

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-19>

УДК 629.113.066 (075)

А. В. Рябовол, аспірант

ORCID: 0009-0001-9704-3116

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*e-mail: oleksandr78596482@gmail.com

МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ПРОЄКТУВАННЯ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ АКТИВАТОРІВ ДВОРЕЖИМНИХ СТРУМИННИХ АПАРАТІВ

Анотація. Мета дослідження полягає у визначенні методичних засад проєктування п'єзоелектричних активаторів дворежимних струминних апаратів на основі аналізу їх функціональних принципів, конструктивних параметрів і режимів роботи. Наукова новизна полягає у формуванні узагальненої чисельної моделі процесу формування струменя з урахуванням квазістатичного й динамічного режимів та у визначенні системи критеріїв ефективності активатора. Практична цінність дослідження зумовлена можливістю використання отриманих рекомендацій для параметризації й налаштування активаторів у струминних апаратах. Основними результатами є встановлення залежностей між електричними параметрами, механічною реакцією п'єзоперетворювача та динамікою формування струменя, а також виявлення умов, що мінімізують утрати енергетичної ефективності за перемикання режимів. Висновки підтверджують доцільність застосування принципів адаптивної оптимізації для забезпечення стабільного дворежимного функціонування й підвищення продуктивності струминних апаратів.

Ключові слова: п'єзоелектричний активатор, дворежимний струминний апарат, математичне моделювання, формування струменя, динамічний режим, критерії ефективності, синтез активатора.

Постановка проблеми. П'єзоелектричні активатори сьогодні відіграють ключову роль у формуванні керованих потоків у струминних апаратах, що застосовуються в системах точного дозування, охолодження, розпилення та мікрофлюїдного управління [1–3]. Розвиток сучасних технологій створює підвищені вимоги до їх функціональної гнучкості, енергоефективності й здатності працювати в різних режимах роботи, зокрема в статичному та динамічному [3–5]. Значна кількість досліджень, присвячених окремим аспектам математичного опису п'єзоперетворювачів і формування струменя, без узагальнення особливостей їх синтезу в контексті дворежимного функціонування поєднує моделі електромеханічного перетворення та гідродинаміки. Таким чином, систематизація підходів і формування єдиної методології проєктування п'єзоелектричних активаторів дворежимних струминних апаратів можуть бути визначені як актуальні складники наукового завдання.

Аналіз останніх досліджень, присвячених проблемам проєктування п'єзоелектричних активаторів для струминних апаратів [1–6], свідчить про наявність двох основних напрямів:

- дослідження електромеханічних властивостей п'єзоперетворювачів як окремих елементів;
- математичне моделювання гідродинамічних процесів у струминних каналах.

У більшості робіт акцент зроблено на відтворенні поведінки активатора в статичному режимі, де втрачаються ефекти, пов'язані з частотною залежністю механічного збурення та динамічним впливом на формування струменя [6–8]. Водночас можна вказати на численні дослідження, присвячені аналізу динамічного режиму функціонування [9–12], однак у більшості з них не розглядається узгодженість п'єзоперетворювача з гідродинамічною моделлю

струминного каналу й не дається оцінка межі перемикання між режимами. Автори дослідження [13] звертають увагу на необхідність урахування конструктивних параметрів активатора, проте в практичній частині пропонують емпіричні рекомендації без узагальнення у вигляді єдиної системи критеріїв оцінювання ефективності активаторів.

Таким чином, аналіз дає підстави стверджувати, що розроблення узагальненої методології синтезу п'єзоелектричного активатора з урахуванням дворежимного формування струменя та визначенням чітких параметрів переходу між режимами може надалі розглядатися як невирішена частина загального дослідження.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Отже, метою дослідження є розроблення узагальненої методології синтезу п'єзоелектричного активатора для дворежимного струминного апарату, яка забезпечує узгоджене функціонування електромеханічного перетворювача з гідродинамічними процесами формування струменя, а також передбачає визначення параметрів перемикання між статичним і динамічним режимами з урахуванням критеріїв ефективності роботи системи.

Основна частина.

1. Визначення функціональних принципів дії п'єзоелектричних активаторів у струминних апаратах

Після формулювання загальної методологічної мети дослідження логічним є зосередження уваги на аналізі фундаментальних аспектів функціонування п'єзоелектричних активаторів у складі струминних апаратів, оскільки саме ці компоненти визначають характер перетворення електричної енергії в задані параметри струменя. Ефективність синтезу активатора значною мірою залежить від типу реалізованого п'єзоперетворювача, механізму передачі механічного збурення до робочого середовища та відповідності режимів збудження вимогам до формування струменя [14–16].

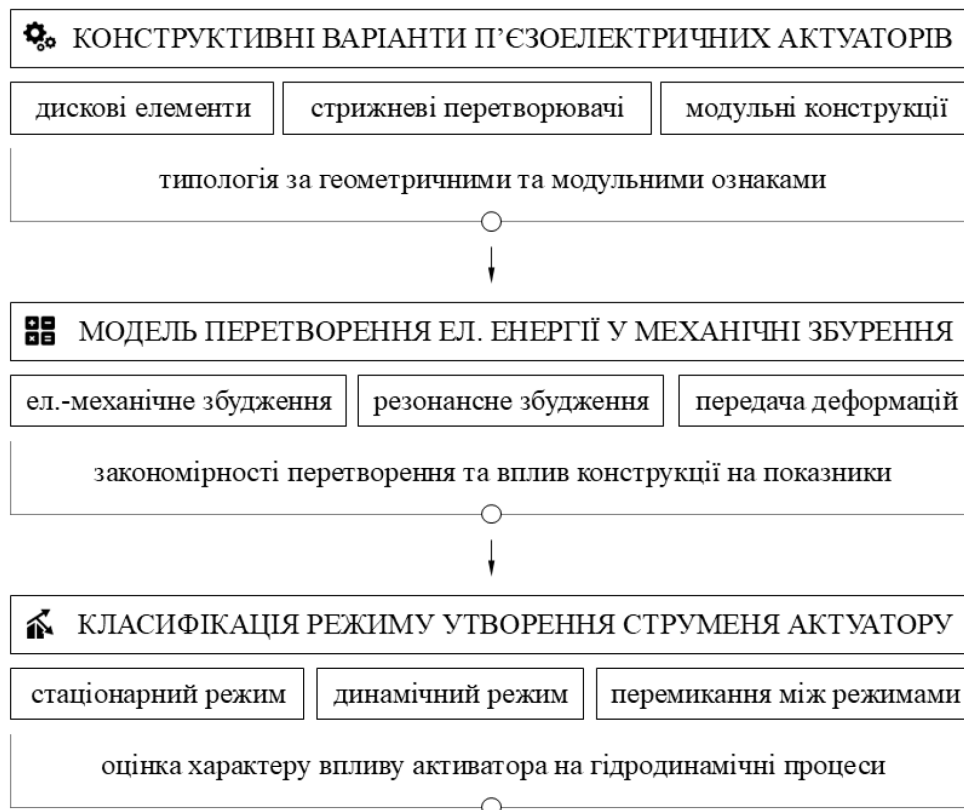


Рис. 1. Структурно-функціональна схема оцінки параметрів формування струменя в п'єзоелектричному активаторі



У цьому контексті особливого значення набуває системне вивчення конструктивних варіантів п'єзоелектричних перетворювачів, закономірностей електромеханічного перетворення та різних режимів формування струменя в дворезимних апаратах як вихідної основи для подальшого узгодженого моделювання (рис. 1).

Вихідні характеристики активатора значною мірою визначаються конструктивним виконанням п'єзоперетворювача, яке безпосередньо впливає на амплітуду деформацій, частотний діапазон роботи й спосіб передачі збудження до робочого середовища струминного каналу. На сучасному етапі розвитку технологій можна виокремити три базові групи п'єзоелектричних перетворювачів відповідно до їх геометричної конфігурації та принципу з'єднання активних елементів [14]:

1. Дискові елементи – характеризуються плоскою формою й використовуються для створення локального зсуву або розтягування, що передається через опорну площину на робоче середовище. Така конструкція забезпечує відносно просте узгодження з гідродинамічними каналами, однак обмежує частотний діапазон збудження через наявність власної резонансної частоти.

2. Стрижневі або циліндричні перетворювачі – мають більш спрямовану передачу деформації та здатні забезпечувати значну амплітуду осьового зсуву, що робить їх придатними для реалізації динамічних режимів формування струменя. Порівняно з дисковими елементами такі конструкції демонструють вищу механічну жорсткість і розширений частотний діапазон, що значно підвищує адаптивність активатора.

3. Модульні конструкції – поєднують кілька п'єзопластин у єдиний блок, формуючи багаточастинну структуру з підвищеним рівнем електромеханічної взаємодії. Це дає змогу отримати більшу вихідну силу за відносно незначних керівних напруг, а також забезпечує гнучкість у параметризації активатора. Важливою властивістю таких конструкцій є можливість змінювати конфігурацію з'єднання шарів, що відкриває додаткові можливості для адаптації до вимог конкретного режиму роботи струминного апарата.

На рівні формування методологічних рекомендацій пропонується вибирати конструктивний варіант п'єзоелектричного перетворювача з урахуванням вимог до амплітуди й частотного діапазону механічного збудження, способу передачі деформацій і можливості інтеграції з гідродинамічною структурою дворезимного апарата.

Процес перетворення електричної енергії на механічне збудження в п'єзоелектричних активаторах описується сукупністю електромеханічних рівнянь, що враховують поляризаційні властивості матеріалу, деформаційний стан і характер прикладеної керівної напруги [15]. У загальному випадку зв'язок між електричною напругою U , механічним напруженням σ та деформацією ε можна подати у вигляді $\sigma = c_E \cdot \varepsilon - e \cdot E$ та $D = e \cdot \varepsilon - \varepsilon_T \cdot E$, де c_E – модуль пружності за сталої напруги, e – п'єзоелектричний модуль, E – напруженість електричного поля, D – електричне зміщення, ε_T – діелектрична проникність. Ці рівняння під час побудови математичної моделі даватимуть можливість визначити зміну механічного стану активатора залежно від амплітуди та частоти прикладеної напруги. У квазістатичному режимі домінує електромеханічне збудження, за якого перехід електричної енергії до механічної відбувається в межах лінійної деформації без істотних інерційних ефектів. У цьому разі параметри роботи визначаються співвідношенням між напругою та деформацією, де максимальна амплітуда збудження досягається за умови поступового росту потенціалу $\varepsilon = (e/c_E) \cdot E$. Відповідний режим забезпечує достатню стабільність збудження, однак має обмеження щодо швидкості зміни параметрів струменя. Натомість у динамічному режимі виникає резонансне збудження, коли частота прикладеної напруги наближається до власної частоти п'єзоперетворювача. У цьому разі механічне збудження описується через гармонічне коливання $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \sin(\omega t)$, причому $\omega \rightarrow \omega_0$,

що є власною круговою частотою активатора. Резонансний режим дає змогу суттєво підвищити амплітуду збурення й реалізувати імпульсне формування струменя, проте супроводжується нестабільністю за відхилень від робочої частоти. У цьому контексті особливого значення набуває узгодження електричних параметрів перетворювача з механічними характеристиками струминного каналу. Також під час математичного моделювання необхідно врахувати механізм передачі деформації на робоче середовище. У загальному випадку механічну дію на математичному рівні можна формалізувати як функцію $F(t) = S \cdot c_E \cdot \varepsilon(t)$, де S – площа контакту між п'єзоелементом і гідродинамічним каналом. Ця залежність відображає пряму кореляцію між конструктивними параметрами активатора й вихідними характеристиками струменя, що є критично важливим для забезпечення коректного перемикання між режимами формування потоку. Таким чином, аналітичне описання процесу перетворення електричної енергії на механічне збурення дає змогу обґрунтувати вибір режиму збудження активатора та визначити параметри, що забезпечують ефективну взаємодію з гідродинамічною частиною дворежимного апарата.

У системах із п'єзоелектричним керуванням формування струменя може реалізовуватися в режимах, які відрізняються характером впливу активатора, динамікою зміни параметрів та вимогами до електромеханічного збудження [16]. З погляду організації дворежимного функціонування доцільно виділити статичний режим, динамічний режим, а також режим перемикання, який забезпечує адаптивний перехід між ними (таблиця 1). Статичний режим відзначається формуванням сталого потоку за відносно повільної зміни прикладеної напруги, що дає змогу створювати стабільні струмені з фіксованими параметрами. Динамічний режим базується на високочастотних коливаннях активатора, що призводить до імпульсного або кластерного формування потоку та забезпечує підвищення інтенсивності струменя. Режим перемикання характеризується комбінованим впливом і використовується для переходу між статичним і динамічним режимами з мінімальними втратами енергії.

Таблиця 1

Класифікація режимів формування струменя п'єзоелектричних апаратів [16]

Режим	Вплив	Збудження	Динаміка	Особливості
Статичний режим	Постійне мех. збурення	Квазистатичне збудження	Рівномірний струмінь	Стабільна робота за фіксованих параметрів
Динамічний режим	Високочастотне змінне збурення	Резонансне збудження	Імпульсний струмінь	Висока інтенсивність і дозоване впорскування
Режим перемикання	Комбінований вплив	Адаптивне збудження	Перехідний режим	Узгодження параметрів за зміни режиму

Конструктивні особливості п'єзоелектричних перетворювачів, закономірності електромеханічного перетворення та характер режимів формування струменя визначають базові передумови для подальшого синтезу дворежимного активатора. Узгодженість конструктивної топології активатора з вибраним типом збудження й режимом формування струменя дає змогу забезпечити не лише необхідну інтенсивність і стабільність струменя, а й адаптивне перемикання між режимами без суттєвих утрат енергетичної ефективності.

2. Визначення функціональних принципів дії п'єзоелектричних активаторів у струминних апаратах

Необхідність теоретичного обґрунтування синтезу п'єзоелектричного активатора зумовлена необхідністю формалізованого опису процесів, що лежать в основі його взаємодії з гідродинамічним середовищем струминного апарата. Структурно-функціональний аналіз показав, що ефективність дворежимного функціонування визначається не лише конструктивними параметрами активатора, а й здатністю математичної моделі адекватно відтворювати електромеха-

нічне збудження, частотні властивості перетворювача та їх вплив на параметри формованого струменя. У цьому контексті особливого значення набуває застосування узгодженого математичного апарату, який дає змогу поєднати опис квазістатичних і динамічних режимів із передачею механічного збудження до струминного каналу та сформувати основу для постановки задачі синтезу активатора з визначенням закономірностей переходу між режимами [17–19], як це представлено на рис. 2.

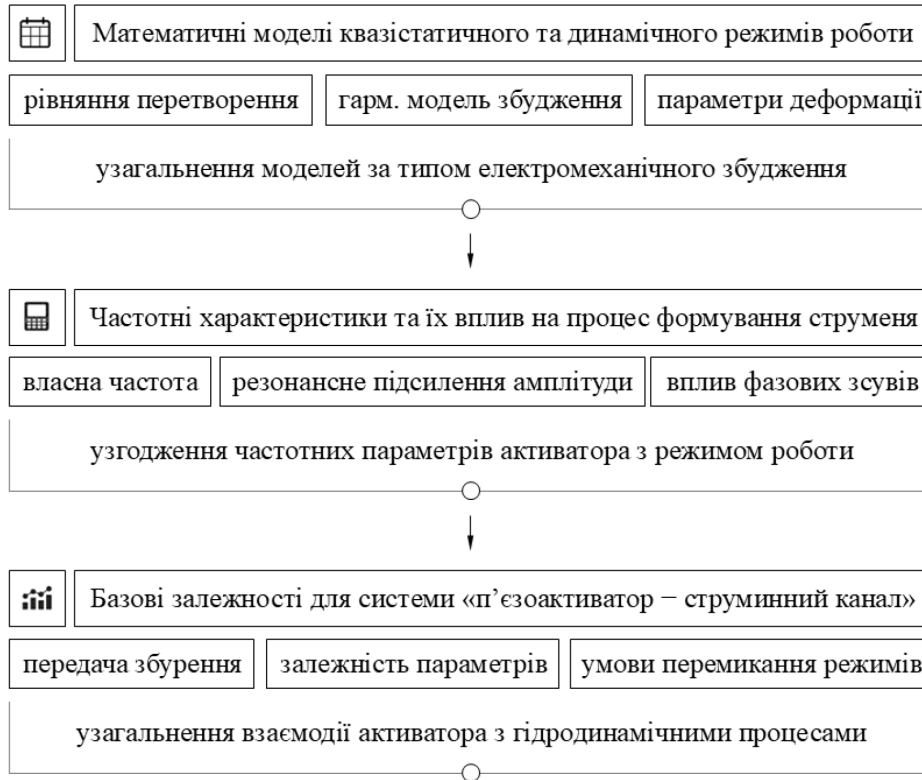


Рис. 2. Структурно-логічна схема обґрунтування синтезу п'єзоелектричного активатора для дворежимних струминних систем

Для розвитку методології синтезу доцільно перейти від загальних рівнянь електромеханічного перетворення, розглянутих у попередньому розділі, безпосередньо до формалізації режимів збудження активатора. Відповідно до цього підходу, квазістатичний режим розглядається як режим лінійної пропорційності між прикладеною напругою та деформацією, коли зміна електричного сигналу відбувається з досить малою швидкістю й не призводить до появи фазових зсувів між електричною та механічною підсистемами. У такому разі механічне збудження задається як визначена функція напруги, яка залишається сталою в часі й забезпечує формування стабільного струменя. На відміну від цього, динамічний режим передбачає гармонічне збудження активатора, за якого частота прикладеної напруги наближається до власної частоти п'єзоперетворювача [17]. Зі зростанням частоти збудження проявляється резонансний ефект, у результаті чого деформація активатора значно зростає порівняно з квазістатичним режимом. Амплітуда механічного збудження в резонансному режимі визначається залежністю:

$$\varepsilon_0 = \frac{(e \cdot U_0) / (c_E \cdot h)}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot \zeta \cdot \omega}{\omega_0}\right)^2}}, \quad (1)$$



яка відображає вплив співвідношення між робочою частотою ω та власною частотою ω_0 для п'єзоелемента товщиною h , а також утрат системи, що на математичному рівні формалізується через уведення коефіцієнта затухання ζ . Аналіз наведеного рівняння вказує, що максимальне значення амплітуди досягається за $\omega \rightarrow \omega_0$, тоді як відхилення в одну або іншу сторону супроводжується різким зниженням збудження. Це зумовлює необхідність точного узгодження електричних параметрів активатора з динамічними параметрами апарата й визначення інтервалу безпечного переходу між режимами. Отримані залежності можуть бути використані для постановки задачі синтезу, де змінні параметри активатора мають бути вибрані так, щоб забезпечити стабільне функціонування у квазістатичному режимі та достатній імпульсний вплив у динамічному режимі за допустимої амплітуди фазового зсуву.

Аналіз виявив, що ключовими чинниками, які визначають ефективність роботи п'єзоелектричного активатора в умовах дворежимного функціонування, є частотні властивості електромеханічної системи. У загальному випадку активатор характеризується власною частотою ω_0 , яка залежить від геометричних параметрів п'єзоперетворювача, механічної жорсткості й маси навантаження. Якщо робоча частота прикладеної напруги ω істотно відрізняється від ω_0 , механічне збудження буде формуватися з незначною амплітудою, що фактично обмежує можливість реалізації динамічного режиму. При цьому поблизу резонансної ділянки спостерігається суттєве підсилення амплітуди струсу, однак водночас зростає чутливість системи до фазових зсувів між електричним сигналом і механічною реакцією активатора. Це може призводити до нерівномірного формування струменя, коли активатор взаємодіє з рідиною з високою густиною або змінним гідродинамічним навантаженням, тому в процесі проєктування необхідно визначити допустимий частотний діапазон, у межах якого зберігається задана амплітуда механічного збудження та забезпечується стабільність функціонування. Фазові зсуви також відіграють важливу роль у процесі переходу між режимами, оскільки за зростання частоти збудження відносно відставання деформації від електричного сигналу збільшується. З позицій гідродинамічної взаємодії це може спровокувати зниження ефективності передачі збудження на робоче середовище та, як наслідок, зменшення інтенсивності струменя. Таким чином, частотна характеристика активатора повинна бути узгоджена з динамічними властивостями струминного каналу, що вимагає врахування не лише власної частоти п'єзоперетворювача, а й масо-інерційних властивостей рідинного середовища [18]. З урахуванням зазначеного подальший синтез активатора має базуватися на визначенні такого частотного інтервалу $[\omega_{\min}; \omega_{\max}]$, для якого одночасно забезпечуються такі умови:

- максимізація амплітуди механічного збудження;
- дотримання допустимого фазового зсуву $\phi(\omega)$;
- стійкість параметрів струменя до змін зовнішніх гідродинамічних параметрів.

Визначення зазначеного інтервалу є основним етапом формування узагальненої моделі «активатор – струминний канал», що безпосередньо впливає на постановку задачі синтезу.

Взаємодія п'єзоелектричного активатора з гідродинамічним середовищем струминного апарата описується сукупністю залежностей, які пов'язують електромеханічні параметри активатора з параметрами формованого струменя. Основу таких залежностей становлять функції, що визначають амплітуду й форму механічного збудження, яке передається на робочу рідину, а також параметри струминного потоку, що виникає в результаті дії активатора [19]. У спрощеному вигляді взаємозв'язок між характеристиками активатора та струменя може бути подано через функцію $v = f(\varepsilon_0, \omega, S, \rho)$, де v – швидкість струменя, ε_0 – амплітуда деформації п'єзоперетворювача, ρ – густина робочого середовища. Для статичного режиму функція $f(\varepsilon_0, \omega, S, \rho)$ має лінійний характер, тоді як для динамічного режиму функція $f(\varepsilon_0, \omega, S, \rho)$ залежить від співвідношення ω/ω_0 та містить резонансний множник. Разом із тим має бути врахована



залежність тиску струменя $p = (\rho \cdot v^2)/2$, що в поєднанні з функцією $f(\varepsilon_0, \omega, S, \rho)$ дає змогу визначати зміну енергетичної потужності струменя залежно від електромеханічних параметрів активатора. Таким чином, можна сформулювати узагальнену функцію відповідності $\Phi: (\varepsilon_0, \omega, S) \rightarrow (v, p, P)$, де P – питомий енергетичний вплив на струминний канал. У рамках синтезу активатора метою є визначення такого набору параметрів $(\varepsilon_0, \omega, S)$, який забезпечує необхідне значення вихідної функції Φ у сталому (квазістатичному) й імпульсному (динамічному) режимах, а також гарантує плавний перехід між ними без втрати стабільності струменя. Відповідно, постановка задачі синтезу запишеться у вигляді:

$$\left[\begin{array}{l} \Phi(\varepsilon_0, \omega, S) \geq \Phi_{\text{стат}} \text{ для квазістатистичного режиму} \\ \Phi(\varepsilon_0, \omega, S) \geq \Phi_{\text{дин}} \text{ для динамічного режиму} \\ \Phi(\varepsilon_0, \omega, S) \text{ стабільна при } \omega \in [\omega_{\text{min}}; \omega_{\text{max}}] \text{ для перемикання} \end{array} \right. \quad (2)$$

Таким чином, наведені залежності формують основу функціонально-параметричної моделі, яка дає змогу за заданими вимогами до параметрів струменя визначити оптимальні значення електромеханічних характеристик активатора за синтезу дворежимної системи.

3. Моделювання процесу формування струменя з урахуванням дворежимного функціонування

Обґрунтування методології синтезу п'єзоелектричного активатора та визначення основних закономірностей переходу між квазістатичним і динамічним режимами є підґрунтям для проведення формалізованого опису процесу формування струменя у дворежимній системі. На цьому етапі дослідження особливого значення набуває застосування математичного апарату гідродинаміки нестисливих середовищ, який дає змогу визначити залежності між електромеханічними параметрами активатора й характеристиками струминного потоку. Урахування параметрів режиму збудження, а також впливу частотних властивостей п'єзоперетворювача на параметри потоку створює підґрунтя для подальшої побудови чисельної моделі, здатної адекватно відтворювати як усталене, так й імпульсне формування струменя [20–22]. У цьому зв'язку найбільш доцільним на цьому етапі дослідження є детальний аналіз базових рівнянь руху робочого середовища в умовах статичної дії активатора з подальшим переходом до опису сценаріїв динамічного впливу, що забезпечує цілісне представлення процесу формування струменя та дає змогу сформулювати критерії переходу між режимами (рис. 3).

У рамках статичного режиму формування струменя основу математичного опису становить уявлення про робоче середовище як про нестисливу рідину, для якої виконується умова збереження об'єму потоку. Це дає змогу представити вплив п'єзоперетворювача через зміну швидкості руху робочого середовища, що, своєю чергою, лінійно залежить від величини прикладеної напруги. У цьому режимі процес формування струменя описується усталеним співвідношенням між тиском і кінетичною енергією струменя, яке безпосередньо визначає швидкість потоку $v = \sqrt{(p_0 - p)/\rho}$, де p – тиск у робочому середовищі, v – швидкість струменя, p_0 – початковий тиск на вході, причому збільшення різниці $(p_0 - p)$ відбувається внаслідок деформації активатора. На методологічному рівні це означає, що статичний режим може бути сформульовано як лінійну передатну залежність між електричними параметрами (U), механічним збуренням (ε) та параметрами струменя (v, p). Такий підхід дає змогу виконати низку актуальних задач, як-то:

- визначити базову калібрувальну залежність між деформацією активатора і швидкісними характеристиками потоку;
- сформулювати початкові параметри, які будуть використані для порівняння під час переходу до динамічного режиму;

- задати умову усталеності, яка в подальшому виконує роль критерію стійкості за адаптивного перемикавання режимів.

Отже, статичний режим формує вихідну модель переходу між категоріями «п'єзозбурення», «тиск» і «швидкість», яка в подальшому використовується як еталонна лінія для оцінювання ефективності динамічних сценаріїв.



Рис. 3. Структурно-логічна схема узгодження гідродинамічної моделі з електромеханічним збудженням

На відміну від статичного режиму, у якому електромеханічне збурення передається у вигляді лінійної детермінованої дії, динамічний режим характеризується частотно-залежною реакцією п'єзоперетворювача та появою гармонічних або імпульсних компонент у структурі збурення. У межах запропонованої методології це зумовлює необхідність розгляду кількох сценаріїв впливу, які відрізняються за характером передачі енергії до робочого середовища:

1. Гармонічний вплив. Під час наближення частоти керівного сигналу до власної частоти п'єзоелемента $\omega \rightarrow \omega_0$ спостерігається різке зростання амплітуди деформації, що спричиняє суттєве підсилення швидкості й імпульсності струменя. Як зазначено вище, у цьому разі струминний канал працює в режимі резонансного підсилення, а параметри потоку описуються через залежність $v = f(\epsilon_0, \omega, \rho)$, де функція f містить резонансний множник, що підвищує чутливість до змін ω . Методологічно цей сценарій є доцільним для підвищення інтенсивності струменя, але вимагає суворого контролю стабільності частоти.

2. Імпульсно-кластерний вплив. У разі коротких високочастотних імпульсів формування збурення відбувається у вигляді кластерів, між якими зберігається інтервал стабілізації. Це



дає змогу формувати вимірювані порції робочої рідини без повного переходу в резонанс, що є актуальним для дозувальних режимів. У цьому сценарії важливою є узгодженість тривалості імпульсу з інерційними характеристиками рідинного середовища.

3. Комбінований вплив передбачає поступове введення високочастотного складника на тлі базового статичного збурення. Такий підхід застосовується для плавного переходу між режимами без різкого зниження енергоефективності й дає змогу оновлювати амплітуду деформації залежно від гідродинамічного навантаження у струминному каналі.

З методологічної позиції наведені сценарії утворюють багатокомпонентну модель динамічного збурення, де змінними керування виступають не лише напруга та частота, а й форма сигналу й тривалість збудження. На цій основі в подальшому визначаються межі допустимого переходу між режимами, що є предметом наступного дослідження.

У межах дворежимного функціонування ефективність роботи п'єзоелектричного активатора визначається не лише коректністю реалізації окремих режимів, а й здатністю системи здійснювати стабільний та адаптивний перехід між ними. З огляду на це, формування критеріїв перемикання є ключовим завданням для математичного опису межі включення активатора в динамічний режим. На основі цього критеріального набору здійснюється оцінка межі включення активатора, яка задається не лише порогом частоти, а й конфігурацією вхідного сигналу, топологією каналу та властивостями робочого середовища. Методологічно система критеріїв переходу дає змогу реалізувати адаптивну логіку перемикання, що враховує змінність гідродинамічного навантаження, модель зворотного контролю частотної відповіді активатора, а також дизайн межових сценаріїв, у яких система перебуває на межі статичного й динамічного режимів, не втрачаючи ефективності. Таким чином, блок критеріїв переходу відіграє роль перехідного фільтра, що забезпечує узгодженість між електромеханічним збудженням і реакцією рідинного середовища, створюючи передумови для реалізації адаптивної оптимізації у синтезі дворежимних струминних систем.

4. Методологія оцінювання ефективності п'єзоелектричного активатора

Моделювання процесу формування струменя з урахуванням дворежимного функціонування дало змогу визначити як характер впливу п'єзоперетворювача на параметри потоку, так і критичні умови переключення між режимами. Однак для забезпечення практичної реалізації синтезу активатора цього недостатньо, оскільки вибір конструктивних та електричних параметрів має базуватися на кількісній оцінці фактичної результативності роботи системи. У цьому контексті наступним етапом дослідження є формування методики оцінювання ефективності п'єзоелектричного активатора, яка дає змогу встановити залежності між параметрами збудження, геометричними характеристиками перетворювача та кінцевими показниками якості струменя. Такий підхід забезпечує можливість не лише порівняння різних структур і режимів формування, а й виявлення ділянки параметрів, що гарантують стабільну роботу активатора та підвищення енергоефективності за адаптивного перемикання (рис. 4).

Оцінювання результативності роботи п'єзоелектричного активатора в умовах дворежимного формування струменя вимагає виокремлення узгодженого набору функціональних критеріїв, які характеризують як якісні, так і кількісні параметри процесу. Із методологічного погляду доцільно розглядати ефективність не як окремий показник, а як систему взаємопов'язаних характеристик, що відображають здатність активатора реалізувати керований вплив на робоче середовище за збереження стабільності режиму. Інтеграція цих критеріїв у єдину систему дає змогу формувати узагальнений показник ефективності, на основі якого здійснюється порівняння різних конструктивних рішень. У подальшому саме цей набір критеріїв використовується як цільова функція під час визначення оптимальних значень електричних і конструктивних параметрів активатора. Після визначення критеріїв функціональної ефективності

подальше дослідження має бути спрямоване на встановлення зв'язків між параметрами активатора та значеннями сформованих показників ефективності. У цьому контексті конструктивні й електричні змінні виступають як керовані параметри, від яких залежить динаміка взаємодії електромеханічного збурення з гідродинамічним середовищем.

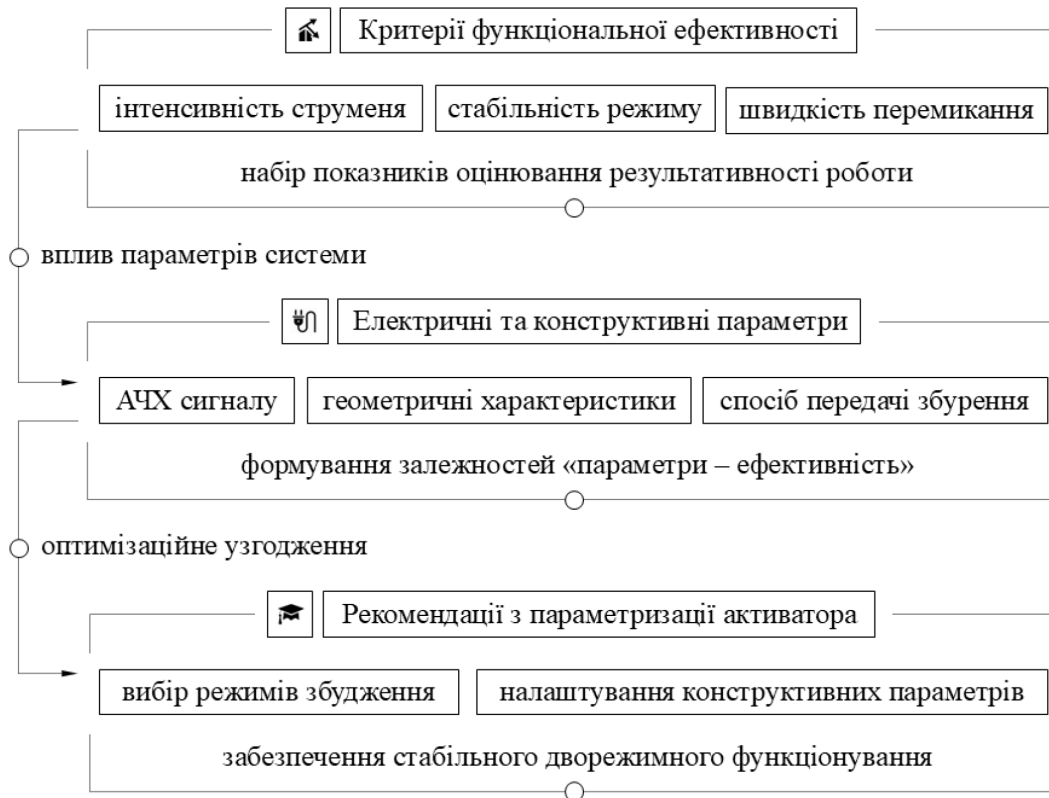


Рис. 4. Структурно-логічна схема формування критеріїв і параметризації п'єзоелектричного активатора для дворежимного функціонування

З позицій практичної реалізації комплексу до ключових електричних параметрів належать:

- амплітуда й частота прикладеної напруги, які безпосередньо визначають інтенсивність збудження та здатність системи до переходу в резонансний режим;
- форма керівного сигналу, що впливає на характер передачі збурення.

Серед конструктивних параметрів найбільш суттєвими в рамках виконання завдання дослідження є:

- геометричні характеристики п'єзоперетворювача, які визначають власну частоту системи й максимальну амплітуду деформації;
- спосіб передачі механічного збурення, що впливає на ефективність взаємодії з робочим середовищем.

Аналіз комбінацій цих параметрів показує, що нерівномірність впливу різних чинників вимагає використання узгодженої оцінювальної моделі, у якій кожний параметр має власну зону впливу на інтегральний критерій ефективності:

- електричні параметри найбільш суттєво впливають на інтенсивність і швидкість перемикання;
- конструктивні параметри – на стабільність роботи й розширення робочого діапазону.

Така диференціація дає змогу сформувати багатовимірне поле ефективності, яке буде використано під час синтезу оптимальної конфігурації активатора на наступному етапі.



Синтез отриманих залежностей дає можливість сформулювати низку узагальнених рекомендацій щодо параметризації п'єзоелектричного активатора, орієнтованої на забезпечення ефективного дворежимного функціонування. Амплітуда та частота керівного сигналу повинні визначатися з урахуванням допустимого діапазону, у межах якого реалізується як достатній рівень збурення, так і стійкість відносно фазових відхилень. Вибір геометричної конфігурації перетворювача має відбуватися з огляду на необхідну максимальну амплітуду деформації в динамічному режимі та забезпечувати можливість лінійного керування в статичному режимі. Окрім того, доцільним є застосування адаптивних схем збудження, які передбачають зміну амплітуди або форми сигналу залежно від поточного гідродинамічного навантаження, що забезпечує плавний перехід між режимами без втрати енергоефективності. Застосування цих принципів дає змогу підвищити продуктивність дворежимних струминних апаратів, зберігаючи стабільність формування потоку та скорочуючи перехідні втрати під час перемикання.

Висновки. У результаті дослідження розроблено узагальнену методологію синтезу п'єзоелектричного активатора для дворежимного струминного апарата з урахуванням взаємодії електромеханічного збудження й гідродинамічних процесів формування струменя. Особливу увагу приділено визначенню параметрів переходу між статичним і динамічним режимами, а також формуванню системи критеріїв оцінювання ефективності активатора. У результаті аналізу:

- систематизовано конструктивні варіанти п'єзоперетворювачів і визначено їх придатність до функціонування у квазістатичному та резонансному режимах;
- обґрунтовано принцип узгодження електромеханічного збудження з гідродинамічною моделлю нестисливої рідини як основу для побудови функціонально-параметричної моделі «активатор – струминний канал»;
- встановлено критичний діапазон робочих частот, у межах якого забезпечується максимальна амплітуда механічного збурення за допустимого фазового зсуву;
- розроблено узгоджену систему критеріїв функціональної ефективності, що дала змогу сформулювати узагальнений показник ефективності активатора;
- визначено вплив електричних параметрів і конструктивних характеристик на рівень ефективності дворежимного формування струменя;
- сформульовано рекомендації щодо параметризації активатора, які передбачають поєднання частотного узгодження, адаптивної зміни електричних режимів і конструктивної гнучкості.

Отримані результати мають практичне значення для проєктування й оптимізації п'єзоелектричних активаторів струминних апаратів, що працюють у змінних режимах. Використання запропонованої методики дає змогу підвищити енергоефективність систем керування струменем, забезпечити стабільне перемикання між режимами роботи та розширити функціональні можливості прецизійних технологічних пристроїв на основі п'єзоелектричного керування.

Список використаних джерел

1. Bußmann A., Thalhoffer T., Hoffmann S., Daum L., Surendran N., Hayden O., Hubbuch J., Richter M. Microfluidic cell transport with piezoelectric micro diaphragm pumps. *Micromachines*. 2021. № 12(12). Article 1459. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi12121459>
2. Parsi B. Design and optimization of piezoelectric actuators for micropumps. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology, Advance online publication*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1177/16878132231158983>
3. Zhang J. Piezoelectric inkjet printing: The principles, fluid dynamics and numerical analysis. *Materials Today Communication*. 2024. № 41. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sdx.2024.XXX>



4. Luo Z., Peng J., Cao J., Yin R., Zou B., Tan Y., Yan J. Demand Flexibility of Residential Buildings: Definitions, Flexible Loads, and Quantification Methods. *Engineering*. 2022. № 16(9). P. 123–140. DOI: 10.1016/j.eng. 2022.01.010
5. Hao J., Gou X., Wang S., Chen Q., Gao K. Dynamic Modeling and Flexibility Analysis of an Integrated Electrical and Thermal Energy System With the Heat Pump–Thermal Storage. *Frontiers in Energy Research*. 2022. № 10. Article 817503. DOI: 10.3389/fenrg.2022.817503
6. Wan J. Dynamic Skin: A Systematic Review of Energy-Saving Technologies. *Buildings*. 2025. № 15(14). P. 2572. URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/15/14/2572>
7. Ho H. H. Synthetic jet actuators for active flow control: A review. *Fluids*. 2024. № 9(12). P. 290. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids9120290>
8. Arafa N. Jet velocity and acoustic excitation characteristics of a synthetic jet actuator. *Fluids*. 2022. № 7(12). P. 387. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids7120387>
9. Jung J., Moon J., Kim D. Dynamics of a Lorentz force–activated oscillating jet. *Physical Review Fluids*. 2025. № 10. 023701. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.10.023701>
10. Lu Z., Dupuis E.D., Patel V.K., Momen A.M., Shahab S. Ultrasonic oscillatory two-phase flow in microchannels. 2020. *arXiv*. URL: <https://arxiv.org/abs/2012.03406>
11. Oosterhuis J. P., Bühler S., Wilcox D., van der Meer T. H. Jet pumps for thermoacoustic applications: Design guidelines based on a numerical parameter study. 2015. *arXiv*. URL: <https://arxiv.org/abs/1508.05119>
12. Deng G., et al. A simplified analysis method for the piezo jet dispenser. *Sensors*. 2018. № 18(7). URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/7/2115>
13. Várhegyi G. Empirical models with constant and variable activation parameters. *Energy & Fuels*. 2019. № 33(3). DOI: 10.1021/acs.energyfuels.9b00040
14. Zhou X., Wu S., Wang X., Wang Z., Zhu Q., Sun J., Huang P., Wang X., Huang W., Lu Q. Review on piezoelectric actuators: materials, classifications, applications, and recent trends. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2024. № 19(1). P. 6. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11465-023-0772-0>
15. Mane P. Piezoelectric actuators as synthetic jets: Cavity dimension effects. *Journal of Propulsion and Power*, 2007. № 18(11). DOI: <https://doi.org/10.1177/1045389X06075658>
16. Ghaemi A., Ebrahimi A., Hajipour M. Integrated multiphysics modeling of a piezoelectric micropump. 2025. *arXiv*. URL: <https://arxiv.org/abs/2502.06413>
17. Mamba S., Zoueshtiag F., Baudoin M. Pressure-driven dynamics of liquid plugs in rectangular microchannels: Influence of the transition between quasi-static and dynamic film deposition regimes. *Journal of Fluid Mechanics*. 2018. № 853. R4. URL: <https://arxiv.org/abs/1802.02489>
18. Ho H. H., Shirinzad A., Essel E. E., Sullivan P. E. Synthetic Jet Actuators for Active Flow Control: A Review. *Fluids*. 2024. № 9(12). Article 290. DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids9120290>
19. Holman R., Utturkar Y., Mittal R., Smith B.L., Cattafesta L. Formation criterion for synthetic jets. *AIAA Journal*. 2005. № 43(10). P. 2110–2116
20. Silva R. E., Franco M. A. R., Bartelt H., Pohl A. A. Numerical characterization of piezoelectric resonant transducer modes for acoustic wave excitation in optical fibers. *Measurement Science and Technology*. 2013. № 24(9). 094020. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/9/094020>
21. Lu Y., Qiu Y. Research on inherent frequency and vibration characteristics of sandwich piezoelectric ceramic transducer. *Sensors*. 2022. № 22(23). P. 9431. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/23/9431>
22. Li W. Design and analysis method of piezoelectric liquid driving device considering coupling effects of elastic force and liquid parameters. *PMC NCBI*. 2024. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC11052154>

Дата першого надходження статті до видання: 25.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



**A. Riabovol***National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"***METHODOLOGICAL FOUNDATIONS FOR DESIGNING PIEZOELECTRIC ACTUATORS OF DUAL-MODE JET DEVICES*****Summary***

A comprehensive analysis of modern approaches to the design of piezoelectric actuators for dual-mode jet devices is carried out, covering the functional principles of converting electrical energy into mechanical excitation, the structural features of piezoelectric transducers, and the classification of jet-forming regimes in devices with piezoelectric control. The differences between static and dynamic operating modes are detailed, particularly regarding their areas of application, requirements for the electrical parameters of the actuator, and the types of deformation transmitted to the jet channel. It is shown that a key prerequisite for synthesizing an effective actuator is the consistency of the mathematical models describing the interaction between the piezoelectric element and the internal hydrodynamic environment of the jet channel, as well as the consideration of the frequency characteristics of the piezoelectric transducer that determine the response speed to the control signal. The parameters of the mechanical response of the piezoelectric actuator affecting the dynamics of jet formation – including the waveform of the applied voltage, the disturbance amplitude, the geometric dimensions of the transducer, and the physical–mechanical properties of the working medium – are generalized. A generalized numerical model of the jet formation process is presented, which makes it possible to evaluate the influence of piezo-excitation in both quasi-static and dynamic operating modes. A comparative analysis of jet-forming regimes is performed, and the switching limits of the piezoelectric transducer are determined – ensuring minimization of energy efficiency losses and improving the stability of the jet device when switching between operating modes. The influence of design parameters of the actuator on the amplitude and shape of the flow is analyzed, which makes it possible to formulate general recommendations for achieving stable dual-mode operation over a wide range of working frequencies. Based on the obtained relations, a system of criteria for evaluating the effectiveness of the piezoelectric actuator is formulated, including jet intensity and stability, response speed to the control signal, consistency of mechanical loading with the electrical characteristics of the actuator, and the resistance of the jet formation process to changes in external conditions. Practical recommendations are substantiated for the parameterization and tuning of piezoelectric actuators based on the principle of adaptive optimization, which makes it possible to increase the dynamic performance of jet devices and ensure their stable operation.

Keywords: piezoelectric actuator, dual-mode jet device, mathematical modeling, jet formation, dynamic mode, performance criteria, actuator synthesis.