

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ
(м. Сєвєродонецьк)

Факультет Інформаційних технологій та електроніки
(повне найменування факультету)

Кафедра Програмування та математики
(повна назва кафедри)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до дипломної роботи

освітньо-кваліфікаційного рівня магістр
(бакалавр, спеціаліст, магістр)

спеціальності 171 – Електроніка
(шифр і назва спеціальності)

на тему Розробка та дослідження схем включення п'єзоелектричних транс-
форматорів

Виконав: студент групи Ел-13м

Лук`янченко Є.І.
(прізвище, та ініціали)

(підпис)

Керівник Паєранд Ю.Е.
(прізвище та ініціали)

(підпис)

Завідувач кафедри Лифар В. О.
(прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент Самойлова Ж.Г.
(прізвище та ініціали)

(підпис)

Сєвєродонецьк - 2019

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ
(м. Сєвєродонецьк)

Факультет Інформаційних технологій та електроніки

Кафедра Програмування та математики

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
(бакалавр, спеціаліст, магістр)

Спеціальність 171 – Електроніка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В.О.Лифар

“ ____ ” _____ 2019 року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Лук`янченку Євгену Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка та дослідження схем включення п'єзоелектричних трансформаторів

керівник проекту (роботи) Паєранд Юрій Едуардович к.т.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “21” листопада 2018 року № 245/48

2. Строк подання студентом роботи 15.01.2019

3. Вихідні дані до роботи Матеріали науково-дослідної практики

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1) Аналіз питання та постановка задачі;

2) Дослідження включення декількох п'єзоелектричних трансформаторів;

3) Розробка методів та схемних рішень автоматичного забезпечення роботи п'єзотрансформатора на резонансній або при резонансній частоті;

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Дата видачі завдання 01.09.2018

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Актуальність теми і постановка завдань дослідження.	03.09.18 - 10.09.18	
2	Аналіз розробок та досліджень	11.09.18 - 30.09.18	
3	Огляд способів керування режимами п'єзотрансформаторів	01.10.18 - 14.10.18	
4	Дослідження послідовного включення декількох п'єзоелектричних трансформаторів напруги	15.10.18 - 30.10.18	
5	Дослідження паралельного включення декількох п'єзоелектричних трансформаторів напруги	15.10.18 - 30.10.18	
6	Моделювання паралельного включення п'єзоелектричних трансформаторів	01.11.18 - 05.12.18	
7	Розробка методів та схемних рішень автоматичного забезпечення роботи п'єзотрансформатора на резонансній частоті	06.12.18 - 31.12.18	
7	Оформлення пояснювальної записки	01.01.19 - 15.01.19	

Студент Лук'янченко Є.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) Паєранд Ю.Е.
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.....	10
1.1 Основні типи і конструкції п'єзоелектричних трансформаторів ...	10
1.2 Принцип роботи п'єзотрансформатора.....	14
1.3 Порівняльний аналіз п'єзоелектричних та електромагнітних трансформаторів	17
1.4 Способи керування режимами п'єзоелектричних трансформаторів	21
1.5 Розгляд схем ввімкнення декількох п'єзоелектричних трансформаторів напруги, для підвищення коефіцієнта трансформації.....	36
1.5 Висновки за розділом	38
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ВКЛЮЧЕННЯ ДЕКІЛЬКОХ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ	40
2.1 Загальні положення	40
2.2 Дослідження послідовного включення декількох п'єзоелектричних трансформаторів напруги	41
2.3 Дослідження паралельного включення декількох п'єзоелектричних трансформаторів напруги	47
2.4 Моделювання паралельного включення декількох одношарових п'єзотрансформаторів напруги.....	53
2.5 Висновки за розділом.....	60
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МЕТОДІВ ТА СХЕМНИХ РІШЕНЬ АВТОМАТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОБОТИ П'ЄЗОТРАНСФОРМАТОРА НА РЕЗОНАНСНІЙ АБО ПРИРЕЗОНАНСНІЙ ЧАСТОТІ.....	62
3.1 Загальні положення	62
3.2 Стабілізація вихідної напруги п'єзотрансформатора за допомогою контролю його вхідного струму	63

3.3 Стабілізація вихідної напруги п'єзотрансформатора за допомогою контролю фазового зсуву між вхідним струмом та вхідною напругою п'єзотрансформатора.....	67
3.4 Робота п'єзотрансформатора поблизу резонансу.....	70
3.5 Висновки за розділом.....	75
ВИСНОВКИ.....	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	80

ВСТУП

Актуальність теми. В наш час наука і техніка в своєму розвитку досягли високого рівня, і цей розвиток буде відбуватися вічно. Однією з найрозвинутіших областей людської діяльності є електроніка. Вона оточує кожну людину на роботі, на вулиці, вдома, усюди. За допомогою електронних пристроїв тепер можна робити таке, про що декілька років тому ще й не мріялося.

Але тепер багато уваги приділяється не тільки створенню нових пристроїв, поліпшенню можливостей та електричних характеристик старих. На передній план тепер виступають такі важливі показники, як вага, габаритні розміри, ціна, економічність в використанні, тощо. І це добре видно, якщо поглянути, як змінили свої розміри телевізори, музикальні програвачі, комп'ютери, мобільні телефони, та більшість іншої побутової (і не тільки) техніки.

Зменшення розмірів різноманітних електронних пристроїв відбувається завдяки тому, що з кожним роком елементи електроніки стають меншими за розміром.

Процес мініатюризації компонентів електроніки йде вже давно. Але не всі їх вдається зменшити (наприклад, елементи силової електроніки), або це можна зробити лише з погіршенням якихось важливих параметрів. До таких елементів можна віднести електромагнітні трансформатори. Вони широко використовуються у багатьох електронних пристроях і довгий час були незамінними при реалізації певних схемотехнічних рішень. Але з розвитком такої специфічної науки як п'єзоелектроніка з'явилися принципово нові елементи – п'єзоелектричні трансформатори, які в деяких випадках можуть замінити електромагнітні трансформатори і працювати при цьому більш ефективно.

П'єзоелектричні трансформатори відносяться до класу виробів електронної техніки, в основі дії яких лежить п'єзоелектричний ефект. Для п'єзотрансформаторів характерні простота технології виготовлення, планарність конструкції, відсутність обмоток, високі економічність та надійність.

Широкі функціональні можливості та підвищена частота перетворювання енергії дозволяють суттєво поліпшити масогабаритні характеристики та підвищити технічний рівень широкого класу напівпровідникових перетворювальних пристроїв та джерел вторинного електроживлення радіоелектронної апаратури. Зокрема, високовольтні джерела вторинного електроживлення на базі п'єзотрансформаторів малої та середньої потужності (до 10 Вт) мають в 4 – 6 разів кращі масогабаритні показники, ніж аналогічні джерела вторинного електроживлення з електромагнітними трансформаторами. Однак ряд специфічних особливостей представляє певні труднощі при створенні на їх основі широкого класу перетворювачів для радіоелектронної апаратури. Відомі схемотехнічні методи побудови джерел вторинного електроживлення з електромагнітними трансформаторами в цьому разі неприйнятні.

Довгий час розробка та впровадження джерела вторинного електроживлення з п'єзотрансформаторами стримувались відсутністю високоякісної п'єзокераміки з необхідними електрофізичними властивостями та недостатніми зусиллями по розвитку силової п'єзонапівпровідникової техніки [1].

На цей час такі матеріали створені, виготовляються якісні п'єзотрансформатори з високими електричними показниками, такими як коефіцієнт трансформації та ККД. Проте особливість роботи п'єзотрансформаторів обумовлює певну складність при розробці електричних схем на їх основі, а мала вихідна потужність обмежує використання навіть в малопотужній електроніці.

Таким чином, задачі, які поставлені та вирішуються в роботі є актуальними.

Мета і задачі роботи. Розробка ефективних способів використання п'єзоелектричних трансформаторів напруги в джерелах вторинного електроживлення та підвищення вихідної потужності схем з використанням п'єзоелектричних трансформаторів. Для досягнення мети поставлені наступні задачі:

- розробка методів та схемних рішень автоматичного забезпечення роботи п'єзотрансформаторів на резонансній або близької до неї;

- дослідження послідовного включення декількох п'єзотрансформаторів;
- дослідження паралельного включення декількох п'єзотрансформаторів.

Об'єктом дослідження є п'єзоелектричні трансформатори напруги.

Предметом дослідження є розробка способів забезпечення ефективної роботи п'єзоелектричних трансформаторів напруги та підвищення вихідної потужності при використанні декількох п'єзотрансформаторів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- запропонований новий спосіб збільшення навантажувальної здатності, заснований на паралельному включенні декількох одношарових п'єзотрансформаторів напруги, який дозволяє отримати більшу вихідну потужність в схемах з використанням п'єзотрансформаторів;
- запропонований новий спосіб автоматичної настройки п'єзотрансформатора на частоту резонансу, який полягає у контролі вхідного струму, який забезпечує максимальне значення напруги на виході п'єзотрансформатора;
- запропонований новий спосіб автоматичної настройки п'єзотрансформатора на частоту резонансу, який полягає у контролі фазового зсуву між вхідним током та вхідною напругою, який забезпечує максимальне значення напруги на виході п'єзотрансформатора;
- запропонований новий спосіб підвищення ефективної роботи п'єзотрансформатора, який полягає в коливанні частоти збудження біля резонансної, який забезпечує велике середнє значення вихідної напруги п'єзотрансформатора на високоомному навантаженні та простоту схемотехнічної реалізації.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що запропоновані способи дозволяють:

- підвищити ефективність роботи схем на базі п'єзотрансформаторів за рахунок автоматичної стабілізації вихідної напруги на максимальному значенні;

- розширити область використання п'єзотрансформаторів за рахунок збільшення вихідної потужності при паралельному включенні декількох п'єзотрансформаторів.

Особистий внесок здобувача полягає в розробці нових способів ефективного використання п'єзоелектричних трансформаторів в електронних схемах та підвищення здатності до навантаження таких схем.

Структура роботи. Робота складається з вступу, трьох розділів та висновків. Загальний обсяг роботи – 81 стор., 37 рисунків, 6 таблиць і список використаних джерел із 17 найменувань.

1 ПЕРШИЙ РОЗДІЛ

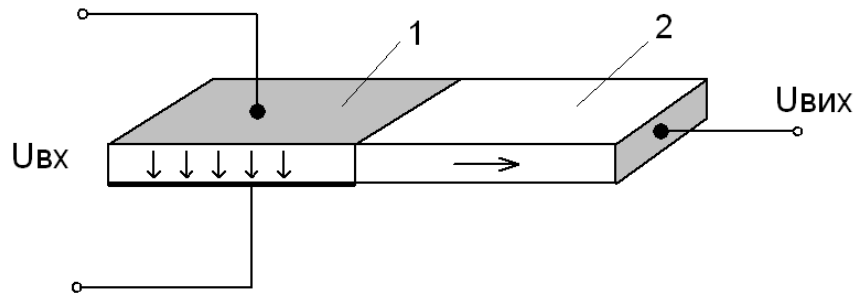
АНАЛІЗ ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Основні типи і конструкції п'єзоелектричних трансформаторів

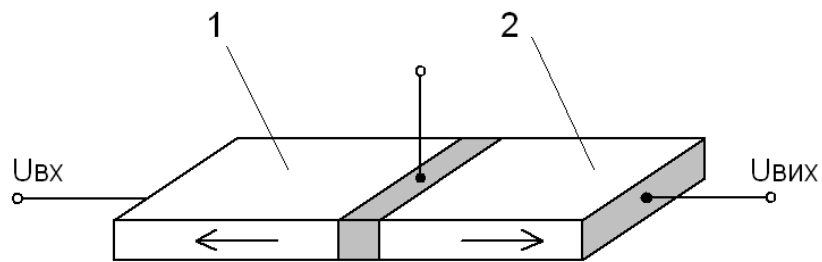
П'єзотрансформатори (електромеханічні перетворювачі енергії) є монокристалічними твердотільними конструкціями, виконаними з п'єзокераміки у вигляді стрижня, пластини, диска або циліндра. Особливістю п'єзокерамічних трансформаторів є резонансний характер перетворення енергії в порівняно вузькій смузі частот механічного резонансу, коли амплітуда механічної внутрішньої напруги досягає максимального значення. За типом збудження об'ємних хвиль деформацій в п'єзоелектричних трансформаторах їх умовно підрозділяють на зсувні, коливання вигину і подовжні. П'єзотрансформатори з коливаннями зсуву та вигину знайшли застосування як функціональні елементи при передачі малих рівнів електричних сигналів: зсувні п'єзотрансформатори в області частот від 0,5 МГц і вище; з коливаннями вигину в низькочастотній області - до одиниць кілогерц. Найбільшого поширення набули п'єзотрансформатори пластинчастого типу із збудженням об'ємних подовжніх коливань у напрямі ширини або довжини п'єзопластини. Залежно від напрямку вектора поляризації або полярної осі в п'єзоструктурі, стан якої можна вважати незмінною, і напрямку розповсюдження збуджених коливань п'єзотрансформатори підрозділяють на поперечно-подовжні, поперечно-поперечні, подовжньо-подовжні і подовжньо-поперечні. Вони зображені на рисунку 1.1. Залежно від призначення п'єзотрансформатори підрозділяють на ті, що підвищують (високовольтні, трансформатори напруги) і знижують (трансформатори струму).

Одна з перших конструкцій високовольтних п'єзотрансформаторів – конструкція Розена, п'єзотрансформатор поперечно-подовжнього типу – показаний на рисунку 1.1, а [2, 3, 4]. Коефіцієнт трансформації такого п'єзотрансформатора, виготовленого з п'єзокерамік системи ЦТС (цирконат

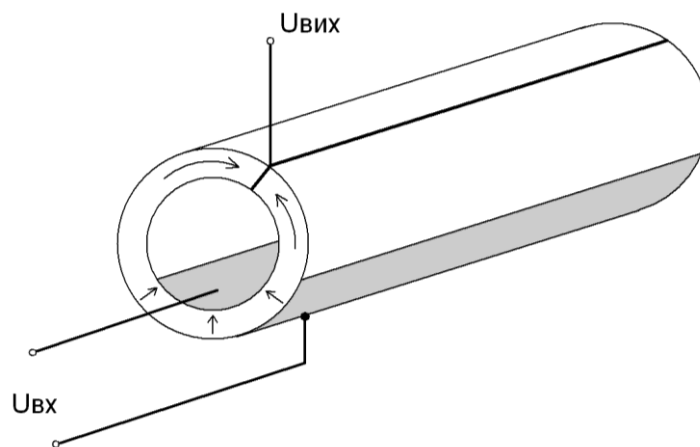
титанат свинцю), досягає 100 в навантаженому стані і більше 1000 за відсутності навантаження. Такі п'єзотрансформатори ефективно працюють як на основній, так і на другій гармоніці власного механічного резонансу.



а)

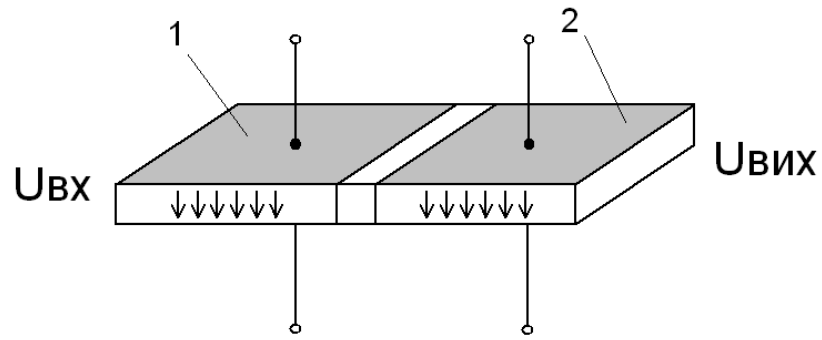


б)

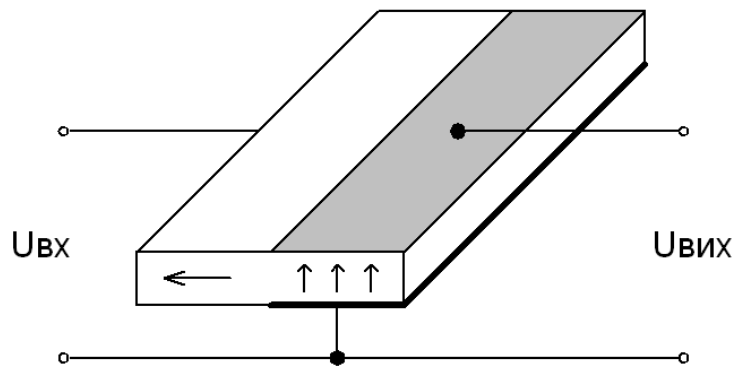


в)

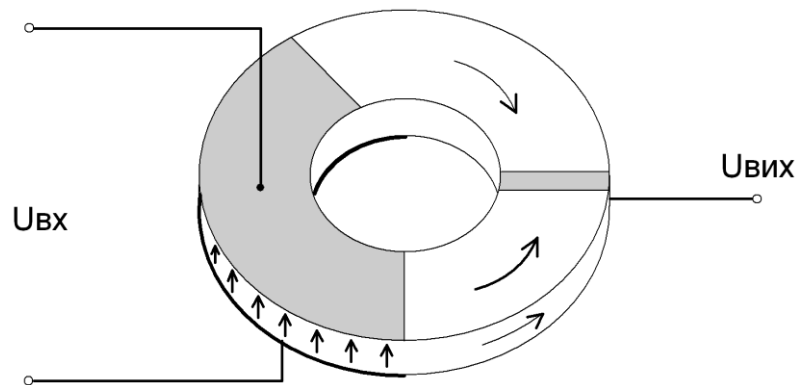
Рисунок 1.1, аркуш 1 – Основні типи і конструкції п'єзотрансформаторів



з)



д)



е)

Рисунок 1.1, аркуш 2

Прикладом п'єзотрансформатора подовжньо-подовжнього типу є конструкція, зображена на рисунку 1.1, б: п'єзотрансформатор є стрижнем з п'єзокераміки з подовжньою поляризацією міжелектродних областей. При

збудженні подовжніх коливань в стрижні напрям розповсюдження пружних хвиль і напрями поляризації співпадають. Особливістю таких п'єзотрансформаторів є мінімальна реактивна складова вхідного опору і велике його значення. Коефіцієнт трансформації значно нижчий, ніж у п'єзотрансформаторів поперечно-подовжнього типу.

Для перетворення підвищеної потужності найбільш оптимальними є п'єзотрансформатори з п'єзоелементом у вигляді циліндра (рисунок 1.1, в), що відрізняються високою міцністю при роботі в сильних динамічних полях і моночастотністю амплітудно-частотних характеристик. У них використовуються радіальні коливання циліндра. Трансформатори напруги з циліндровим або дисковим п'єзоелементами (рисунок 1.1, е) можна віднести до поперечно-подовжнього типу (дві поляризовані аксіальні генераторні секції із загальним кільцевим вихідним електродом). На рисунках 1.1, з і д зображені поперечно-поперечний і подовжньо-поперечний п'єзотрансформатори, які знижують.

Топологія електродів на протилежних площинах п'єзопластини п'єзотрансформатора повністю симетрична. Залежно від необхідних вихідних параметрів розраховується розмір і співвідношення площ електродів вхідної і вихідної секцій. Якщо розмістити вхідний і вихідний електроди строго симетрично щодо подовжньої центральної осі п'єзопластини, такий п'єзотрансформатор ефективно працюватиме на 1-ій і 2-ій гармоніках власних коливань. При аналогічному розташуванні трьох симетричних електродів можлива робота на 3-ій гармоніці і т.д. Звичайно знижуючі п'єзотрансформатори мають робочу частоту в інтервалах 60...100 кГц або 200...270 кГц при коефіцієнті трансформації 10:1. Істотно знизити коефіцієнт трансформації можна за допомогою п'єзотрансформатора подовжньо-поперечного типу при використанні коливань по ширині на 1-ій і 2-ій гармоніках.

У конструкціях низьковольтних п'єзотрансформаторів ($U_{\text{вх}}, U_{\text{вих}} < 500\text{В}$) для підвищення потужності (струму) на виході необхідно мати мінімально можливі значення $Z_{\text{вх}}, Z_{\text{вих}}$, тобто у них повинні бути найбільшими значення

$C_{вх}$, $C_{вих}$. Тому для цих п'єзотрансформаторів найбільш ефективним є частотний діапазон f_p від 100 кГц до 1,5...3 МГц. З цією метою використовують вищі моди подовжніх коливань по ширині, виконуючи секції збудника і генератора п'єзотрансформатора у вигляді напівхвильових секцій при точному узгодженні положення пар електродів з пучностями стоячої хвилі на частоті $f_p \leq 500$ кГц. При цьому п'єзотрансформатори необхідно виготовляти з можливо тонших пластин (0,1...1 мм) для отримання низького $Z_{вих}$ і високих значень питомої потужності. У діапазоні $f_p > 0,5...3$ МГц використовуються основні і вищі моди подовжніх коливань, а також зсувні коливання по товщині п'єзотрансформатора. Коливання зсуву характеризуються вищим коефіцієнтом електромеханічного зв'язку і значеннями механічної добротності і є одними з найбільш ефективних для створення перспективних конструкцій п'єзотрансформаторів. При цьому необхідно використовувати п'єзоматеріали з високою допустимою напруженістю електричного поля і слабкою залежністю електрофізичних параметрів при сильних динамічних збудженнях. Низьковольтні п'єзотрансформатори повинні працювати в режимах, близьких до граничних по механічній і електричній нарузі, забезпечуючи передачу максимальної потужності при ККД $\geq 0,85...0,95$. При цьому для перспективних конструкцій п'єзотрансформаторів граничні показники питомої потужності складають 150...1000 Вт/дм³.

1.2 Принцип роботи п'єзоелектричного трансформатора

П'єзоелектричний трансформатор є електричним багатополіусником. Він представляє собою тверде тіло з п'єзоелектричного матеріалу, переважно п'єзокерамічного, розташованого в корпусі для захисту від зовнішніх впливів. На його поверхні нанесено не менш трьох електродів, які за допомогою виводів підключені до зовнішніх електричних кіл. П'єзоелектричні трансформатори виконують різні функції. Вони можуть перетворювати опір кола, змінювати сигнал по нарузі чи току, інвертувати фазу вхідного сигналу та,

крім цього, володіють ще цілим рядом функціональних властивостей, що дозволяє знайти їм застосування не лише в якості пасивних, а й активних елементів схем.

П'єзоелектричний трансформатор складається зі збудника 1 і генератора 2 (рисунок 1.1). При подачі на збудник 1 змінного електричного сигналу в ньому за рахунок зворотного п'єзо ефекту виникають механічні коливання з частотою прикладеного електричного поля. Механічні коливання збудника, розповсюджуючись у п'єзоелементі, передаються в генератор 2 і на електродах генератора за рахунок прямого п'єзо ефекту з'являється електричний сигнал. Таким чином, за допомогою подвійного перетворення електричної енергії в механічну і навпаки передається енергія з входу на вихід п'єзотрансформатора. За таким же принципом здійснюється робота будь-якої конструкції п'єзотрансформатора. Оскільки збудник механічно пов'язаний з генератором, то в п'єзотрансформаторі відсутній гальванічний, а також і електричний зв'язок між входом і виходом.

П'єзоелектричний трансформатор є електромеханічним резонатором і в загальному випадку є акустично монолітним твердим тілом з п'єзоелементом. Амплітуда механічних коливань електромеханічного резонатора, а отже і передача енергії від збудника до генератора п'єзотрансформатора залежить від частоти. При збігу частоти електричного сигналу збудження з власними частотами механічного резонансу в електромеханічному резонаторі відбувається багатократне накладення акустичних хвиль, внаслідок чого в п'єзоелементі встановлюються механічні хвилі великої амплітуди. При цьому на частотах механічного резонансу здійснюється найбільш ефективна передача енергії від п'єзотрансформатора до навантаження. Щоб змінити робочу частоту або частоти п'єзотрансформатора, необхідно змінити його розміри.

У деяких конструкцій ширококутових п'єзоелектричних трансформаторів коефіцієнт трансформації по напрузі слабо змінюється в достатньо широкій області частот (нижче за частоту першого резонансу механічних коли-

вань). Такі трансформатори застосовують в якості імпульсних пристроїв і елементів пам'яті.

У п'єзоелектричному трансформаторі як в механічному резонаторі можливе збудження різних типів акустичних хвиль: подовжніх, вигину, зсувних і крутільних, основної або вищих мод коливань. Для ефективного збудження в п'єзотрансформаторі будь-якого з вказаних типів коливань необхідно виготовити п'єзоелемент трансформатора певної форми і конструкції і поляризувати по відношенню до його електродів.

Конструкції п'єзотрансформатора подовжньо-подовжнього і поперечно-поперечного (рисунок. 1.1, б, з) типів є симетричними. При рівності об'ємів збудника 1 і генератора 2 коефіцієнт трансформації по напрузі у цих п'єзотрансформаторів визначається тільки резонансними властивостями п'єзоелемента. П'єзоелектричний трансформатор поперечно-подовжнього типу (рисунок 1.1, а) є несиметричною конструкцією. Його коефіцієнт трансформації по напрузі залежить не тільки від резонансних властивостей п'єзоелемента, але і визначається також конструктивними параметрами: відношенням довжини генератора до товщини збудника. У режимі холостого ходу коефіцієнт трансформації по напрузі у п'єзотрансформатора поперечно-подовжнього типу може перевищувати 1000, а у симетричних конструкцій – тільки 10-200 в цьому ж режимі.

П'єзоелектричні трансформатори з генератором подовжнього типу називають п'єзоелектричними трансформаторами напруги. Максимальна напруга на виході генератора п'єзотрансформатора визначається відстанню між електродами генератора і напругою, яку можна отримати з одиниці довжини п'єзоелектричного матеріалу. Сучасні п'єзоелектричні матеріали на основі твердих розчинів цирконату-титанату свинцю системи ЦТС (PZT) дозволяють отримати напругу в 50-300 В з кожного міліметра довжини генератора. Таким чином, для п'єзоелектричного матеріалу з питомою напругою 100 В/мм при довжині генератора 10 мм напруга на його обкладинках буде дорівнювати 1000 В, а для генератора завдовжки 100 мм - 10 000 В. Тому в якості

високовольтних п'єзотрансформаторів напруги використовують конструкції з генераторами подовжнього типу, у яких відстань між електродами максимальна, а отже, максимальна напруга на виході трансформатора.

Крім того, для п'єзотрансформаторів напруги з генератором подовжнього типу характерні високі значення вихідних опорів, які для більшості конструкцій перевищують сотні кілоом. Цим і обумовлене те, що до недавнього часу всі п'єзоелектричні трансформатори відносили до п'єзотрансформаторів напруги, тобто до приладів, на виході яких важко отримати струми більше 1 мА. Останнім часом розроблені конструкції п'єзотрансформаторів з вихідними струмами до 10 А. Враховуючи їх конструктивні особливості і нові вимоги, які до них пред'являються, вони були названі п'єзоелектричними трансформаторами струму.

Ділення п'єзотрансформаторів на трансформатори напруги і струму досить умовне, оскільки між ними не можна провести якісної межі і деякі конструкції п'єзотрансформаторів можна віднести і до тих, і до інших. Зазвичай до п'єзотрансформаторів струму відносять конструкції з коефіцієнтом трансформації по напрузі менше одиниці або з незначним перевищенням одиниці, які працюють при порівняно великих вхідних і вихідних струмах.

Оскільки серед простих конструкцій у п'єзотрансформаторів з генератором поперечного типу найбільш низькі вихідні опори, то на їх основі і було розроблено більшість конструкцій п'єзотрансформаторів струму [5].

1.3 Порівняльний аналіз п'єзоелектричних та електромагнітних трансформаторів

П'єзоелектричні і електромагнітні трансформатори об'єднує спільність виконуваних функцій. Крім того, коефіцієнт трансформації по напрузі (струму) пропорційний відношенню реактивних опорів входу і виходу трансформатора в ступені 0,5:

$$K_U = q \cdot \left(\frac{X_{\text{ВИХ}}}{X_{\text{ВХ}}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.1)$$

де q - коефіцієнт пропорційності.

Для п'єзотрансформаторів це відповідає відношенню ємностей:

$$K_{U1} = q_1 \cdot \left(\frac{C_{\text{ВХ}}}{C_{\text{ВИХ}}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.2)$$

де $C_{\text{ВХ}}$ і $C_{\text{ВИХ}}$ - відповідно вхідна і вихідна ємності п'єзотрансформатора.

Для електромагнітного трансформатора це відповідає відношенню індуктивностей:

$$K_{U2} = q_2 \cdot \left(\frac{L_{\text{ВЫХ}}}{L_{\text{ВХ}}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.3)$$

де $L_{\text{ВХ}}$ і $L_{\text{ВЫХ}}$ - відповідно вхідна і вихідна індуктивності електромагнітного трансформатора.

П'єзоелектричні і електромагнітні трансформатори мають наступні відмінності. З фізичної точки зору п'єзотрансформатор - прилад з подвійним електромеханічним перетворенням енергії, тобто зв'язок між первинним і вторинним ланцюгом - механічний на відміну від електромагнітного трансформатора, у якого цей зв'язок - магнітний.

Конструктивно п'єзотрансформатор є твердотілим електромеханічним резонатором різної форми (пластина, диск та ін.), що містить хоч би один п'єзоелемент, на який нанесені електроди і у якого вектор поляризації орієнтований по відношенню до електродів. Електроди збудника підключаються до первинного ланцюга, а електроди генератора - до навантаження. Електро-

магнітний трансформатор складається з двох і більш обмоток, намотаних, наприклад, на феритовому кільці, одна з яких підключена до первинного ланцюга, а друга - до навантаження.

Резонансні частоти п'єзотрансформатора визначаються розмірами п'єзоелемента як резонатора. Внаслідок цього його ККД і коефіцієнт трансформації по напрузі (струму) залежить від опору навантаження і робочої частоти. Ефективність перетворення електричної енергії в механічну і навпаки характеризується коефіцієнтом електромеханічного зв'язку k_{ij} , який для більшості п'єзокерамічних матеріалів не перевищує 0,7. Величина k_{ij}^2 показує, яка частка вхідної електричної енергії перетворюється на запасену в п'єзоелементі механічну і навпаки.

Передача енергії від збудника до генератора залежить ще і від механічної добротності п'єзоматеріала Q_m , яка характеризує втрати механічної енергії в резонаторі і визначається як відношення всієї механічної енергії, запасеної в п'єзоелементі, до енергії механічних втрат за період коливань.

Чим вище добуток $k_{ij}^2 \cdot Q_m$, тим вище ККД п'єзотрансформатора. Механічна добротність, крім того визначає і смугу пропускання п'єзотрансформатора в режимах холостого ходу і короткого замикання.

Електромагнітний трансформатор – широкосмуговий прилад. Завдяки застосуванню замкнутих магнітопроводів з матеріалів з великими значеннями магнітної проникності коефіцієнт зв'язку між обмотками близький до одиниці в широкому діапазоні частот, тому вся енергія, що поступає в первинний ланцюг, з малими втратами передається в навантаження. Отже, для електромагнітного трансформатора характерна значно менша залежність ККД і коефіцієнта трансформації по напрузі (струму) від опору навантаження.

Існує різниця між еквівалентними схемами п'єзотрансформатора і електромагнітного трансформатора. У еквівалентній схемі п'єзотрансформатора як резонансного приладу можна виділити резонансний контур, наприклад, з еквівалентними зосередженими параметрами в області резонансних частот. У

електромагнітного трансформатора такий контур на еквівалентній схемі відсутній, якщо не брати до уваги паразитні ємності.

П'єзоелектричні трансформатори виготовляють з діелектричних матеріалів. Його збудник і генератор є ємностями, тому п'єзотрансформатор не пропускає постійної складової електричного струму по вхідному і вихідному ланцюгах. Електромагнітний трансформатор на вході і виході містить індуктивності, тому він пропускає постійну складову струму по вхідному і вихідному ланцюгах. Ця відмінність приводить до різних способів включення трансформаторів в електронних схемах.

Різний і характер залежності вхідних і вихідних параметрів трансформаторів від частоти. Із збільшенням робочої частоти ємнісні опори входу і виходу п'єзотрансформатора зменшуються. Отже, при однакових розмірах збільшення робочої частоти п'єзотрансформатора приводить до збільшення споживаної потужності. Тому п'єзотрансформатор легко зробити малогабаритним і малопотужним на низькій частоті, оскільки для низькочастотних трансформаторів зменшення вхідної ємності пов'язане із зменшенням розмірів п'єзоелемента. У електромагнітних трансформаторів, навпаки, вхідні і вихідні індуктивні опори зменшуються із зменшенням частоти. Тому їх значно важче зробити малогабаритними і малопотужними на низькій частоті, оскільки для зменшення споживаної потужності необхідно збільшувати індуктивність обмоток, а отже, розміри трансформатора.

При виборі режиму роботи п'єзотрансформатора необхідно враховувати, що максимальний ККД п'єзотрансформатора відповідає його мінімальній ефективній добротності, тобто мінімальному резонансному посиленню. У цьому режимі п'єзотрансформатор має максимальні питомі характеристики і тому він є найбільш переважним. Потрібний коефіцієнт трансформації по напрузі досягається за рахунок вибору оптимальної конструкції або частковим зсувом до режимів узгодження, але останнє супроводжується зменшенням ККД. Режими узгодження забезпечують високе резонансне посилення по на-

прузі (струму), проте ККД в цих режимах рівний 50% і тому у п'єзотрансформаторів порівняно низькі питомі характеристики. Режим короткого замикання у п'єзотрансформаторів практично не використовується, а режим холостого ходу - тільки для п'єзотрансформаторів напруги, коли потрібно отримати максимальне посилення по напрузі.

При виборі режиму роботи п'єзотрансформатора необхідно задати і рівень сигналу збудження. По-перше, небажана робота п'єзотрансформатора в режимах вище гранично допустимого або по величині механічної напруги в матеріалі п'єзотрансформатора унаслідок небезпеки його руйнування, або по температурі (зазвичай на вищих частотах) унаслідок небезпеки деполяризації матеріалу п'єзотрансформатора. По-друге, від величини сигналу збудження залежить значення K_u , що необхідно враховувати при розрахунках трансформатора. Із збільшенням рівня сигналу збудження зменшується резонансне посилення п'єзотрансформатора за рахунок зменшення ефективної добротності, тобто збільшення механічних і електричних втрат в матеріалі електро-механічного резонатора.

У зв'язку з тим, що параметри п'єзотрансформатора міняються із зміною температури, необхідно задавати і діапазон робочих температур, при виборі якого слід враховувати власний тепловий режим роботи п'єзотрансформатора, залежний від потужності втрат, що виділяються в п'єзоелементі [5].

1.4 Способи керування режимами п'єзоелектричних трансформаторів

Системно- і схемотехнічні принципи побудови джерел високовольтного електроживлення на базі п'єзотрансформатора істотно відрізняються від широко відомих принципів побудови джерел високовольтного електроживлення на базі електромагнітних трансформаторів. Відмінності визначаються властивостями п'єзотрансформаторів – функціонального резонансного елементу – і при побудові джерел високовольтного електроживлення враховуються наступні специфічні особливості п'єзотрансформаторів: вузькість ре-

зонансних амплітудно-частотних характеристик (добротність високовольтних п'єзотрансформаторів може досягати 1000); зсув (дрейф) амплітудно-частотної характеристики п'єзотрансформатора по обох координатних осях при дії збурюючих чинників (зміна характеру і величини навантаження, температури і т. п.); висока крутизна фазо-частотної характеристики п'єзотрансформатора на частоті резонансу; сильна зміна вхідних і вихідних повних опорів п'єзотрансформатора при дії збурюючих чинників зміни частоти; опори у функції частоти змінюють свій характер (можуть мати ємнісний, індуктивний, активний і комбінований характер); зазвичай мала вихідна ємність п'єзотрансформаторів (у високовольтних п'єзотрансформаторів 9...20 пФ); сильна залежність коефіцієнтів передачі і параметрів передавальних функцій, а також ККД п'єзотрансформаторів від струму навантаження; взаємозв'язок процесів передачі енергії і інформації в п'єзотрансформаторах по різних каналах управління: п'єзотрансформатор – багатозв'язкова ланка (об'єкт управління) із змінною структурою і змінними параметрами.

Перераховані особливості показують, що між п'єзоелектричними трансформаторами і електромагнітними мало схожих ознак, тобто це істотно різні по своїх властивостях елементи, а термін «п'єзоелектричний трансформатор» не відображає специфіки властивостей, можливостей і призначення цього елемента функціональної електроніки. Тому принципи побудови джерел високовольтного електроживлення на базі п'єзотрансформатора значно відрізняються від таких, розроблених для джерел високовольтного електроживлення з електромагнітними трансформаторами.

Наочною ілюстрацією до сказаного може служити, наприклад, особливість п'єзотрансформатора як багатовимірного багатозв'язкового об'єкту управління. Використання цієї особливості дозволяє керувати вихідною напругою п'єзотрансформатора у складі джерела високовольтного електроживлення за допомогою дії по декількох каналах: амплітудному, частотному, фазовому, їх взаємозв'язку, по секціях «зворотних зв'язків» і т. д., що створює широкі можливості забезпечення високих якісних показників роботи джерел

високовольтного електроживлення по точності стабілізації, швидкодії; полегшує побудову підсистем захисту джерел високовольтного електроживлення; полегшує режим роботи ряду вузлів і елементів джерел високовольтного електроживлення і т.д. Окрім цього, використання властивостей багатозв'язковості розширює клас джерел високовольтного електроживлення з п'єзотрансформаторами по схемо- і системотехніці, що відрізняються один від одного реалізацією в них тих або інших способів управління вихідною напругою п'єзотрансформатора [6]. Для порівняння відзначимо, що в джерелах високовольтного електроживлення з електромагнітними трансформаторами управління вихідною напругою здійснюється в основному шляхом амплітудного способу – зміною діючого (середнього) значення вихідної напруги за допомогою амплітудно- або широтно-імпульсної модуляції. Тому необхідно окремо розглянути способи управління вихідною напругою п'єзотрансформатора.

Розроблена класифікація способів управління по кількості взаємозв'язаних дій, що управляють, підрозділяє їх на три основні групи: одновимірні (амплітудний, частотний, фазовий), дуальні або двовимірні (амплітудно-частотні, амплітудно-фазові, фазо-частотні) і багатовимірні (амплітудно-фазочастотні та ін.). Особливе місце займають адаптивні та інваріантні способи. На основі цих способів були розроблені принципи системо- і схемотехнічної реалізації п'єзонапівпровідникових джерел високовольтного електроживлення з п'єзотрансформаторами.

Одновимірні способи. Амплітудний спосіб управління базується на зміні амплітуди напруги збудження U_3 п'єзотрансформатора при його роботі на резонансній частоті. Компенсація збурюючих дій і стабілізація $U_{\text{вих}}$ в джерелах високовольтного електроживлення може бути здійснена шляхом амплітудно-імпульсної або широтно-імпульсної модуляції напруги збудження.

Найпростіше реалізація амплітудного способу здійснюється в джерелах високовольтного електроживлення з автогенераторним перетворювачем напруги. Робота п'єзотрансформаторів на частоті резонансу f_p тут забезпечу-

ється дією автогенераторної схеми з п'єзотрансформатором як частотно-задаючим елементом. При цьому оскільки резонансні властивості п'єзотрансформатора (його амплітудно-частотна характеристика) використовуються для самозбудження автогенератора на частоті резонансу п'єзотрансформатора (при виконанні необхідних умов балансу амплітуд і балансу фаз), то і вплив дрейфу амплітудно-частотної характеристики і фазо-частотної характеристики п'єзотрансформатора уздовж частотної осі автоматично компенсується дією автогенераторного перетворювача напруги. Зміна U_3 з метою стабілізації $U_{\text{вих}}$ здійснюється зазвичай за допомогою компенсаційних стабілізаторів напруги, які підтримують стабільне значення напруги живлення автогенератора (пристрої з амплітудно-імпульсною модуляцією). Недоліком таких джерел високовольтного електроживлення є досить вузький діапазон відробітки зовнішніх обурень, оскільки при сильній зміні напруги живлення автогенератора можливий зрив автоколивань або їх відхід від значення резонансної частоти п'єзотрансформатора (із-за зменшення напруги позитивного зворотного зв'язку, зміни фазових співвідношень, тобто у зв'язку з порушенням умови балансів амплітуд і фаз). Крім того, якщо не приймати спеціальних заходів, автогенератор схильний до самозбудження на паразитних гармоніках п'єзотрансформатора.

Розширення динамічного діапазону відпрацювання зовнішніх впливів може бути забезпечене шляхом ускладнення схеми автогенератора – введенням в неї активних ланцюгів формування сигналу зворотного зв'язку, що синхронізується на частоті резонансу п'єзотрансформатора генератором, введенням активних регульованих ланцюгів фазової затримки, які забезпечують точне настроювання автогенератора на резонансну частоту п'єзотрансформатора. Зміна напруги живлення автогенератора (його підсилювача потужності) здійснюється зазвичай за допомогою лінійного або ключового (імпульсного) компенсаційного стабілізатора або за допомогою мережевого керованого тиристорного випрямляча-стабілізатора. Останній варіант є більш переважним, оскільки не дивлячись на деяке ускладнення згладжуючого фі-

льтра, мережевий тиристорний випрямляч суміщає в собі функції перетворювача напруги, стабілізатора і регулятора (правда, із-за обмеженості частотних властивостей тиристорів його швидкодія може виявитися недостатньо високою). Таким чином, джерела високовольтного електроживлення на базі п'єзотрансформатора і реалізацією амплітудного способу з амплітудно-імпульсною модуляцією умовно складаються з двох частин - одна забезпечує стабілізацію вихідної напруги $U_{\text{вих}}$, а інша - роботу п'єзотрансформатора на частоті f_p . Такі джерела високовольтного електроживлення при підвищених вимогах до точності стабілізації $U_{\text{вих}}$ виявляються відносно складними, мають велику кількість силових елементів (регулюючі елементи – транзистори або тиристори), із-за двократного перетворення потужності на вході джерела високовольтного електроживлення і в п'єзотрансформаторі мають знижений ККД. Недоліки джерела високовольтного електроживлення з п'єзотрансформатором і амплітудно-імпульсною модуляцією можна частково усунути, якщо використовувати підсилювач потужності одночасно як регулюючий елемент, а схему доповнити генератором, частота коливань якого синхронізована з частотою резонансу п'єзотрансформатора [7]. У такому джерелі високовольтного електроживлення буде реалізований амплітудний спосіб з широтно-імпульсною модуляцією. Амплітуда основної гармоніки напруги збудження U_3 залежить від тривалості (ширини) квазіпрямокутних двополярних імпульсів з «паузою на нулі», що поступають на вихідний (зазвичай двохтактний) підсилювач потужності. Власна частота генератора, що синхронізується, вибирається декілька нижче за частоту f_p п'єзотрансформатора (приблизно на 10 Гц) для поліпшення синхронізації. Формування «паузи на нулі» необхідне для полегшення ключового режиму роботи транзисторів двухтактного підсилювача потужності, а також для виключення режиму «скрізних» струмів (почерговим включенням і надійним замиканням цих транзисторів). Для низьковольтних п'єзотрансформаторів ($U_{\text{вих}} < 0,5$ кВ) потрібно забезпечити «захват» частоти основної гармоніки резонансу п'єзотрансформатора і уникнути збудження на побічній частоті. Це завдання надійно вирішується застосуванням

схем активної фазової затримки у складі джерела високовольтного електроживлення з широтно-імпульсною модуляцією [8]. Таким чином, застосування широтно-імпульсної модуляції в джерелі високовольтного електроживлення виявляється переважним. Проте в порівнянні з джерелом високовольтного електроживлення з п'єзотрансформатором і амплітудно-імпульсною модуляцією, де форма кривої напруги збудження і її гармонійних складових залишалася практично незмінною в широкому діапазоні зміни амплітуди $U_{в}$, в схемах джерел високовольтного електроживлення з п'єзотрансформатором і широтно-імпульсною модуляцією при управлінні відбувається істотна зміна складу гармонійних складових.

Частотний спосіб управління заснований на використанні резонансного характеру амплітудно-частотної характеристики п'єзотрансформатора, робоча точка вибирається на частотах $f > f_p$ або $f < f_p$ (поблизу f_p) на квазілінійній ділянці амплітудно-частотної характеристики п'єзотрансформатора (рисунок 1.2). Компенсація збурюючих дій в даних джерелах високовольтного електроживлення здійснюється шляхом зсуву робочої точки п'єзотрансформатора уздовж частотної осі амплітудно-частотної характеристики. Вибір робочої точки на правому схилі амплітудно-частотної характеристики має більшу перевагу за енергетичними показниками роботи п'єзотрансформатора (тут розташована область максимального ККД п'єзотрансформатора в певній частині поблизу f_p) і по ряду переваг при організації управління. Положення $U_{вих з}$ відповідає деякому заданому значенню вихідної напруги. Цьому значенню на лівому схилі амплітудно-частотної характеристики відповідає частота $f_{кр}$, на правому $f_{роб}$. Зона «захвату» або зона частотного управління на лівому схилі розташовується вище за лінію $U_{вих}$, що встановлює в даному джерелі високовольтного електроживлення потрібне мінімально можливе значення $U_{вих min}$, обмежена по частоті смугою $f_{кр} \dots f_{роб}$ для $U_{вих min}$ рівного, наприклад, $U_{вих з}$. На правому схилі зона захвату розповсюджується на весь схил при виборі робочої точки на правому схилі амплітудно-частотної характеристики. Якщо дрейф амплітудно-частотної характеристики такий, що вона не виходить з

меж зони регулювання, то режим є не критичним. Так, зсув амплітудно-частотної характеристики вліво по частотній осі не викликає зміни знаку зворотного зв'язку в контурі частотного управління (інверсія управління) і, отже, не приводить до зриву режиму стабілізації в джерелі високовольтного електроживлення. Іншими словами, до зсуву амплітудно-частотної характеристики вліво джерело високовольтного електроживлення менш чутливе. Якщо ж амплітудно-частотна характеристика зміщується трохи управо по частотній осі і робоча точка на амплітудно-частотній характеристиці п'єзотрансформатора не виходить із смуги частот $f_{кр} \dots f_{роб}$, інверсії управління не відбувається, і джерело високовольтного електроживлення працездатне. При значному такому дрейфі амплітудно-частотної характеристики робоча точка на амплітудно-частотній характеристиці п'єзотрансформатора виходить за межі смуги $f_{кр} \dots f_{роб}$ (виявляється лівіше $f_{кр}$), і настає інверсія управління – зміна знаку зворотного зв'язку в частотному каналі. Частотний спосіб при цьому виявляється неприйнятний.

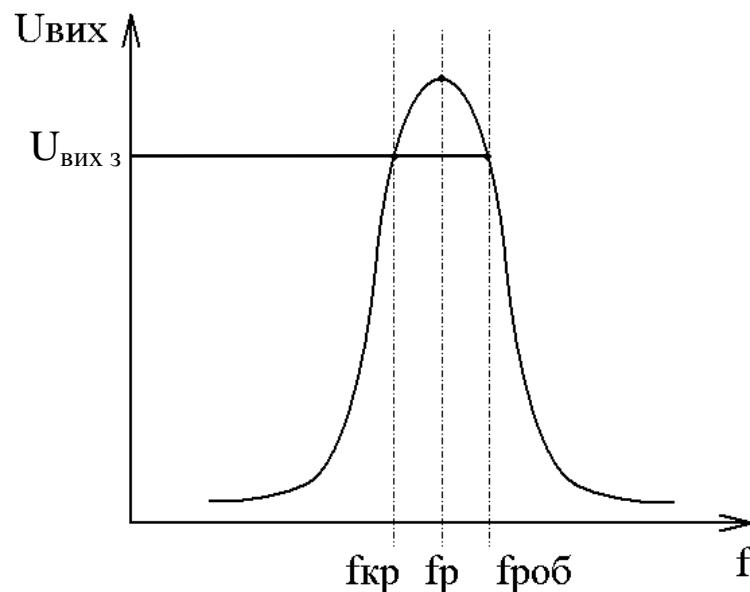


Рисунок 1.2 – Амплітудно-частотна характеристика п'єзоелектричного трансформатора

Частотний спосіб також, як і дискретний фазочастотний, принципово непридатний, якщо при дрейфі амплітудно-частотної характеристики вліво під дією сильних збуджень значення $U_{\text{вих max}}$ стає менше $U_{\text{вих min}}$, тобто коли зміною частоти по схилу неможливо досягти заданого значення $U_{\text{вих з}}$. У цих випадках ефективні лише дуальні способи з управлінням по амплітуді, частоті (фазі) або багатовимірні способи.

Основним характерним елементом частотно-керованого джерела високовольтного електроживлення з п'єзотрансформатором [9] є керований генератор, що є релаксаційним генератором, частота коливань якого змінюється при зміні напруги, яка управляє, поступає на його вхід від регулятора. Регулятор зазвичай з пропорційно-інтегрально-диференціальним законом управління містить вхідну схему порівняння, на яку поступає вихідна і опорна напруга. Схеми джерела високовольтного електроживлення з частотним способом управління у ряді випадків виявляються вельми простими і практично не змінюються при переході на живлення від мережі 220 В. Однак застосування джерела високовольтного електроживлення з частотним способом обмежене, оскільки п'єзотрансформатор в них не повністю використовується по напрузі і потужності, можливий зрив режиму стабілізації під час переходу робочої точки на неробочий (частіше лівий) схил амплітудно-частотної характеристики. Вибір робочої точки на амплітудно-частотній характеристиці п'єзотрансформатора, де ККД відповідає максимальному значенню, виявляється мало ефективним із-за обмеженого діапазону зміни частоти у бік f_p , обмеженим в цьому випадку виявляється і діапазон зміни в джерелі високовольтного електроживлення $U_{\text{вих}}$, по суті такий режим є квазікритичним. Усунути ці недоліки до певної міри можна в джерелі високовольтного електроживлення із стабільним керованим генератором. Для цього перехід робочої точки на неробочий схил амплітудно-частотної характеристики виключають установкою граничної нижньої частоти генерації керованого генератора, рівною резонансній частоті п'єзотрансформатора. Проте із-за високої добротності п'єзотрансформатора межі зміни його частоти при компенсації збуджень складають

одиниці відсотків, і навіть незначне температурне (або інше) відхилення нижньої частоти керованого генератора від резонансної або звужує діапазон корекції зовнішніх обурень, або збільшує небезпеку виникнення зриву режиму стабілізації. Тому потрібно використовувати достатньо високостабільні керовані генератори, а це ускладнює зміну частоти, оскільки суть забезпечення фізичних процесів високостабільності і керованості в генераторі (повинен досягатися певний компроміс). З іншого боку, у п'єзотрансформаторі є температурний дрейф амплітудно-частотної характеристики, його резонансна частота зміщується, а параметричне відстеження зміни межі частоти керованого генератора здійснити простими засобами практично неможливо. Тому навіть із застосуванням високостабільних керованих генераторів (наприклад, з мостовими ланцюгами, що задають часові інтервали) частотно-керовані джерела високовольтного електроживлення використовуються у випадках вузьких діапазонів зміни зовнішніх збуджуючих дій [10]. Частотно-керовані джерела високовольтного електроживлення для вузьких діапазонів збуджень реалізувати простіше, ніж джерела високовольтного електроживлення з амплітудним способом управління. Проте за інших рівних умов реалізація схемотехніки частотно-керованого джерела високовольтного електроживлення може опинитися і складнішою, ніж амплітудно-керованого, якщо при цьому враховувати розкид параметрів п'єзотрансформатора (тобто вводити індивідуальне підстроювання робочої частоти), для джерела високовольтного електроживлення цього типу необхідні і високостабільні керовані генератори з компенсацією дрейфу робочої точки, може також бути потрібна стабілізація амплітуди напруги збудження п'єзотрансформатора (з допомогою хоч би простих стабілізаторів на вході джерела високовольтного електроживлення).

Фазовий спосіб керування заснований на змінах фазового зсуву між вхідною і вихідною змінною напругою п'єзотрансформатора (або струмами, напругою U_z , $U_{вих}$ і струмом), при цьому п'єзотрансформатори збуджують або на частоті f_p , або на частотах $f > f_p$ чи $f < f_p$ (поблизу f_p). Зовнішні збурення в джерелі високовольтного електроживлення компенсуються зміною

частоти керованого генератора залежно від фазового сигналу помилки, що виробляється регулятором. Найбільш просто фазовий спосіб реалізується в автогенераторних пристроях, де напруга, що управляє, знімається з секції зворотного зв'язку п'єзотрансформатора і подається на керований фазозсувний ланцюг. При цьому автогенератор аналогічний автогенератору амплітудно-керованого джерела високовольтного електроживлення, в ланцюг позитивного зворотного зв'язку якого включений активний фазозсувний ланцюг, керований регулятором. Оскільки має місце часова (частотна) відповідність амплітудно-частотної і фазо-частотної характеристик п'єзотрансформатора, то відбувається зсув робочої точки, як і в частотному способі, уздовж одного з схилів амплітудно-частотної характеристики п'єзотрансформатора (у бік компенсації впливу обурень). Проте при порівняльній простоті реалізації фазового способу він рідко використовується самостійно із-за схильності автогенератора до самозбудження на вищих гармоніках і нестійкості режиму автоколивань унаслідок обмеженості діапазону регулювання фази. Найчастіше фазовий спосіб керування використовується у поєднанні з іншими способами, тобто в пристроях з дуальними або багатовимірними способами керування.

Дуальні способи керування поєднують в собі переваги одновимірних способів і позбавлені певною мірою їх недоліків. Слід відмітити, що одновимірні способи можуть бути лише умовно віднесені до цієї групи, оскільки при реалізації їх в джерелі високовольтного електроживлення керуючі впливи опиняються в тому або іншому ступені взаємозв'язаними через п'єзотрансформатор і навантаження. Так, в джерелі високовольтного електроживлення з амплітудним способом автогенератор компенсує вплив дрейфу амплітудно-частотної і фазо-частотної характеристик п'єзотрансформатора уздовж частотної осі, тобто має місце амплітудно-частотне управління з частковою автономністю по управлінню; при фазовому способі відбувається зміна частоти і забезпечується, таким чином, фазочастотне управління. Тому при умовному віднесенні цих способів до одновимірних в основу був покладений принцип

дії основного (пріоритетного) керуючого сигналу в джерелі високовольтного електроживлення, які реалізують ці способи.

Ефективність роботи джерела високовольтного електроживлення з п'єзотрансформатором можна підвищити використанням двох і більш взаємозв'язаних керуючих дій. Ці дії повинні бути певним чином взаємозв'язані як в статиці, так і в динаміці. На базі цього був запропонований ряд способів взаємозв'язаного дуального управління: частотно-амплітудний, частотно-амплітудно-струмовий (функціональний) і фазочастотний.

У джерела високовольтного електроживлення з частотно-амплітудним способом управління враховуються специфічні особливості зсуву (дрейфу) амплітудно-частотної характеристики п'єзотрансформатора при сильних збуреннях [11]. При цьому в джерелі високовольтного електроживлення щоб уникнути сильних коливань вихідної напруги під час перехідних процесів вплив на частоту повинен випереджати вплив на амплітуду U_B . Для досягнення найбільш економічного режиму (робота поблизу f_p) вплив на амплітуду, викликаний зміною частоти, повинен випереджати вплив на амплітуду, викликаний зміною вихідної напруги джерела високовольтного електроживлення. Вказані взаємодії при цьому способі досягаються введенням амплітудно- і частотно-корегуючих сигналів ($U_{ак}$ і $U_{чк}$), що впливають з підбраною відповідним чином форсуванням на зміни f_B і A_B [11]. При дії сильних збурень стабілізацію вихідної напруги $U_{вих}$ за допомогою автономного регулювання частоти f_B і амплітуди A_B забезпечити не вдається, що приводить зазвичай до зриву режиму стабілізації із-за інверсії управління. Введення сигналів $U_{ак}$ і $U_{чк}$ забезпечує направлені взаємозв'язані попереджуючі дії на компенсацію відхилення $U_{вих}$ від заданого значення. При цьому сигнал $U_{ак}$ забезпечує форсування зміни f_B по відношенню до змін A_B на первинному етапі, а $U_{чк}$ - форсування зміни на завершальному етапі стабілізації. В цілому використання перехресних корегуючих зв'язків дозволяє отримати неавтономне взаємозв'язане управління і істотно зменшити тривалість t_p , перерегулювання σ , у перехідних процесах при збереженні підвищеної точності стабілізації $U_{вих}$.

Корегуючі зв'язки по похідних можливо вибрати значно великі значення критичного коефіцієнта посилення джерела високовольтного електроживлення як системи автоматичного управління і істотно розширити область стійкості джерела високовольтного електроживлення.

До недоліків цього способу відносяться: небезпека перевищення амплітудою A_B допустимого значення $A_{B \text{ доп}}$, що може привести до механічного руйнування п'єзотрансформатора; можливість інверсії управління під час переходу робочої точки на неробочий схил амплітудно-частотної характеристики, що викликає зрив режиму стабілізації напруги $U_{\text{вих}}$. Недоліком способу є також відсутність в ньому операцій, що забезпечують надійну компенсацію діючих збуджень при гранично допустимих режимах роботи п'єзотрансформатора.

Іншим ефективним способом дуального управління є фазочастотний спосіб [6, 10]. Схеми джерел високовольтного електроживлення з фазочастотним способом синтезовані на основі взаємозв'язку способів частотного і фазового управління. При цьому фазочастотний спосіб може бути реалізований у вигляді «безперервного» і «дискретного» варіантів. У першому з них управління зводиться до «безперервного», в другому - до «дискретного» впливу фазового сигналу помилки на процеси в джерелах високовольтного електроживлення. Суть дискретного способу фазочастотного управління полягає в тому, що при зсуві робочої точки під дією збуджень на лівий схил амплітудно-частотної характеристики п'єзотрансформатора розмикають частотний контур управління у момент переходу фазо-частотної характеристики п'єзотрансформатора через нуль, формують фазовий сигнал, що управляє, з необхідними динамічними властивостями і з його допомогою змінюють частоту керованого генератора, повертаючи робочу точку на правий схил амплітудно-частотної характеристики, після чого замикають частотний контур управління [12]. Дискретність операцій забезпечується автоматично за допомогою компаратора у фазовому каналі. При цьому стрибкоподібно зростає фазовий сигнал управління U_ϕ під час переходу робочої точки з правого схи-

лу амплітудно-частотної характеристики на лівий. На лівому схилі амплітудно-частотної характеристики п'єзотрансформатора частотою керованого генератора управляє сигнал з фазового, а на правому - сигнал з частотного каналу. Включення (виключення) фазового каналу відбувається при зміні знаку фазового зсуву $\Delta\varphi$ (наприклад, між U_B і $U_{вих}$), що виявляється фазовим детектором. Ця зміна відбувається на частоті резонансу f_p і пов'язане із специфічними особливостями амплітудно-частотної характеристики і фазо-частотної характеристики п'єзотрансформатора. Таким чином, фазовий канал фіксує моменти знаходження робочої точки на неробочому (лівому) схилі амплітудно-частотної характеристики і впливом компаратора виводить її на робочий схил. Фазовий сигнал виключає інверсію управління і фіксує робочу точку поблизу f_p до закінчення дії сильного збудження. Формальне фазочастотне управління еквівалентно частотному з введенням «плаваючої» фіктивної нижньої межі керованого генератора, що автоматично стежить за дрейфом амплітудно-частотної характеристики п'єзотрансформатора [8]. При цьому в якості керованого генератора можна застосовувати прості і відносно нестабільні генератори, наприклад з температурною нестабільністю 5...10 % [13].

У джерела високовольтного електроживлення з безперервним фазочастотним управлінням забезпечується поточна зміна положення робочої точки виходячи з умов дрейфу амплітудно-частотної і фазо-частотної характеристик п'єзотрансформатора. Стабілізація $U_{вих}$ здійснюється взаємозв'язаною дією фазового сигналу управління і основного сигналу помилки, що формується частотним каналом [6].

Не дивлячись на достатньо високі показники джерела високовольтного електроживлення з дуальним управлінням, для підвищення точності стабілізації напруги доцільно розглянути можливості **багатовимірного управління**. Спосіб багатовимірного управління полягає у введенні перехресних корегуючих управляючих сигналів в основні канали від суміжних, завдяки чому досягається цілеспрямована взаємозв'язана дія всіх трьох керуючих впливів при компенсації відхилення вихідної напруги від заданого значення. Викори-

стання корегуючих зв'язків в джерелі високовольтного електроживлення є вельми ефективним унаслідок дії загальних для всіх каналів збуджень. Це забезпечує найбільш високу точність стабілізації $U_{\text{вих}}$ при сильних збудженнях і робить джерело високовольтного електроживлення практично інваріантним по відношенню до таких збуджень.

Одним із способів багатовимірного управління є організація керуючих впливів в джерелі високовольтного електроживлення, коли одночасно з основним впливом, що коректує частоту f_b , здійснюється взаємозв'язана дія на амплітуду A_b , залежна від керуючого фазового сигналу [14]. При цьому забезпечується підлеглість зміни f_b по відношенню до фазового керуючого сигналу. В цілому здійснюється взаємозв'язана дія трьох основних керуючих впливів (по A_b , f_b , φ_b) на стабільність напруги $U_{\text{вих}}$. Спосіб ґрунтується на тому, що при зсуві амплітудно-частотної і фазо-частотної характеристик п'єзотрансформатора значенням частоти f_p відповідають певні фазові співвідношення. Отже, задаючи значення $\Delta\varphi_z$ і стабілізуючи його, можна стежити за змінами f_p , а відхилення $U_{\text{вих}}$ від заданого значення компенсувати взаємозв'язаною зміною амплітуди $U_b(A_b)$. Спосіб дає більшу точність встановлення частоти, ніж, наприклад, в джерелі високовольтного електроживлення з частотним управлінням, оскільки стабілізується залишкова різниця фаз, а не частот. При цьому за рахунок імпульсно-фазового управління стабілізація $U_{\text{вих}}$ здійснюється по окремих відліках фазової помилки (фазова дискретизація) [6].

Застосування багатовимірного управління дозволяє забезпечити більшу точність регулювання при підвищеній якості процесів управління (збільшується швидкодія, зменшується перерегулювання) в порівнянні з дуальним управлінням. Проте способи багатовимірного управління є найбільш складними в реалізації.

Адаптивні способи. Розглянуті способи базувалися на ідеях автономного (одновимірні способи), або неавтономного, взаємозв'язаного управління (дуальні, багатовимірні способи). У адаптивних способах управління викори-

стовуються властивості п'єзотрансформатора як високоякісного частотно-виборчого пристрою, що працює на частоті f_p . Цей спосіб в умовах сильного розкиду параметрів п'єзотрансформатора (до 30 % і більш) дозволяє забезпечити автоматичну настройку режиму роботи п'єзотрансформатора у складі джерела високовольтного електроживлення. При цьому можуть бути реалізовані схеми з безперервною адаптацією або ефективніші за своїми якісними показниками схеми джерела високовольтного електроживлення з періодичною адаптацією. У джерелі високовольтного електроживлення з періодичною адаптацією здійснюється режим первинного, а в подальшому - епізодичного пошуку екстремуму амплітудно-частотної характеристики при його втраті від дії сильних збуджень. Стабілізація вихідної напруги зазвичай проводиться на частотах, близьких до f_p . У джерелі високовольтного електроживлення з безперервною адаптацією пошук екстремуму амплітудно-частотної характеристики ведеться безперервно. Стабілізація $U_{\text{вих}}$ проводиться зазвичай на частоті резонансу f_p п'єзотрансформатора. Реалізація функцій адаптації в схемах джерела високовольтного електроживлення найефективніше здійснюється в сукупності з одновимірними, дуальними і багатовимірними способами.

Так, при дуальному частотно-амплітудному управлінні і безперервній адаптації джерела високовольтного електроживлення здійснює первинний пошук екстремуму амплітудно-частотної характеристики зміною частоти f_p , наприклад, по пилкоподібному закону. Пристрій запам'ятовування екстремуму джерела високовольтного електроживлення фіксує значення $U_{\text{вих max}}$ і здійснює безперервне стеження за ним в автоколивальному режимі. Таким чином, настроювання на частоту f_p п'єзотрансформатора забезпечується дією частотного каналу, а стабілізація $U_{\text{вих}}$ досягається дією амплітудного каналу, який компенсує сигнал помилки $\Delta U = U_{\text{вих max}} - U_{\text{вих}}$. Джерело високовольтного електроживлення з адаптацією автоматично визначає регулюючі впливи f_B і A_B і стабілізує $U_{\text{вих}}$ на частоті f_p п'єзотрансформатора при дії зовнішніх збуджень [15].

Можливості управління величиною вихідної напруги п'єзотрансформатора зміною напруженості постійного електричного поля, що прикладається або до спеціальної секції п'єзотрансформатора, або безпосередньо до його вхідних електродів, знайшли застосування в способі **інваріантного управління** [16]. Суть цього способу полягає в тому, що на п'єзотрансформатор впливають сигналом, пропорційним випрямленій напрузі мережі; управляють цим сигналом також у функції струму навантаження і змінюють з його допомогою вихідну напругу п'єзотрансформатора, компенсуючи її відхилення від заданого значення (при дії збуджень). Даний спосіб застосовується або при живленні п'єзотрансформатора від мережі 380/220 В, або при використанні високовольтних п'єзотрансформаторів. Інваріантний спосіб може також застосовуватися у поєднанні з одновимірними, дуальними і багатовимірними способами, забезпечуючи при цьому підвищені якісні показники джерела високовольтного електроживлення [6].

1.5 Розгляд схем ввімкнення декількох п'єзоелектричних трансформаторів напруги, для підвищення коефіцієнта трансформації

При каскадному з'єднанні двох ідеальних п'єзотрансформаторів загальний коефіцієнт трансформації дорівнює добутку коефіцієнтів трансформації кожного трансформатора. Отже, каскадне з'єднання можна розглядати як один з шляхів збільшення k_u .

Розрахунок каскадного з'єднання поперечно-поперечного і поперечно-подовжнього п'єзоелектричних трансформаторів був зроблений Ключко С. Ф. У розрахунку передбачалося, що перший з них (по відношенню до джерела вхідного сигналу) працює на 2-ій моді подовжніх коливань, а другий - на 1-ій моді коливань. Розрахункові формули для цього випадку приведені в [5].

Нижче приведені інші способи збільшення k_u при паралельно-послідовному з'єднанні п'єзоелектричних трансформаторів. Один із способів такого з'єднання показаний на рисунках 1.3, *a* і *б*. Перевага його очевидна (k_u

і $U_{\text{вих}}$ в 2 рази вище, ніж для одного п'єзоелектричного трансформатора), але застосування його обмежене тільки окремими випадками, коли навантаження непов'язане із землею (рисунок 1.3,*а*) або симетричне відносно неї (рис. 1.3,*б*).

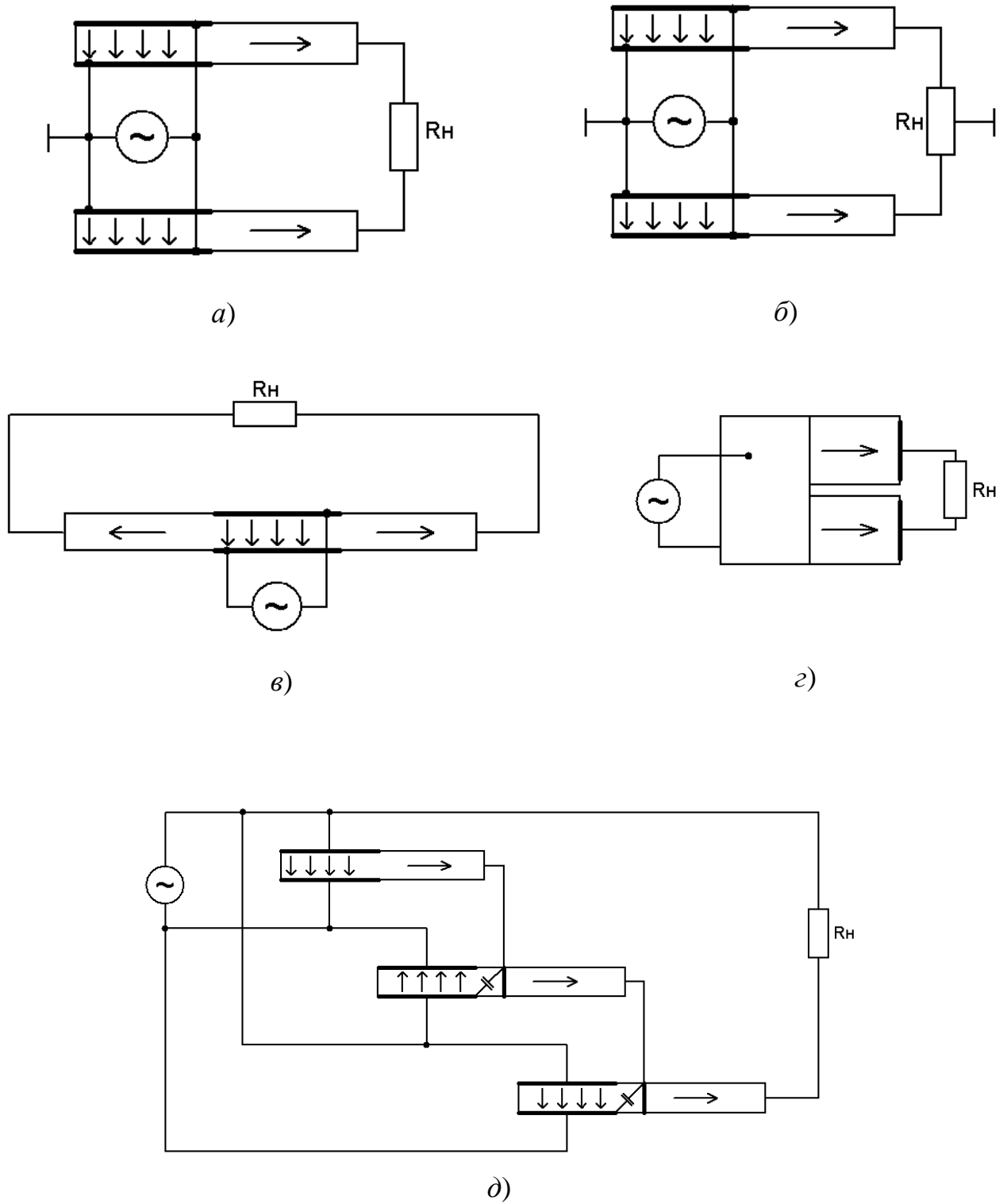


Рисунок 1.3 – Схеми включення декількох п'єзоелектричних напруги

Послідовне з'єднання генераторів може здійснюватися і в одній конструкції, якщо вона виконана, як показано на рисунках 1.3,в і з. Проте такі конструкції, як правило, мають більше недоліків (складність виготовлення, кріплення та ін.), ніж переваг.

Другий варіант паралельно-послідовного з'єднання показаний на рисунку 1.3,д. Для його здійснення всі п'єзоелектричні трансформатори, окрім одного, повинні виконуватися з електрично ізольованим генератором. Крім того, оскільки кожна паразитна ємність $C_{\text{п}}$ (рисунок 1.3,д) є ємнісним навантаженням всіх п'єзоелектричних трансформаторів попередніх ступенів, її величина повинна бути $C_{\text{п}} < C''_{\text{в}}/10n$, де n – число попередніх ступенів, $C''_{\text{в}}$ – вихідна ємність п'єзоелектричного трансформатора. Оскільки напруга від ступеня до ступеня зростає пропорційно з напругою, повинен збільшуватися і проміжок між збудником і генератором. З цієї причини більше двох ступенів робити не рекомендується.

1.6 Висновки за розділом

Таким чином, п'єзоелектричні трансформатори мають не тільки незаперечні переваги перед електромагнітними, такі як високі масогабаритні показники, високий коефіцієнт трансформації, відсутність електромагнітних перешкод, але й деякі недоліки, пов'язані з особливостями його конструкції, принципом роботи і електричними характеристиками. Так, одним з недоліків п'єзотрансформаторів є їх мала вихідна потужність. Це, безумовно, обмежує область застосування п'єзоелектричних трансформаторів і в більшості випадків вони поки не можуть замінити електромагнітні трансформатори. Тому підвищення вихідної потужності п'єзотрансформаторів є актуальною проблемою і вимагає відповідної уваги з боку вчених та інженерів в даній області. Проте потужність самого п'єзоелектричного трансформатора повністю визначається його конструкцією і матеріалом, тому підвищення вихідної потужності безпосередньо п'єзотрансформаторів в даній роботі не розглядається.

З іншого боку, підвищення вихідної потужності схем, побудованих на базі п'єзотрансформатора, можливо за рахунок використання декількох п'єзоелектричних трансформаторів. Деякі варіанти таких схем включення приведені в пункті 1.4. Тому дослідження схем, побудованих на базі декількох п'єзотрансформаторів, також є досить актуальною задачею.

Іншою проблемою, властивою п'єзоелектричним трансформаторам, а точніше схемам з їх використанням, є складність системи управління п'єзотрансформатором в таких схемах. У пункті 1.3 були розглянуті різні способи управління п'єзотрансформаторів, розроблені вже досить давно. Проте аналіз всіх цих способів дозволяє зробити наступний висновок: чим точніше потрібно забезпечити стабілізацію вихідної напруги джерела високовольтного електроживлення на базі п'єзотрансформатора, тим складніше схема (велика кількість елементів, великі габарити), і, навпаки, чим простіше схема, тим менш стійко вона працює і не дозволяє забезпечити стабільність вихідної напруги джерела високовольтного електроживлення. Велика складна схема зменшує надійність пристрою в цілому і збільшує його вартість, а також, що не менш важливо, йде в супереч з сучасною тенденцією мініатюризації схемотехніки. Зі всього вище сказаного можна зробити висновок, що оптимізація способів управління п'єзотрансформатором в поєднанні сучасною елементною базою і мікропроцесорною технікою є важливою і актуальною проблемою в даній області електроніки.

2 ДРУГИЙ РОЗДІЛ

ДОСЛІДЖЕННЯ ВКЛЮЧЕННЯ ДЕКІЛЬКОХ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

2.1 Загальні положення

Як вказано в першому розділі, одним з недоліків п'єзоелектричних трансформаторів є їх мала вихідна потужність (одиниці ватт), що обмежує їх область застосування навіть в малопотужній електроніці. Для вирішення проблеми підвищення вихідної потужності схем з використанням п'єзотрансформаторів було вирішено досліджувати класичні методи збільшення потужності, які успішно використовуються на практиці стосовно інших елементів і пристроїв електроніки, а саме послідовне і паралельне включення. Так, в електромагнітному трансформаторі для підвищення вихідної напруги з'єднують послідовно декілька вторинних обмоток, а для збільшення вихідного струму цієї обмотки включають паралельно. Аналогічно, сумарна потужність магазину опорів, включених паралельно, рівна сумі потужностей кожного з цих опорів. І, хоча п'єзотрансформатор по своїх властивостях відрізняється від електромагнітного, все ж таки способи збільшення вихідної потужності за рахунок паралельного і послідовного з'єднання декілька п'єзотрансформаторів можуть дати позитивний результат, тому такі дослідження є доцільними, а результати, отримані від цих досліджень, можуть бути корисні інженерам при розробці джерел вторинного електроживлення.

Деякі схеми послідовного, паралельного і послідовно-паралельного включення декількох п'єзотрансформаторів були розглянуті в п. 1.5 першого розділу. Але ці схеми мають свої недоліки. Так, схеми на рисунках 1.3,*а* і *б* можна застосовувати тільки у тому випадку, коли навантаження електрично не пов'язане із землею (рисунок 1.3,*а*) або симетричне відносно неї (рисунок 1.3,*б*). Решта схем на рисунку 1.3 вимагають застосування п'єзотрансформа-

торів в спеціальній конструкції (з двома генераторами в схемах на рисунках 1.3,в і з і з ізольованим генератором в схемі на рисунку 1.3,д).

Метою даного розділу є дослідження послідовного і паралельного включення декількох трививідних п'єзоелектричних трансформаторів напруги поперечно-подовжнього типу (рисунок 1.1,а).

2.2 Дослідження послідовного включення декількох п'єзоелектричних трансформаторів напруги

Теоретично при послідовному (каскадному) з'єднанні декількох п'єзотрансформаторів результуючий коефіцієнт трансформації ($k_{тр}$) буде дорівнювати добутку $k_{тр}$ кожного п'єзотрансформатора. Таким чином, з'єднуючи послідовно декілька п'єзотрансформаторів, можна отримати більшу напругу на навантаженні, ніж при використанні одного п'єзотрансформатора (при одній і тій же вхідній напрузі). Очевидно також і наступне: одну і ту ж величину вихідної напруги можна отримати від більш низьковольтного джерела. Отже, потужність на виході останнього п'єзотрансформатора при послідовному з'єднанні збільшується за рахунок збільшення потужності на його вході шляхом застосування ще одного (або декількох) п'єзотрансформаторів як елементів, що підсилюють напругу джерела. Проте максимальна вихідна потужність такої системи не може бути вище за максимальну вихідну потужність останнього п'єзотрансформатора.

Для перевірки цього припущення були проведені експериментальні дослідження послідовного включення двох п'єзотрансформаторів напруги.

Всі дослідження проводилися на макетній платі, яка показана на рисунку 2.1.

Заздалегідь були зняті амплітудно-частотні характеристики п'єзотрансформаторів. Вони зображені на рисунках 2.2 і 2.3.

Схема вимірювання амплітудно-частотної характеристики приведена на рисунку 2.4.

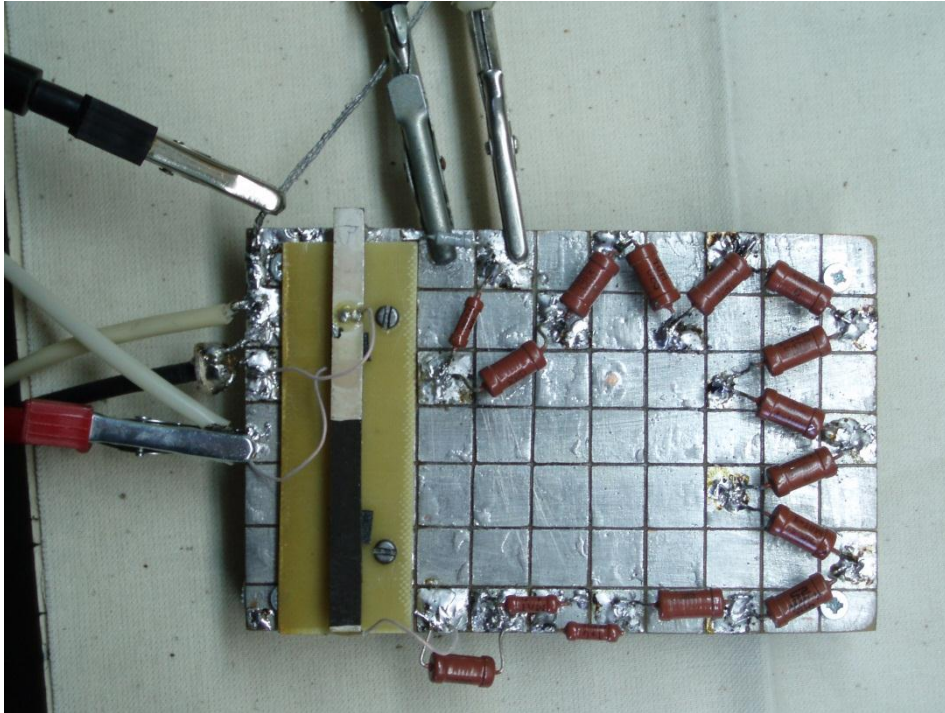


Рисунок 2.1 – Макетна плата

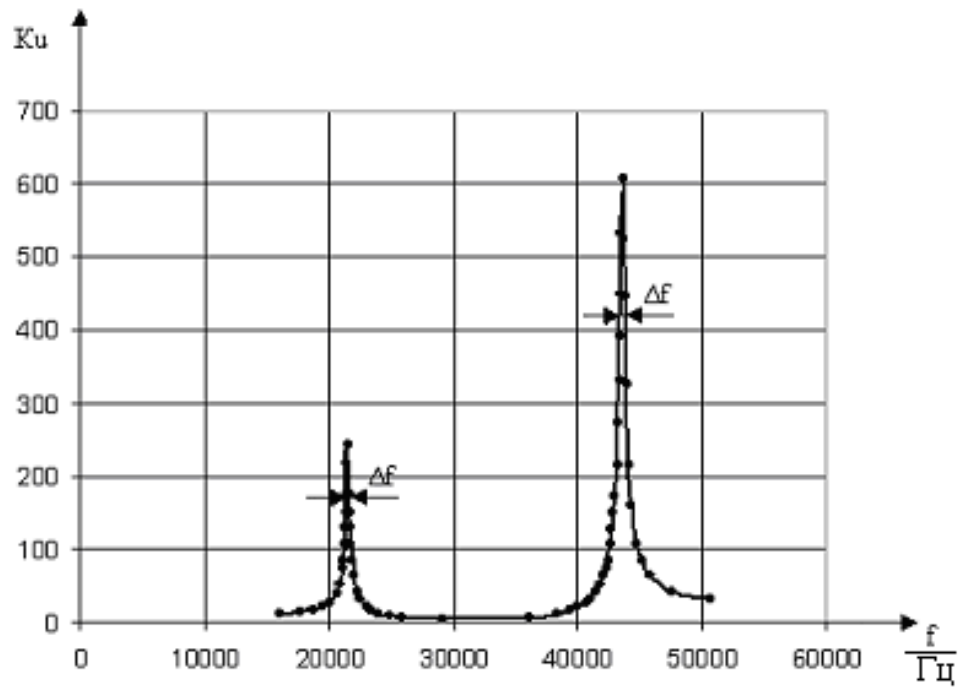


Рисунок 2.2 – Амплітудно-частотна характеристика одношарового п'єзотрансформатора типу ТП-Р1 800603

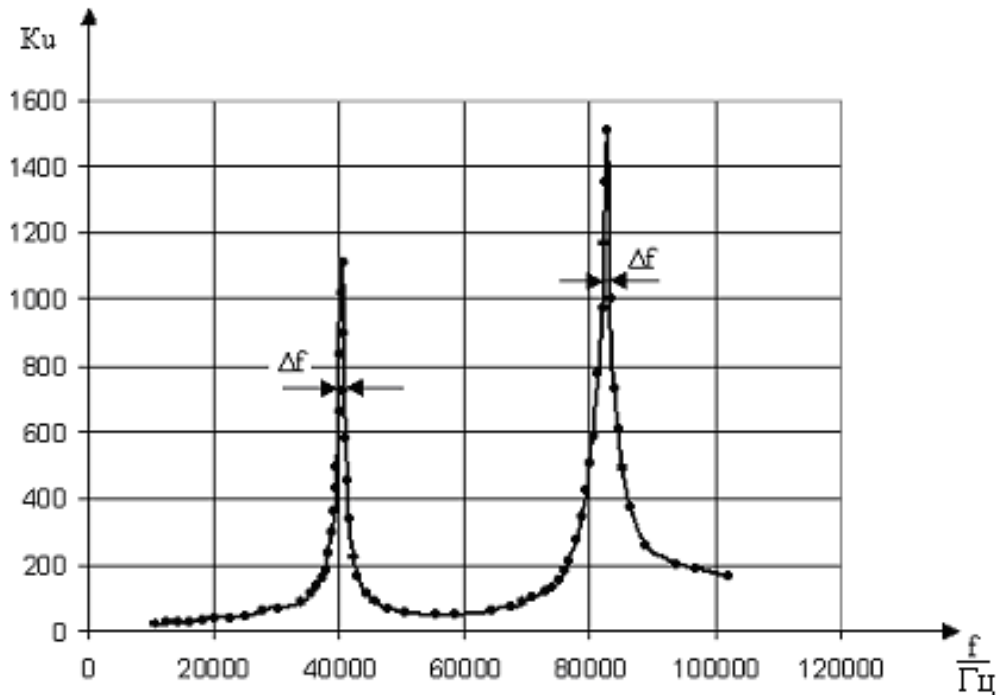


Рисунок 2.3 – Амплітудно-частотна характеристика багат шарового п'єзотрансформатора типу ТП-РМ 400602

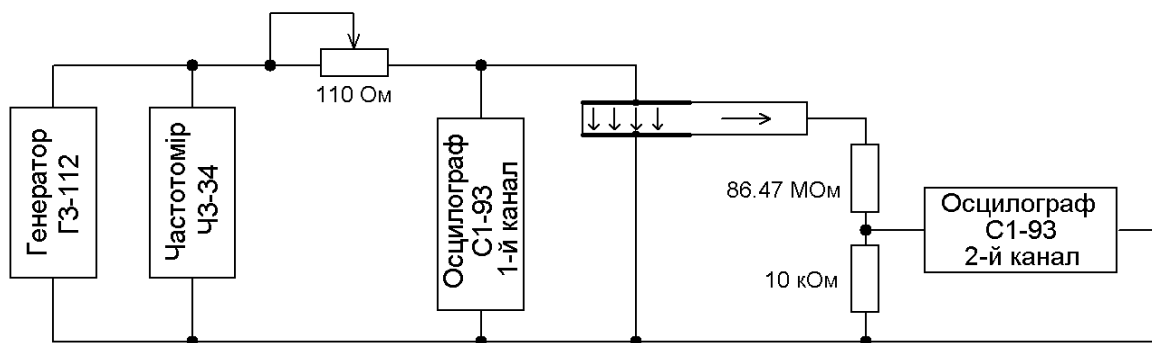


Рисунок 2.4 – Схема вимірювання амплітудно-частотної характеристики п'єзотрансформатора

Експериментальне дослідження послідовного включення п'єзотрансформаторів напруги проводилося для двох випадків:

- 1) один з трансформаторів - багат шаровий, другий - одношаровий;
- 2) обидва трансформатори одношарові.

У таблицях 2.1 і 2.2 приведені габаритні розміри і електричні параметри досліджуваних п'єзотрансформаторів, надані фірмою-виробником [17].

Таблиця 2.1 – Габаритні розміри п'єзотрансформаторів

Позначення п'єзотрансформатора	Тип	Габаритні розміри		
		Довжина, L, мм	Ширина, В, мм	Товщина, Н, мм
1	ТП-РМ 400602	40±0,5	6±0,5	2±0,2
2	ТП-Р1 800603	80±0,1	6±0,4	3±0,2

Таблиця 2.2 – Електричні параметри п'єзотрансформаторів

Позначення п'єзотрансформатора	Частота основного резонанса, кГц	Електрична ємність вихідної секції, пФ	tg δ . секції, не більше	Вхідна напруга, Вэф	Вихідна напруга, кВ не менше, Rн 100 МОм
1	35 – 45	10-14	0,008	5	2,5
2	19 - 22	5-7	0,01	60	3,0

На рисунку 2.5 зображений зовнішній вигляд досліджуваних п'єзотрансформаторів.

Схема дослідження показана на рисунку 2.6.

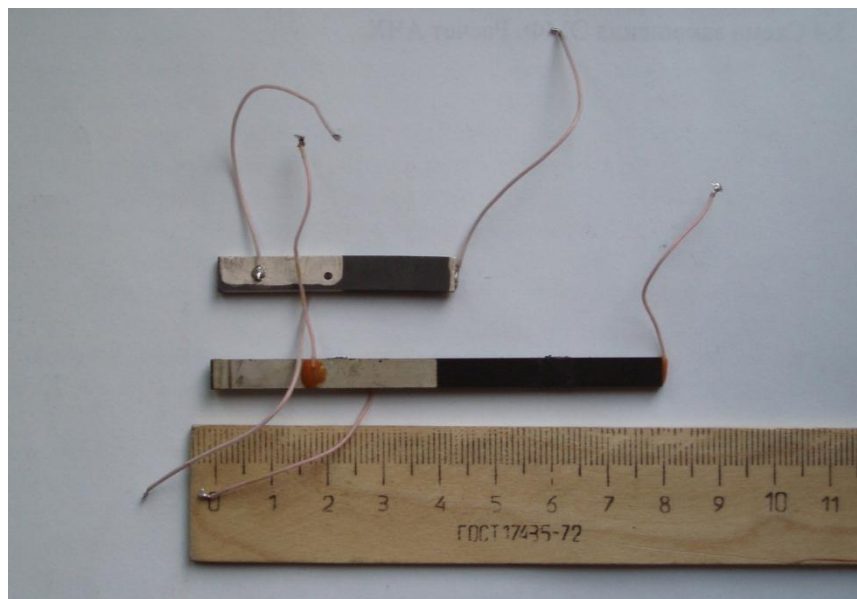


Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд досліджуваних п'єзотрансформаторів

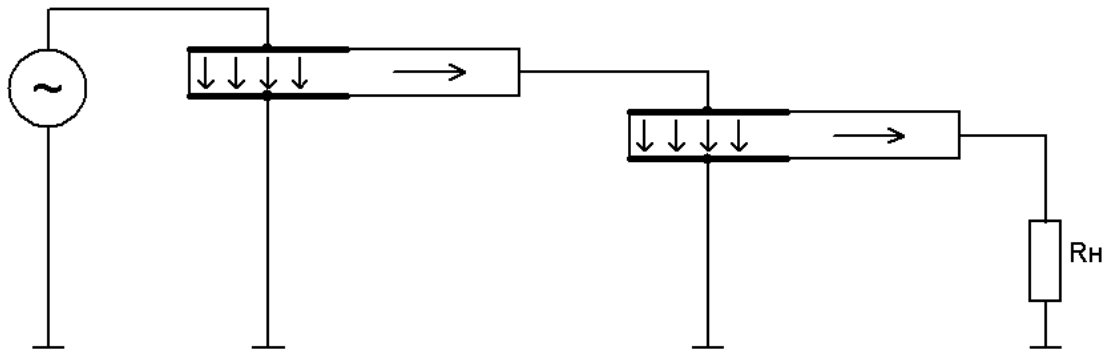


Рисунок 2.6 – Схема дослідження послідовного включення двох п'єзотрансформаторів

Синусоїдальна напруга потрібної частоти і амплітуди подавалася від лабораторного низькочастотного генератора ГЗ-112. Контроль частоти проводився за допомогою частотоміра ЧЗ-34. Вхідна і вихідна напруга спостерігалася двоканальним осцилографом С1-93. Вихідна напруга вимірювалася за допомогою дільника з коефіцієнтом ділення 8647, як показано на рисунку 2.4.

Слід відмітити, що частота в такій схемі (рисунок 2.6) однакова на входах і виходах кожного п'єзотрансформатора і дорівнює частоті генератора. Як видно з рисунків 2.2 і 2.3, резонансні частоти досліджуваних п'єзотрансформаторів не співпадають. Тому передбачалося, що в першому випадку, коли перший п'єзотрансформатор - багат шаровий, а другий - одношаровий, один з них (багат шаровий) працюватиме не на резонансній частоті, а інший (одношаровий) – на резонансній. Таке включення обґрунтоване відмінністю допустимих параметрів для обох п'єзотрансформаторів. Допустима вхідна напруга ($U_{\text{вхдоп}}$) одношарового п'єзотрансформатора ТП-Р1 800603 дорівнює 60 В, в той час, як для багат шарового ТП-РМ 400602 вона дорівнює 10 В (таблиця 2.2). Тому п'єзотрансформатор з нижчою допустимою вхідною напругою доцільніше використовувати в першому каскаді, а п'єзотрансформатор з вищим $U_{\text{вхдоп}}$ – в другому.

В ході експерименту було встановлено, що таке включення не дає бажаного результату. Регулюючи частоту генератора в широких межах і спостерігаючи вихідну напругу за допомогою осцилографа, не було зафіксовано резонансу на навантаженні ні на резонансних частотах обох п'єзотрансформаторів, ні на інших частотах, а напруги на виходах обох п'єзотрансформаторів були зневажливо малі.

Отримані результати пояснюються тим, що другий п'єзотрансформатор є для першого дуже великим навантаженням. До того ж характер цього навантаження комбінований: відомо, що п'єзотрансформатор залежно від частоти може поводитися як індуктивність, ємність або активний опір. Тому спостерігається велика просадка вихідної напруги першого п'єзотрансформатора, унаслідок чого робота другого п'єзотрансформатора вже не може бути ефективною. Теоретично цю проблему може вирішити введення між п'єзотрансформаторами додаткових підсилюючих каскадів, але у такому разі втрачається сенс самої ідеї послідовного включення. Адже при включенні між першим і другим п'єзотрансформаторами підсилувача потужності потрібне додаткове джерело живлення з вихідною напругою, більшою, ніж напруга вхідного генератора. Очікується, що послідовне включення дозволяє отримати збільшення вихідної напруги від одного і того ж джерела без застосування додаткових джерел живлення. Використовуючи підсилувач потужності перший п'єзотрансформатор можна взагалі виключити зі схеми.

У другому випадку, коли обидва п'єзотрансформатори були одношаровими і одного і того ж типу, передбачалося, що вони обидва працюватимуть на резонансній частоті. Але, ймовірно, з тієї ж причини, що і в першому випадку, результати були отримані незадовільні.

Таким чином, можна зробити висновок, що послідовне включення двох п'єзоелектричних трансформаторів напруги є неефективним. Подальший напрямок дослідження може бути націлений на послідовне включення п'єзоелектричного трансформатора струму і п'єзоелектричного трансформатора напруги. В роботі [5] вказано на існування цієї можливості.

2.3 Дослідження паралельного включення декількох п'єзоелектричних трансформаторів напруги

Паралельне з'єднання різних вузлів електроніки (джерел живлення, вторинних обмоток електромагнітних трансформаторів тощо) збільшує їх здатність до навантаження, тобто дозволяє отримати більший вихідний струм. Можна припустити, що такий ефект вдасться отримати і від паралельного з'єднання декількох п'єзоелектричних трансформаторів напруги. Дослідження такого явища стосовно п'єзотрансформаторів вельми актуально, оскільки одним з головних недоліків п'єзотрансформаторів є їх мала вихідна потужність, а ефект, отриманий від їх паралельного включення, міг би частково усунути цей недолік при використанні п'єзотрансформаторів в різних електронних схемах. При паралельному з'єднанні елементів вихідна потужність збільшується, але разом з тим збільшується і споживана потужність. Проте, максимальна вихідна потужність дорівнює сумі максимальних потужностей кожного елементу.

Для перевірки такого припущення були проведені експериментальні дослідження паралельного включення декількох п'єзотрансформаторів напруги.

Схема дослідження приведена на рисунку 2.7.

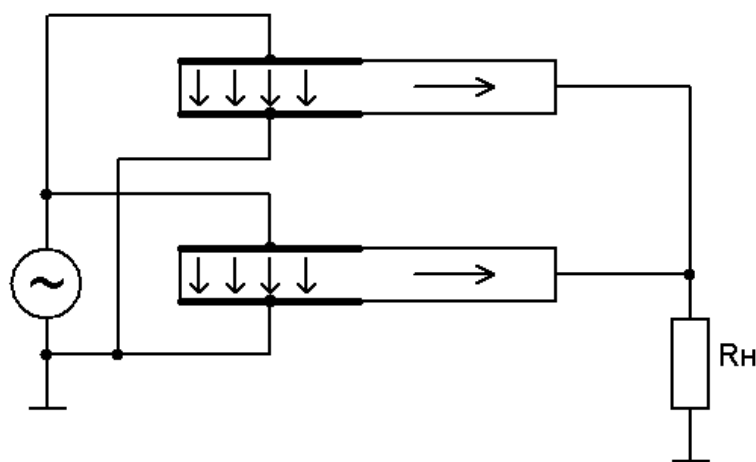


Рисунок 2.7 – Схема дослідження паралельного включення двох п'єзотрансформаторів

Зі схеми на рисунку 2.7 видно, що і збудники, і генератори обох п'єзотрансформаторів паралельно з'єднані між собою.

В ході експерименту була перевірена можливість паралельного з'єднання як одношарових, так і багатшарових п'єзотрансформаторів напруги типу ТП-Р1 800603 і ТП-РМ 400602 відповідно (див. таблиці 2.1 і 2.2 і рисунок 2.5). В обох випадках досліджувалися два однакових п'єзотрансформатори.

При дослідженні паралельного включення одношарових трансформаторів спочатку була знята характеристика навантаження одного п'єзотрансформатора типу ТП-Р1 800603, а потім двох і трьох, включених паралельно. Результати вимірювань приведені в таблицях 2.3-2.5.

Вимірюючи вхідну напругу і напругу на дільнику (рисунок 2.4) і знаючи опори навантаження і коефіцієнт ділення дільника, були розраховані вихідна напруга і струми за формулами

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{д}} \cdot k_{\text{д}}, \quad (2.1)$$

$$I_{\text{вих}} = \frac{U_{\text{вих}}}{R_{\text{н}}}, \quad (2.2)$$

де $U_{\text{вих}}$ та $I_{\text{вих}}$ – вихідна напруга та вихідний струм п'єзотрансформатора;

$k_{\text{д}}$ – коефіцієнт ділення дільника;

$U_{\text{д}}$ – напруга на низькоомному резисторі дільника.

За результатами досліджень були побудовані графіки залежностей вихідної напруги п'єзотрансформатора від опору навантаження і вихідного струму від вихідної напруги. Графіки приведені на рисунках 2.8 і 2.9. На графіках крива 1 відповідає одному п'єзотрансформатору, криві 2 і 3 - двом і трьом паралельно включеним п'єзотрансформаторам відповідно.

З графіків на рисунках 2.8 і 2.9 видно, що паралельне з'єднання декількох п'єзотрансформаторів дає приріст здатності до навантаження приблизно в 1,5 рази на кожен паралельно підключений трансформатор.

Таблиця 2.3 – Результати вимірювань для одного п'єзотрансформатора
ТП-Р1 800603

Опір навантаження R_n , МОм	Вхідна напруга $U_{вх}$, В	Напруга на дільнику U_d , В	Коефіцієнт ділення K_d	Вихідна напруга $U_{вих}$, В	Вихідний струм, мкА
86,47	3,4	0,28	8647	2421	28
76,47	3,4	0,31	7647	2371	31
66,47	3,4	0,34	6647	2260	34
56,47	3,41	0,37	5647	2090	37
46,47	3,41	0,35	4647	1626	35
40,87	3,41	0,35	4087	1430	35
35,27	3,41	0,37	3527	1305	37
29,67	3,41	0,38	2967	1127	38
24,07	3,41	0,4	2407	963	40
18,47	3,41	0,4	1847	739	40
15,47	3,42	0,46	1547	712	46
12,47	3,44	0,52	1247	648	52
11,47	3,45	0,54	1147	619	54
10,47	3,46	0,6	1047	628	60

Таблиця 2.4 – Результати вимірювань для двох паралельно включених п'єзотрансформаторів типу ТП-Р1 800603

Опір навантаження R_n , МОм	Вхідна напруга $U_{вх}$, В	Напруга на дільнику U_d , В	Коефіцієнт ділення K_d	Вихідна напруга $U_{вих}$, В	Вихідний струм, мкА
86,47	3,4	0,4	8647	3459	40
76,47	3,4	0,44	7647	3381	44
66,47	3,4	0,48	6647	3209	48
56,47	3,41	0,55	5647	3100	55
46,47	3,41	0,51	4647	2355	51
40,87	3,41	0,55	4087	2244	55
35,27	3,41	0,57	3527	1998	57
29,67	3,41	0,59	2967	1743	59
24,07	3,41	0,65	2407	1566	65
18,47	3,41	0,64	1847	1182	64
15,47	3,42	0,73	1547	1133	73
12,47	3,44	0,76	1247	943	76
11,47	3,45	0,77	1147	889	77
10,47	3,46	0,83	1047	870	83

Таблиця 2.5 – Результати вимірювань для трьох паралельно включених п'єзотрансформаторів типу ТП-Р1 800603

Опір навантаження R_H , МОм	Вхідна напруга $U_{вх}$, В	Напруга на ділянці $U_{д}$, В	Коефіцієнт ділення K_d	Вихідна напруга $U_{вих}$, В	Вихідний струм, мкА
86,47	3,4	0,57	8647	4922	57
76,47	3,4	0,64	7647	4875	64
66,47	3,4	0,67	6647	4479	67
56,47	3,41	0,71	5647	3990	71
46,47	3,41	0,68	4647	3141	68
40,87	3,41	0,74	4087	3013	74
35,27	3,41	0,77	3527	2709	77
29,67	3,41	0,77	2967	2279	77
24,07	3,41	0,83	2407	1988	83
18,47	3,41	0,85	1847	1575	85
15,47	3,42	0,94	1547	1451	94
12,47	3,44	1,1	1247	1375	110
11,47	3,45	1,16	1147	1330	116
10,47	3,46	1,25	1047	1305	125

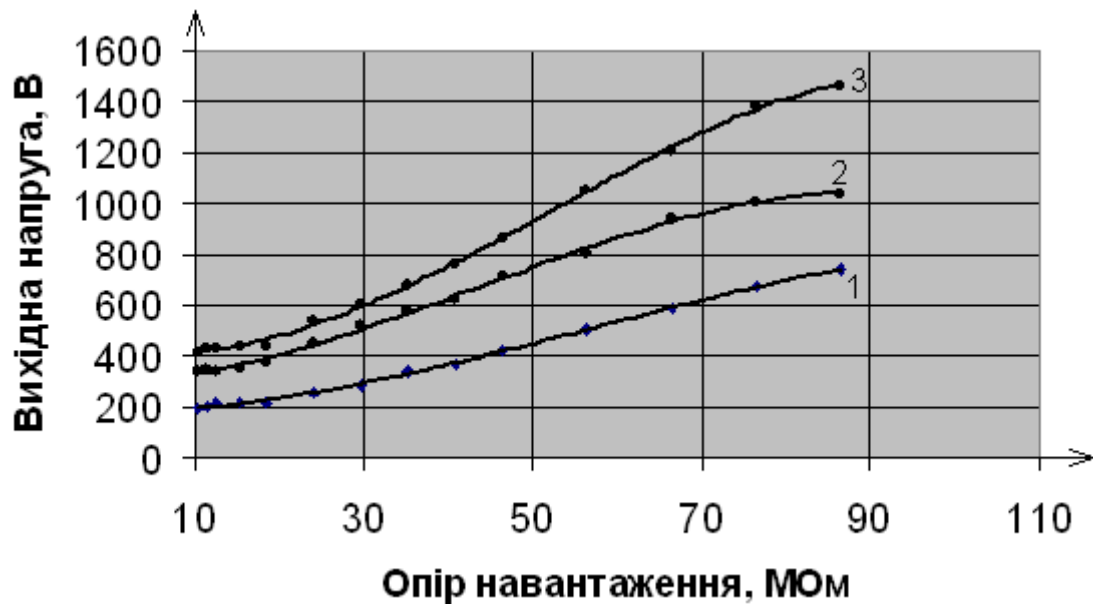


Рисунок 2.8 – Залежність вихідної напруги одного, двох і трьох одношарових п'єзотрансформаторів від опору навантаження:

- 1 – для одного п'єзотрансформатора,
- 2 – для двох паралельно включених п'єзотрансформаторів,
- 3 – для трьох паралельно включених п'єзотрансформаторів

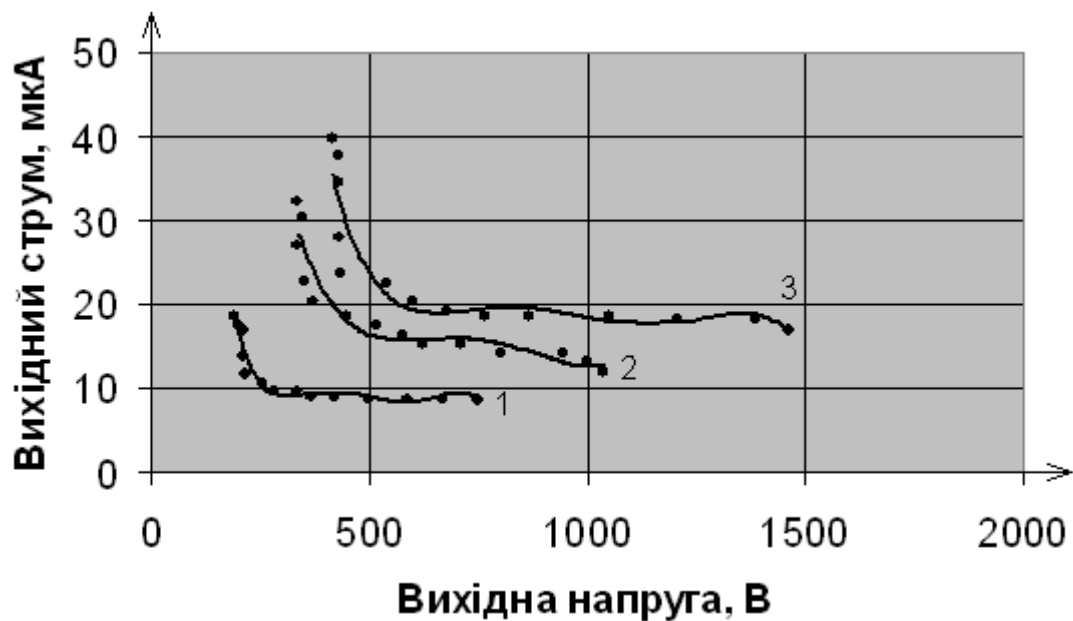


Рисунок 2.9 – Залежність вихідного струму одного, двох и трьох одношарових п'єзотрансформаторів від вихідної напруги

- 1 – для одного п'єзотрансформатора,
- 2 – для двох паралельно включених п'єзотрансформатора,
- 3 – для трьох паралельно включених п'єзотрансформаторів

При дослідженні паралельного включення багат шарових п'єзотрансформаторів типу ТП-РМ 400602 ефекту збільшення здатності до навантаження не було отримано. Графіки залежності вихідної напруги від опору навантаження і вихідного струму від вихідної напруги приведені на рисунках 2.10 і 2.11. Криві для одного і двох п'єзотрансформаторів майже співпадають. Можна припустити, що такі результати пояснюються особливостями структури багат шарових п'єзотрансформаторів, але на дійсний час, в літературі практично відсутня інформація по структурі багат шарових п'єзотрансформаторів і остаточний аргументований висновок зробити складно. З цією метою, доцільне проведення додаткових досліджень в області керамічних матеріалів, що не пов'язано з метою і задачами цієї роботи.

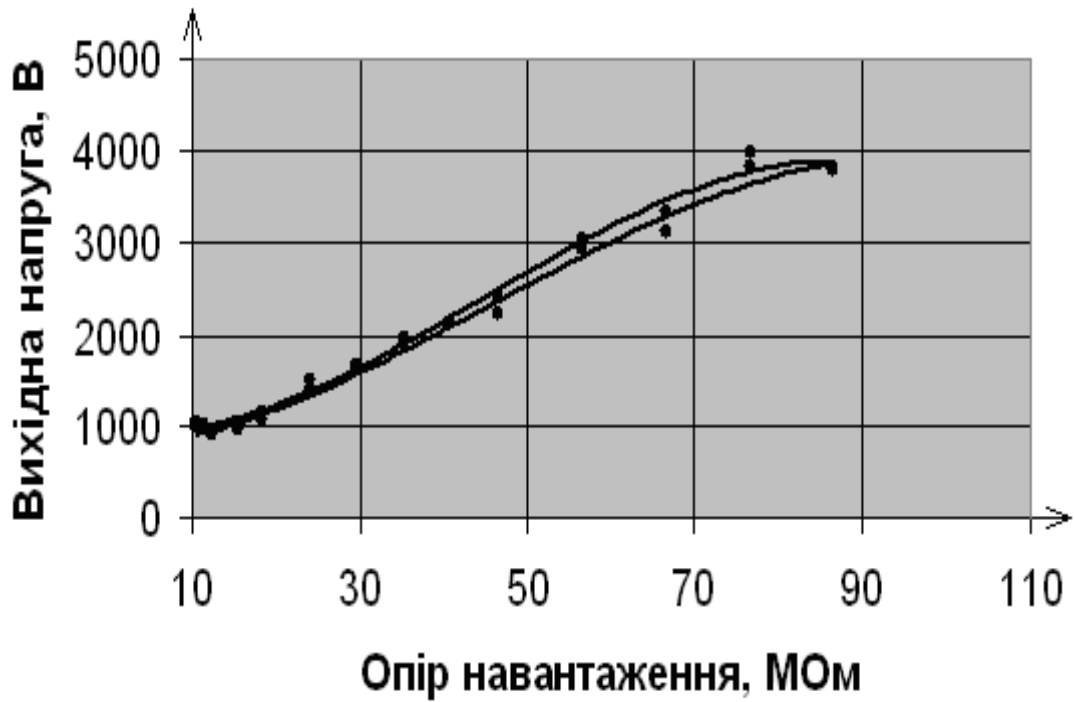


Рисунок 2.10 – Залежність вихідної напруги одного і двох багат шарових п'єзотрансформаторів від опору навантаження

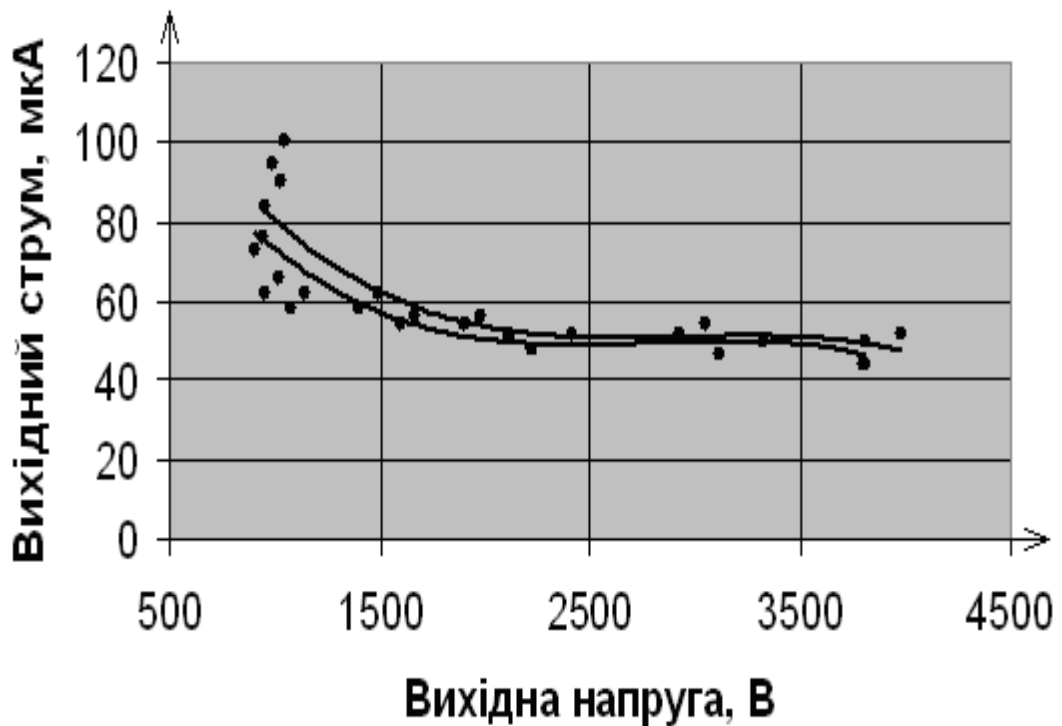


Рисунок 2.11 – Залежність вихідного струму одного і двох багат шарових п'єзотрансформаторів від вихідної напруги

2.4 Моделювання паралельного включення декількох одношарових п'єзотрансформаторів напруги

Разом з експериментальним дослідженням паралельного включення декількох п'єзотрансформаторів проводилося також моделювання. За допомогою пакету кризного моделювання OrCAD була зроблена спроба змоделювати паралельне включення декількох п'єзоелектричних трансформаторів напруги.

В роботі [5] наведена еквівалентна схема заміщення одношарового п'єзоелектричного трансформатора напруги і її розрахунок. Ця схема приведена на рисунку 2.12.

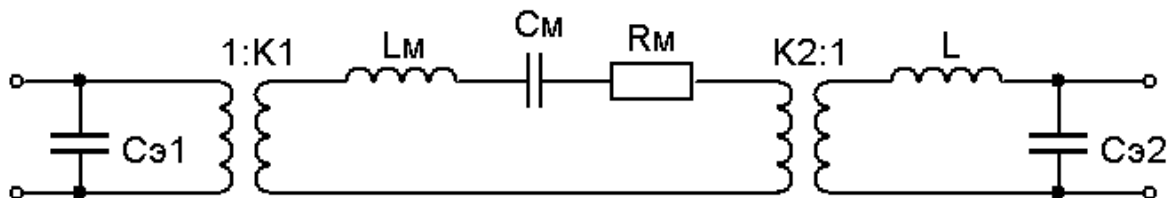


Рисунок 2.12 – Еквівалентна схема заміщення одношарового п'єзотрансформатора напруги

Нижче приведені формули для розрахунку параметрів схеми заміщення

$$C_{\text{з1}} = \frac{\varepsilon_{33}^T \cdot (1 - k_{31}^2) \cdot b' \cdot L'}{a'}, \quad (2.3)$$

$$C_{\text{з2}} = \frac{\varepsilon_{33}^T \cdot (1 - k_{33}^2) \cdot a'' \cdot b''}{L''}, \quad (2.4)$$

$$L = \frac{1}{\omega^2 \cdot C_{\text{з2}}}, \quad (2.5)$$

$$k_1 = 2 \cdot b' \cdot d_{31} \cdot Y_1^E, \quad (2.6)$$

$$k_2 = \frac{2 \cdot k_{33}^2 \cdot a'' \cdot b''}{g_{33} \cdot L''}, \quad (2.7)$$

$$z_0 = a' \cdot b' \cdot \sqrt{\rho \cdot Y_1^E}, \quad (2.8)$$

$$L_m = 4 \cdot a' \cdot b' \cdot L' \cdot \rho, \quad (2.9)$$

$$C_m = \frac{L'}{\pi^2 \cdot a' \cdot b' \cdot Y_1^E}, \quad (2.10)$$

$$R_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot z_0}{Q_m}, \quad (2.11)$$

де ϵ_{33}^T – діелектрична проникність;

k_{31} – поперечний коефіцієнт електромеханічного зв'язку;

k_{33} – подовжній коефіцієнт електромеханічного зв'язку;

b', b'' – ширина збудника та генератора відповідно;

L', L'' – довжина збудника та генератора відповідно;

a', a'' – товщина збудника та генератора відповідно;

ω – кругова частота;

d_{31}, g_{33} – п'єзоелектричні модулі;

Y_1^E – модуль Юнга;

ρ – щільність;

Q_m – механічна добротність.

Підставивши у формули відповідні константи з [17], а також розміри п'єзотрансформатора та резонансну частоту, були розраховані всі параметри схеми заміщення. На рисунку 2.13 показана модель одношарового п'єзотрансформатора, побудована в програмі OrCAD. Модель доповнена опором навантаження R_n , джерелом синусоїдальної напруги V_1 і резистором R_{gen} , що імітує внутрішній опір джерела.

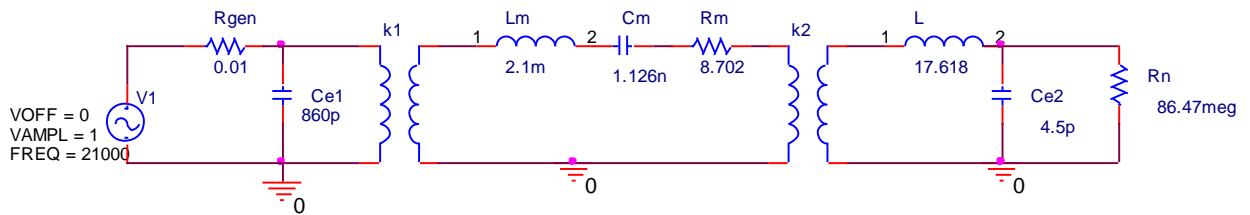


Рисунок 2.13 – Модель одношарового п'єзотрансформатора

Про працездатність моделі можна судити по амплітудно-частотній характеристиці, отриманій в результаті моделювання еквівалентної схеми п'єзотрансформатора. Амплітудно-частотна характеристика приведена на рисунку 2.14.

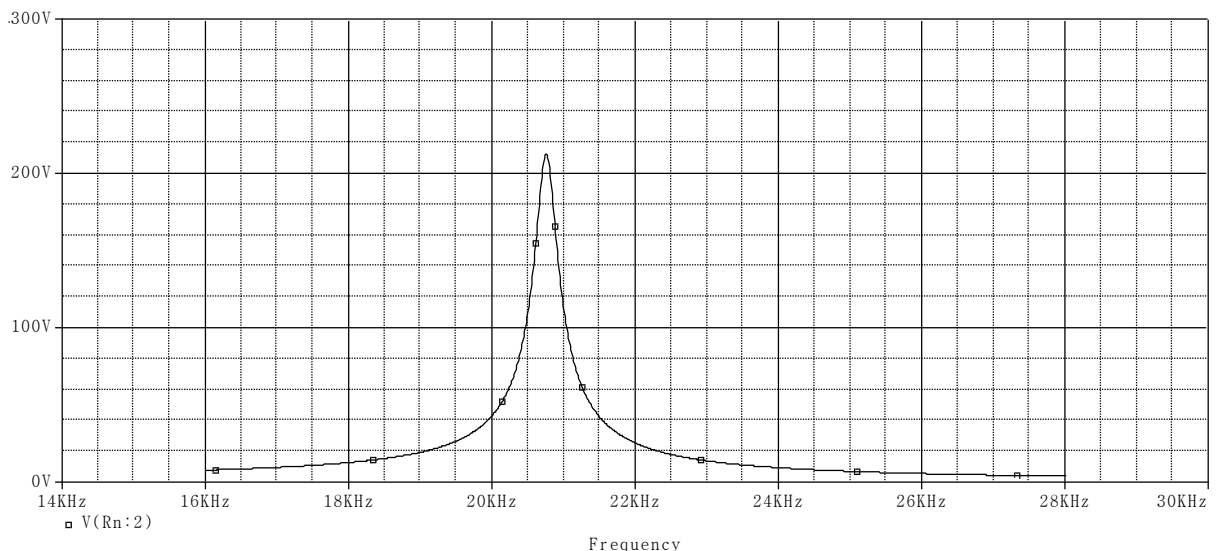


Рисунок 2.14 – Амплітудно-частотна характеристика одношарового п'єзотрансформатора, побудована програмою OrCAD

З графіка на рисунку 2.14 видно, що амплітудно-частотна характеристика, побудована ЕОМ, досить близька до експериментально знятої амплітудно-частотної характеристики, приведеної на рисунку 2.2. Тому модель можна вважати достатньо адекватною.

Для зручності моделювання паралельного з'єднання декількох п'єзотрансформаторів схема на рисунку 2.13 була об'єднана в ієрархічний блок, внаслідок чого схема стала менш громіздка і більш наочна. Вона приведена на рисунку 2.15.

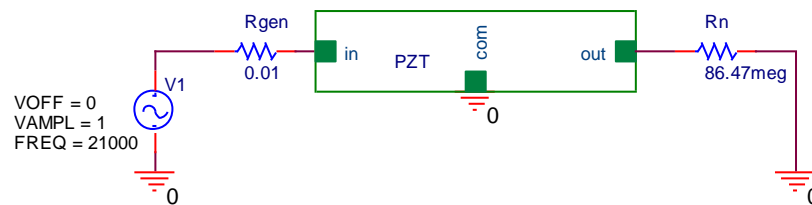


Рисунок 2.15 - Модель п'єзотрансформатора у вигляді ієрархічного блоку.

Модель паралельного включення двох і трьох одношарових п'єзоелектричних трансформаторів напруги приведена на рисунках 2.16 і 2.17. Модель доповнена резисторами R1-R4, які необхідні для нормального розрахунку параметрів алгоритмами OrCAD. Опір цих резисторів малий і на роботу схеми не впливає.

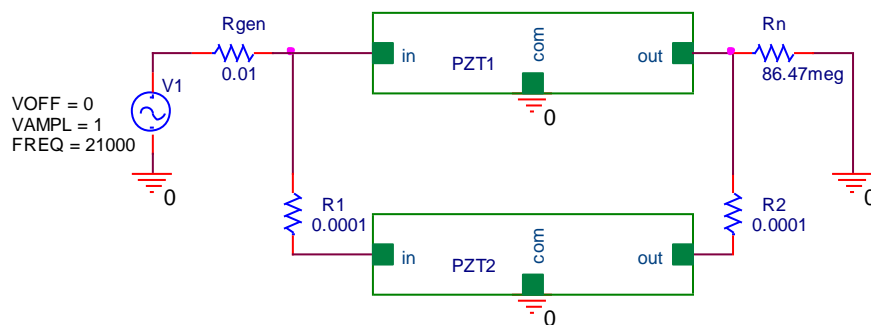


Рисунок 2.16 - Модель паралельного включення двох п'єзотрансформаторів

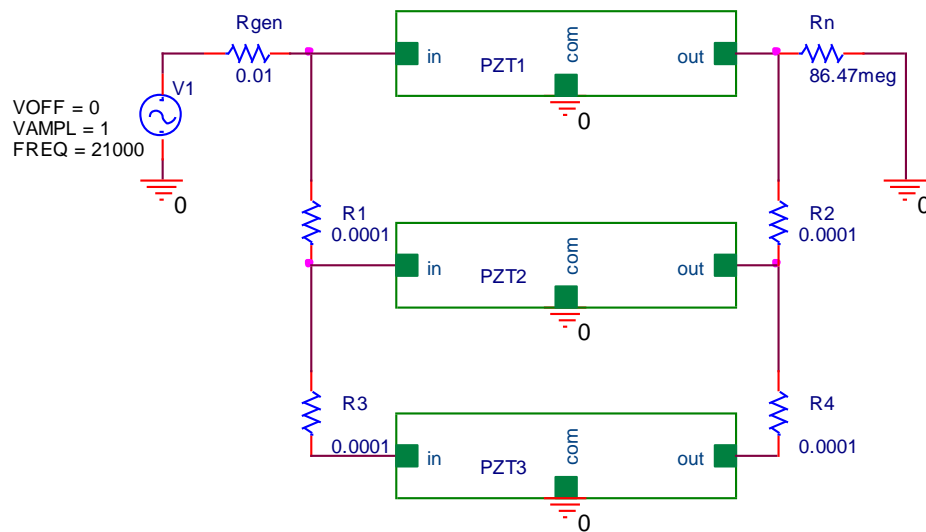


Рисунок 2.17 – Модель паралельного включення трьох п'єзотрансформаторів

В результаті моделювання були отримані амплітудно-частотні характеристики. Вони показані на рисунку 2.18. З амплітудно-частотних характеристик видно, що коефіцієнт трансформації при паралельному з'єднанні двох і трьох п'єзотрансформаторів збільшився в 2 і 3 рази відповідно (рисунки 2.14, 2.18). Це пояснюється тим, що при паралельному з'єднанні збільшилася здатність до навантаження схеми. Для отримання навантажувальних характеристик (рисунки 2.8, 2.9) була зроблена серія вимірювань: змінюючи опір навантаження, фіксувалися значення вихідної напруги. Такі вимірювання були зроблені для одного п'єзотрансформатора, а також для двох і трьох паралельно включених. Результати вимірювань приведені в таблиці 2.6. Вихідний струм був розрахований по закону Ома.

За результатами вимірювань були побудовані графіки залежностей вихідної напруги від опору навантаження і вихідного струму від вихідної напруги. Графіки приведені на рисунках 2.19 і 2.20. Крива 1 - для одного п'єзотрансформатора, криві 2 і 3 - для двох і трьох паралельно включених п'єзотрансформаторів відповідно.

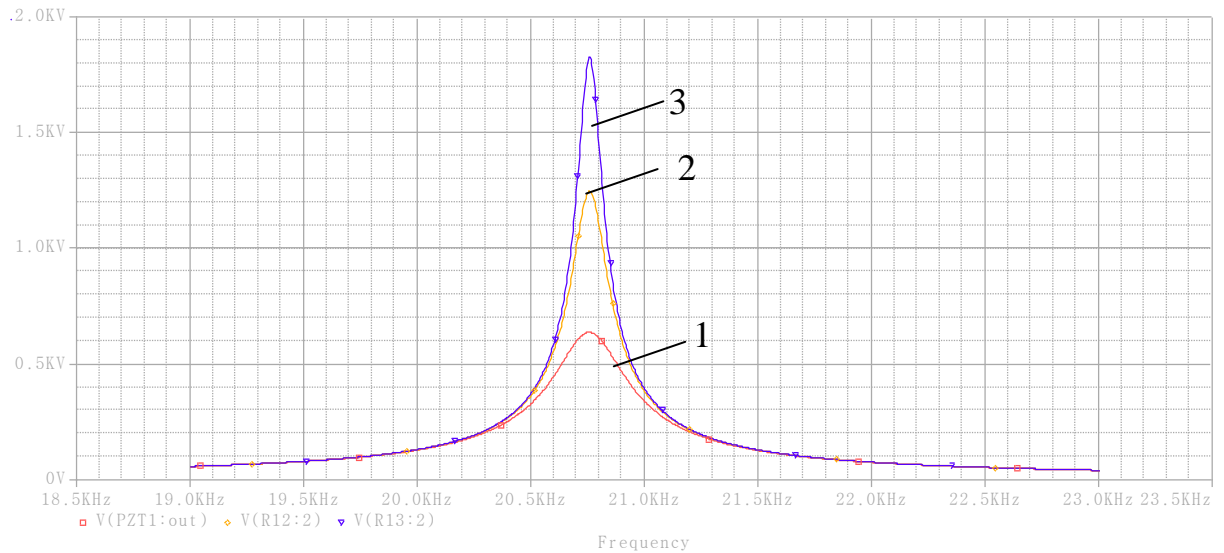


Рисунок 2.18 – Амплітудно-частотна характеристика одного, двох та трьох паралельно включених п'єзотрансформаторів, побудовані програмою OrCAD:

- 1 – для одного п'єзотрансформатора;
- 2 – для двох паралельно включених п'єзотрансформаторів;
- 3 – для трьох паралельно включених п'єзотрансформаторів

Таблиця 2.6 – Результати моделювання

R_H , МОм	$U_{вх}$, В	$U_{вих1}$, В	$U_{вих2}$, В	$U_{вих3}$, В	$I_{вих1}$, мКА	$I_{вих2}$, мКА	$I_{вих3}$, мКА
86,47	3	640	1250	1830	7,40	14,46	21,16
76,47	3	565	1108	1630	7,39	14,49	21,32
66,47	3	493	969	1427	7,42	14,58	21,47
56,47	3	420	827	1222	7,44	14,65	21,64
46,47	3	346	684	1013	7,45	14,72	21,80
40,87	3	305	603	895	7,46	14,75	21,90
35,27	3	264	522	776	7,49	14,80	22,00
29,67	3	223	441	656	7,52	14,86	22,11
24,07	3	181	359	535	7,52	14,92	22,23
18,47	3	139	276	412	7,53	14,94	22,31
15,47	3	116	232	346	7,50	14,99	22,37
12,47	3	94	187	280	7,54	14,99	22,45
11,47	3	86	172	257	7,50	14,99	22,41
10,47	3	79	157	235	7,55	14,99	22,45

В таблиці 2.6 були вжиті наступні скорочення:

R_H – опір навантаження;

$U_{вх}$ – вхідна напруга;

$U_{\text{вих1}}$ – вихідна напруга одного п'єзотрансформатора;

$U_{\text{вих2}}$ – вихідна напруга двох паралельно з'єднаних п'єзотрансформаторів;

$U_{\text{вих3}}$ – вихідна напруга трьох паралельно з'єднаних п'єзотрансформаторів;

$I_{\text{вих1}}$ – вихідний струм одного п'єзотрансформатора;

$I_{\text{вих2}}$ – вихідний струм двох паралельно з'єднаних п'єзотрансформаторів;

$I_{\text{вих3}}$ – вихідний струм трьох паралельно з'єднаних п'єзотрансформаторів.

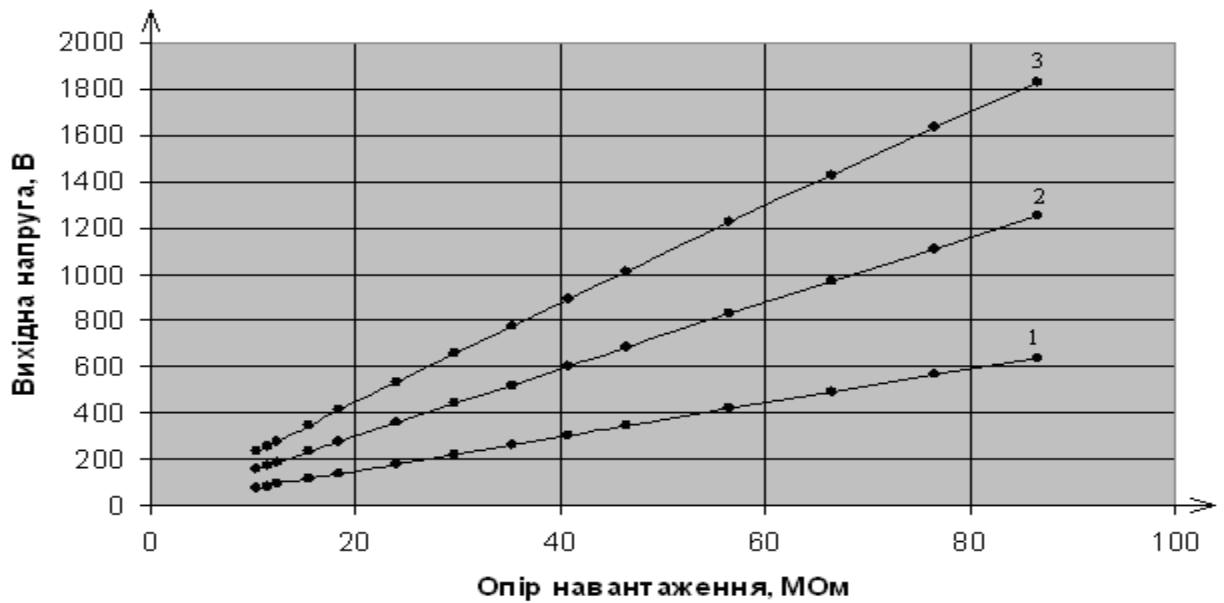


Рисунок 2.19 - Залежність вихідної напруги п'єзотрансформатора від опору навантаження

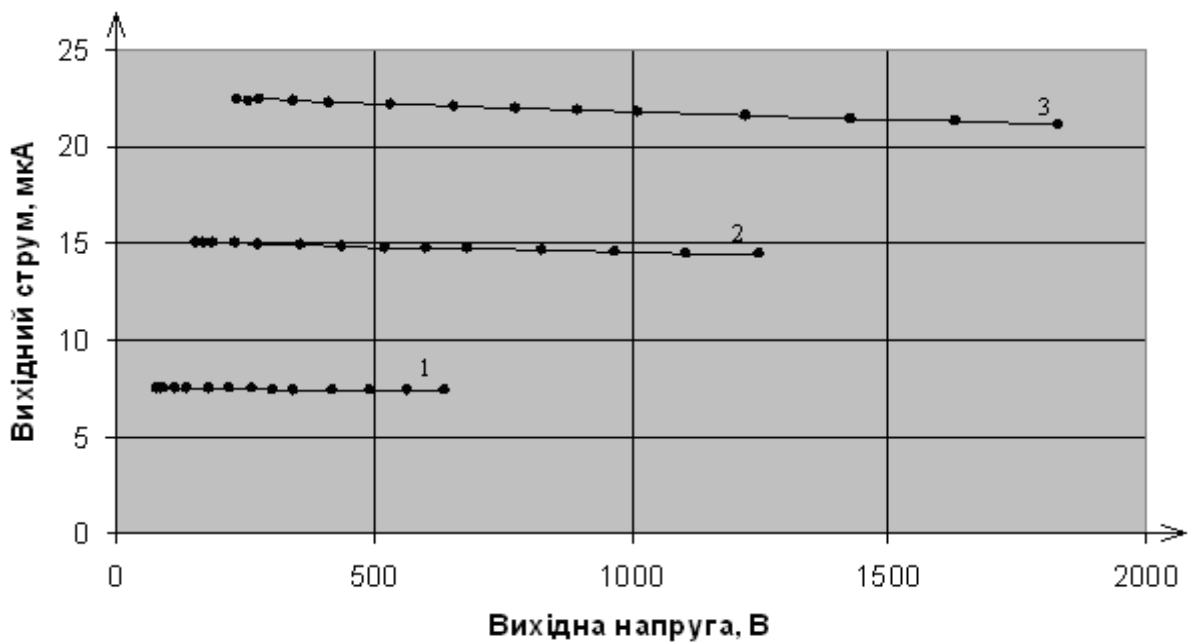


Рисунок 2.20 - Залежність вихідного струму п'єзотрансформатора від вихідної напруги

З характеристик на рисунках 2.19 і 2.20 видно, що включення двох п'єзотрансформаторів збільшує здатність до навантаження приблизно в два рази. Деяка відмінність характеристик моделі від експериментально знятих характеристик пояснюється тим, що модель не враховує всіх властивостей реального п'єзотрансформатора, а також їх взаємного впливу один на одного за допомогою електричного поля. В цілому, результати моделювання можна вважати адекватними.

2.5 Висновки за розділом

Таким чином, в даному розділі роботи були експериментально досліджені можливості послідовного і паралельного з'єднання декількох п'єзоелектричних трансформаторів напруги (одношарових і багатошарових), а також було зроблено моделювання паралельного включення декількох п'єзотрансформаторів за допомогою ЕОМ.

В результаті експериментальних досліджень була встановлена недоцільність послідовного включення одношарових і багатошарових п'єзотрансформаторів напруги із-за повної непрацездатності такого включення. Для отримання потрібного ефекту необхідне використання додаткових підсилювальних каскадів, внаслідок чого така схема повністю втрачає сенс, оскільки для живлення підсилювача потужності необхідне додаткове джерело напруги.

При експериментальному дослідженні паралельного включення двох і трьох одношарових п'єзотрансформаторів було встановлено, що таке включення збільшує здатність до навантаження схеми. При цьому паралельне підключення одного п'єзотрансформатора збільшує здатність до навантаження приблизно в 1,5 рази. Отримані результати можуть бути корисні інженерам-розробникам електронних схем на базі п'єзоелектричних трансформаторів і відкривають деякі можливості для розширення області застосування п'єзотрансформаторів.

При експериментальному дослідженні паралельного включення багат шарових п'єзотрансформаторів такого ефекту не було отримано. Це, найімовірніше, пояснюється особливостями структури багат шарового п'єзотрансформатора, але в літературі практично відсутня інформація про багат шарову структуру п'єзотрансформатора і рішення цього питання потребує додаткових дослідження у області керамічних матеріалів, що знаходиться за рамками цієї роботи.

Результати моделювання паралельного включення одношарових п'єзотрансформаторів на ЕОМ, а саме за допомогою програми OrCAD, підтвердили експериментально зняті характеристики, а деякі відмінності в результатах пояснюються недосконалістю моделі, яка не враховує всіх властивостей реального п'єзотрансформатора (наприклад, взаємного впливу п'єзотрансформаторів один на одного в просторі).

ТРЕТІЙ РОЗДІЛ

РОЗРОБКА МЕТОДІВ ТА СХЕМНИХ РІШЕНЬ АВТОМАТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОБОТИ П'ЄЗОТРАНСФОРМАТОРА НА РЕЗОНАНСНІЙ АБО ПРИРЕЗОНАНСНІЙ ЧАСТОТІ

3.1 Загальні положення

Через особливості та специфічні характеристики п'єзоелектричних трансформаторів їх використання в електронних схемах створює певні труднощі. Амплітудно-частотна характеристика п'єзотрансформатора носить резонансний характер, тому доцільним є застосування п'єзотрансформатора саме на резонансній частоті або поблизу неї. Очевидно, що використання п'єзотрансформаторів потребує специфічних схемотехнічних рішень, повністю відмінних від схем із застосуванням електромагнітних трансформаторів.

В простішому випадку джерело живлення на базі п'єзотрансформатора може представляти собою генератор синусоїдальних або прямокутних імпульсів, підсилювач потужності (може бути відсутній) та сам п'єзотрансформатор. Така схема зображена на рисунку 3.1.

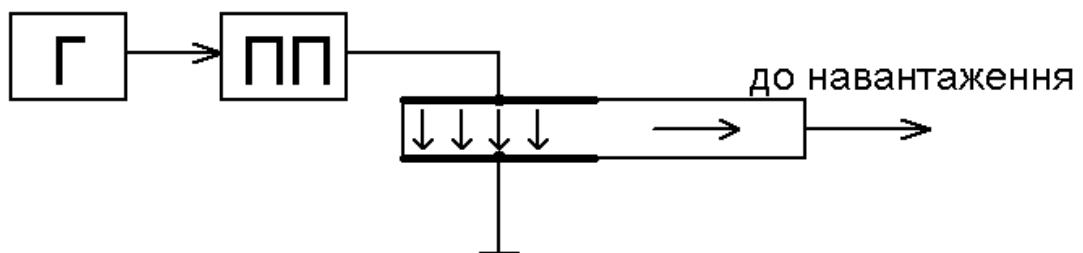


Рисунок 3.1 – Просте джерело живлення на базі п'єзотрансформатора

Частота генератора (Г) настроєна на резонансну частоту п'єзотрансформатора. Підсилювач потужності (ПП) потрібен, якщо вихідний струм генератора недостатній для збудження п'єзотрансформатора.

Така схема є дуже простою, але має суттєвий недолік: відсутність контролю та стабілізації вихідної напруги. Якщо поглянути на амплітудно-частотну характеристику п'єзотрансформатора, то зрозуміло, що незначна зміна частоти генератора призведе до різкого зменшення вихідної напруги. Причиною неспівпадіння резонансної частоти п'єзотрансформатора та частоти генератора може бути не лише нестабільність роботи генератора, а й дрейф амплітудно-частотної характеристики п'єзотрансформатора внаслідок різних чинників: температура, вологість тощо.

Із всього вище сказаного витікає, що для забезпечення нормальної роботи джерела живлення на базі п'єзотрансформатора потрібне введення додаткових вузлів контролю та стабілізації частоти.

Різноманітні способи управління п'єзоелектричними трансформаторами, розроблені для регулювання та стабілізації вихідної напруги джерел живлення на базі п'єзотрансформатора, були розглянуті в пункті 1.4. Аналізуючи ці способи, було зроблено висновок: для забезпечення високої якості вихідної напруги та стабільної роботи джерел живлення з використанням п'єзотрансформаторів необхідна дуже складна система керування, заснована на багатовимірних способах управління; проста стабілізація з використанням одновимірних способів управління часто виявляється малоефективною.

Таким чином, існує потрібність в простих та якісних способах забезпечення стабільної роботи джерел живлення на базі п'єзоелектричних трансформаторів.

3.2 Стабілізація вихідної напруги п'єзотрансформатора за допомогою контролю його вхідного струму

Щоб стабілізувати вихідну напругу п'єзотрансформатора на потрібному рівні, необхідно контролювати один або декілька параметрів самого п'єзотрансформатора. До цих параметрів відносяться сама вихідна напруга, вхідний і вихідний струми і фазовий зсув між напругою та струмом п'єзотранс-

форматора. Найчастіше здійснюють контроль вихідної напруги, а потім за допомогою системи керування регулюють частоту або амплітуду напруги збудження. Структурна схема з частотним управлінням і зворотним зв'язком по вихідній напрузі показана на рисунку 3.2.

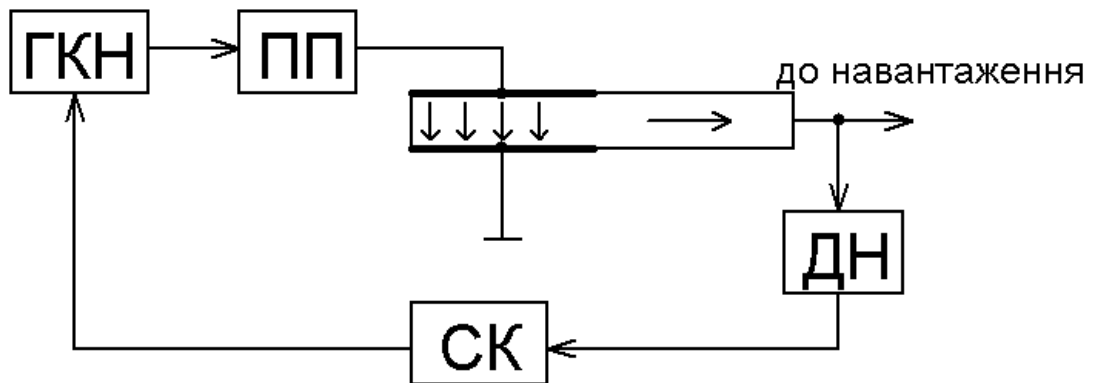


Рисунок 3.2 – Структурна схема джерела живлення з частотним управлінням і контролем вихідної напруги

З датчика напруги (ДН) знімається сигнал, що несе інформацію про величину вихідної напруги, і подається на систему керування (СК). СК у свою чергу змінює свою вихідну напругу залежно від сигналу з ДН. Вихідний сигнал СК подається на генератор, керований напругою (ГКН). Таким чином здійснюється підстроювання частоти імпульсів збудника п'єзотрансформатора, залежно від його вихідної напруги.

Така схема має деякі недоліки: по-перше, п'єзотрансформатор є інерційним пристроєм, тому контроль його вихідних параметрів вимагає застосування складних регуляторів в системі керування; по-друге, застосування в якості датчика напруги класичного резистивного дільника може привести до «просадки» вихідної напруги п'єзотрансформатора, оскільки введення в генераторний ланцюг п'єзотрансформатора активного опору збільшує загасання коливань; по-третє, існує електричний зв'язок вихідного високовольтного кола з низьковольтною системою керування.

Однією з областей застосування п'єзотрансформаторів є озонатори і іонізатори повітря. У таких пристроях п'єзотрансформатора входить до складу високовольтного джерела живлення і, як правило, працює в режимі, близькому до холостого ходу. У такому разі використання резистивного дільника в якості датчика вихідної напруги взагалі неприпустимо. Тому в таких схемах доцільніше контролювати не вихідні, а вхідні параметри п'єзотрансформатора.

Одним із способів здійснення контролю по вхідному колу п'єзотрансформатора є стеження за його вхідним струмом ($I_{вх}$). На рисунку 3.3 приведена теоретична залежність вхідного струму п'єзотрансформатора (крива 1) від частоти. На цій же характеристиці показана і вихідна напруга (крива 2).

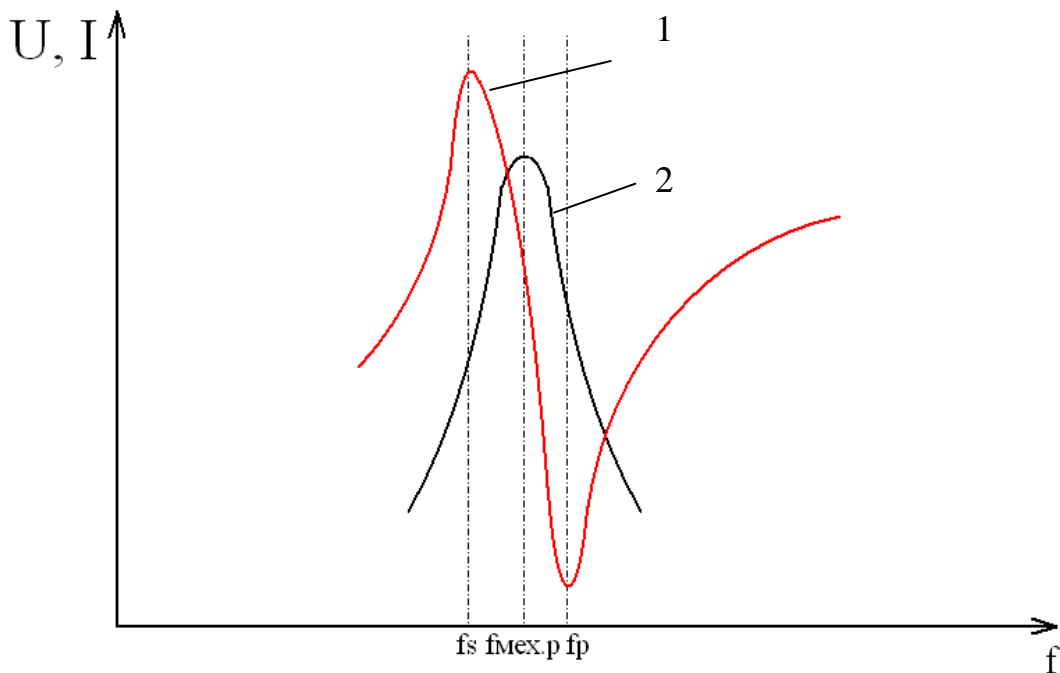


Рисунок 3.3 – Залежність вхідного струму і вихідної напруги п'єзотрансформатора від частоти

Частоти f_s і f_p мають називаються антирезонансною та резонансною відповідно (мається на увазі електричний резонанс вхідного кола), а частота

$f_{\text{мех.р}}$ називається частотою механічного резонансу і відповідає максимуму вихідної напруги п'єзотрансформатора.

З рисунка 3.3 очевидний зв'язок вхідного струму і вихідної напруги п'єзотрансформатора. Саме цей зв'язок і можна використовувати для стабілізації $U_{\text{вих}}$. Резонансна частота п'єзотрансформатора характеризується максимумом $U_{\text{вих}}$, а $I_{\text{вх}}$ на цій частоті близький до свого мінімального значення.

Отже, використовуючи датчик струму у вхідному колі п'єзотрансформатора і систему управління, здатну відстежувати мінімум (або наперед задане значення) вхідного струму п'єзотрансформатора і підстроювати частоту генератора, можна побудувати високовольтне джерело живлення із стабілізацією вихідної напруги без застосування зайвих вузлів у вихідному колі п'єзотрансформатора.

Структурна схема такого джерела живлення показана на рисунку 3.4.

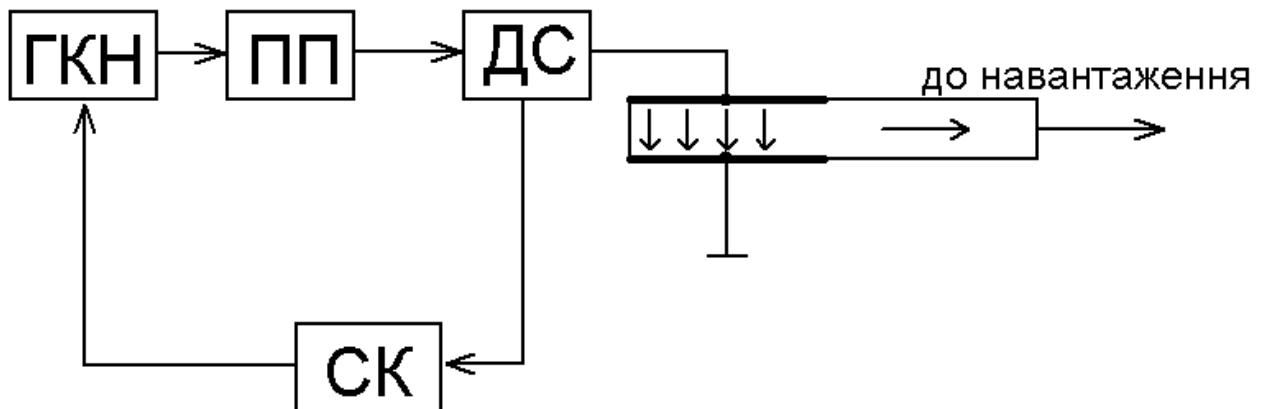


Рисунок 3.4 – Структурна схема джерела живлення з частотним управлінням і контролем вхідного струму

Використання способу контролю вхідного струму за допомогою датчика струму (ДС) та системи керування дозволяє досить ефективно стабілізувати вихідну напругу п'єзотрансформатора.

Таким чином, така побудова джерела живлення позбавлена недоліків, властивих схемі на рисунку 3.2.

Слід зазначити, що застосування в обох схемах мікропроцесорної або мікроконтролерної системи керування є більш доцільним та найпростішим в даному випадку схемним рішенням. Це обумовлено складністю реалізації функції, які покладаються на СК, за допомогою дискретних елементів та операційних підсилювачів. Система керування повинна «сканувати» певний частотний діапазон після ввімкнення джерела живлення, а потім «зупинитися», коли знайдено резонанс. В разі зсуву резонансної частоти під впливом збуджуючих чинників СК повинна знову її знаходити. Такі складні функції легко виконують сучасні мікропроцесори та мікроконтролери. Роль генератора, керованого напругою, також може виконувати сам мікропроцесор. Таким чином, джерело живлення може звестися всього до декількох електронних компонентів: самого п'єзотрансформатора, мікропроцесора (мікроконтролера) та підсилювача потужності.

3.3 Стабілізація вихідної напруги п'єзотрансформатора за допомогою контролю фазового зсуву між вхідним струмом та вхідною напругою п'єзотрансформатора

Хоча спосіб стабілізації вихідної напруги, описаний в попередньому підрозділі, є досить ефективним, він має свій недолік. Якщо звернути увагу на залежність вхідного струму п'єзотрансформатора від частоти (рисунок 3.3, крива 1), можна побачити, що одному і тому ж вхідному струму поблизу резонансу відповідає дві різних частоти, одна з яких є резонансною. Таким чином, система керування може настроїтись на заданий струм, але не забезпечити при цьому резонансної частоти. Для вирішення цієї проблеми можна запрограмувати систему керування таким чином, щоб сканування починало проводитися з області верхніх частот до області нижніх. Але все одно необхідно дуже чітко задавати величину вхідного струму.

Іншим способом стабілізації вихідної напруги за допомогою контролю тільки у вхідному колі п'єзотрансформатора є стеження за фазовим зсувом

між вхідним струмом та вхідною напругою. Для кращого розуміння такого способу була знята фазо-частотна характеристика багат шарового п'єзотрансформатора типу ТП-РМ 400602. Фазовий зсув знімався між вхідним струмом та вхідною напругою. Ця характеристика приведена на рисунку 3.5.

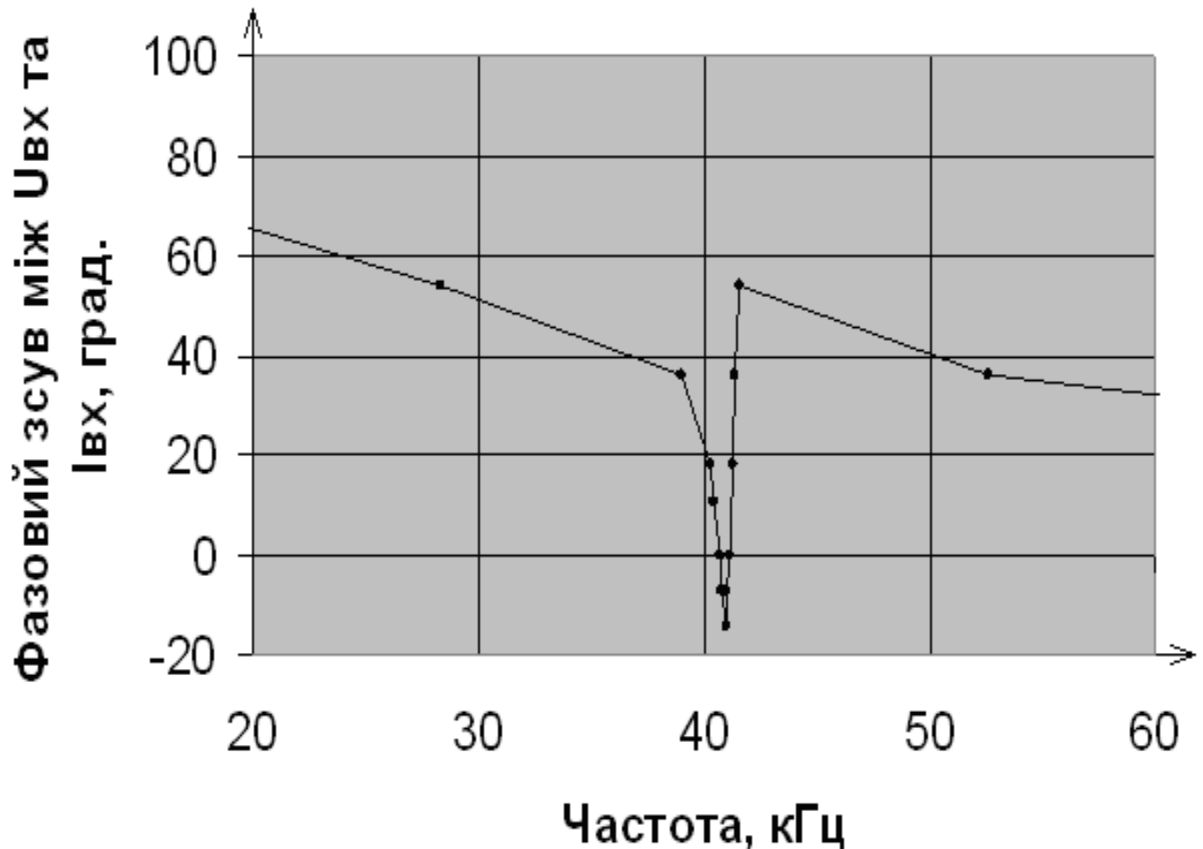


Рисунок 3.5 – Експериментальна фазо-частотна характеристика п'єзотрансформатора типу ТП-РМ 400602

На рисунку 3.6 показана теоретична фазо-частотна характеристика.

З рисунків 3.5 та 3.6 видно, що в області резонансу фазовий зсув різко змінює своє значення (теоретично – з 90 ел. град. до - 90 ел. град.). Цю особливість п'єзотрансформатора можна використати для побудування високовольтного джерела живлення з можливістю досить точно регулювати та стабілізувати вихідну напругу.

На рисунку 3.7 приведена структурна схема такого джерела живлення.

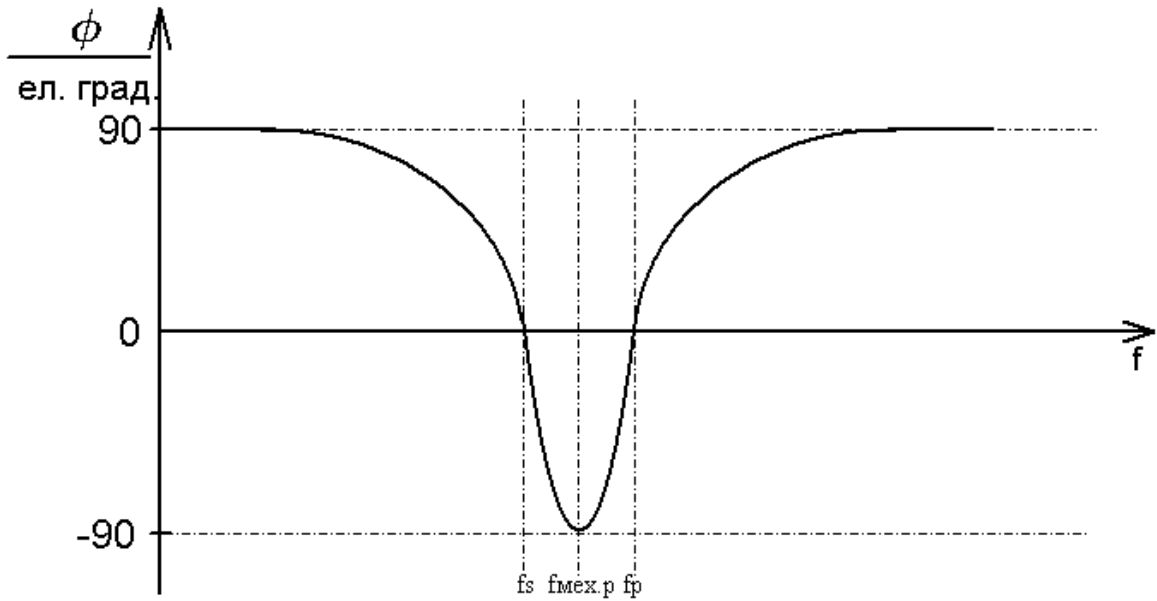


Рисунок 3.6 – Теоретична фазо-частотна характеристика п'єзотрансформатора

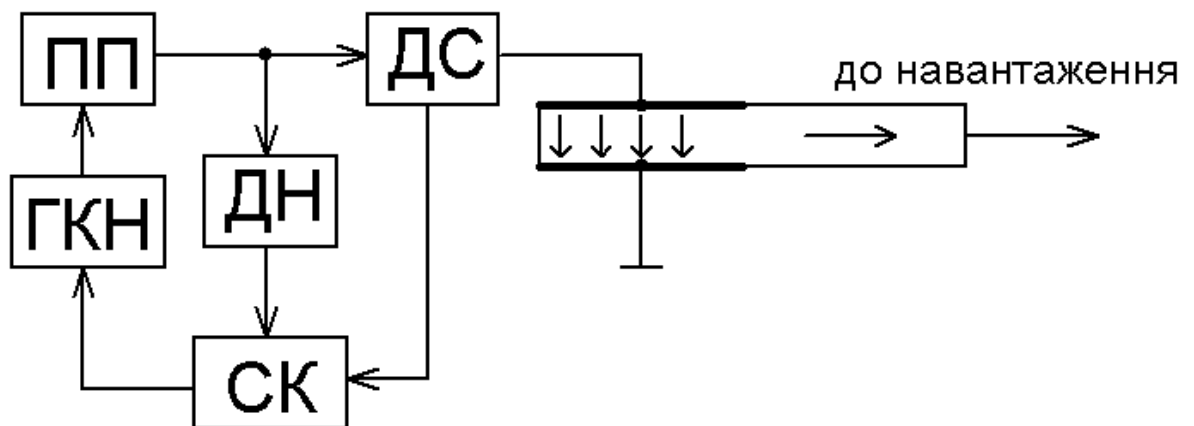


Рисунок 3.7 – Структурна схема джерела живлення з частотним управлінням і контролем фазового зсуву між вхідним струмом та вхідною напругою

Система керування в такій схемі повинна відстежувати, коли фазо-частотна характеристика п'єзотрансформатора заходить в область негативних значень (рисунки 3.5 і 3.6). Нижня точка на фазо-частотній характеристиці відповідає максимуму вихідної напруги. В даному випадку також доцільно використовувати мікропроцесорну або мікроконтролерну систему керування. Також, як і в схемі на рисунку 3.4, систему керування починає скану-

вати задану область частотного діапазону в момент включення напруги живлення. Але тут немає різниці, з якої частоти починати сканування.

3.4 Робота п'єзотрансформатора поблизу резонансу

Максимальну вихідну напругу на виході п'єзотрансформатора можна отримати лише якщо він працює на резонансній частоті. Але в випадках, коли від п'єзотрансформатора не потрібно отримувати максимальну напругу, яку він може дати, схему високовольтного джерела живлення можна значно спростити, відмовившись від мікропроцесорної системи керування. При цьому пропонується використовувати п'єзотрансформатор не на резонансній частоті, а біля неї, при чому частота генератора повинна змінюватися в нешироких межах біля резонансної. Такий спосіб можна реалізувати по схемі, зображеній на рисунку 3.8.

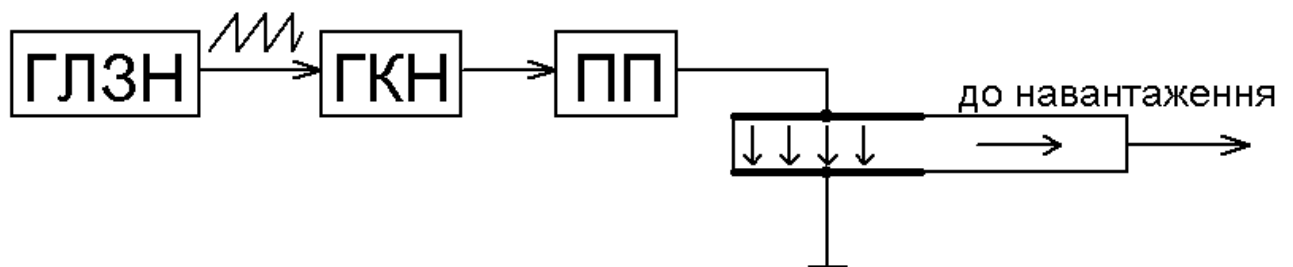


Рисунок 3.8 – Структурна схема джерела живлення

Схема складається з генератора напруги, що змінюється (ГЛЗН), генератора керованого напругою (ГКН) та підсилювача потужності (ПП). Частота імпульсів ГКН залежить від рівня напруги на його вході. Таким чином, в схемі на рисунку 3.8 за допомогою ГЛЗН здійснена частотна модуляція на виході ГКН, а на виході ПТ маємо амплітудну модуляцію. На рисунку 3.9 приведені діаграми, які пояснюють роботу схеми. Частота ГЛЗН повинна бути набагато меншою за частоту ГКН.

В схемі на рисунку 3.8 середня напруга буде значно меншою, ніж при роботі п'єзотрансформатора на резонансній частоті. Це і є недоліком такого схемного рішення. Рівень середньої напруги можна збільшити, якщо звузити діапазон зміни частоти на виході ГКН, а для цього, в свою чергу, треба звузити діапазон зміни вихідної напруги ГЛЗН. Функції ГЛЗН та ГКН також може виконувати мікропроцесорна система, що зменшить розміри пристрою.

Удосконалити схему на рисунку 3.8 можна, якщо замість ГЛЗН використовувати звичайне низьковольтне нестабілізоване джерело живлення. Адже для ГКН неважливо, за яким законом змінюється напруга на його вході. Тому це може бути звичайна пульсація випрямленої напруги.

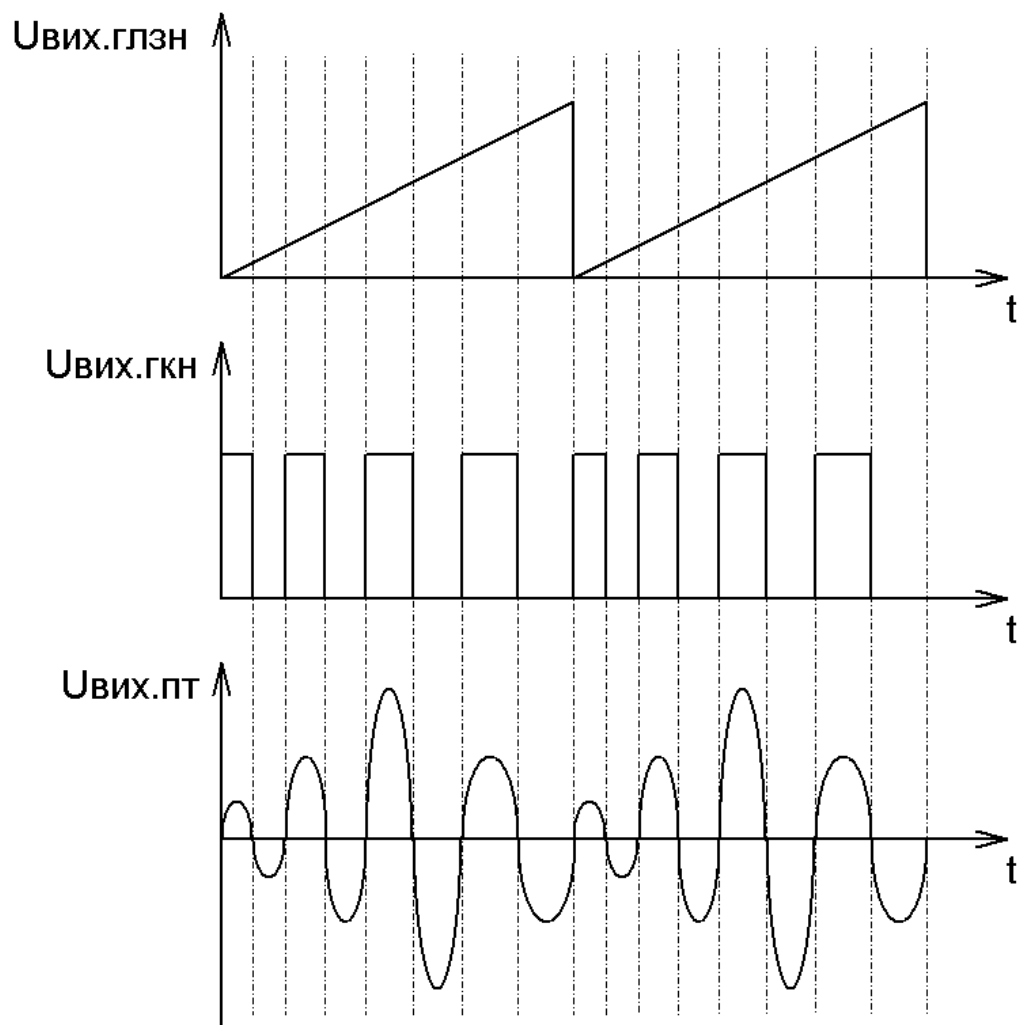


Рисунок 3.9 – Часові діаграми зміни вихідної напруги п'єзотрансформатора зі зміною частоти генератора

На рисунку 3.10 приведена принципіальна схема високовольтного джерела живлення, в якому п'єзотрансформатор працює із змінною частотою.

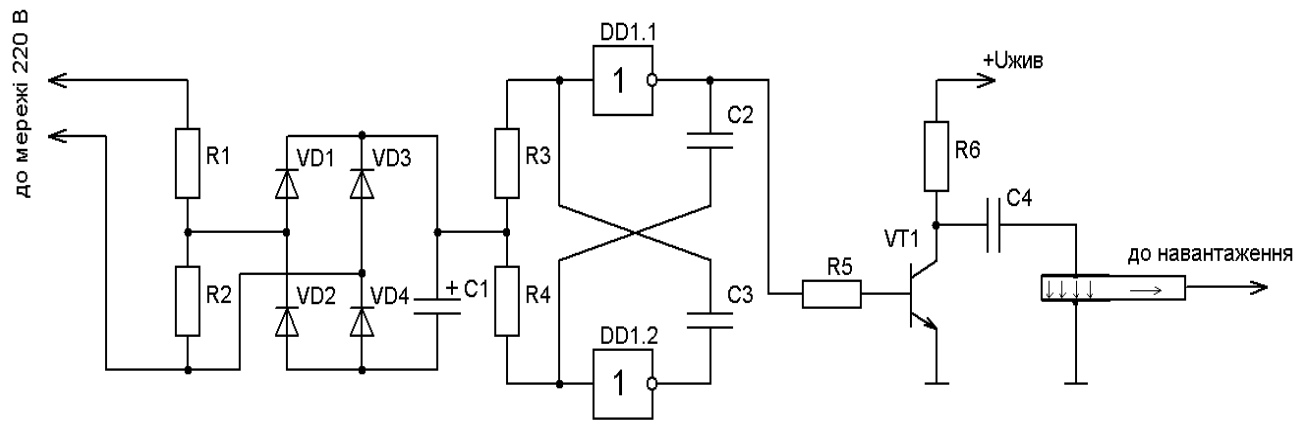


Рисунок 3.10 – Принципова схема високовольтного джерела живлення

Резистори R1-R2 утворюють дільник напруги мережі, який зменшує вхідну змінну напругу до необхідного рівня. З дільника напруга поступає на мостовий випрямляч, який зібраний на діодах VD1-VD4. Випрямлена напруга фільтрується конденсатором C1 і подається на ГКН, зібраний на елементах DD1.1-DD1.2, R3-R4, C2-C3. Підсилювач потужності утворюють елементи VT1, R5-R6, C4. На схемі не показано джерело живлення мікросхеми DD1 та підсилювача потужності. Його можна виконати по будь-якій схемі, але доцільніше в даному випадку використання безтрансформаторної схеми (з точки зору мініатюризації пристрою).

Така схема є дуже простою та дешевою в схемотехнічному виконанні, в ній відсутні зворотні зв'язки, але має такі недоліки, як невелика середня вихідна напруга п'єзотрансформатора та підвищена чутливість до коливань напруги мережі.

Для перевірки працездатності схеми на рисунку 3.10 було проведено її моделювання в програмі OrCAD. PSpice-модель показана на рисунку 3.11.

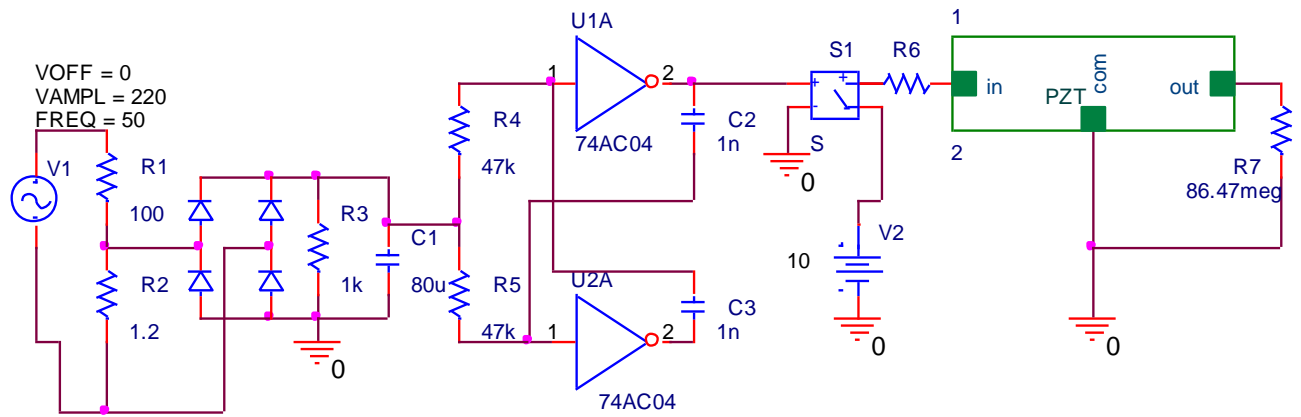


Рисунок 3.11 – PSpice-модель високовольтного джерела живлення

В результаті моделювання були отримані часові діаграми напруг в схемі. Було встановлено, що ефективність роботи схеми сильно залежить від точності настройки діляника та підбора конденсатора C_1 , а також від опору навантаження. Це видно з часових діаграм, приведених на рисунках 3.12-3.15. Зверху показана напруга на конденсаторі C_1 , знизу – вихідна напруга п'єзотрансформатора.

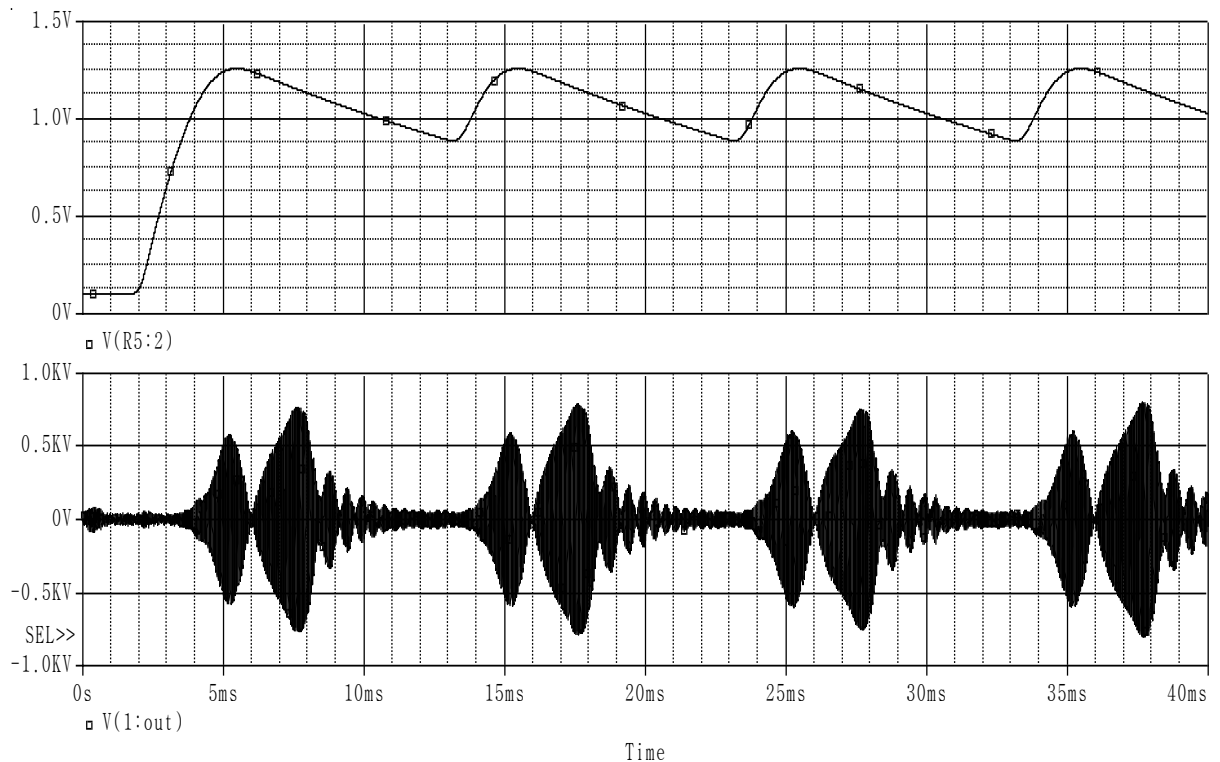


Рисунок 3.12 – Результати моделювання при $C_1 = 20 \text{ мкФ}$, $R_H = 86,47 \text{ МОм}$

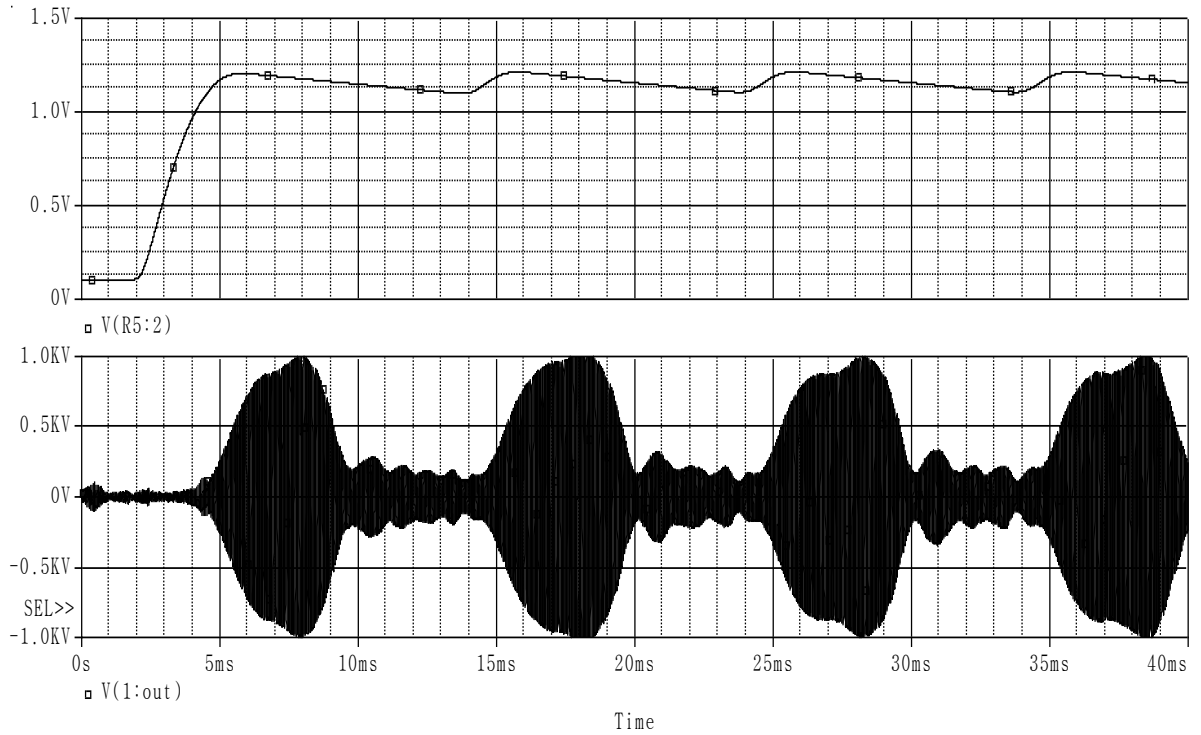


Рисунок 3.13 – Результати моделювання при $C1 = 80 \text{ мкФ}$, $R_H = 86,47 \text{ МОм}$

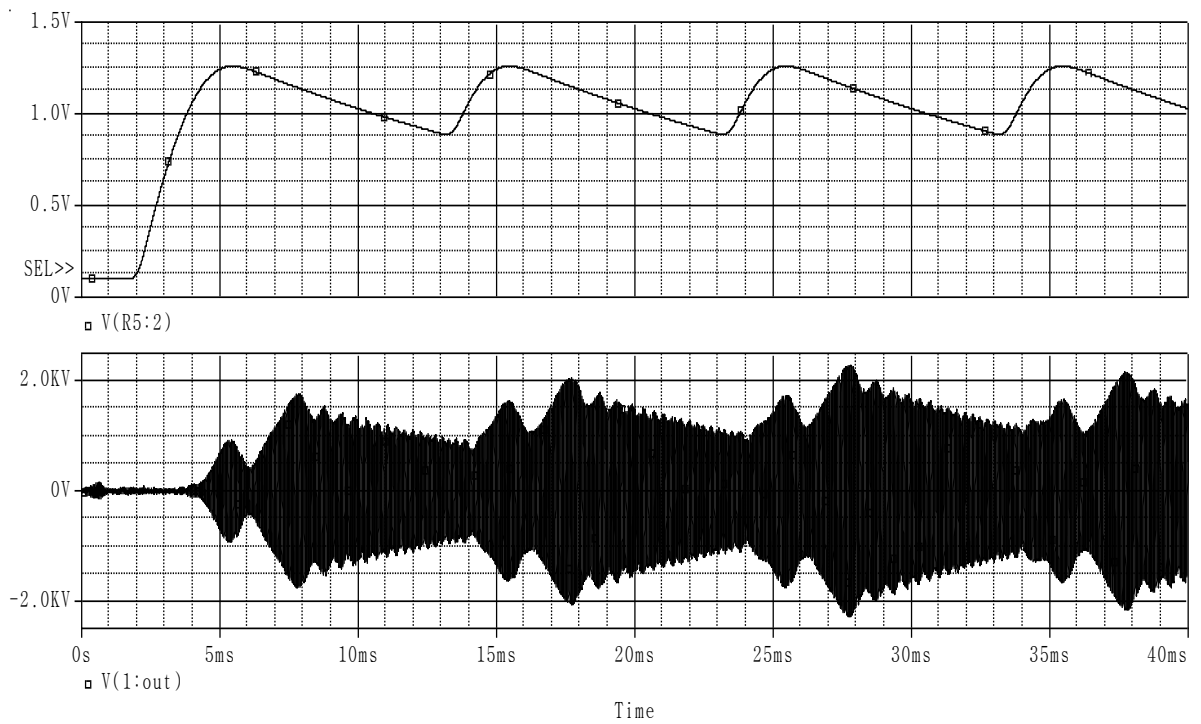


Рисунок 3.14 – Результати моделювання при $C1 = 20 \text{ мкФ}$, $R_H = 1000 \text{ МОм}$

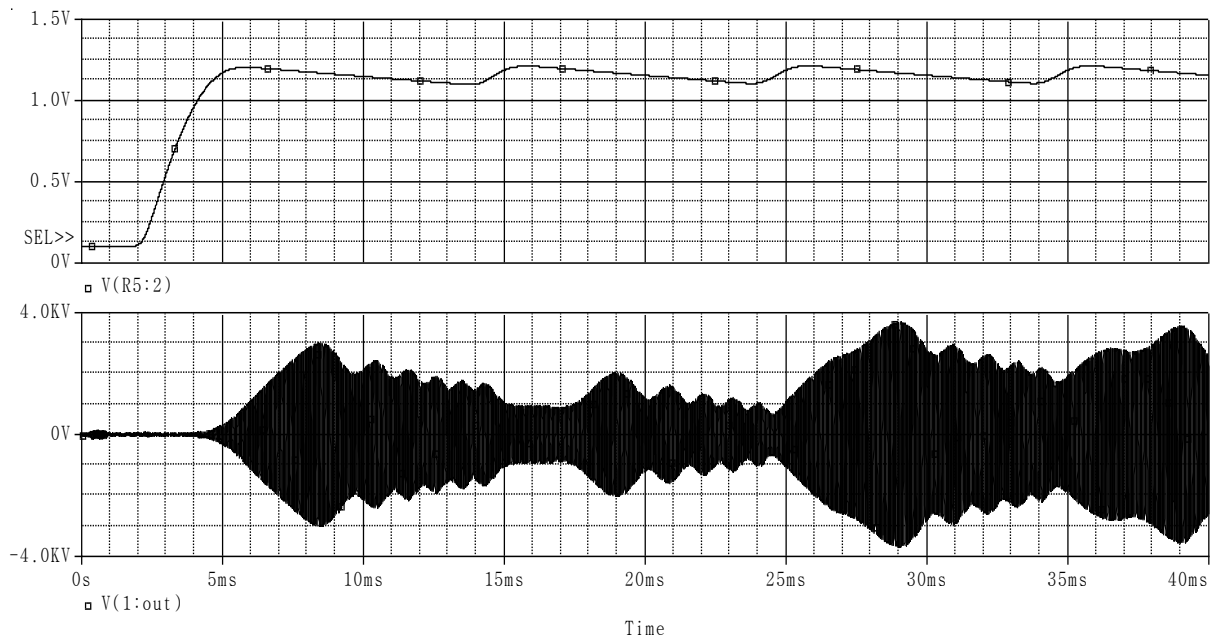


Рисунок 3.15 – Результати моделювання при $C1 = 80 \text{ мкФ}$, $R_H = 1000 \text{ МОм}$

З результатів моделювання видно, що при правильно настроєному ділнику і підбраному $C1$ середня вихідна напруга п'єзотрансформатора збільшується при збільшенні опору навантаження. Отже, ефективність схеми буде максимальною в режимі, близькому до холостого ходу.

3.5 Висновки за розділом

Таким чином, в цьому розділі були запропоновані способи стабілізації вихідної напруги п'єзоелектричних трансформаторів за рахунок контролю вхідного струму п'єзотрансформатора та фазового зсуву між вхідним струмом п'єзотрансформатора та його вхідною напругою. Обидва способи відносяться до частотного управління та мають такі переваги перед схемами з контролем вихідної напруги: простота схемної реалізації з використанням мікропроцесорної системи керування; відсутність гальванічного зв'язку між вхідним та вихідним колами п'єзотрансформатора; висока швидкодія; висока точність стабілізації вихідної напруги.

Також була розглянута можливість роботи п'єзотрансформатора в режимі «плаваючої» частоти (частота збудження п'єзотрансформатора змінюється біля резонансної частоти). Була запропонована працююча в такому режимі принципова схема високовольтного джерела живлення. Схема відрізняється простотою, невеликою кількістю та малими розмірами компонентів, відсутністю складної системи керування та зворотних зв'язків, ефективністю роботи в режимах, близьких до холостого ходу. Недоліками схеми є невелике значення середньої вихідної напруги при низьких опорах навантаження та залежність стабільності роботи схеми від мережної напруги.

Для перевірки можливості роботи п'єзотрансформатор в режимі «плаваючої» частоти було проведене моделювання запропонованого джерела живлення в програмі OrCAD. Результати моделювання підтвердили, що схема досить ефективно працює при високому опорі навантаження.

ВИСНОВКИ

П'єзоелектричні трансформатори мають не тільки незаперечні переваги перед електромагнітними, такі як високі масогабаритні показники, високий коефіцієнт трансформації, відсутність електромагнітних перешкод, але й деякі недоліки, пов'язані з особливостями його конструкції, принципом роботи і електричними характеристиками. Так, одним з недоліків п'єзотрансформаторів є їх мала вихідна потужність. Це, безумовно, обмежує область застосування п'єзоелектричних трансформаторів і в більшості випадків вони поки не можуть замінити електромагнітні трансформатори. Тому підвищення вихідної потужності п'єзотрансформаторів є актуальною проблемою і вимагає відповідної уваги з боку вчених та інженерів в даній області.

Іншою проблемою, властивою п'єзоелектричним трансформаторам, а точніше схемам з їх використанням, є складність системи управління п'єзотрансформатором в таких схемах. Проте аналіз управління п'єзотрансформаторів дозволяє зробити висновок: чим точніше потрібно забезпечити стабілізацію вихідної напруги джерела високовольтного електроживлення на базі п'єзотрансформатора, тим складніше схема (велика кількість елементів, великі габарити), і, навпаки, чим простіше схема, тим менш стійко вона працює і не дозволяє забезпечити стабільність вихідної напруги джерела високовольтного електроживлення. Велика складна схема зменшує надійність пристрою в цілому і збільшує його вартість, а також, що не менш важливо, йде в супереч з сучасною тенденцією мініатюризації схемотехніки. Тому оптимізація способів управління п'єзотрансформатором в поєднанні сучасною елементною базою і мікропроцесорною технікою є важливою і актуальною проблемою в даній області електроніки.

В результаті експериментальних досліджень була встановлена недоцільність послідовного включення одношарових і багатшарових п'єзотрансформаторів напруги із-за повної непрацездатності такого включення. Для отримання потрібного ефекту необхідне використання додаткових підсилюва-

льних каскадів, внаслідок чого така схема повністю втрачає сенс, оскільки для живлення підсилювача потужності необхідне додаткове джерело напруги.

При експериментальному дослідженні паралельного включення двох і трьох одношарових п'єзотрансформаторів було встановлено, що таке включення збільшує здатність до навантаження схеми. При цьому паралельне підключення одного п'єзотрансформатора збільшує здатність до навантаження приблизно в 1,5 рази. Отримані результати можуть бути корисні інженерам-розробникам електронних схем на базі п'єзоелектричних трансформаторів і відкривають деякі можливості для розширення області застосування п'єзотрансформаторів.

При експериментальному дослідженні паралельного включення багатшарових п'єзотрансформаторів такого ефекту не було отримано. Це, найімовірніше, пояснюється особливостями структури багатшарового п'єзотрансформатора, але в літературі практично відсутня інформація про багатшарову структуру п'єзотрансформатора і рішення цього питання потребує додаткових дослідження у області керамічних матеріалів, що знаходиться за рамками цієї роботи.

Результати моделювання паралельного включення одношарових п'єзотрансформаторів на ЕОМ, а саме за допомогою програми OrCAD, підтвердили експериментально зняті характеристики, а деякі відмінності в результатах пояснюються недосконалістю моделі, яка не враховує всіх властивостей реального п'єзотрансформатора (наприклад, взаємного впливу п'єзотрансформаторів один на одного в просторі).

В роботі запропоновані способи стабілізації вихідної напруги п'єзоелектричних трансформаторів за рахунок контролю вхідного струму п'єзотрансформатора та фазового зсуву між вхідним струмом п'єзотрансформатора та його вхідною напругою. Обидва способи відносяться до частотного управління та мають такі переваги перед схемами з контролем вихідної напруги: простота схемної реалізації з використанням мікропроцесорної системи керування; відсутність гальванічного зв'язку між вхідним та вихідним ко-

лами п'єзотрансформатора; висока швидкодія; висока точність стабілізації вихідної напруги.

Розглянута можливість роботи п'єзотрансформатора в режимі «плаваючої» частоти (частота збудження п'єзотрансформатора змінюється біля резонансної частоти). Була запропонована працююча в такому режимі принципова схема високовольтного джерела живлення. Схема відрізняється простотою, невеликою кількістю та малими розмірами компонентів, відсутністю складної системи керування та зворотних зв'язків, ефективністю роботи в режимах, близьких до холостого ходу. Недоліками схеми є невелике значення середньої вихідної напруги при низьких опорах навантаження та залежність стабільності роботи схеми від мережної напруги.

Для перевірки можливості роботи п'єзотрансформатора в режимі «плаваючої» частоти було проведене моделювання запропонованого джерела живлення в програмі OrCAD. Результати моделювання підтвердили, що схема досить ефективно працює при високому опорі навантаження.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ерофеев А. А. и др. Пьезокерамические трансформаторы и их применение в радиоэлектронике / А. А. Ерофеев, Г. А. Данов, В. Н. Фролов. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.: ил.
2. Магнитные и диэлектрические приборы: Пер. с англ./Под ред. Г. В. Катца. – М.: Энергия, 1964. – Ч. 1.
3. Пат. 439.992 США/Розен К. А. – 29.06.1954.
4. Плужников В. М., Семенов В. С. Пьезокерамические твердые схемы. – М.: Энергия, 1971.
5. Лавриненко В. В. Пьезоэлектрические трансформаторы. М., «Энергия», 1975. – 112 с. с ил.
6. Ерофеев А. А. Пьезоэлектронные устройства автоматики. – Л.: Машиностроение, 1982. – 212с.
7. А. с. 754391 СССР. Стабилизированный пьезотрансформаторный источник питания постоянного напряжения / А. А. Ерофеев, А. А. Ушаков, В. Е. Бахмутский, В. И. Орехов. – Оpubл. 1980, Бюл. № 29.
8. А. с. 851687 СССР. Стабилизированная система электропитания на базе ПЭТ / А. А. Ерофеев, А. А. Ушаков, В. К. Захаров. – Оpubл. 1981, Бюл. № 25.
9. А. с. 764015 СССР. Пьезополупроводниковый частотно-управляемый стабилизатор напряжения / А. А. Ерофеев, А. А. Ушаков, В. К. Захаров и др. – Оpubл. 1980, Бюл. № 34.
10. Ерофеев А. А., Ушаков А. А. Частотное и фазочастотное управление в пьезополупроводниковых системах // Теория и техника обработки сигналов в многоканальных локационных системах: Межвуз. сб. – ЛИАП, 1981. – Вып. 152. – С. 122 – 128.
11. А. с. 600640 СССР. Способ частотно-амплитудного управления напряжением в пьезополупроводниковых преобразователях / А. А. Ерофеев. – Оpubл. 1979, Бюл. № 12.

12. А. с. 799052 СССР. Способ управления преобразователем на базе пьезоэлектрического трансформатора / А. А. Ерофеев, А. А. Ушаков. – Оpubл. 1981, Бюл. № 3.

13. А. с. 800974 СССР. Стабилизатор постоянного напряжения на базе ПЭТ / А. А. Ерофеев, А. А. Ушаков, Г. А. Данов, Б. Г. Парфенов. – Оpubл. 1981, Бюл. № 4.

14. А. с. 760246 СССР. Способ фазового управления в пьезоэлектрическом трансформаторе и устройство для его осуществления / А. А. Ерофеев, Н. Мижиддорж. – Оpubл. 1980, Бюл. № 32.

15. Джагунов Р. Г., Ерофеев А. А. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления: Справочник. — СПб.: Политехника, 1994. — 608 с: ил.

16. А. с. 646392 СССР. Способ управления выходным напряжением в пьезополупроводниковом преобразователе / А. А. Ерофеев. – Оpubл. 1979, Бюл. № 5.

17. Справочник пьезокерамических материалов различных фирм. Режим доступа: www.elpiezo.ru – 23.03.2018.