} < 0,6; \quad t_0 = 1 \text{ для } \frac{d_{\text{внутр.}}^0}{d_{\text{зовн.}}^0} \geq 0,6.$$

На рис. 2.7 приведена схема п'єзoeлектричного двигуна, який проектується, на основі складеного осцилятора. Вона включає кільцевий п'єзoeлемент, ув'язнений в хвильову оболонку, на якій встановлені штовхачі, що упираються у внутрішню частину ротора.

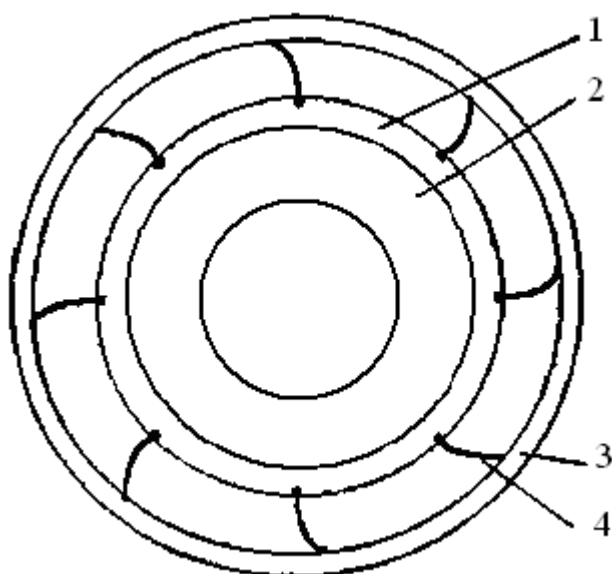


Рисунок 2.7– Схема п'єзоелектричного двигуна зі складеним осцилятором:

1 – тонка сталевна оболонка; 2 – п'єзоелемент; 3 – ротор; 4 – штовхачі

Працює такий п'єзоелектричний двигун таким чином. При підключенні п'єзоелемента до джерела зовнішнього збудження в ньому виникають акустичні радіальні резонансні коливання з частотою F_r . За рахунок резонансного узгодження радіальних частот п'єзоелемента і оболонки ці коливання практично без ослаблення передаються в оболонку, а через оболонку в штовхачі, які фрикційно взаємодіючи з ротором, обертають його. Оболонка виконана зі сталі 25Х13, $V^0 = 5250$ м/с. Штовхачі встановлені в пази оболонки і закріплені за допомогою компаунда на основі епоксидної смоли. Оскільки такий компаунд є хорошим звукопровідним матеріалом ($V = 5000$ м/с), наявністю пазів можна нехтувати.

Для зовнішньої оболонки правдива межа

$$\frac{d_{\text{внутр.}}^0}{d_{\text{зовн.}}^0} \rightarrow 1,$$

тоді для $m = 1$ (основної моди), для $d_{\text{зовн.}}^0$ набуваємо значення

$$d_{зовн.}^0 = \frac{2V^0}{\pi F_r} - d_{внутр.}^0 = 26 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

а для товщини оболонки отримуємо значення

$$\frac{(d_{зовн.}^0 - d_{внутр.}^0)}{2} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Використання таких складених осциляторів трохи змінює добротність п'єзоелемента (у гіршому разі на 50...70%), і відкриває великі технологічні можливості для реалізації різних конструкцій п'єзодвигунів.

Методи кріплення осцилятора до корпусу. Проблема кріплення осцилятора до корпусу є однією з найскладніших проблем при проектуванні двигуна і пов'язана з дисипацією енергії осцилятора в корпус, а отже і з ККД п'єзоелектричного двигуна. Ми зупинимося лише на деяких методах кріплення, які знайшли застосування на практиці. Це, перш за все нежорсткий метод кріплення, напівжорсткий і жорсткий.

Нежорсткий метод кріплення передбачає склеювання п'єзоелемента гумовим компаундом по одній з циліндрових або торцевих поверхонь, рис. 2.8. Як гумовий компаунд може бути використаний герметик ВГО. Такий метод кріплення використовується, перш за все, при побудові малогабаритних двигунів, масогабаритні параметри яких не передбачають розміщення додаткових елементів для кріплення осцилятора, а проблема ККД в таких двигунах гостро не стоїть. Це один з найпростіших способів, який значно змінює добротність осцилятора, проте в багатьох випадках ця втрата може компенсуватися додатковою потужністю накачування п'єзоелемента. У таблиці 2.2 приведений характер зміни електричних параметрів різних осциляторів після склеювання їх компаундом по торцевій поверхні.

Таблиця 2.2– Параметри осциляторів

Тип п'єзоелементу	F_r , кГц	I , мА	U , В до склеювання	U , В після склеювання
П'єзоелемент № 28	56	100	4,6	23
П'єзоелемент № 20	18	50	10	31
П'єзоелемент № 12	120	50	4	10

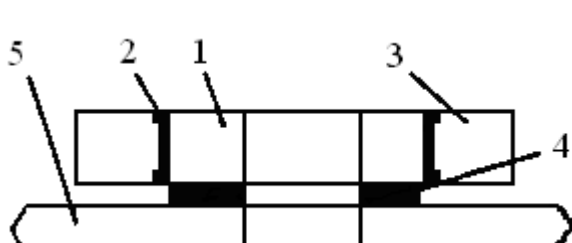


Рисунок 2.8– Нежорстке кріплення осцилятора:

1 – п'єзоелемент; 2 – хвильова оболонка; 3 – штовхачі; 4 – компаунд; 5 – основа

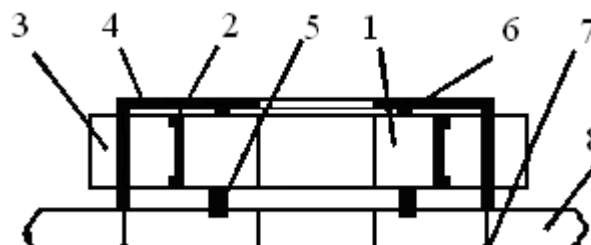


Рисунок 2.9– Напівжорстке кріплення осцилятора:

1 – п'єзоелемент; 2 – хвильова оболонка; 3 – штовхачі; 4 – фланець; 5 – фторопластове кільце; 6 – гумове кільце; 7 – кріпильні гвинти; 8 – основа

Напівжорсткий метод кріплення є на сьогоднішній день найбільш поширеним як для прецизійних двигунів, так і для двигунів загального застосування. Це пояснюється його високою технологічністю в збірці, настройці, так і достатньо високими електромеханічними властивостями. При цьому відразу слід зазначити, що такий метод кріплення не використовується при проектуванні малогабаритних двигунів (п'єзоелемент № 12). Приклад такого кріплення представлений на рис. 2.9. При такому кріпленні п'єзоелемент фіксується до корпусу за допомогою жорсткого (металевого) фланця через фторопластове і гумове кільце, які одночасно виконують роль акустичної розв'язки. При цьому гума виконує роль фіксуючого еластичного елементу, а фторопластове кільце – ковзаючого елементу, що не обмежує ступенів свободи

осцилятора. У табл. 2.3 представлений характер зміни електричних параметрів осциляторів при напівжорсткому кріпленні.

Таблиця 2.3– Параметри осциляторів

Тип п'єзоелементу	F_r , кГц	I , мА	U , В до встановлення	U , В після встановлення
П'єзоелемент № 46	38,5	100	9	16
П'єзоелемент № 28	56	100	17	28
П'єзоелемент № 20	72	50	8	20

Жорсткий метод кріплення є найбільш простим і передбачає кріплення осцилятора до корпусу через стійки, які є продовженням хвильової оболонки, рис. 2.10. Проте при такому методі кріплення значна частина акустичної енергії через жорсткі стійки може йти в корпус, що з одного боку знижує ККД двигуна, а з іншої – приводить до сильних звукових шумів і акустичної детонації самого двигуна. Тому даний метод кріплення доцільно використовувати для побудови двигунів з масивною підставою, або у разі побудови безкорпусних двигунів, тобто коли осцилятор встановлюється безпосередньо на корпус приладу, а ротор – на робочу вісь.

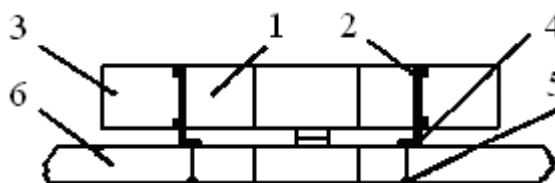


Рисунок 2.10– Жорсткий метод кріплення осцилятора:

1 – п'єзоелемент; 2 – хвильова оболонка; 3 – штовхачі; 4 – стійки; 5 – кріпильні гвинти; 6 – основа

У табл. 2.4 представлений характер зміни параметрів різноманітних осциляторів при жорсткому кріпленні.

Таблиця 2.4– Параметри осциляторів

Тип п'єзоелементу	F_r , кГц	I , мА	U , В до встановлення	U , В після встановлення
П'єзоелемент № 46	37,2	100	7	18
П'єзоелемент № 28	56,1	100	10	28
П'єзоелемент № 20	76,2	50	6,2	18

Загалом можна констатувати, що всі три способи кріплення з точки зору зміни електричних параметрів є рівноцінними, а використання одного з методів у кожному конкретному випадку визначається конструктивними особливостями побудови двигуна.

2.3 Розрахунок параметрів штовхачів

Штовхачі в п'єзоелектричному двигуні виконуються з тонкої пружинної сталі і виконують роль трансформатора поступальних (радіальних для п'єзоелемента) коливань на вході штовхача (у місці кріплення) в еліптичний тип коливань на виході в точці сполучення штовхача з ротором.

Як наголошувалося раніше, найбільш оптимальною формою траєкторії руху контактної крапки є еліпс. Забезпечення такого характеру коливань досягається шляхом узгодження власних резонансних частот двох взаємозв'язаних резонансних систем: радіальних (подовжніх) коливань п'єзоелемента (первинного генератора коливань); подовжніх та поперечних (на вигин) коливань штовхачів. Зазвичай в двигуні узгодження резонансних частот відбувається шляхом підстроювання частоти задаючого генератора – п'єзоелемента і узгодження резонансних частот штовхача.

Частота f_n подовжніх коливань штовхача (випадок тонкого довгого стрижня) довжиною $l \gg b \gg a$ (де b – ширина, a – товщина) визначається співвідношенням

$$f = \frac{m}{2l} \sqrt{E/\rho}; (l > 10a),$$

де E – модуль Юнга матеріалу штовхача;

ρ – щільність матеріалу штовхача;

m – номер моди подовжніх коливань.

Частота коливань вигину штовхача дорівнює

$$f_i = \frac{\pi a (n + 0,5)^2 \sqrt{\gamma^E / 3\rho}}{4l^2} \sqrt{E/\rho}, \quad (l > 10a),$$

де n – номер моди коливань вигину.

Хоча реально в штовхачі існують нелінійно зв'язані коливання, тобто строго кажучи, немає простої суперпозиції подовжніх коливань та коливань вигину (як незв'язаних) в першому наближенні можна вважати, що $f_n \approx f_i$, звідки виходить вираз для узгодження мод подовжніх коливань і коливань вигину штовхача

$$0,45(n + 0,5)^2 / m \approx l/a, \quad (l > 10a).$$

З останнього співвідношення видно, що умова частотного узгодження розмірів штовхача вимагає використання вищих мод коливань вигину штовхача. Остаточний вибір геометричних співвідношень для штовхачів для реальних конструкцій п'єзоелектричному двигунів підбирається експериментально для різних співвідношень m/n .

Для проектного двигуна підібрано співвідношення $m/n = 1/5$, тому співвідношення геометричних розмірів штовхачів дорівнює

$$l/a \approx 0,45(5 + 0,5)^2 / 1 = 13,6, \quad (l > 10a). \quad (2.6)$$

Слід згадати ще про один елемент, який встановлюється на штовхачі – це «глушники». Вони служать для придушення шкідливих звукових коливань, які можуть виникати при роботі двигуна. Це нарізані шматочки трубки, які натягаються на штовхач. Дані трубки повинні виконуватися з м'якого

еластичного матеріалу, який трохи впливає на резонансні властивості осцилятора. Як приклад в табл. 2.5 представлений характер зміни параметрів осцилятора залежно від матеріалу «глушника».

Таблиця 2.5– Параметри осциляторів

Тип осцилятора	F_r , кГц	I , мА	U , В без трубки	U , В силіконові трубки	U , В ліноксинові трубки
Осцилятор № 46 Двигуна класу ДПК – 46 36 подвійних штовхачів	38,5	100	4	8	15

2.4 Розрахунок параметрів ротора

Ротор п'єзоелектричного двигуна може бути охарактеризований як з погляду фрикційних властивостей матеріалу, так і з погляду його хвильових параметрів. Зупинимось на цьому детальніше.

Матеріал ротора. При взаємодії штовхача з ротором, як згадувалося раніше, присутній ефект заклинювання і ефект розклинювання (просковзування). Тому матеріал ротора повинен бути певної твердості для реалізації вищезгаданих ефектів і отримання відповідного ККД двигуна. Проведені дослідження показали, що при використанні надтвердих матеріалів (наприклад ситаллів), не вдається досягти задовільних параметрів двигуна. Так, при цьому виходить незначний момент просковзування і заклинювання, внаслідок цього двигун розвиває значні швидкості при незначному моменті на валу.

При використанні м'яких матеріалів, наприклад не розжарених сталей, момент заклинювання і просковзування виходить вельми значним, і часто двигун також не може розвинути значних швидкостей і моменту. Проте, для отримання тихохідних високомоментних двигунів з високим моментом самогальмування доцільно використовувати не розжарювані сталі, наприклад сталь 45.

Для двигунів середньої і малої потужності найбільш оптимальним матеріалом ротора є розжарені сталі з рівнем мікротвердості 55...61 HRC, наприклад ХВГ, 25Х13 тощо. Ці сталі забезпечують достатньо високий момент заклинювання, і порівняно малий коефіцієнт просковзування, що дозволяє отримувати достатньо високі ККД двигунів.

Хвильові параметри ротора. При побудові ротора п'єзоелектричного двигуна необхідно пам'ятати, щоб частота власних коливань ротора не співпадала з частотою збудження п'єзоелемента, оскільки це приведе до фрикційного просковзування штовхача і ротора, і як наслідок – до непрацездатності всієї системи. Ротор п'єзоелектричного двигуна є кільцевою оболонкою, в якій можуть виникати різні типи коливань як за своєю природою (подовжні і коливання вигину), так за частотою і амплітудою. Найбільш ефективною формою коливань вигину такої структури є формування стоячої хвилі з чотирма вузлами і чотирма пучностями, форма $n = 2$, рис. 2.11. Зроблені аналізи показують, що частота коливань $F_{\text{виг}}^n$ для форми $n = 2$ часто менше частоти збудження п'єзоелемента F_r , тому вплив резонансного узгодження на хвильові властивості фрикційного контакту двигуна можуть наступити при вищих модах коливань. Тому завжди слід пам'ятати, щоб $F_{\text{виг}}^n \neq F_r$.

Розрахункове співвідношення для частоти $F_{\text{виг}}^n$ такої форми коливань має вигляд

$$F_{\text{виг}}^n = \frac{n(n^2 - 1)}{2\pi\sqrt{1 + n^2}} \sqrt{\frac{EI}{S\rho r^4}} = 3,42 \text{ кГц}, \quad (2.7)$$

де $n = 2$ – номер моди коливань;

I – момент інерції перетину щодо головної осі;

$E = 200 \cdot 10^9$ Па – модуль Юнга (для сталі);

S – площа поперечного розрізу кільця;

$r = 15,25 \cdot 10^{-3}$ м – радіус осьового кільця ротора;

$\rho = 7826$ кг/м³ – щільність сталі (при 20° С).

Момент інерції I може бути розрахований із співвідношення

$$I = bh^3/12 = 5,5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^4, \quad (2.8)$$

де $b = 19,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – висота ротора;

$h = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – товщина ротора.

Площа поперечного розрізу кільця S може бути розрахована із співвідношення

$$S = \pi(R_p^2 - r_p^2) = 143,65 \text{ мм}^2, \quad (2.9)$$

де $R_p = 16 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – зовнішній радіус ротора;

$r_p = 14,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – внутрішній радіус ротора.

Другий тип коливань, який заслуговує уваги, це радіальний тип коливань оболонки, обумовлений подовжніми коливаннями (розтягуванням оболонки). Це так звані коливання з формою $n = 0$, рис. 2.12.



Рисунок 2.11–Форма коливань вигину Рисунок 2.12– Радіальний тип коливань

Розрахункове співвідношення для частоти F_r^0 такої форми коливань має вигляд

$$F_r^0 = \frac{1}{2\pi r} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{V^R}{2\pi r} = 52,8 \text{ кГц}, \quad (2.10)$$

де $V^R = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = 5055 \text{ м/с}$ – швидкість звуку в матеріалі ротора.

Для вищої форми справедливе співвідношення

$$F_r^n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E(1+n^2)}{\rho r^2}}. \quad (2.11)$$

Даний тип коливань, часто, за частотою вельми близький до власної частоти збудження п'єзоелемента, тому вельми акуратно слід відноситися до виконання співвідношення $F_r \neq F_r^n$.

Дані розрахунки частот коливань вигину та радіальних коливань ротора відповідають співвідношенню $F_r \neq F_r^n$ ($F_r = 73 \text{ кГц}$).

Недоліком реверсивного приводу є те, що при збудженні одного з п'єзоелементів, акустичні коливання, проникаючи в ротор, викликають зниження тертя між ротором і штовхачами другого п'єзоелемента, значно знижуючи гальмуючий момент (виявляється ефект зниження тертя при накладенні на фрикційний контакт акустичних коливань), що призводить до зниження основного моменту. На практиці використовуються три типи роторів реверсивного двигуна: цілісний, розрізний і складений.

Цілісний ротор. У багатьох конструкціях може бути використаний цілісний ротор. Це, перш за все малопотужні п'єзоелектричні двигуни, наприклад, на шайбах № 12, № 20. У таких двигунах акустичні коливання незначні, а ротор за рахунок малого діаметру порівняно жорсткий. Тому можна нехтувати проникненням акустичних коливань з однієї частини ротора в іншу.

Розрізний ротор. У тих двигунах, де ефект акустичного просковзування стає значним, наприклад для шайб № 28, № 46 тощо, використовується розрізний ротор. Такий ротор розділений на дві частини поряд тонких прорізів у вигляді кільцевих секторів, які створюють зазвичай три перемички,

розташованих під кутом 120 кут. град. і що задовольняють співвідношенню $R \geq 10\Delta$, де R – радіус ротора, Δ – ширина перемички.

У такому роторі відбувається перетворення радіальних коливань збудженої частини ротора в коливання вигину введених в нього перемичок. Це призводить до багатократного ослаблення коливань в тій частині ротора (не збудженої), яка знаходиться за перемичками. Таке ослаблення збільшує фрикційне тертя між штовхачами незбудженого п'єзoeлемента і ротором і, як наслідок – збільшує момент

Складений ротор. У двигунах великої потужності та з великим діаметром ротора (це двигуни починаючи з п'єзошайби № 46 і більше) рівень акустичних коливань стає значним і використання навіть розрізного ротора стає не ефективним. В цьому випадку використовується складений ротор. Такий ротор складається з двох незалежних частин, жорстко сполучених між собою через ультразвукову ізоляційну прокладку. У такому роторі реалізується практично стовідсоткова акустична розв'язка за рахунок, звукопоглинальної прокладки між частинами ротора.

2.5 Технічні характеристики спроектованого п'єзoeлектричного двигуна

Максимальний момент. Вимірювання максимального моменту п'єзoeлектричного двигуна може здійснюватися в двох режимах:

- в статичному режимі (у режимі руху);
- в динамічному режимі (у режимі гальмування).

У першому випадку при фіксованому робочому моменті на валу п'єзoeлектричного двигуна здійснювалося визначення мінімальної живлячої напруги (потужності), при якій починалося обертання п'єзoeлектричного двигуна.

У другому випадку фіксованою живлячою напругою (потужністю), задавався режим обертання і шляхом зміни робочого моменту, здійснювалося гальмування двигуна до повної зупинки.

Типові залежності представлені на рис. 2.13, близькі до лінійного характеру, що узгоджується з принципом роботи п'єзоелектричного двигуна.



Рисунок 2.13– Статична та динамічна залежності п'єзоелектричного двигуна

Характеристики навантажень. Типові характеристики навантажень двигуна представлені на рис. 2.14 відповідно для нереверсивного і реверсивного двигунів.

Дані характеристики носять лінійний характер і практично не відрізняються до рівня моменту самогальмування, при якому настає різка зупинка валу реверсивного двигуна, обумовлена просковзуванням фрікціонної муфти.

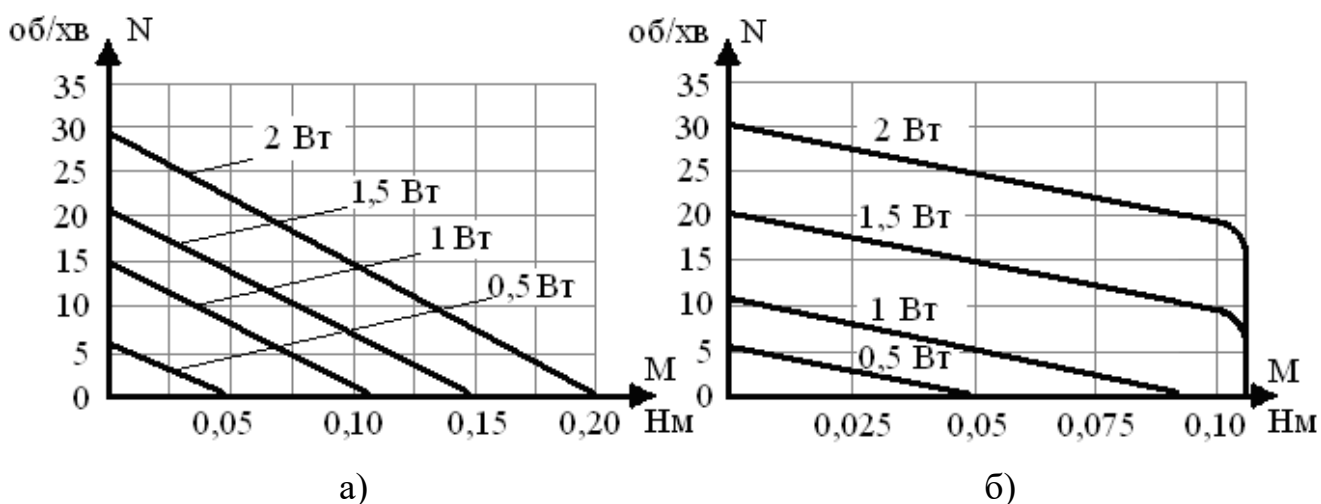


Рисунок 2.14– Типові характеристики навантажень:
а – нереверсивного двигуна; б – реверсивного двигуна

Кутовий дозвіл і динамічні характеристики двигуна. Під кутовим дозволом двигуна розуміється, перш за все, кроковий режим роботи, який заснований на високочастотному «підштовхуванні» ротора за рахунок збудження його короткими імпульсами живлення. Величина кроку при такому способі керування визначається тривалістю імпульсу живлення τ_i (тривалістю збудження).

Таким чином, варіюючи тривалістю імпульсу живлення, тим самим варіюють величиною кутового кроку, а варіюючи частотою проходження цих імпульсів тим самим варіюють інтегральною швидкістю руху валу. У цьому і закладена основна властивість двигуна, а саме – можна варіювати швидкістю в широких межах при постійності робочого моменту на валу.

Під точнісною характеристикою двигуна розуміється залежність величини кутового кроку α_k від тривалості імпульсу збудження τ_i . Дана характеристика для системи знімається в режимі реального навантаження. Типова точнісна характеристика п'єзоелектричного двигуна приведена на рис. 2.15.

На даній характеристиці можна виділити три характерні ділянки. Ділянка 1 – ділянка спокою. Дана ділянка обмежує ту мінімальну тривалість імпульсу збудження, при якій не відбувається руху. Ділянка 2 – нелінійна ділянка характеристики. Вона починається від $\tau_{\min}$ і до тривалості повного розгону τ_p .

Ділянка 3 – лінійна залежність кутового кроку α_k від тривалості керуючого імпульсу τ_i . Кожна з цих ділянок дає уявлення про характер руху валу. Мінімальний крок п'єзоелектричного двигуна, або кутовий дозвіл (порядку однієї кут. с) відповідає тривалості, в декілька періодів збудження осцилятора. З даного рівня тривалості вал переходить із стану спокою в стан руху плавно з розгоном. З характеристики виходить, що повний розгін двигуна здійснюється за час τ_p . Зазвичай ця величина складає декілька десятків періодів збудження осцилятора, і не перевищує однієї мілісекунди. Таким чином, для отримання номінального моменту на валу необхідно забезпечити повний розгін двигуна.

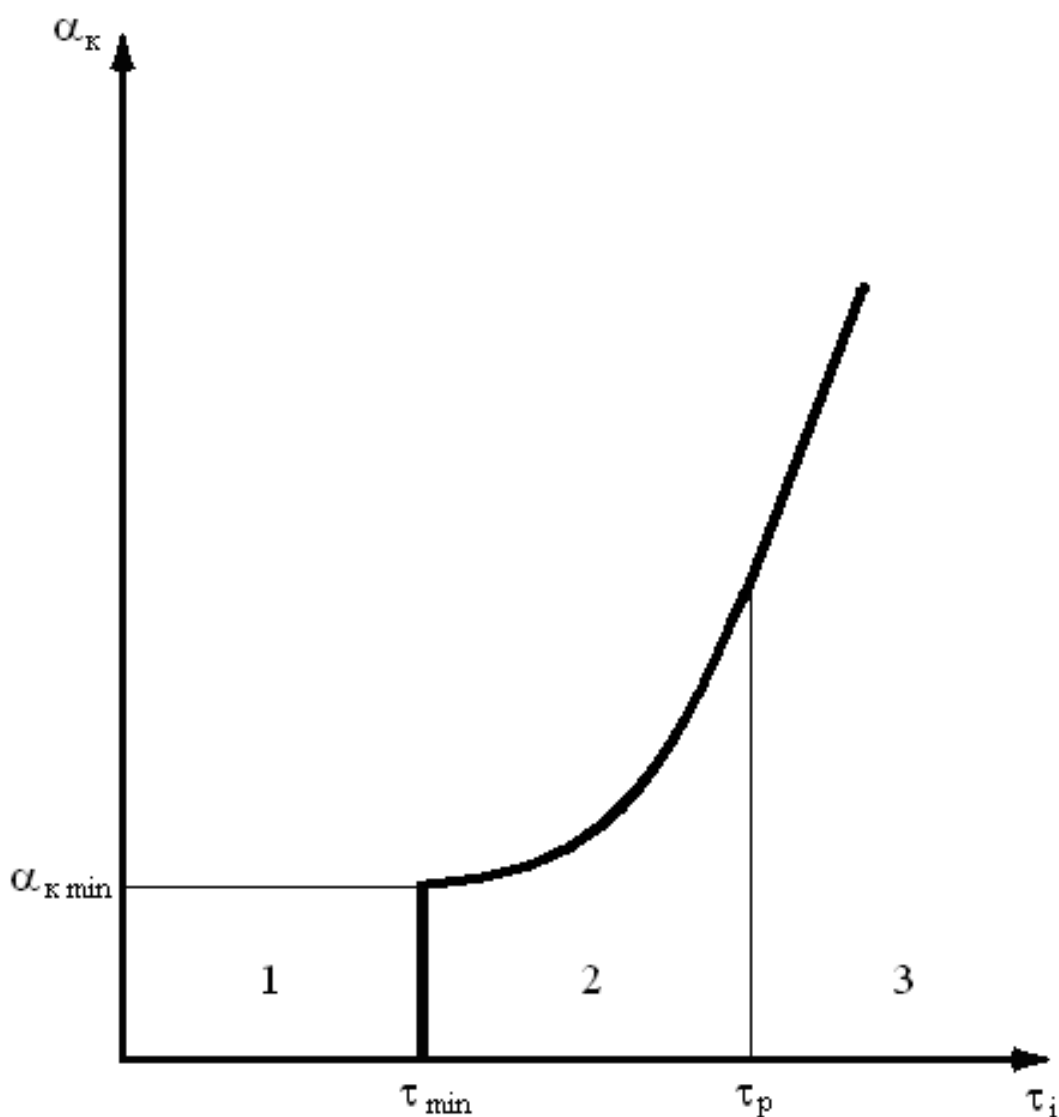


Рисунок 2.15– Залежність кутового кроку α_k від тривалості імпульсу збудження

τ_i

Типова характеристика моменту двигуна від тривалого керуючого імпульсу, представлена на рис. 2.16. Вона має ті ж характерні ділянки. Тривалість часу повного розгону τ_p може значно змінюватись від двигуна до двигуна і визначається, крім інерційного навантаження самого двигуна і робочого елементу, ще і параметрами зовнішніх ланцюгів. Таким чином, час повного розгону двигуна є суперпозиція ряду складових, основним з яких є час переходу осцилятора із стану спокою в стан коливань і трансформації цих коливань в обертальний рух.

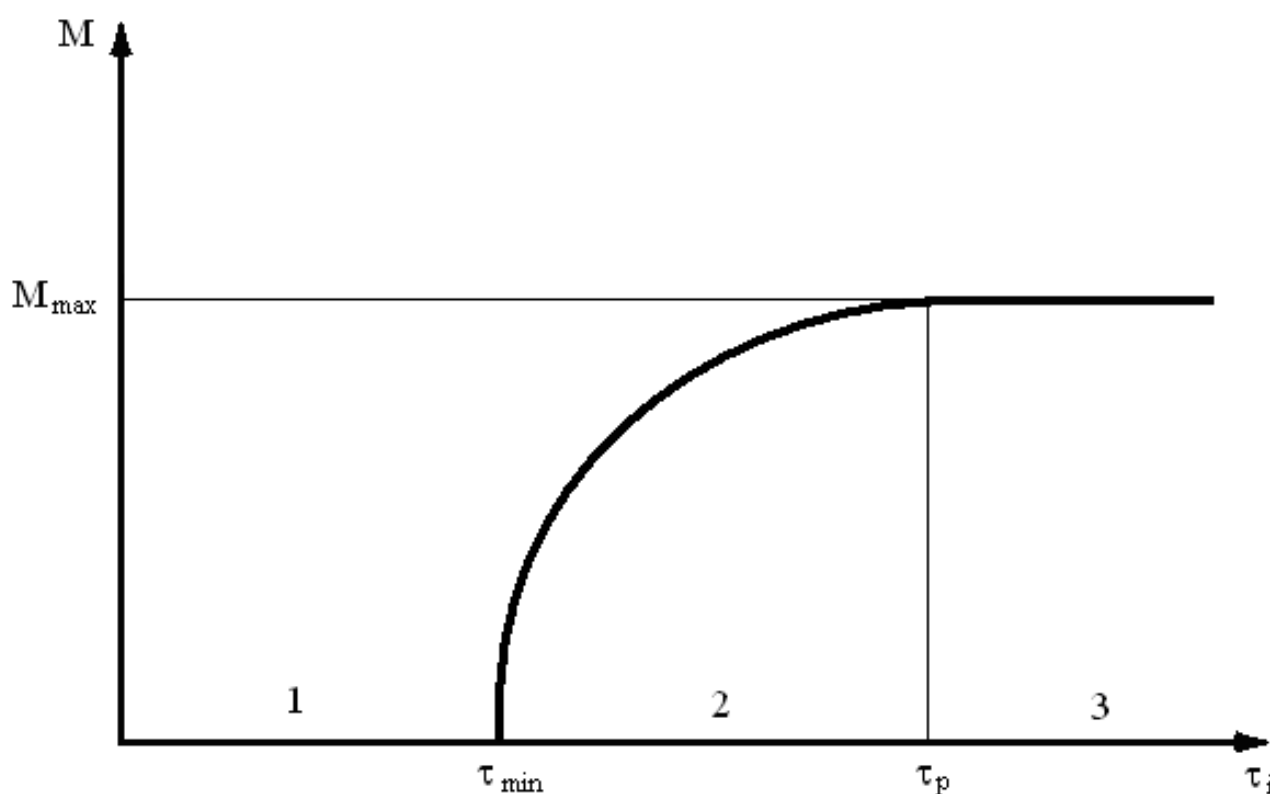


Рисунок 2.16— Залежність моменту M від тривалості імпульсу збудження τ_i

Технічний ресурс двигуна. Принцип ультразвукового обертання, який закладений в основу роботи двигуна, яких визначається високочастотним контактом статора і ротора веде до ультразвукової обробки і зносу штовхачів і ротора. Це обмежує ресурс роботи двигуна. Площа контактуючої поверхні ротора в сотні разів перевищує площу контактуючої поверхні штовхачів, тому зносу, в першу чергу, піддаються штовхачі. Використання стандартних

фрикційно-узгоджених пар дозволяє в теперішній час виходити на технічний ресурс 1 000 000 обертів (зменшення моменту самогальмування в 2 – 3 рази), а використання спеціальних фрикційних пар – 10 000 000 обертів. Відповідно з вищезазначеним, технічний ресурс двигуна визначається загальним напрацюванням обертів $N_{\text{напрац}}$ на відмову і розраховується із співвідношення

$$T = \frac{N_{\text{напрац}}}{\omega_{\text{сер}}}, \quad (2.12)$$

де T – час напрацювання на відмову;

$\omega_{\text{сер}}$ – середня швидкість обертання двигуна.

З представлених даних виходить, що при середній швидкості обертання $\omega_{\text{сер}} \approx 1$ об/хв (6 град/с) і загальному напрацюванню на відмову $N_{\text{напрац}} \approx 1\,000\,000$ об, технічний ресурс складатиме приблизно 17 000 годин (два роки безперервного обертання), що значно перевищує ресурс сучасних двигунів.

Температурна стабільність. Залежність параметрів двигуна від зміни температури визначається зміною п'єзомодуля d_{31} п'єзоелемента, рис. 2.17.а, а також зміною резонансних характеристик двигуна, рис. 2.17.б. Резонансні залежності знімалися по схемі, представлений на рис. 2.4. З представлених даних виходить, що при зниженні температури погіршується добротність двигуна (резонансна крива струму розширюється, зменшується по амплітуді і зміщується по частоті), при цьому різночастотність електричного і механічного резонансу стає більш істотною. При цьому блок живлення п'єзоелектричного двигуна, настроєний в нормальних умовах, може виходити із зони захоплення, що спричиняє за собою відмову двигуна. Тому двигуни, що працюють при знижених температурах повинні наструюватися при відповідній мінусовій температурі.

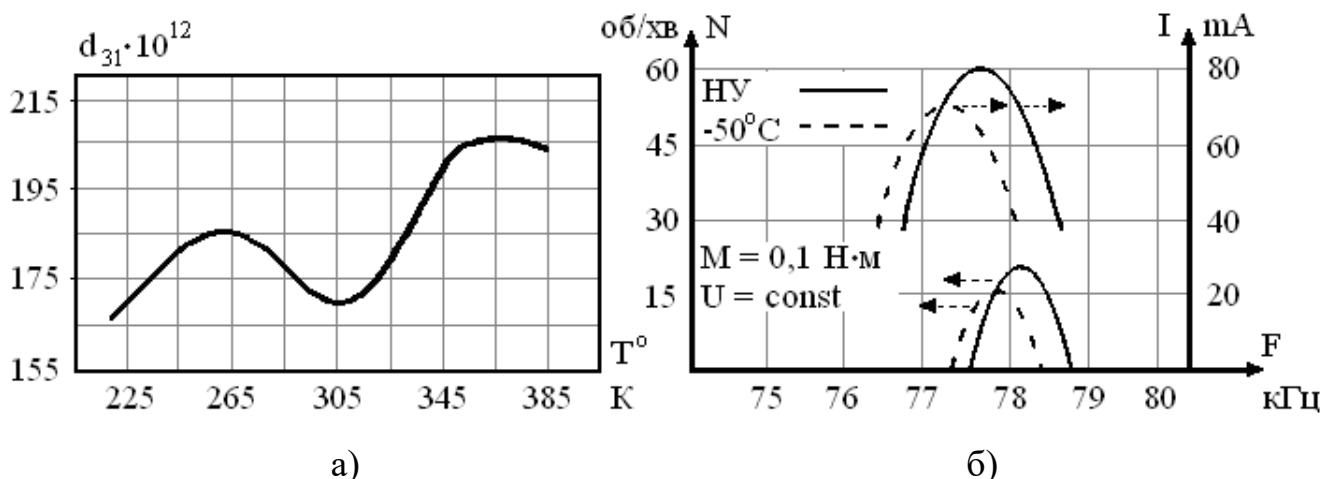


Рисунок 2.17– Залежності: а – п’єзомодуля d_{31} від температури; б – резонансних характеристик від температури

На рис. 2.18 представлена типова залежність швидкості обертання двигуна при фіксованому моменті навантаження на валу M_H від температури. Дана характеристика носить лінійний характер, і визначається в першу чергу зміною резонансних властивостей двигуна (п’єзомодуль зменшується на 15-20%). Загалом можна констатувати, що зниження швидкості обертання, при температурі -50°C в порівнянні з нормальними умовами відбувається в середньому в 2,5....3,0 рази. Тому для стабілізації швидкості обертання необхідно вводити спеціальні системи корекції за температурою.

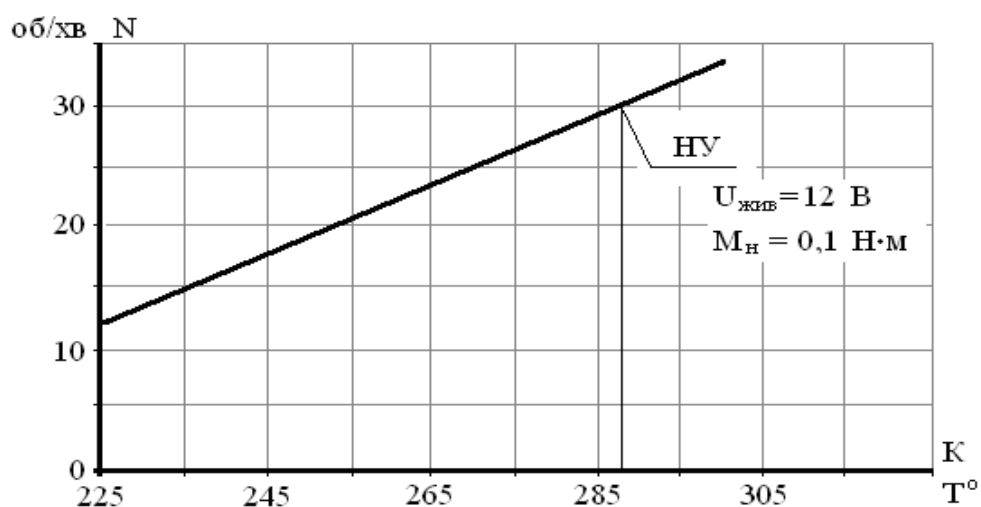


Рисунок 2.18–Типова залежність швидкості обертання п’єзоелектричного двигуна від температури

Механічна стабільність. Найменше ударостійким і вібростійким елементом в двигуні є п'єзоелемент. Захист п'єзоелемента в осьовому напрямі забезпечується кільцями, що демпферують, з фторопласту і гуми, які одночасно виконують функції акустичної розв'язки осцилятора від основи двигуна, рис. 1.3.

Захист п'єзоелементів в радіальному напрямі здійснюється безпосередньо хвильовою оболонкою і пружними демпферними властивостями штовхачів, встановлених на ній.

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

3.1 Розробка принципової схеми системи керування

Слідкувальна система, на основі п'єзоелектричного двигуна. Розглянемо побудову слідкувальної системи на основі використання п'єзоелектричного двигуна з погляду його основної якості, а саме, можливості зміни режиму роботи від безперервного обертання до крокового переміщення. В цьому випадку зміна величини кроку проводиться за рахунок зміни тривалості τ_i керованого імпульсу живлення залежно від величини амплітуди вхідного сигналу розузгодження. Величина цього кроку може змінюватися в значних межах (від сотень кутових градусів до одиниць кутових секунд). Реверсивний п'єзоелектричний двигун в таких системах розглядається як два незалежні двигуни на загальному валу, кожен з яких незалежно від іншого здійснює обертання в свою сторону.

На рис. 3.1 представлена блок-схема такої системи.

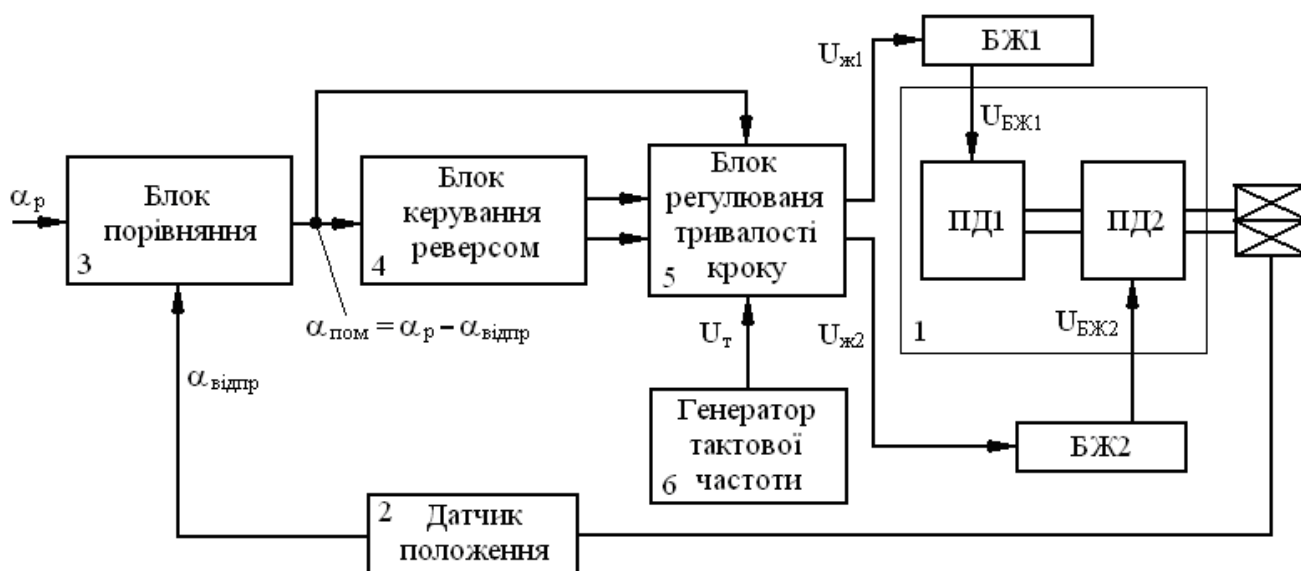


Рисунок 3.1– Блок-схема слідкувальної системи на основі п'єзоелектричного двигуна

Система містить: п'єзоелектричний двигун 1 реверсивного обертання, представлений у вигляді двох незалежних п'єзоелектричних двигунів однонаправленого обертання ПД1 і ПД2 із загальним валом і їх блоками живлення БП1 і БП2 відповідно; датчик зворотного зв'язку 2 (наприклад оптичний датчик кута); блок порівняння 3; блок управління реверсом 4; блок регулювання тривалості кроку 5; генератор тактової частоти 6. Схема працює таким чином. Під час вступу сигналу розузгодження α_p в блок порівняння 3, на виході останнього формується сигнал помилки $\alpha_{\text{пом}} = \alpha_p - \alpha_{\text{відпр}}$ (де $\alpha_{\text{відпр}}$ – сигнал відпрацювання). Полярність сигналу, що поступає на блок 4, запускає відповідне плече двигуна. Поточна абсолютна величина сигналу $\alpha_{\text{пом}}$ (визначена у момент тактових імпульсів U_T), поступає на блок 5 і формує тривалість імпульсів живлення U_i , відповідного плеча п'єзоелектричного двигуна, тобто тривалість імпульсу живлення τ_i є функція амплітуди сигналу $\alpha_{\text{пом}}$, $\tau_i = f(\alpha_{\text{пом}})$.

Таким чином, на виході блоку 5 формується імпульс живлення, який на виході БЖ формує сигнал збудження $U_{\text{БЖ}}$, а двигун формує сигнал відпрацювання $\alpha_{\text{відпр}}$. При відпрацюванні сигналу розузгодження, тривалість $U_{\text{Ж}}$ зменшується до нуля, тобто $\tau_{i1} > \tau_{i2} > \dots > \tau_{in}$. П'єзоелектричний двигун в такій системі дозволяє здійснювати плавний перехід від режиму безперервного обертання до крокового. При цьому точність відробітку визначатиметься мінімальним кутовим кроком для даної конструкції п'єзоелектричного двигуна і в кращому разі складати одиниці кут. с, а в деяких конструкціях – і десяті долі кут.с.

Система керування п'єзоприводом мікроманіпулятора PSF-3. Основою маніпулятора є рухома прецизійна каретка, зазвичай в підшипникових направляючих з прецизійною гвинт-гайкою [8-11]. Обертання мікромеханічного гвинта здійснюється зазвичай двигуном постійного струму, або в кращому разі – кроковим двигуном. Реальний дозвіл, що отримується на двигуні постійного струму обчислюється десятками-сотнями мікрон, а вібраційний шум редуктора часто вельми обмежує його використання.

Величина одиничного мікропереміщення при використанні крокового двигуна обмежена кроком двигуна. Подальше зменшення мікропереміщень в такому, пристрої може бути досягнуто установкою редукторів, що знижують, що призводить до додаткових люфтів, ускладнення конструкції, енерго- і трудомісткості, а також до обмеження можливості тимчасового угруповання мікропереміщень, що визначає швидкість мікропередачі. При цьому мікропереміщення однозначно зав'язане на швидкість і навпаки. Тому актуальним стало завдання забезпечення можливості одночасного формування малих одиничних мікропереміщень і їх угруповання за швидкістю (часом). На рис. 3.2 представлена схема маніпулятора на основі п'єзоелектричного двигуна, а на рис. 3.3 – епюри напруги живлення, що пояснюють його роботу. Пристрій містить рухома каретку 1 із пружинами, що притискують 3, розташовану в підшипникових направляючих 2, сполучену з мікрометричною гайкою 4 та гвинтом 5.

Гвинт 5 сполучається через рухома муфту 6 з валом 7 п'єзопривода 8, що включає ротор 9, осцилятор 10, встановлений на валу, і осцилятор 11, встановлений на корпусі 13, штовхачі 12.

Система керування включає блок живлення двигуна (генератор високочастотних імпульсів збудження п'єзоелементів) 16, керовані ключі 15, підсилювачі драйвера 14, блоки формування 17 частоти пачок імпульсів збудження п'єзоелементів, блоки формування 18 тривалості пачок імпульсів збудження п'єзоелементів, блоки формування 20 одиничної пачки імпульсів збудження п'єзоелементів, 19 – резистивний джойстик. Робота пристрою здійснюється таким чином. Навіть за наявності постійної живлячої напруги на виході блоків 16 (епюра А, рис. 3.3), сигнал в такій формі не поступає на блоки 14.

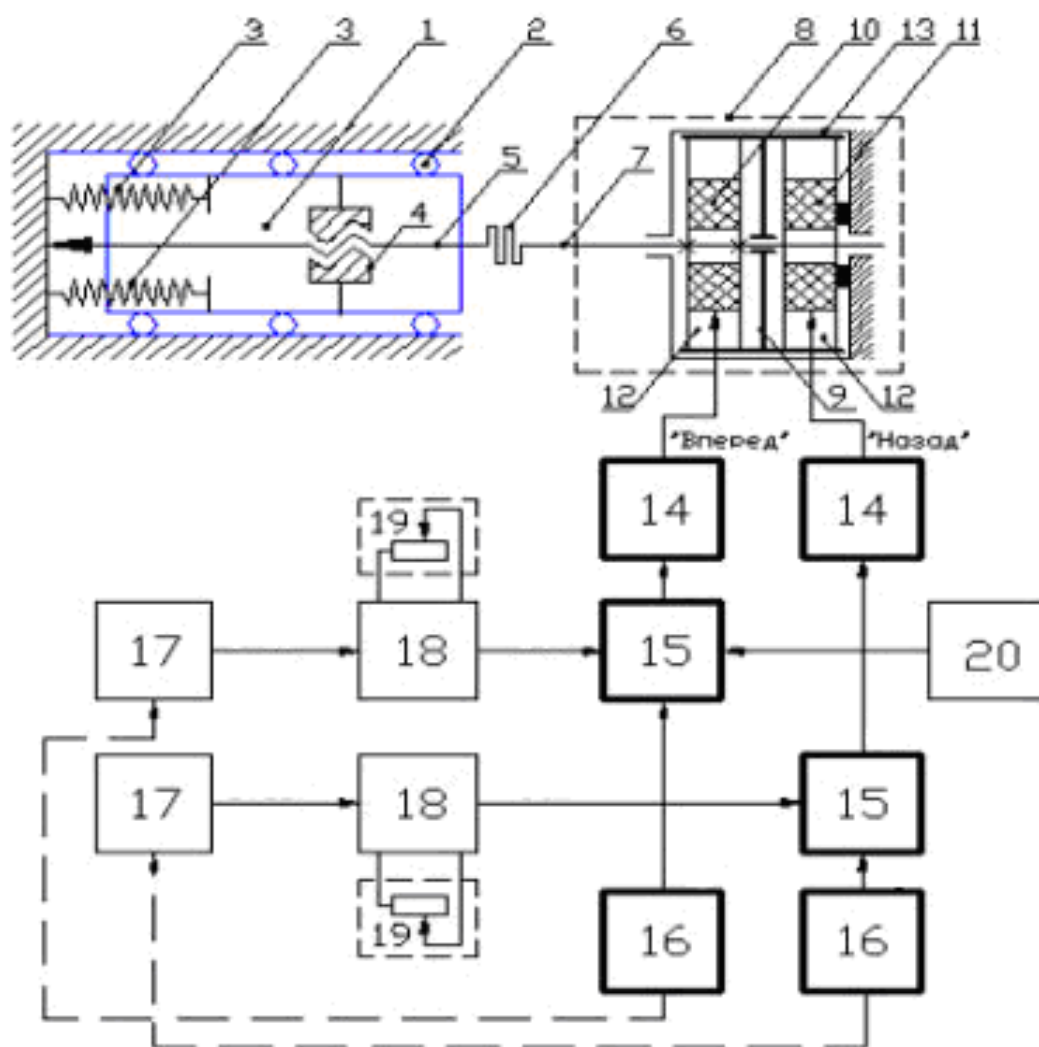


Рисунок 3.2–Схема керування маніпулятором

Форму імпульсу живлення формують ключі 15, які управляються генераторами частоти 17, що формує частоту імпульсів керування $F_{\text{сл}}$. (епюра Б). У блоках 18 формується тривалість імпульсів керування τ_i відповідно до частоти $F_{\text{сл}}$. Сформований сигнал керування (епюра В) поступає на ключі, що управляє, 15, з виходу яких йдуть імпульси живлення, відповідні частоті і тривалості імпульсів керування (епюра Г). У блоці 14 здійснюється перетворення імпульсів живлення в пачки імпульсів збудження п'єзоелементів з напругою $U_{\text{ПЕ}}$, частотою $F_{\text{г}}$, і тривалістю τ_i (епюра Д). Крок п'єзопривода або кут розвороту валу пропорційний тривалості імпульсів управління τ_i (епюра Е). Кутове обертання гвинтом 5 перетвориться в поступальну ходу, яка передається каретці 1.

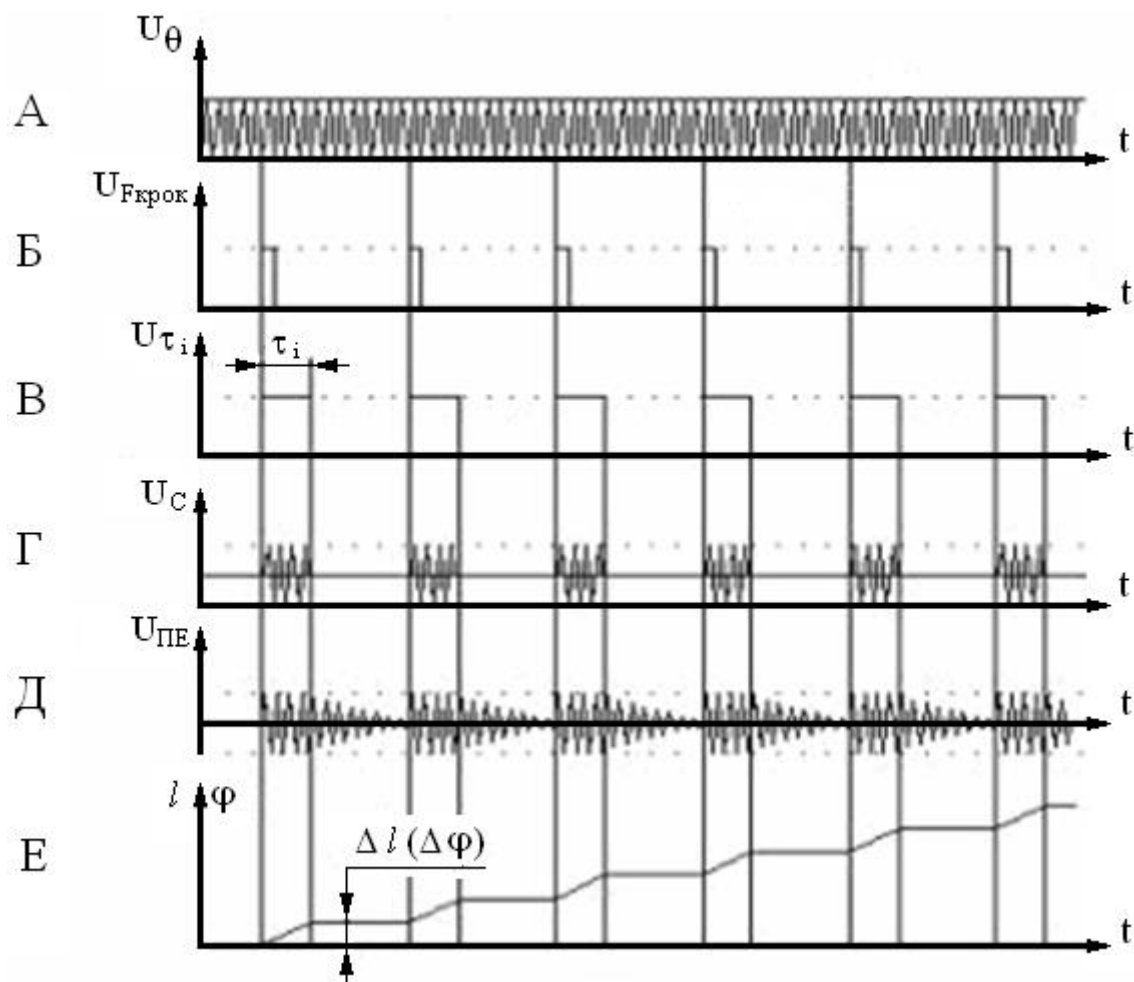


Рисунок 3.3– Епюри напруг, які пояснюють роботу маніпулятора

Таким чином, одиничне мікропереміщення каретки Δl (епюра Е) визначатиметься кроком п'єзопривода і передавальним відношенням гвинт-гайки. Швидкість переміщення при заданій мікропередачі визначатиметься частотою проходження імпульсів керування $F_{сл}$. Використання такого пристрою за рахунок одночасного формування мікроподач і їх угруповання в часі дозволило значно поліпшити характеристики існуючих маніпуляторів.

Драйвер RM. Драйвер RM є двоканальний перетворювач напруги 12В в змінну напругу з частотою збудження п'єзоелектричного осцилятора і подвійною амплітудою 220...250В (рис. 3.4). Підстроювання частоти під відповідний осцилятор здійснюється за допомогою резисторів R2, R4 (для RM-20 «75...78 кГц»). Підключення двигуна здійснюється через роз'єм XP2. Керування двигуном здійснюється в ТТЛ – рівнях по двох лініях роз'єму XP1.

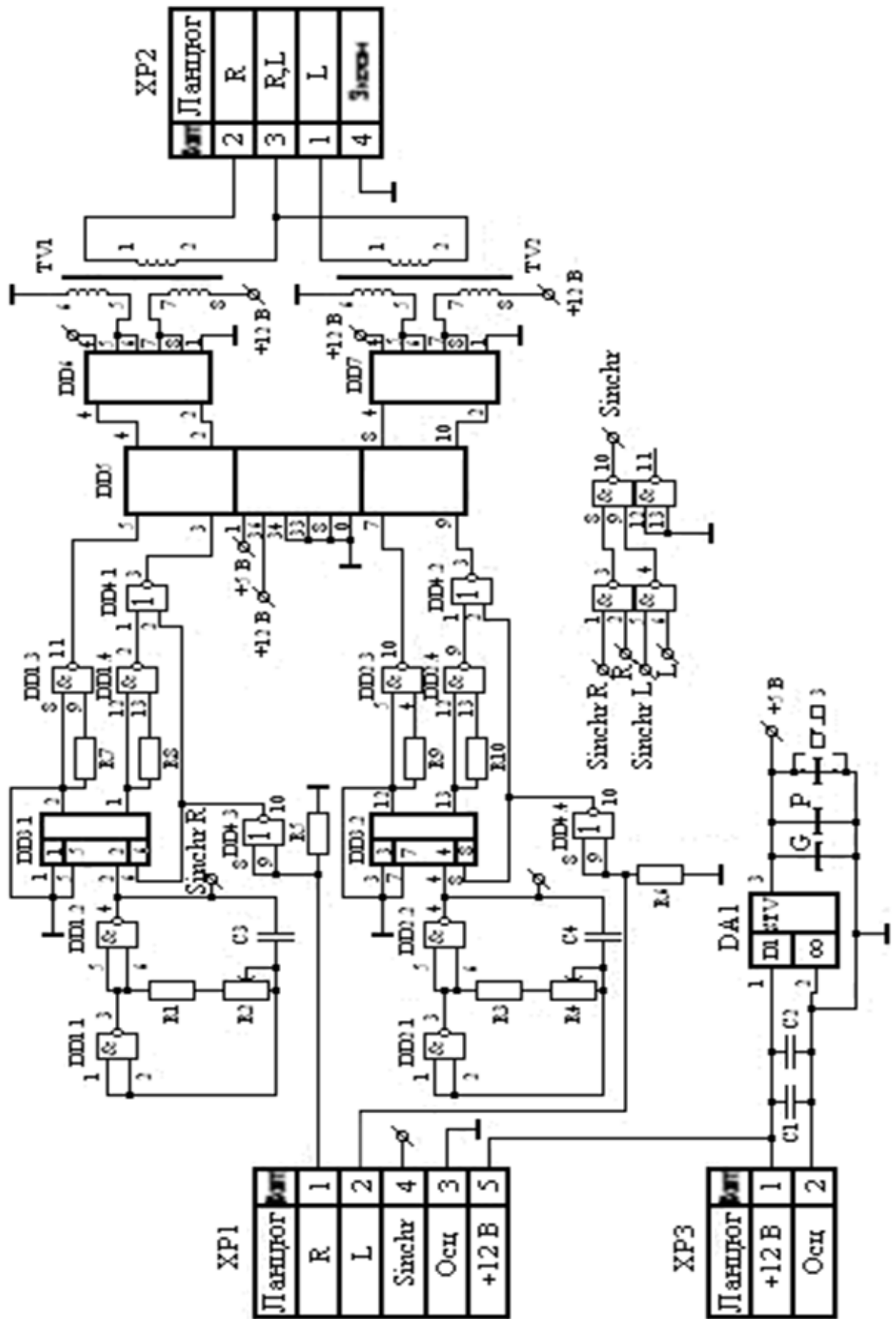


Рисунок 3.4–Принципова схема драйвера RM

При подачі сигналу логічної «1» на контакт 1 «R» здійснюється обертання валу за годинниковою стрілкою. При подачі сигналу логічної «1» на контакт 2 «L» – проти годинникової стрілки. Одночасна присутність сигналів логічної «1» на контактах 1 і 2 неприпустимо. При керуванні двигуном в режимі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) на частоті, близькій до 2 кГц, необхідно імпульси ШІМ синхронізувати з імпульсами частоти збудження двигуна, які подаються на контакт 4 «Sinchr» роз'єму XP1, [8-11].

3.2 Дослідження стійкості системи керування

Для системи керування п'єзоелектричним приводом знайдена безліч положень рівноваги при подовжньому або поперечному п'єзоефекті. Визначені умови стійкості системи керування п'єзоелектричним приводом при подовжньому і поперечному п'єзоефектах для детермінованих і випадкових дій. На відміну від системи керування з однозначною нелінійністю, для якої стійкість положення рівноваги досліджується за допомогою критерію Попова, стійкість системи керування п'єзоелектричним приводом з гістерезисною нелінійністю і безліччю положень рівноваги оцінюється із застосуванням критерію стійкості Якубовича, [8,9].

Статичні і динамічні характеристики п'єзоелектричного приводу як об'єкту керування. Динамічні характеристики і передавальні функції п'єзоперетворювача для нано- і мікропереміщень (рис. 3.6) розраховуються на основі сумісного рішення хвильового рівняння, рівняння п'єзоефекту при нульових початкових і відповідних межових умов. При розрахунку деформації п'єзоперетворювачів використовується хвильове рівняння, що описує розповсюдження хвилі в довгій лінії зі загасанням без викривлень,

$$\frac{\left[1/(c^E)^2\right]\partial^2\xi(x,t)}{\partial t^2} + \frac{(2\alpha/c^E)\partial\xi(x,t)}{\partial t^2} + \alpha^2\partial\xi(x,t) = \frac{\partial^2\xi(x,t)}{\partial x^2}, \quad (3.1)$$

де $\xi(x, t)$ – зсув перерізу п'єзоперетворювача;

x – координата;

t – час;

c – швидкість звуку при постійній напруженості електричного поля $E = \text{const}$ в п'єзоперетворювачі;

α – коефіцієнт загасання хвилі, що враховує загасання коливань через розсіювання енергії на теплові втрати при розповсюдженні хвилі в п'єзоперетворювачі.

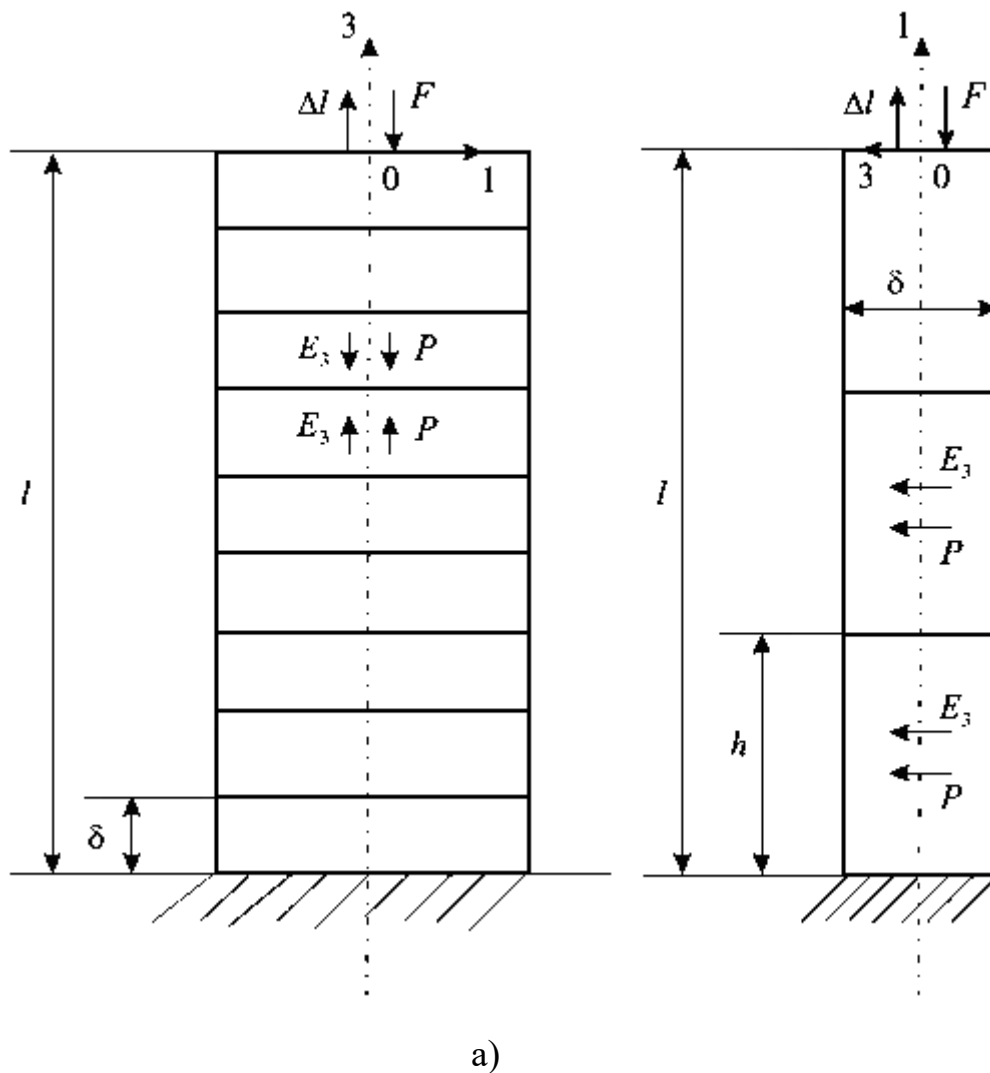


Рисунок 3.6–Складений п'єзоперетворювач при подовжньому (а) та поперечному (б) п'єзоефекті

Рівняння зворотного подовжнього п'єзоефекту при керуванні п'єзоперетворювача за напругою

$$S_3 = d_{33}E_3(t) + s_{33}^E T_3(x, t), \quad (3.2)$$

де $S_3 = \frac{\partial \xi(x, t)}{\partial x}$ – відносне переміщення перерізу п'єзоперетворювача (рис. 3.6,а) по осі 3;

d_{33} – п'єзомодуль при подовжньому п'єзоефекті;

$E_3(t) = \frac{U(t)}{\delta}$ – напруженість електричного поля по осі 3;

$U(t)$ – напруга на електроді п'єзопластини;

s_{33}^E – пружня податливість по осі 3 при $E = \text{const}$;

$T_3(x, t)$ – механічна напруга по осі 3;

δ – товщина п'єзопластин;

P – вектор поляризації.

Для складеного п'єзоперетворювача із закріпленим торцем при подовжньому п'єзоефекті і інерційному навантаженні для $x = 0$ маємо $\xi(x, t) = 0$ і для $x = l = n\delta$, де l – довжина п'єзоперетворювача; n – число п'єзопластин, отримуємо рівняння сил, що діють на торці п'єзоперетворювача, у вигляді

$$T_3 S_0 = \frac{-M \partial^2 \xi(x, t)}{\partial t^2}, \quad (3.3)$$

де M – маса навантаження, яка переміщується.

Введемо перетворення Лапласа

$$\Xi(x, p) = L\{\xi(x, t)\} = \int_0^\infty \xi(x, t) e^{-pt} dt, \quad (3.4)$$

де p – параметр перетворення Лапласа.

Відповідно, при $x = l$ перетворення Лапласа виразу переміщення торця п'єзоперетворювача має вигляд

$$\Xi(p) = L\{\xi(t)\} = \int_0^{\infty} \xi(t) e^{-pt} dt \quad (3.5)$$

В наслідок перетворення хвильового рівняння (3.1) отримаємо лінійне звичайне диференціальне рівняння другого порядку з параметром p у вигляді

$$\frac{d^2 \Xi(x, p)}{dx^2} - \left[\frac{1}{(c^E)^2} p^2 + \frac{2\alpha}{c^E} p + \alpha^2 \right] \Xi(x, p) = 0 \quad (3.6)$$

Отже, з рівняння зворотного п'єзоефекту (3.2) з урахуванням длях на торець п'єзоперетворювача сил (3.3) отримуємо

$$\left. \frac{d\Xi(x, p)}{dx} \right|_{x=l} = d_{33} E_3(p) - \frac{s_{33}^E M p^2 \Xi(p)}{S_0}, \quad (3.7)$$

де $\Xi(p)$, $\Xi(x, p)$ – перетворення Лапласа перевіщення торця п'єзоперетворювача та переміщення розрізу п'єзоперетворювача при нульових умовах. Враховуючи, що один торець п'єзоперетворювача жорстко закріплений при $x = 0$, отримаємо вирази

$$\Xi(x, p) = \frac{\Xi(p) \operatorname{sh}(x\gamma)}{\operatorname{sh}(l\gamma)}, \quad \left. \frac{d\Xi(x, p)}{dx} \right|_{x=l} = \frac{\Xi(p) \gamma}{\operatorname{th}(l\gamma)}, \quad \gamma = \frac{p}{c^E} + \alpha.$$

Отже, отримуємо вираз для складеного п'єзоперетворювача, закріпленого одним торцем, при подовжньому п'єзоефекті і інерційному навантаженню

$$\frac{\Xi(p) \gamma}{\operatorname{th}(l\gamma)} + \frac{\Xi(p) s_{33}^E M p^2}{S_0} = d_{33} E_3(p) \quad (3.8)$$

З виразу (3.8) визначасмо передавальну функцію складеного п'єзоперетворювача у вигляді

$$W_{21}(p) = \frac{\Xi(p)}{E_3(p)} = \frac{d_{33}}{s_{33}^E M p^2 / S_0 + \gamma / \text{th}(l\gamma)}. \quad (3.9)$$

З урахуванням $m(c^E)^2 / l = S_0 / s_{33}^E$, отримуємо передавальні функції у вигляді

$$W_{21}(p) = \frac{\Xi(p)}{E_3(p)} = \frac{d_{33} l \text{th}(l\gamma)}{M l^2 \text{th}(l\gamma) p^2 / m(c^E)^2 + l\gamma};$$

$$W_{23}(p) = \frac{\Xi(p)}{F(p)} = - \frac{l^2 \text{th}(l\gamma) / (m(c^E)^2)}{M l^2 \text{th}(l\gamma) p^2 / m(c^E)^2 + l\gamma}, \quad (3.10)$$

де $E_3(p)$, $F(p)$ – відповідно перетворення Лапласа напруженості електричного поля у складеному п'єзоперетворювачі та сили при нульових, початкових умовах;

m – маса складеного п'єзоперетворювача.

Якщо за вхідну величину прийняти зображення Лапласа напруги джерела живлення $U_0(p)$, то

$$W_1(p) = \frac{\Xi(p)}{U_0(p)} = - \frac{l^2 \text{th}(l\gamma) / (m(c^E)^2)}{(T_a p + 1) \left[M l^2 \text{th}(l\gamma) p^2 / m(c^E)^2 + l\gamma \right]};$$

$$T_a = R n C_0, \quad (3.11)$$

де T_a , R , C_0 – відповідно постійна часу аперіодичної ланки, опір узгоджених ланцюгів та ємність п'єзопластини у складеному п'єзоперетворювачі.

Рівняння зворотного поперечного п'єзоефекту при керуванні п'єзоперетворювача за напругою має вигляд

$$S_1 = d_{31}E_3(t) + s_{11}^E T_1(x, t), \quad (3.12)$$

де $S_1 = \frac{\partial \xi(x, t)}{\partial x}$ – відносне зміщення розрізу п'єзоперетворювача (рис. 3.6,

б) по осі 1;

d_{31} – п'єзомодуль при поперечному п'єзоефекті;

$E_3(t) = \frac{U(t)}{\delta}$ – напруженість електричного поля по осі 3;

s_{11}^E – пружня податливість по осі 1 при $E = \text{const}$;

$T_1(x, t)$ – механічна напруженість по осі 1;

$l = nh$ – довжина складеного п'єзоперетворювача;

h – висота п'єзопластини.

При поперечному п'єзоефекті, якщо одна з граней складеного п'єзоперетворювача (рис. 3.6, б) жорстко закріплена при $x = 0$, отримуємо передавальну функцію

$$W_{21}(p) = \frac{\Xi(p)}{E_3(p)} = \frac{d_{31}lth(l\gamma)}{Ml^2th(l\gamma)p^2 / m(c^E)^2 + l\gamma}. \quad (3.13)$$

Розглянемо роботу п'єзоперетворювача для жорстко закріпленої однієї грані п'єзоперетворювача при $M / m \gg 1$. Наведемо вирази (3.13) для $W_{21}(p)$ та $W_{23}(p)$ в наступному зручному для перетворення вигляді

$$W_{21}(p) = \frac{\Xi(p)}{E_3(p)} = \frac{d_{33}l}{Ml^2 p^2 / m(c^E)^2 + l\gamma \text{cth}(l\gamma)};$$

$$W_{23}(p) = \frac{\Xi(p)}{F(p)} = -\frac{l^2 / \left(m(c^E)^2\right)}{Ml^2 p^2 / m(c^E)^2 + l\gamma \text{cth}(l\gamma)}.$$
(3.14)

Використовуючи апроксимацію гіперболічного котангенса двома членами степеневого ряду, отримуємо з (3.14) у діапазоні частот $0 < \omega < 0,01c^E/l$ наступні вирази

$$W_{21}(p) = \frac{\Xi(p)}{E_3(p)} = -\frac{d_{33}l}{T_t^2 p^2 + 2T_t \xi_t p + 1};$$

$$W_{23}(p) = \frac{\Xi(p)}{F(p)} = -\frac{s_{33}^E l / S_0}{T_t^2 p^2 + 2T_t \xi_t p + 1};$$
(3.15)

$$W_1(p) = \frac{\Xi(p)}{U_0(p)} = \frac{nd_{33}}{(T_a p + 1)(T_t^2 p^2 + 2T_t \xi_t p + 1)};$$

$$T_t = l\sqrt{M/m}/c^E; \quad \xi_t = \alpha l\sqrt{m/M}/3,$$
(3.16)

де T_t , ξ_t – відповідно постійна часу та коефіцієнт загасання коливальної ланки для складеного п'єзоперетворювача при подовжньому п'єзоефекті.

Аналогічно отримуємо передавальну функцію складеного п'єзоперетворювача, який закріплений однією гранню, при $M/m \gg 1$ та поперечному п'єзоефекті у вигляді

$$W_{21}(p) = \frac{\Xi(p)}{E_3(p)} = -\frac{nd_{31}h}{T_t^2 p^2 + 2T_t \xi_t p + 1};$$

$$T_t = nh\sqrt{M/m}/c^E; \quad \xi_t = \alpha nh\sqrt{m/M}/3, \quad (3.17)$$

де T_t , ξ_t – відповідно постійна часу та коефіцієнт загасання коливальної ланки для складеного п'єзоперетворювача при поперечному п'єзоефекті.

Таким чином при закріпленому торці п'єзоперетворювача при подовжньому п'єзоефекті та пружноінерційному навантаженні при $x = l = n\delta$ маємо рівняння сил, що діють на торці п'єзоперетворювача, у вигляді

$$T_3 S_0 = -M \partial^2 \xi(x, t) / \partial t^2 - (C_a + C_e) \xi(x, t), \quad (3.18)$$

де M – маса, що переміщується;

C_a , C_e , C_c – жорсткості елемента, який армує, пружного навантаження та складеного п'єзоперетворювача.

З рівняння зворотного подовжнього п'єзоефекта (3.2) з урахуванням длах на торець п'єзоперетворювача сил отримуємо

$$\left. \frac{d\Xi(x, p)}{dx} \right|_{x=l} = d_{33} E_3(p) - \frac{s_{33}^E M p^2 \Xi(p)}{S_0} - \frac{s_{33}^E (C_a + C_e) \Xi(p)}{S_0}. \quad (3.19)$$

Отже, отримуємо вираз для п'єзоперетворювача, закріпленого одним торцем, при подовжньому п'єзоефекті та пружноінерційному навантаженні

$$\frac{\Xi(p)\gamma}{\text{th}(l\gamma)} + \frac{\Xi(p)s_{33}^E M p^2}{S_0} + \frac{\Xi(p)s_{33}^E (C_a + C_e)}{S_0} = d_{33} E_3(p). \quad (3.20)$$

Означимо $C_y = S_0 / (s_{33}^E l)$ – жорсткість складеного п'єзоперетворювача при подовжньому п'єзоефекті. Тоді з урахуванням (3.20) передавальні функції

п'єзоперетворювача, закріпленого одним торцем, при подовжньому п'єзоефекті та пружноінерційному навантаженні приймають вигляд

$$W_{21}(p) = \frac{\Xi(p)}{E_3(p)} = \frac{d_{33}l}{Mp^2/C_e + l\gamma \text{cth}(l\gamma) + (C_a + C_e)/C_c};$$

$$W_2(p) = \frac{\Xi(p)}{U(p)} = \frac{d_{33}n}{Mp^2/C_e + l\gamma \text{cth}(l\gamma) + (C_a + C_e)/C_c}, \quad (3.21)$$

де $\Xi(p)$ – перетворення Лапласа переміщення складеного п'єзоперетворювача по осі 3 та $U(p)$ – перетворення Лапласа за напругою на обкладинках складеного п'єзоперетворювача при нульових початкових умовах.

Отже, отримуємо вираз для статичного переміщення $\xi(l, \infty)$ армованого складеного п'єзоперетворювача (рис. 3.6, а) в установленому режимі при подачі напруги $U(t) = U_{\max}1(t)$ при пружноінерційному навантаженні, де $U_{\max}$ – максимальна напруга, у наступному вигляді

$$\xi(l, \infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} \xi(l, t) = \lim_{p \rightarrow 0} pW_2(p)U_{\max}/p. \quad (3.22)$$

Звідки виходить

$$\xi(l, \infty) = \lim_{\substack{p \rightarrow 0 \\ a \rightarrow 0}} \frac{d_{33}nU_{\max}}{l(p/c^E + \alpha)/\text{th}[l(p/c^E + \alpha)] + (C_a + C_e)/C_c}, \quad (3.23)$$

в остаточному вигляді отримуємо

$$\xi(l, \infty) = \frac{d_{33}nU_{\max}}{1 + (C_a + C_e)/C_c}. \quad (3.24)$$

Таким чином, передавальна функція $W_2(p)$ складеного п'єзоперетворювача

на робочих частотах при подовжньому п'єзоефекті та пружноінерційному навантаженні у діапазоні робочих частот $0 < \omega < 0,01c^E/l$ записується у вигляді

$$W_2(p) = \frac{\Xi(p)}{U(p)} = \frac{d_{33}nU_{\max}/[1+(C_a+C_e)/C_c]}{T_t^2 p^2 + 2T_t\xi_t p + 1},$$

$$T_t = \sqrt{M/(C_a + C_e + C_c)};$$

$$\xi_t = \frac{\alpha l^2 C_c}{3c^E \sqrt{M/(C_a + C_e + C_c)}}, \quad (3.25)$$

де T_t , ξ_t – відповідно постійна часу та коефіцієнт загасання коливальної ланки для складеного п'єзоперетворювача при подовжньому п'єзоефекті та пружноінерційному навантаженні.

Стійкість системи керування п'єзоелектричним приводом. У системах автоматичного керування п'єзоелектричним приводом використовуються пристрій, що узгоджує, послідовний і паралельний пристрої, що коректують, посилювач потужності, який забезпечує необхідні напругу і струм для живлення п'єзоперетворювача, датчики деформації, швидкості, прискорення, напруги, заряду, струму, механічної напруги п'єзоперетворювача. Для аналізу стійкості систем керування п'єзоелектричним приводом з гістерезисною нелінійністю використовується узагальнення, при якій в системі керування ланки системи трансформуються до двох – гістерезисної ланки нелінійної частини і ланки лінійної частини системи керування (рис. 3.7).

Дослідження абсолютної стійкості системи керування деформацією п'єзоперетворювача для нано- і мікропереміщень при детермінованих діях проведемо на основі критерію Якубовича, який являє собою розвитком критерію абсолютної стійкості Попова. При описі системи використовуємо передавальну функцію лінійної частини системи $W(p)$ і гістерезисну функцію S_3 або S_1 п'єзоперетворювача при подовжньому і поперечному п'єзоефектах.

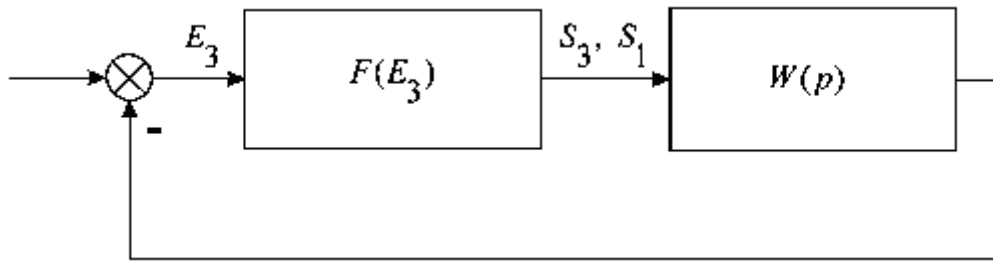


Рисунок 3.7—Узагальнена структурна схема системи керування деформацією п'єзоперетворювача

Опис гістерезисної нелінійності п'єзоперетворювача при подовжньому п'єзоефекті в загальному виді виглядає як

$$S_3 = F \left[E_3 \Big|_0^t, t, S_3(0), \text{sign} \dot{E}_3 \right]. \quad (3.26)$$

Це означає, що значення функції S_3 в кожен момент часу t залежить від поведінки напруженості електричного поля E_3 на проміжку $[0, t]$, від t , від початкового значення $S_3(0)$ і знаку швидкості E_3 зміни напруженості поля. При цьому $S_3(0)$ повинно належати деякому додатково заданій безлічі $L[E_3(0)]$, яка залежить у загальному випадку від $E_3(0)$. Розглянемо гістерезисну характеристику п'єзоперетворювача. Безліччю $L[E_3(0)]$ являє собою вертикальний відрізок $[S_3^0, -S_3^0]$ – перетин осі ординат з петлею гістерезису, знятої при максимально допустимій напруженості поля в п'єзоперетворювачі. Знайдемо стаціонарну безліч системи керування деформацією п'єзоперетворювача при стійкій лінійній частині системи керування. На площині (E_3, S_3) проведемо пряму A з рівнянням $E_3 + W(0)S_3 = 0$, де $W(0)$ – значення передавальної функції лінійної частини системи керування при $p \rightarrow 0$. Безліч точок M перетину цієї прямої з гістерезисною характеристикою являє собою відрізок прямої, який виділений на рис. 3.8.

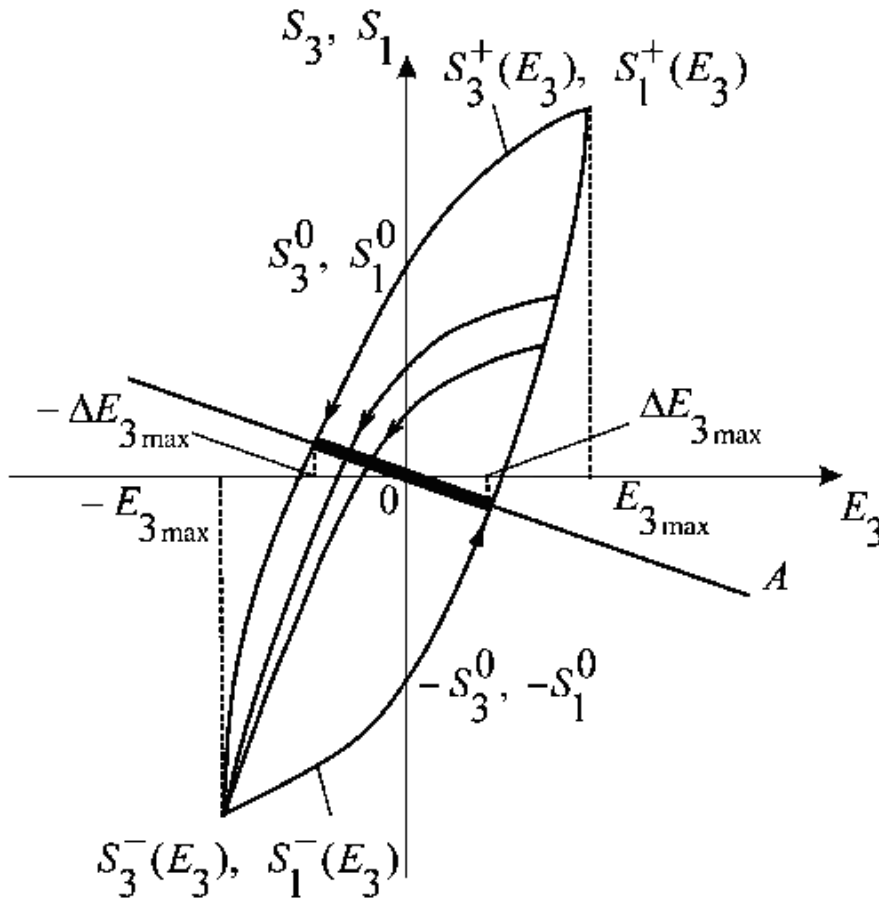


Рисунок 3.8—Гістерезисна характеристика п'єзоперетворювача при подовжньому та поперечному п'єзоефекті

Нехай E_{30} , S_{30} – стаціонарне рішення системи. Тоді отримуємо

$$E_{30} + W(0)S_{30} = 0, \quad (3.27)$$

Таким чином, стаціонарною безліччю M системи буде виділений безліччю пар (E_{30}, S_{30}) відрізок прямої A . Кожній точці перетину гістерезисної нелінійності з приватними циклами і прямою A відповідає одне положення рівноваги з координатами (E_{30}, S_{30}) .

Визначимо проекцію стаціонарної безлічі положень рівноваги торця п'єзоперетворювача на вісь X , де координата $x = E_3/E_{3\max}$. Підставимо в рівняння прямої (3.9) аналітичний опис основної гістерезисної петлі п'єзоперетворювача для подовжнього п'єзоефекта у вигляді

$$S_3 = d_{33}E_3 - \gamma_{33}E_{3\max} \left(1 - \frac{E_3^2}{E_{3\max}^2}\right)^{n_{33}} \text{sign}\dot{E}_3 \quad (3.28)$$

де $E_{3\max}$ – амплітуда напруженості електричного поля в п'єзоперетворювачі;

$\gamma_{33} = S_3^0 / E_{3\max}$ – залишковий гістерезис при подовжньому п'єзоефекті по осі 3;

S_0 - залишкова відносна величина статичної гістерезисної характеристики по осі 3 при $E_3 = 0$;

n_{33} – ступеневий коефіцієнт, який визначається за формою гістерезисної кривої при подовжньому п'єзоефекті.

Знайдемо ширину зони спокою 2Δ . Для визначення ширини зони спокою, підставляючи значення $E_{30} = \Delta E_{3\max}$ у вираз (3.27), отримаємо

$$\Delta E_{3\max} + W(0)S_3^-(\Delta E_{3\max}) = 0, \quad (3.29)$$

де Δ – відносне значення напруженості електричного поля, що нормується за амплітудою напруженості в крайній точці рівноваги системи керування деформацією п'єзоперетворювача;

$S_3^-(\Delta E_{3\max})$ – значення відносної деформації S_3 на висхідній гілці гістерезисної характеристики при $E_3 > 0$ і $E_{30} = \Delta E_{3\max}$;

$S_3^+(-\Delta E_{3\max})$ – значення відносної деформації S_3 на низхідній гілці гістерезисної характеристики при $E_3 < 0$ і $E_{30} = -\Delta E_{3\max}$.

Відповідно маємо

$$S_3^-(\Delta E_{3\max}) = d_{33}\Delta E_{3\max} - \gamma_{33}E_{3\max} \left(1 - \frac{(\Delta E_{3\max})^2}{E_{3\max}^2}\right), \quad (3.30)$$

після спрощення в (3.30) отримаємо вираз

$$S_3^-(\Delta E_{3\max}) = d_{33}\Delta E_{3\max} - \gamma_{33}E_{3\max}(1 - \Delta^2). \quad (3.31)$$

Підставляючи (3.31) в (3.29), отримаємо вираз

$$\Delta E_{3\max} + W(0)E_{3\max} [d_{33}\Delta - \gamma_{33}(1 - \Delta^2)] = 0 \quad (3.32)$$

Звідси маємо

$$\Delta + W(0) [d_{33}\Delta - \gamma_{33}(1 - \Delta^2)] = 0. \quad (3.33)$$

З виразу (3.33) отримаємо квадратне рівняння для визначення ширини зони спокою 2Δ п'єзоперетворювача при подовжньому п'єзоефекті у вигляді

$$\Delta^2 + \frac{(1 + W(0)d_{33})}{W(0)\gamma_{33}}\Delta - 1 = 0. \quad (3.34)$$

Отже, ширина зони спокою при подовжньому п'єзоефекті

$$2\Delta = -\frac{(1 + W(0)d_{33})}{W(0)\gamma_{33}} + \sqrt{\frac{(1 + W(0)d_{33})^2}{W^2(0)\gamma_{33}^2} + 4}. \quad (3.35)$$

Аналогічно отримаємо опис гістерезисної характеристики п'єзоперетворювача при поперечному п'єзоефекті

$$S_1 = d_{31}E_3 - \gamma E_{3\max} \left(1 - \frac{E_3^2}{E_{3\max}^2}\right)^{n_{31}} \text{sign}\dot{E}_3, \quad (3.36)$$

де $\gamma_{31} = S_1^0 / E_{3\max}$ – де залишковий гістерезис при поперечному п'єзоефекті по осі 1;

S_1^0 – залишкова відносна величина статичної гістерезисної характеристики по осі 1 при $E_3 = 0$;

n_{31} – ступеневий коефіцієнт, який визначається формою гістерезисної кривої при поперечному п'єзоефекті.

Аналогічно ширина зони спокою при поперечному п'єзоефекті при $n_{31} = 1$ має вигляд

$$2\Delta = -\frac{(1+W(0)d_{31})}{W(0)\gamma_{31}} + \sqrt{\frac{(1+W(0)d_{31})^2}{W^2(0)\gamma_{31}^2} + 4}. \quad (3.37)$$

Функція S_3 гістерезисної не лінійності п'єзоперетворювача при подовжньому п'єзоефекті непереривна, причому

$$v_{133}, v_{233} \in [0, v_{33}], \quad v_{33} = \max[dS_3/dE_3]. \quad (3.38)$$

Величини v_1 і v_2 визначаємо за гістерезисною статичною характеристикою при подовжньому п'єзоефекті, яка виміряна при максимально допустимій напруженості електричного поля в п'єзоперетворювачі, де $v_{133} = 0$ і $v_{233} = v_{33}$ – відповідно мінімальне і максимальне значення тангенса кута нахилу дотичної до гістерезисної нелінійності. Гістерезисна петля п'єзоперетворювача для п'єзопривода нано- і мікропереміщень обходиться проти годинникової стрілки. Відношення тангенсів кута нахилу дотичної до гістерезисної нелінійності п'єзоперетворювача при подовжньому і поперечному п'єзоефектах пропорційне відношенню відповідних п'єзомодулей

$$\frac{v_{33}}{v_{31}} = \frac{d_{33}}{d_{31}}. \quad (3.39)$$

Позначимо величину v , яка відповідає максимальному значенню тангенса кута нахилу дотичної до нелінійної характеристики п'єзоперетворювача, v_{33} або v_{31} при подовжньому і поперечному п'єзоефектах.

Тоді достатні умови абсолютної стійкості системи керування деформацією п'єзоперетворювача мають вигляд

$$\operatorname{Re} vW(j\omega) \geq -1, \quad (3.40)$$

де j – уявна одиниця, ω – частота.

На рис. 3.9 на комплексній площині приведені амплітудно-фазові частотні характеристики для частотної передавальної функції $vW(j\omega)$, для двох видів кривих, для яких виконуються умови (3.1) і не виконуються умови (3.2) абсолютної стійкості системи керування деформацією п'єзоперетворювача. Частотний критерій абсолютної стійкості (3.40) простий і зручний для синтезу пристроїв, що коректують, систем керування деформацією п'єзоперетворювача для нано- і мікропереміщень.

Необхідно відзначити, що частотний критерій абсолютної стійкості безлічі положень рівноваги в нелінійній системі з однією гістерезисною нелінійністю п'єзоперетворювача справедливий для систем як з детермінованими, так і з випадковими діями, як із зосередженими, так і з розподіленими параметрами.

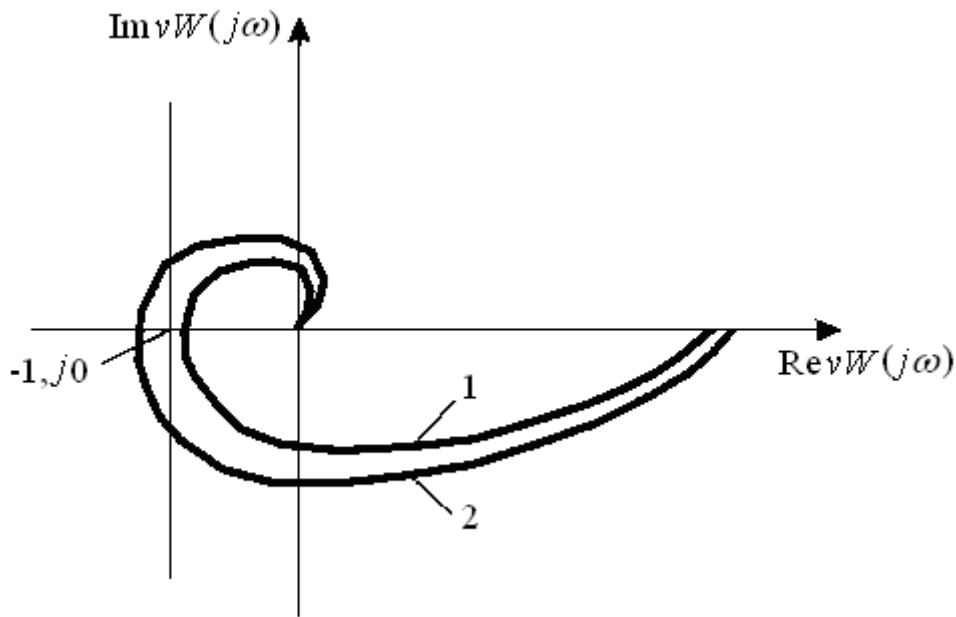


Рисунок 3.9—Критерій абсолютної стійкості системи керування на площині:

1 – виконуються умови та 2 – не виконуються умови абсолютної стійкості

Розглянемо геометричну інтерпретацію критерію (3.39) при поперечному п'єзоефекті. Амплітудно-фазова характеристика розімкненої системи $v_{31}W(j\omega)$ повинна бути для всіх $\omega \geq 0$ розміщена праворуч прямої $\text{Rev}_{31}W(j\omega) = -1$. Критерій абсолютної стійкості системи на площині логарифмічної амплітудної частотної характеристики і фазової частотної характеристики розімкненої системи $v_{31}W(j\omega)$ в декартовій системі координат $L(\omega) = Q[\varphi(\omega)]$, де $L(\omega) = 20\lg|v_{31}W(j\omega)|$ – логарифмічна амплітудна частотна характеристика, $\varphi(\omega)$ – фазова частотна характеристика, формулюється наступним чином: для абсолютної стійкості системи досить, щоб логарифмічна амплітудна частотна характеристика $L(\omega) = Q[\varphi(\omega)]$ розімкненої системи керування п'єзоперетворювачем (заштрихована характеристика) для всіх $\omega \geq 0$ розміщувалась нижче за граничну криву $L(\omega) = 20\lg|1/\cos\varphi|$ (рис. 3.10). Заштрихована область для скоректованої характеристики $L(\omega)$ при $v = v_{31}$ відповідає скоректованій амплітудно-фазовій частотній характеристиці для частотної передавальної функції $vW(j\omega)$ на рис. 3.10, яка не перетинає на комплексній площині вертикальну лінію $\text{Rev}W(j\omega) = -1$. При введенні в систему пристрою, що коректує, який певним чином деформує амплітудну

частотну характеристику лінійної частини системи керування деформацією п'єзоперетворювача для п'єзопривода нано- і мікропереміщень, частотний критерій абсолютної стійкості буде виконуватись.

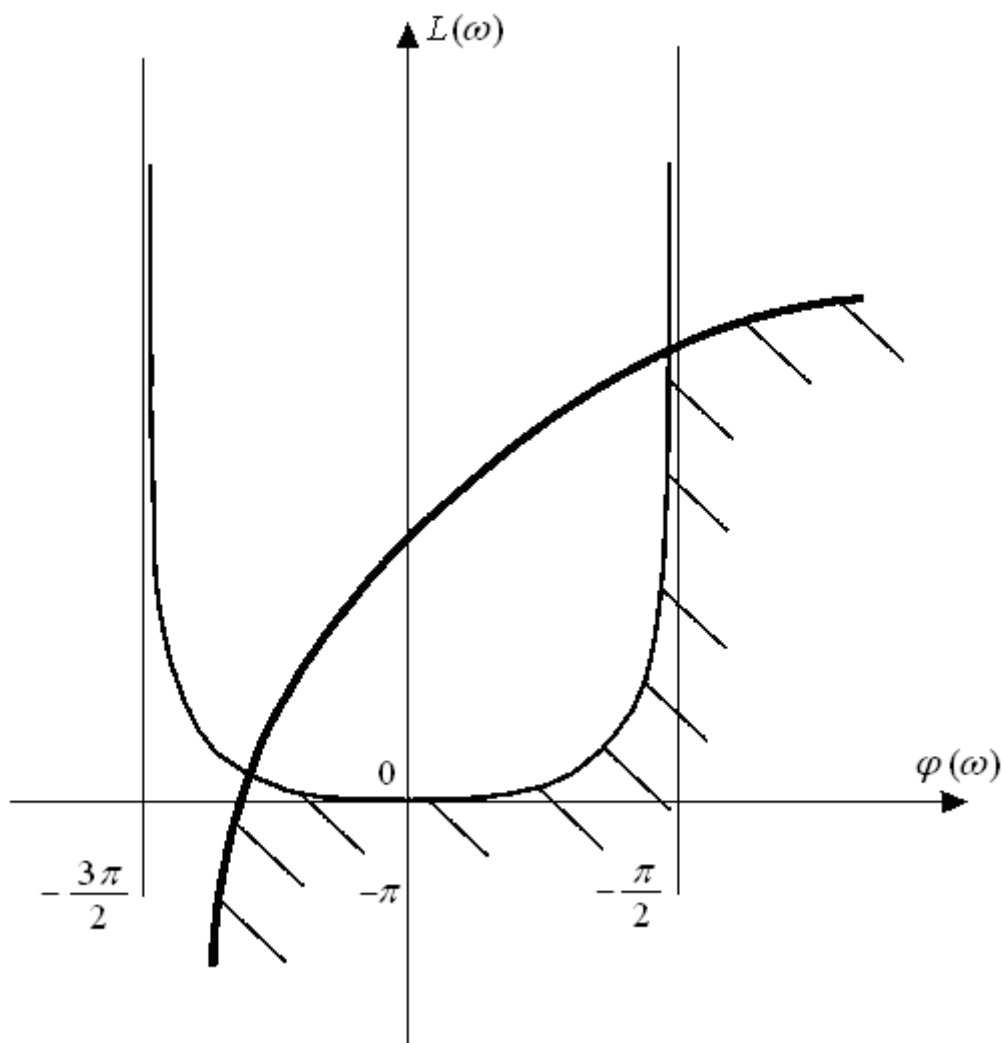


Рисунок 3.10–Вибір пристрою, що коректує, за критерієм абсолютної стійкості системи керування деформацією п'єзоперетворювача

Безліч положень рівноваги системи керування деформацією п'єзоперетворювача при подовжньому або і поперечному п'єзоефекті стійко, якщо виконується отримані умови на похідну гістерезисної характеристики при максимальній напруженості електричного поля в п'єзоперетворювачі. Отримані умови абсолютної стійкості системи керування деформацією п'єзоперетворювача дозволяють проводити синтез пристроїв систем, [8-11,15]

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

Стаття 43 Конституції України проголошує право кожного громадянина нашої держави на «належні, безпечні і здорові умови праці». Закріплюються ці права і законом України «Про охорону праці», [12,13].

Охорона праці - це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі трудової діяльності.

Державне управління охороною праці в Україні здійснюють Кабінет Міністрів України; Державний комітет України по нагляду за охороною праці; Міністерство аграрної політики та інші центральні органи державної виконавчої влади; місцева державна адміністрація; місцеві ради. Державний нагляд за дотриманням законодавчих та інших нормативних актів з охорони праці здійснюють: Державний комітет України з нагляду за охороною праці; Державний комітет України з ядерної та радіаційної безпеки; органи державного пожежного нагляду Управління пожежної охорони Міністерства внутрішніх справ України; органи та заклади санітарно-епідеміологічної служби Міністерства охорони здоров'я України.

4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів

Виробниче середовище – це частина техносфери, що володіє підвищеною концентрацією негативних чинників. Основними носіями травмуючих і шкідливих чинників у виробничому середовищі є машини і інші технічні пристрої, хімічно і біологічно активні предмети праці, джерела енергії, нерегламентовані дії тих, що працюють, порушення режимів і організації діяльності, а також відхилення від допустимих параметрів мікроклімату робочої зони.

На людину в процесі її трудової діяльності можуть впливати небезпечні (викликаючи травми) і шкідливі (викликаючи захворювання) виробничі чинники. Небезпечні і шкідливі виробничі чинники підрозділяються на чотири групи: фізичні, хімічні, біологічні і психофізіологічні.

- Фізичні чинники: рухомі частини механізмів, підвищення або пониження температури повітря, підвищення або пониження температури поверхні, підвищена запиленість або загазованість, підвищена вологість, підвищена швидкість руху повітря, підвищений рівень шуму, підвищений рівень вібрації, недостатня освітленість, підвищений рівень випромінювання (УФВ, лазерне, електромагнітне), небезпека поразки електричним струмом і так далі.

- Хімічні чинники: загальнотоксичні, подразнюючі, такі, що викликають алергію, канцерогенні (викликають рак), мутагенні, такі, що впливають на репродуктивну діяльність.

- Біологічні чинники: мікроорганізми, макроорганізми.
- Психофізіологічні чинники: фізичне перевантаження, нервово-психічні перевантаження (розумове перенапруження, перенапруження аналізаторів, емоційні перевантаження, монотонність праці).

До небезпечних фізичних чинників відносяться: рухомі машини і механізми; різні підйомно-транспортні пристрої і переміщувані вантажі; незахищені рухомі елементи виробничого устаткування (приводні і передавальні механізми, ріжучі інструменти, устаткування, що обертається і переміщується, і ін.); відлітаючі частинки оброблюваного матеріалу і інструменту, електричний струм, підвищена температура поверхонь устаткування і оброблюваних матеріалів і так далі

Шкідливими для здоров'я фізичними чинниками є: підвищена або знижена температура повітря робочої зони; висока вологість і швидкість руху повітря; підвищені рівні шуму, вібрації, ультразвука і різних випромінювань - теплових, іонізуючих, електромагнітних, інфрачервоних і ін. До шкідливих фізичних чинників відносяться також запиленість і загазованість повітря робочої зони;

недостатня освітленість робочих місць, проходів і проїздів; підвищена яскравість світла і пульсація світлового потоку.

Між шкідливими і небезпечними виробничими чинниками спостерігається певний взаємозв'язок. У багатьох випадках наявність шкідливих чинників сприяє прояву травмонебезпечних чинників. Наприклад, надмірна вологість у виробничому приміщенні і наявність струмопровідного пилу (шкідливі чинники) підвищують небезпеку поразки людини електричним струмом (небезпечний чинник).

Шум

Інтенсивний шум на виробництві сприяє зниженню уваги і збільшенню числа помилок при виконанні роботи, виключно сильний вплив робить шум на швидкість реакції, збір інформації і аналітичні процеси, із-за шуму знижується продуктивність праці і погіршується якість роботи. Шум утрудняє своєчасну реакцію тих, що працюють на попереджувальні сигнали внутрішньоцехового транспорту (автонавантажувачів, мостових кранів і т. п.), що сприяє виникненню нещасних випадків на виробництві.

Шум діє на весь організм людини: пригніблює ЦНС, викликає зміну швидкості дихання і пульсу, сприяє порушенню обміну речовин, виникненню серцево-судинних захворювань, гіпертонічній хворобі, може приводити до професійних хвороб.

Вібрації

Дію вібрації на людину класифікують:

- за способом передачі коливань;
- по напрямку дії вібрації;
- по тимчасовій характеристиці вібрації.

Залежно від способу передачі коливань людині вібрацію підрозділяють :

- загальна, така, що передається через опорні поверхні на тіло сидячої або стоячої людини

- локальна, така, що передається через руки людини. Вібрація, що впливає на ноги сидячої людини, на передпліччя, що контактують з віброуючими поверхнями робочих столів, також відноситься до локальної.

По напрямку дії вібрацію поділяють на:

- вертикальну, таку, що розповсюджується по осі x , перпендикулярною до опорної поверхні;
- горизонтальну, таку, що розповсюджується по осі y , від спини до грудей;
- горизонтальну, таку, що розповсюджується по осі z , від правого плеча до лівого плеча.

По тимчасовій характеристиці розрізняють:

- постійну вібрацію, для якої контрольований параметр за час спостереження змінюється не більше ніж в 2 рази (6 дБ);
- непостійну вібрацію, що змінюється по контрольованих параметрах більш ніж в 2 рази.

Вібрація відноситься до чинників, що мають високу біологічну активність. Вираженість реакцій, що надаються у відповідь, обумовлюється головним чином силою енергетичної дії і біомеханічними властивостями людського тіла як складної коливальної системи. Потужність коливального процесу в зоні контакту і час цього контакту є головними параметрами, що визначають розвиток вібраційних патологій, структура яких залежить від частоти і амплітуди коливань, тривалості дії, місця додатку і напрямку осі вібраційної дії, демпфуючих властивостей тканин, явищ резонансу і інших умов.

Між відповідними реакціями організму і рівнем впливаючої вібрації немає лінійної залежності. Причину цього явища бачать в резонансному ефекті. При підвищенні частот коливань більше 0,7 Гц можливі резонансні коливання в органах людини. Резонанс людського тіла, окремих його органів настає під дією зовнішніх сил при збігу власних частот коливань внутрішніх органів з частотами зовнішніх сил. Область резонансу для голови в положенні сидячи

при вертикальних вібраціях розташовується в зоні між 20...30 Гц, при горизонтальних - 1,5...2 Гц.

Особливого значення резонанс набуває по відношенню до органу зору. Розлад зорового сприйняття виявляється в частотному діапазоні між 60 і 90 Гц, що відповідає резонансу очних яблук. Для органів, розташованих в грудній клітці і черевній порожнині, резонансними є частоти 3...3.5 Гц. Для всього тіла в положенні сидячи резонанс настає на частотах 4...6 Гц.

При дії на організм загальної вібрації страждає в першу чергу нервова система і аналізатори: вестибулярний, зоровий, тактильний.

Проблема сучасного виробництва, особливо машинобудування - локальна вібрація. Локальна вібрація викликає спазми судин кисті, передпліччя, порушуючи постачання крові до кінцівок. Одночасно коливання діють на нервові закінчення, м'язові і кісткові тканини, викликають зниження шкірної чутливості, відкладення солей в суглобах пальців, деформуючи і зменшуючи рухливість суглобів.

Коливання низьких частот викликають різке зниження тону капілярів, а високих частот - спазм судин.

До чинників виробничого середовища, що посилюють шкідливу дію вібрацій на організм, відносяться надмірні м'язові навантаження, несприятливі мікрокліматичні умови, особливо знижена температура, шум високої інтенсивності, психоемоційний стрес. Охолодження і змочування рук значно підвищують ризик розвитку вібраційної хвороби за рахунок посилення судинних реакцій. При сумісній дії шуму і вібрації спостерігається взаємне посилення ефекту в результаті його додавання, а можливо, і потенціювання.

Електромагнітні поля (ЕМП)

На людину в процесі життєдіяльності діють природні магнітні поля (магнітне поле Землі, радіовипромінювання сонця, атмосферна електрика), а також штучні електромагнітні поля. Якщо природне електромагнітне поле залишається практично постійним впродовж тисячоліть, то рівень штучних електромагнітних полів сильно виріс за останні десятиліття.

Джерелами штучних електромагнітних полів є електромагнітні поля низькочастотного діапазону, які використовуються в промисловому виробництві (термічна обробка), високочастотні поля (радіозв'язок, медицина, ТБ, радіомовлення), електромагнітні поля СВЧ-діапазона (радіолокація, навігація, медицина, стільниковий зв'язок), і так далі

Застосування електромагнітних полів в промисловості значно покращує умови праці, проте, при цьому виникає ряд проблем по захисту персоналу від їх дії. Електромагнітні поля всепронизуючі, здатні розповсюджуватися із швидкістю світла і не виявляються органами чуття.

Джерела електромагнітних полів промислової частоти - це всі електричні прилади, лінії електропередач.

Шкідлива дія ЕМП залежить від інтенсивності поля, довжини хвилі, часу дії і функціонального стану організму.

Постійна дія ЕМП веде до функціональних розладів нервової, ендокринної і серцево-судинної систем, у людини знижується кров'яний тиск, сповільнюється пульс, гальмуються рефлекс, змінюється склад крові, може привести до перегріву тіла і окремих органів, порушення їх функціональної діяльності, привести до теплової катаракти (помутніння кришталика ока). Суб'єктивний прояв дії ЕМП виражається в підвищеній стомлюваності, головному болю, дратівливості, задишці, сонливості, погіршенні зору, підвищенні температури тіла.

Електробезпека.

Електротравма - травма, викликана дією електричного струму або електричної дуги.

Види електротравм:

- 1) пов'язана з порушенням нормальної роботи електроустаткування, при якому через тіло людини протік струм;
- 2) пов'язана з порушенням нормальної роботи електроустаткування, при якому людина опинилася в електромагнітному полі великої напруженості;
- 3) пов'язана з порушенням нормальної роботи електроустаткування, при

якому людина отримала опіки, засліплення дугою, механічні травми;

4) що виникла під впливом електростатичної напруги.

Проходячи через організм людини електричний струм має 4 види дії:

Термічна дія – виявляється в опіках окремих частин організму, нагрівання до високих температур кровоносних судин, крові, нервів, серця, мозку, що викликає серйозні розлади.

Електролітична дія – розкладання органічних рідин (лімфи і крові) з порушенням їх складу.

Механічна дія – розшарування, розрив тканин організму (м'язів серця, судин) в результаті електричного динамічного ефекту.

Біологічне – подразнення живих тканин організму; порушення внутрішніх біоелектричних процесів, які протікають в нормальному організмі.

Чинники, що впливають на небезпеку поразки електричним струмом:

- 1) величина напруги;
- 2) рід струму (до 500 В небезпечніше змінний струм);
- 3) частота струму (найнебезпечніший діапазон $f = 40.100$ Гц);
- 4) шлях струму через тіло людини;
- 5) опір тіла людини (розрахункове значення 1000 Ом);
- 6) час дії струму;
- 7) умови зовнішнього середовища (температура, вологість впливають на опір).

4.2 Розрахунок захисного заземлення

Захисне заземлення – це навмисне електричне з'єднання із землею або її еквівалентом металевих не струмоведучих частин, які можуть опинитись під напругою.

Мета захисного заземлення: знизити до безпечної величини напругу щодо землі на металевих частинах обладнання, що нормально не перебувають під напругою.

Потрібно зробити розрахунок захисного заземлення для електроустановки з напругою до 1000 В, для $R_d = 4 \text{ Ом}$.

Тип заземлювача – стержневий у землі.

Тип ґрунту – садова земля.

Довжина стержня – $l = 2,5 \text{ м}$.

Діаметр стержня – $d = 45 \text{ мм} = 0,045 \text{ м}$.

Глибина закладення труби – $t_0 = 0,5 \text{ м}$.

Сполучна смуга – протяжна полосова в землі.

Ширина смуги – $b = 40 \text{ мм} = 0,04 \text{ м}$.

Ми використаємо метод коефіцієнтів використання електродів:

1. Припустимий опір заземлюючого пристрою: $R_d = 4 \text{ Ом}$;
2. Визначаємо питомий опір ґрунту по даним таблиць, що рекомендовані для розрахунку: $\rho = 50 \text{ Ом/м}$;
3. Для обраного типу й розмірів визначаємо опір розтіканню одного заземлювача:

$$t = t_0 + \frac{l}{2} = 0,5 + 0,5 \cdot 2,5 = 1,75 \text{ (м)},$$

$$R_1 = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \left(\ln \left(\frac{2l}{d} \right) + \frac{\ln \left(\frac{4 \cdot t + l}{4 \cdot t - l} \right)}{2} \right) =$$

$$= \frac{50}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,5} \cdot \left(\ln \left(\frac{2 \cdot 2,5}{0,045} \right) + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{4 \cdot 1,75 + 2,5}{4 \cdot 1,75 - 2,5} \right) \right) = 16,161 \text{ (Ом)}.$$

Так як $R_1 > R_d$, то необхідно використовувати декілька заземлювачів, сполучених паралельно:

$$n = \frac{R_1}{\eta R_d}, \text{ при } \eta = 1, n = \frac{R_1}{R_d} = \frac{16,161}{4} = 4,04 \approx 4;$$

4. При $n = 4$ і відношенні відстані між електродами до їх довжини рівною 1 і розміщенні електродів по контуру фактичний коефіцієнт використання заземлювачів $\eta_\phi = 0,69$;

5. Фактичний опір вертикальних заземлювачів:

$$R_{\phi} = \frac{R_1}{\eta_{\phi} n} = \frac{16,161}{0,69 \cdot 4} = 5,855 \text{ (Ом)};$$

6. Опір сполучної смуги визначимо по наступній формулі:

$$R_n = \frac{\rho}{2\pi \cdot l_n} \cdot \ln \frac{l_n^2}{b \cdot t},$$

$$l_n = 1,05 \cdot (1 \dots 3) \cdot l \cdot n = 1,05 \cdot 2 \cdot 2,5 \cdot 4 = 21 \text{ (м)}, \quad t = t_0 = 0,5 \text{ м},$$

$$R_n = \frac{50}{2 \cdot \pi \cdot 21} \cdot \ln \frac{21^2}{0,04 \cdot 0,5} = 4,055 \text{ (Ом)};$$

7. При $n = 4$, відношенні відстані між електродами до їх довжини рівною 2 і розміщенні електродів по контуру фактичний коефіцієнт використання сполучної смуги $\eta_{n\phi} = 0,55$;

8. Фактичний опір сполучної смуги:

$$R_{n\phi} = \frac{R_n}{\eta_{n\phi}} = \frac{4,055}{0,55} = 7,372 \text{ (Ом)};$$

9. Загальні опір заземлюючого пристрою:

$$R_3 = \frac{R_{\phi} R_{n\phi}}{R_{\phi} + R_{n\phi}} = \frac{5,855 \cdot 7,372}{5,855 + 7,372} = 3,263 \text{ (Ом)}.$$

Отриманий еквівалентний опір менше припустимого ($R_3 < R_d$), отже розрахунок захисного заземлення електроустановки виконаний вірно.

4.3 Заходи з техніки безпеки

Захист від шуму.

Методи боротьби з шумом:

1. Зменшення шуму в джерелі (зміни технології і конструкції машин: заміна ударних процесів на тихіші, заміна ручної зварки на автоматичну, своєчасний ремонт, заміна металевих деталей на беззвучні, застосування віброізоляції, глушників, демпфування, звукоізолюючих кожухів і др).

2. Зміна спрямованості шуму.

3. Раціональне планування цехів.

4. Акустичні засоби захисту.

- Звукоізоляція (конструкція, що захищає, відбиває велику частину звукової енергії).

- Звукопоглинання (перетворення звукової енергії на теплову за рахунок в'язкого тертя в капілярах пористих матеріалів). Засоби індивідуального захисту (протишуми): вкладиш (знижує рівень шуму на 5 – 20 дБ), навушники (на 34–45 дБ), шолом (застосовується, якщо рівень шуму понад 120 дБ), протишумні костюми (якщо рівень шуму понад 135 дБ).

Методи боротьби з вібрацією.

1. Зменшення вібрації в джерелі (застосування технологічних процесів без вібрації).

2. Розузгодження вібраційної частоти з резонансною (при проектуванні власна частота не повинна співпадати з частотою вимушених коливань). Зміна власної частоти шляхом варіації значення маси конструкцій і введенням ребер жорсткості.

3. Вібродемпфування – перетворення механічної енергії коливань на теплову за рахунок збільшення сил внутрішнього або поверхневого тертя.

4. Віброгасіння:

- пасивне (збільшення маси фундаменту)
- активне (додавання маси з однаковим за модулем значенням частоти власних і вимушених коливань, що знаходяться при цьому в протифазі)

5. Віброізоляція – зменшення вібрації на шляху її розповсюдження за рахунок застосування пружних елементів (пружини, гума і т. д.)

6. Застосування засобів індивідуального захисту. при дії на руки використовуються рукавички, при передачі через ноги - спеціальне взуття, наприклад, з товстою гумовою підошвою.

Захист від електромагнітного випромінювання

Способи захисту.

Організаційні заходи:

- вибір раціональних режимів роботи устаткування;
- обмеження місця і часу знаходження персоналу в зоні дії поля.

Технічні заходи:

- раціональне розміщення устаткування;
- використання засобів, що обмежують величину ЕМП на робочому місці;
- позначення зон з підвищеним рівнем ЕМП;
- зниження потужності;
- зменшення часу роботи;
- збільшення відстані до джерела;
- автоматизація робіт;
- екранування робочого місця або джерела.

Екрани виконують із сталі, алюмінію, міді або сітки з розміром осередку, рівним $\lambda / 3$. Під дією ЕМП в матеріалі екрану наводиться вторинне поле, майже рівне по амплітуді і протилежне по фазі зовнішньому. Екран повинен бути заземлений;

- застосування застережливої сигналізації;
- застосування ЗІЗ;
- правильне розміщення робочого місця;
- розташування джерел випромінювання в окремих приміщеннях;
- вимоги до території – розміщення служб поза зоною дії ЕМП;
- визначення шляху руху людей в зоні ЕМП;
- лікувально-профілактичні заходи;
- контроль величини ЕМП (на постійних робочих місцях, на висоті 0,5 – 1-1,7 м).

Міри захисту від ураження електричним струмом

Для захисту від поразки електричним струмом в нормальному режимі застосовують наступні способи захисту від прямого дотику:

- 1) ізоляція;
- 2) огорожа;
- 3) встановлення бар'єрів;
- 4) розміщення поза зоною досяжності (110 кВ – відстань 1 м);
- 5) застосування низької напруги (50 В – змінне, 120 В – постійне).

Способи захисту від непрямого дотику:

- 1) захисне заземлення;
- 2) автоматичне відключення живлення;
- 3) зрівнювання потенціалів (для напруги дотику);
- 4) вирівнювання потенціалів (для напруги кроку);
- 5) подвійна або посилена ізоляція;
- 6) застосування наднизької напруги;
- 7) захисне електричне розділення мережі (застосування розділових трансформаторів, у яких коефіцієнт трансформації = 1).

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Відповідно до статті 12 Закону від 25.06.91 р. № 1264-XII «Про охорону навколишнього природного середовища» встановлюються обов'язки громадян у сфері охорони навколишнього природного середовища, а у статті 44 згадуються серед платників збору за забруднення навколишнього природного середовища підприємства, установи, організації та громадяни, [14].

В Порядку встановлення нормативів збору забруднення навколишнього природного середовища та справляння цього збору, затверджені постановою КМУ від 01.03.99 р. № 303 згадуються також підприємства, установи, організації та громадяни, але вже уточнюється, що йдеться про суб'єктів підприємницької діяльності.

В умовах науковотехнічного прогресу значно ускладнились взаємовідносини суспільства з природою. Людина отримала можливість впливати на хід природних процесів, підкорила сили природи, почала опановувати майже всі доступні відновні і невідновні природні ресурси, але разом з тим забруднювати і руйнувати довкілля.

За оцінкою Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), із більш ніж 6 млн. відомих хімічних сполук практично використовується до 500 тис. сполук; із них біля 40 тис. мають шкідливі для людини властивості, а 12 тис. є токсичними.

До кінця XX в. забруднення навколишнього середовища відходами, викидами, стічними водами всіх видів промислового виробництва, сільського господарства, комунального господарства міст набуло глобального характеру і поставило людство на грань екологічної катастрофи.

Втручання людини у природні процеси різко зростає і може спричиняти зміну режиму ґрунтових і підземних вод у цілих регіонах, поверхневого стоку, структури ґрунтів, інтенсифікацію ерозійних процесів, активізацію геохімічних та хімічних процесів у атмосфері, гідросфері та літосфері, зміни мікроклімату

тощо. Сучасна діяльність, наприклад, будівництво гідротехнічних споруд, шахт, рудників, доріг, свердловин, водойм, дамб, деформація суші ядерними вибухами, будівництво гігантських міст, обводнення і озеленення пустель, та інші повсякденні аспекти діяльності людини, вже викликали значні видимі і приховані зміни довкілля.

5.1 Забруднення навколишнього середовища

Сучасне машинобудування розвивається на базі великих виробничих об'єднань, що включають заготівельні і ковальсько-пресові цехи, цехи хімічної і механічної обробки металів, цехи покриттів і велике ливарне виробництво.

Механічна обробка металів на верстатах у цехах механічної обробки супроводжується виділенням пилу, туманів масел і емульсій, які через вентиляційну систему викидаються з приміщень. Так, при обробці текстоліту виділення пилу становить 100 ... 120 г/год [1].

При обслуговуванні промисловим маніпулятором верстатів при зміні їх інструменту чи заготовок не відбувається забруднення навколишнього середовища, але самі верстати вносять суттєвий вплив в загальне забруднення:

Стружка чорних і кольорових металів - утворюється при механічній обробці металів. Місцем тимчасового накопичення є металеві ящики в цеху, в міру накопичення стружка здається в адміністративно-господарський відділ має майданчик в складській зоні для накопичення металобрухту. На майданчику встановлено металеві контейнери для накопичення брухту і стружки, окремо для чорних і кольорових металів.

Відпрацьоване масло індустріальне, утворюється при поточному і періодичному технологічному обладнанні верстатів. Відхід збирається в металеву ємність.

Промаслена ганчір'я, утворюється в результаті обслуговування обладнання, що потребує в мастилі, при проведенні планових і поточних ремонтних робіт. Збирається в місцях тимчасового накопичення.

Забруднений бензин-розчинник (нефрас) утворюється при промиванні деталей після механічної обробки. Відхід збирається в металеву ємність.

Виробниче сміття, утворюється в результаті виробничої діяльності цеху являє собою суміш різних матеріалів у вигляді, стружки, змітань підлог і т.п., збирається в металевий ящик в цеху, в цей час разом з побутовим сміттям, вивозиться на звалище.

5.2 Розрахунок виділень (викидів) забруднюючих речовин

Розрахунок викидів забруднюючих речовин в дипломному проекті буде для механічного цеху при фрезеруванні, внаслідок того, що забруднюючі речовини, які утворюються в процесі виробництва, є найбільш шкідливими для навколишнього середовища і людини.

Кількість забруднюючих речовин, що виділяються при механічній обробці металів без застосування МОР (мастильна охолоджуюча рідина) за рік, визначається за формулою:

$$M_{\text{вид}} = 3,6 \cdot K \cdot T \cdot 10^{-3}, \text{ т/год}$$

де: K - питомі виділення пилу технологічним обладнанням г/с;

T - фактичний річний фонд часу роботи обладнання, год

Для фрезерного вертата маємо наступні дані:

$$K = 13,9 \cdot 10^{-3} \text{ г/с}, T = 2000 \text{ год.}$$

$$M_{\text{вид}} = 3,6 \cdot 13,9 \cdot 10^{-3} \cdot 2000 \cdot 10^{-3} = 0,1 \text{ т/год.}$$

5.3 Основні заходи захисту атмосфери

Основні заходи захисту атмосфери від забруднень промислового пилу і туманами передбачають широке використання пило-та туманоуловлювачів апаратів і систем. Виходячи із сучасної класифікації пилоуловлювачів

систем, заснованої на принципових особливостях процесу очищення, пилоочисного обладнання можна розділити на чотири групи: сухі пилоуловлювачі, мокрі пилоуловлювачі, електрофільтри і фільтри. Пилоуловлювачі різних типів, і в тому числі і електрофільтри, застосовують при підвищених концентраціях домішок у повітрі. Фільтри використовуються для тонкого очищення повітря з концентраціями домішок менш 100 мг/м^3 .

До сухих пилоуловлювачів відносяться всі апарати, в яких відділення частинок домішок від повітряного потоку відбувається механічним шляхом за рахунок сил гравітації, інерції, Кориоліса. Конструктивно сухі пиловлоуловлювачі поділяють на циклони, ротаційні, вихрові, радіальні, жалюзійні пилоуловлювачі і т.п.

Апарати **мокрого очищення газів** мають широке поширення, тому що характеризуються високою ефективністю очищення від дрібнодисперсного пилу, а також можливістю очищення від пилу гарячих і вибухонебезпечних газів. Апарати мокрого очищення працюють за принципом осідання частинок пилу або на поверхню крапель рідини, або на поверхню плівки рідини. Осідання частинок пилу на рідину відбувається під дією сил інерції і броунівського руху.

Фільтрування широко використовуються в промисловості для тонкого очищення вентиляційного повітря від домішок, а також для промислового та санітарного очищення газових викидів. При цьому способі газоочищення газові потоки проходять через пористі фільтрувальні перегородки, що пропускають газ, але затримують тверді частинки. Фільтри служать для уловлювання дуже тонких фракцій пилу (менше 1 мкм) і характеризуються високою ефективністю при очищенні газів.

Для очищення повітря від туманів кислот, лугів, масел та інших рідин використовуються волокнисті фільтри, принцип дії яких заснований на осідання крапель на поверхні пор з наступним стіканням рідини під дією сил тяжіння. Осідання крапель рідини на поверхні пор відбувається під дією всіх

раніше розглянутих механізмів відділення частинок забруднювача від газової фази на фільтроелементах.

Процеси очищення технологічних і вентиляційних викидів машинобудівних підприємств від газів і пароподібних домішок характеризується рядом особливостей: по-перше, гази, що викидаються в атмосферу, мають досить високу температуру і містять велику кількість пилу, що істотно ускладнює процес газоочищення і вимагає попередньої підготовки газів, що відходять; по-друге, концентрація газоподібних і пароподібних домішок частіше у вентиляційних і рідше в технологічних викидах зазвичай змінна і дуже низька. Методи очищення промислових викидів від газоподібних домішок за характером протікання фізико-хімічних процесів діляться на чотири групи: промивка викидів розчинниками домішок (метод абсорбції); промивка викидів розчинами реагентів, що пов'язують домішки хімічно (метод хемосорбції); поглинання газоподібних домішок твердими активними речовинами (метод адсорбції); поглинання домішок шляхом застосування каталітичного перетворення.

Метод абсорбції полягає в поділі газоповітряної суміші на складові частини шляхом поглинання одного або декількох газових компонентів цієї суміші поглиначем (абсорбентом) з утворенням розчину.

Метод хемосорбції заснований на поглинанні газів і парів твердими або рідкими поглиначами з утворенням малолітучих або малорозчинних хімічних сполук.

Метод адсорбції заснований на фізичних властивостях деяких твердих тіл селективно витягати й концентрувати на своїй поверхні окремі компоненти з газової суміші.

Каталітичні методи засновані на взаємодії речовин, що видаляються, з одним з компонентів, що є присутніми в газі, що очищується, або з речовиною, що додається спеціально в суміш, на твердих каталізаторах. Каталітичним методом перетворюють токсичні компоненти промислових викидів у речовини

нешкідливі або менш шкідливі для навколишнього середовища шляхом введення в систему додаткових речовин – каталізаторів.

Дотримання гранично припустимої концентрації шкідливих речовин у повітрі вимагає систематичного контролю за фактичним їхнім змістом в атмосферному повітрі й у робочих зонах на підприємствах. Для цього використовуються різні методи контролю дотримання гігієнічних нормативів. Для кожного джерела забруднення встановлюють гранично припустимий викид (ГПВ) шкідливих речовин в атмосферу й систему контролю за його дотриманням. Спостереження за забрудненням атмосфери ведуться на стаціонарних, маршрутних і пересувних постах. У великих промислових центрах функціонують автоматизовані системи контролю за рівнем забруднення повітря.

ВИСНОВКИ

При розробці автоматизованого електроприводу з кроковим двигуном було проведено аналіз існуючих видів систем мікропереміщень із різними перетворювачами та обрано систему на основі складеного п'єзокерамічного двигуна РМ-20R. Були розраховані наступні параметри:

- відносна діелектрична проникність п'єзоелемента $\varepsilon_{33}^T / \varepsilon_0 = 2026,3$;
- питомий об'ємний електричний опір п'єзоелемента $\rho_v = 1,18 \cdot 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{м}$;
- швидкість звуку в п'єзоелементі $V_1^\varepsilon = 3275 \text{ м/с}$;
- п'єзомодуль п'єзоелемента у динамічному режимі $d_{31} = 100,7 \cdot 10^{-12} \text{ К/Н}$;
- зовнішній діаметр сталеві оболонки під штовхачі $d_{\text{зовн}}^0 = 26 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;
- співвідношення геометричних розмірів штовхачів $l/a = 13,6$;
- частота коливань вигину ротора $F_{\text{виг}}^n = 3,42 \text{ кГц}$;
- радіальна частота коливань ротора $F_r^0 = 52,8 \text{ кГц}$.

Проведено дослідження роботи п'єзоелектричного двигуна на навантаження $0 \text{ Н} \cdot \text{м}$ (холостий рух), $0,025 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $0,05 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $0,075 \text{ Н} \cdot \text{м}$ та $0,1 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Дані характеристики носять лінійний характер до рівня моменту самогальмування, при якому настає різка зупинка валу двигуна, що обумовлена просковзуванням фрікціонної муфти.

Запропоновано комп'юторизовану систему керування п'єзоелектричним приводом, яка дозволяє здійснювати реверс, а також змінювати тривалість кроку (драйвер RM). Досліджена стійкість системи керування п'єзоелектричним приводом з гістерезисною нелінійністю і безліччю положень рівноваги із застосуванням критерію стійкості Якубовича.

Також були установлені правила з техніки безпеки при експлуатації спроектованого електроприводу.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Фоменко А.М., Шарейко Д.Ю. Комплектні електроприводи: У 3 ч. Ч. 2: Цифрові комплектні електроприводи: Навчальний посібник. – Миколаїв: НУК, 2014. – 142 с.
2. Комплектні електроприводи. Ч. 3. Сервоелектроприводи [Електронний ресурс] : навч. посібник : електрон. вид. комбін. використання на DVD-ROM. У 3 ч. Ч. 3 Сервоелектроприводи / І. С. Білюк, Д. Ю. Шарейко, А. М. Фоменко, О. В. Савченко; МОН України, НУК ім. адмірала Макарова. – Електрон. дані. – Миколаїв : НУК, 2018. – Назва з етикетки диска.
3. Авраменко О. А. До питання проектування високоточних автоматизованих п'єзоелектричних приводів // ЕТЕМ – 2009. – С. 3-5.
4. Ван, Чи Слідкувальна система на основі п'єзоелектричного двигуна / Чи Ван // Матеріали всеукр. наук.-техн. конф. "Сучасні проблеми автоматики та електротехніки". – Миколаїв : НУК, 2017. – С. 4–5.
5. Петренко С. Ф. Пьезоэлектрический двигатель в приборостроении. – К.: «Корнійчук», 2002. – 96 с.
6. Сайт компанії «Лилея» <http://piezomotor.com.ua>.
7. Смирнов А. Б. Мехатроника и робототехника. Системы микроперемещений с пьезоэлектрическими приводами. – С.-П.: СПбГПУ, 2003.
8. Афонин С. М. Исследование абсолютной устойчивости системы управления деформацией пьезопреобразователя для нано- и микроперемещений // Мехатроника, автоматизация, управление. № 1. 2008. – С. 10-16.
9. Стабілізація нелінійних електроприводів / С. О. Гаврилов, Д. Ю. Шарейко, А. М. Фоменко, О. В. Савченко, М. Ю. Богаченко // Матеріали ІХ Міжнародної науково-технічної конференції "Інновації в суднобудуванні та океанотехніці". – Миколаїв : НУК, 2018. – С. 340–341.
10. Мікропроцесорна система керування електроприводами промислового обладнання / О.Ф.Великий, Д. О. Главацький, В. П. Єремєєв, А. Р. Лук'янчук, А. І. Станіслав // Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції

молодих вчених «Автоматика та електротехніка». – Миколаїв : НУК, 2020. – С. 17–18. (10-11 листопада 2020 року).

11. Система керування сервоприводами / М. І. Захаренко, Д. В. Булацевський, А.Г.Запорожець, Я. С. Мередов, Т. О. Попадюк, О. О. Гапчук // Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених «Автоматика та електротехніка». – Миколаїв : НУК, 2020. – С. 19–20. (10-11 листопада 2020 року).

12. Гандзюк М. П., Желібо Є. П., Халімовський М. О. Основи охорони праці: Підруч. для студ. вищих навч. закладів. За ред. М. П. Гандзюка. – К.: Каравела, 2004. – 408 с.

13. Гайченко В. А., Коваль Г. М. Основи безпеки життєдіяльності людини: Навч. посіб. – К.: МАУП, 2002. – 232 с

14. Производство керамических изделий: Комплексное предотвращение и контроль загрязнения окружающей среды. Справочный документ по наилучшим доступным технологиям. – 2007.

15. Шарейко Д. Ю., Харченко В.С. Корекція системи керування з використанням перемикаючих сигналів / Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : XVI Міжнародна науково-технічна конференція : матеріали. – Миколаїв : НУК, 2025. – С. 550-553.

Розробка системи керування прецизійного робота маніпулятора

Студент магістратури: *Архипенко Сергій Анатолійович*

Науковий керівник: *к.т.н., доцент Надточій Віктор Анатолійович*

Актуальність проблеми П'єзокерамічні елементи знайшли широке застосування у системах мікропереміщень (СМП) мініатюрних об'єктів, які використовуються в приладобудуванні протягом багатьох десятиліть і пов'язані в основному з оптико-механічними приладами і годинниковими механізмами. Колосальний стрибок в кінці 20 і початку 21 століть в розвитку технологій, що відносяться до виробництва комп'ютерної техніки, дозволив створити принципово нові пристрої мікросистемної техніки.

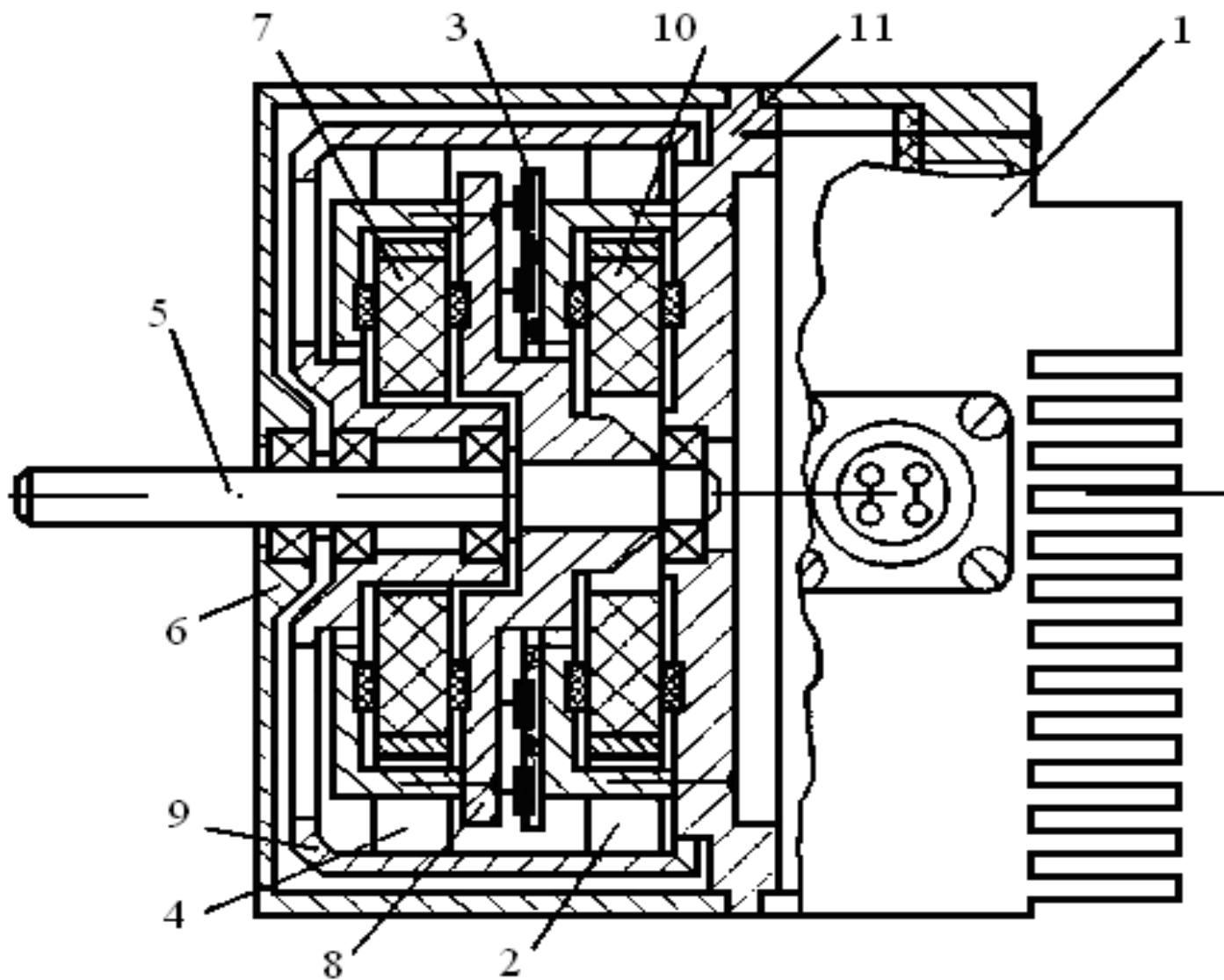
Збільшені вимоги військової і космічної техніки, медицини, моніторингу навколишнього середовища і безпеки атомних електростанцій дали поштовх до розвитку мініатюрних і мікроелектромеханічних систем (МЕМС). Тут потрібно уточнити, що

розуміється під термінами «мініатюрні» і «мікро-». До мініатюрних електромеханічних систем умовно можна віднести пристрої, розміри яких лежать в межах від 10х10х10 мм до 50х50х50 мм, все, що має менші габарити можна віднести до мікросистем, СМП включають пристрої, що забезпечують рух вихідної ланки на відстань до міліметра з мінімальним кроком до десятих долей мікрометра. Крім того, МЕМС можуть бути елементами СМП, зокрема робочими органами.

Мета і завдання дослідження. На основі існуючих теоретичних досліджень провести синтез системи керування п'єзоприводом мікроманіпулятора PSF-3.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Провести конструктивний аналіз основних вузлів п'єзоелектричних приводів.
2. Провести розрахунок параметрів п'єзоперетворювача.
3. Розрахувати систему керування п'єзоелектричного привода мікроманіпулятора PSF-3.



Конструктивне виконання двигуна реверсивного обертання



Мікроманіпулятор PSF-3

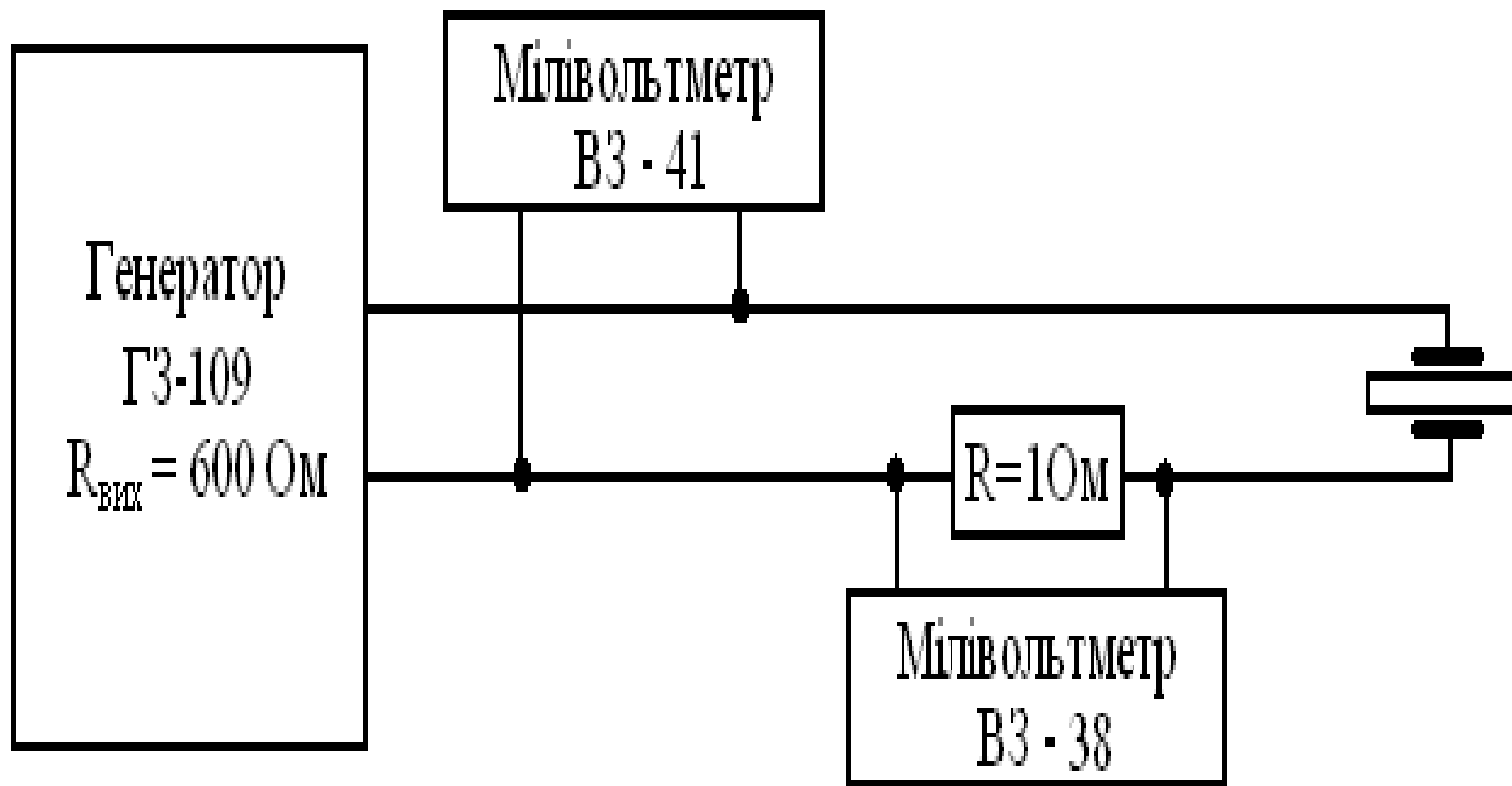
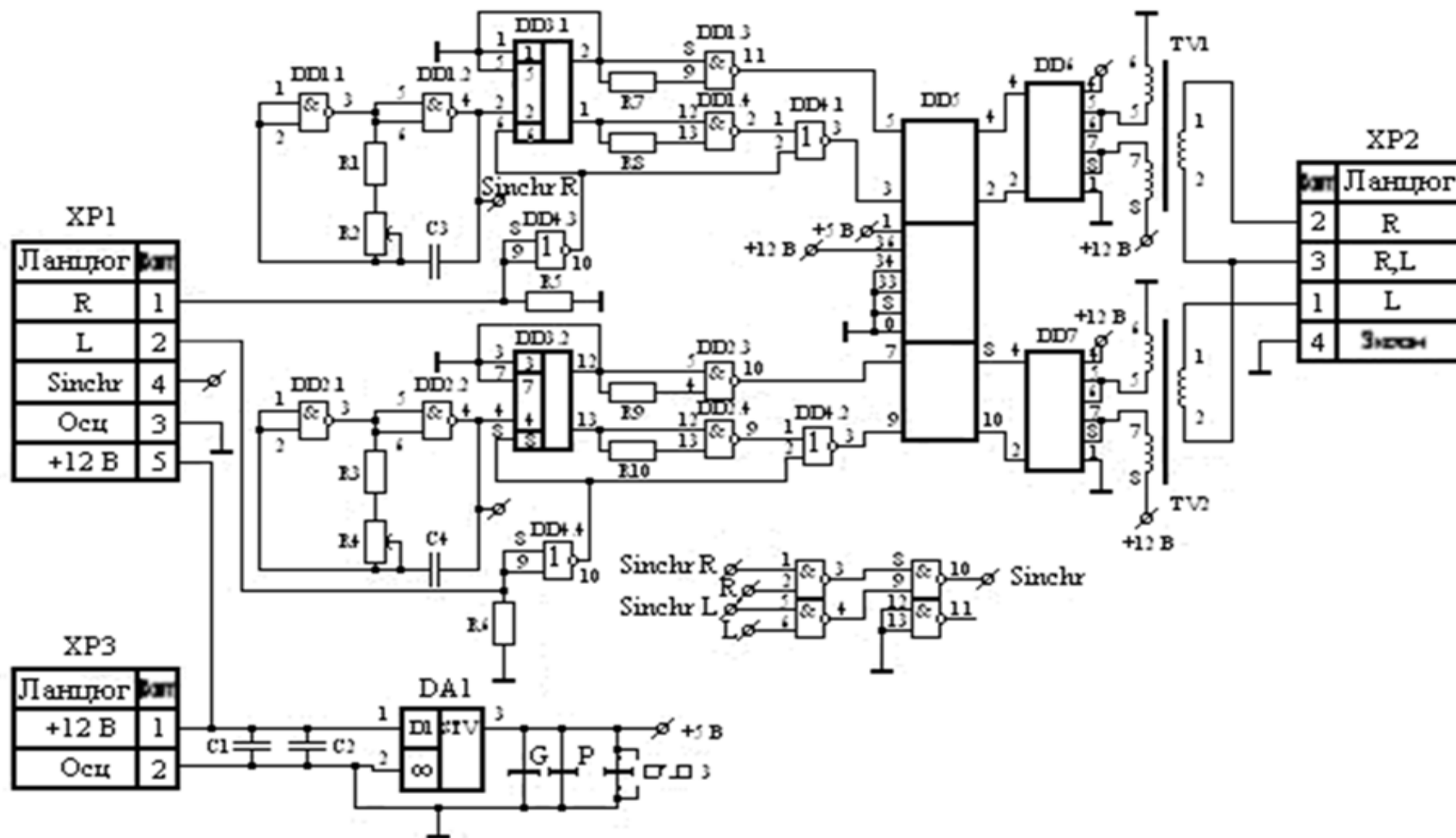
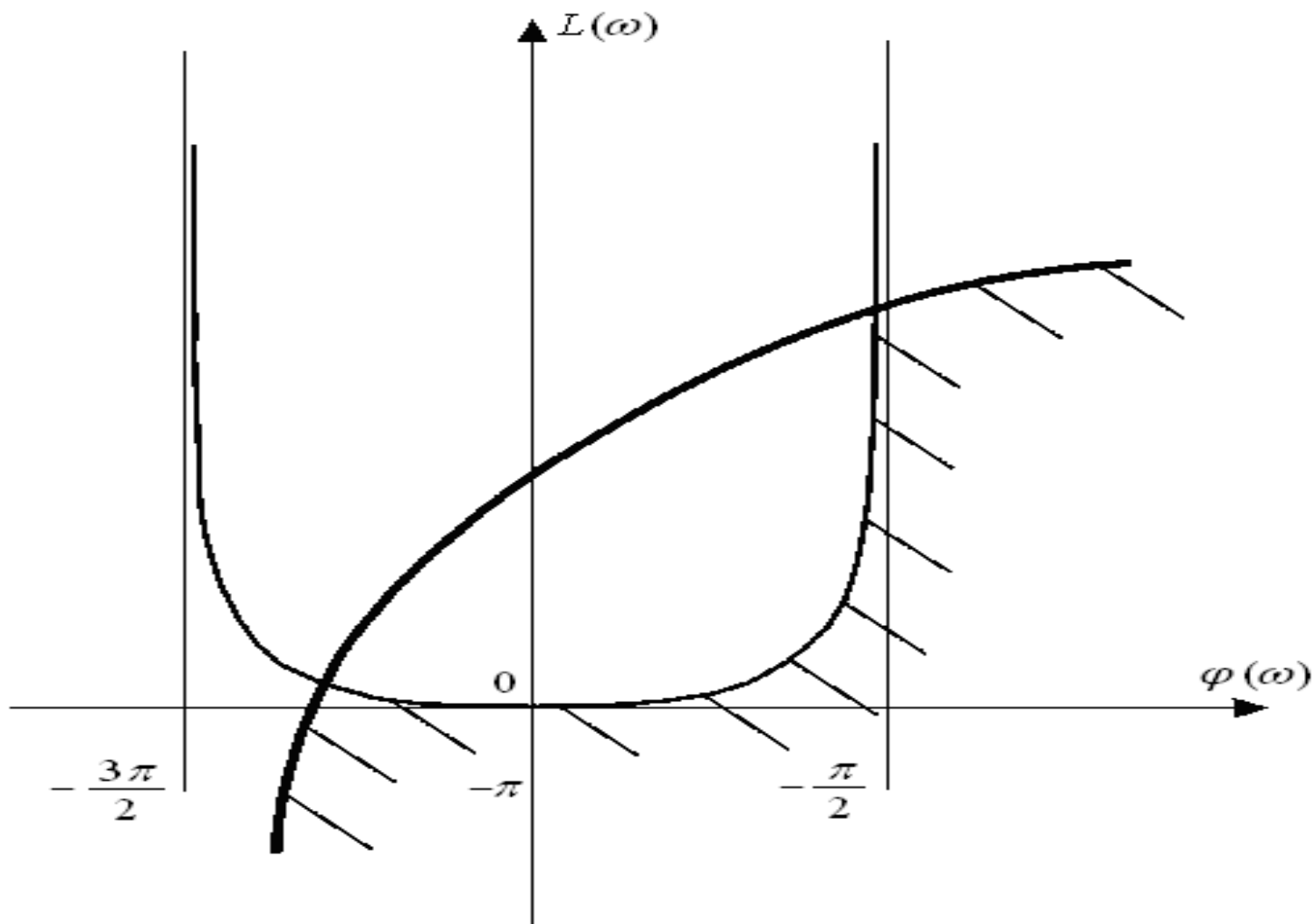


Схема для вимірювання електричної добротності резонатора



Принципова схема драйвера RM



Вибір пристрою, що коректує, за критерієм абсолютної стійкості
системи керування деформацією п'єзоперетворювача

ВИСНОВКИ

При розробці автоматизованого електроприводу з кроковим двигуном було проведено аналіз існуючих видів систем мікропереміщень із різними перетворювачами та обрано систему на основі складеного п'єзокерамічного двигуна РМ-20R. Були розраховані наступні параметри:

- відносна діелектрична проникність п'єзоелемента $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0 = 2026,3$;
- питомий об'ємний електричний опір п'єзоелемента $\rho_v = 1,18 \cdot 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{м}$;
- швидкість звуку в п'єзоелементі $V_1^\epsilon = 3275 \text{ м/с}$;
- п'єзомодуль п'єзоелемента у динамічному режимі $d_{31} = 100,7 \cdot 10^{-12} \text{ К/Н}$;
- зовнішній діаметр сталевोї оболонки під штовхачі $d_{\text{зовн}}^0 = 26 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;
- співвідношення геометричних розмірів штовхачів $l/a = 13,6$;
- частота коливань вигину ротора $F_{\text{виг}}^n = 3,42 \text{ кГц}$;

– радіальна частота коливань ротора $F_r^0 = 52,8$ кГц.

Проведено дослідження роботи п'єзоелектричного двигуна на навантаження 0 Н·м (холостий рух), 0,025 Н·м, 0,05 Н·м, 0,075 Н·м та 0,1 Н·м. Дані характеристики носять лінійний характер до рівня моменту самогальмування, при якому настає різка зупинка валу двигуна, що обумовлена просковзуванням фрікціоної муфти.

Запропоновано комп'юторизовану систему керування п'єзоелектричним приводом, яка дозволяє здійснювати реверс, а також змінювати тривалість кроку (драйвер RM). Досліджена стійкість системи керування п'єзоелектричним приводом з гістерезисною нелінійністю і безліччю положень рівноваги із застосуванням критерію стійкості Якубовича.

Також були установлені правила з техніки безпеки при експлуатації спроектованого електроприводу.