

*Кривошей Д.А.*  
(ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)  
*dmytro.kryvoshei@gmail.com*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВТОРИННОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ НА ОСНОВІ П'ЄЗОТРАНСФОРМАТОРА**

*Запропоновано структуру вторинного джерела живлення на основі п'єзотрансформатора та його схемотехнічну реалізацію. Описано експериментальний зразок пристрою, отримано та досліджено характеристики його роботи, надано рекомендації щодо його використання.*

**Ключові слова:** *п'єзотрансформатор, вторинне джерело живлення, резонансна частота, коефіцієнт трансформації, коефіцієнт корисної дії.*

*Предложена структура вторичного источника питания на основе пьезотрансформатора и его схемотехническая реализация. Описан экспериментальный образец устройства, получены и исследованы характеристики его работы, даны рекомендации по его использованию.*

**Ключевые слова:** *пьезотрансформатор, вторичный источник питания, резонансная частота, коэффициент трансформации, коэффициент полезного действия.*

**Вступ.** Будова вторинного джерела живлення (ВДЖ), яке є невід'ємною частиною будь-якого електронного пристрою чи системи, зазвичай ґрунтується на використанні електромагнітного трансформатора. Такий спосіб має ряд суттєвих недоліків: подібним пристроям, як правило, притаманні значна розсіювана потужність, високий рівень нагрівання, низькі надійність та зносостійкість, незадовільні масогабаритні показники, створення електромагнітних перешкод, небезпека пробою обмоток тощо. На додачу до цього, отримання високих рівнів напруги за допомогою електромагнітного трансформатора є доволі складним завданням. Тому в спектроскопії і рентгеноскопії, іонній оптиці, світлотехніці, радіолокації, електросинтезі озону та інших галузях техніки, де застосовується висока напруга, для побудови ВДЖ можливе застосування альтернативних перетворювальних приладів – п'єзотрансформаторів (ПТ).

Дослідження в галузі використання ПТ активно проводяться за кордоном, здебільшого японськими та американськими науковцями, в

чому зацікавлені найвідоміші світові гіганти з виробництва електронного устаткування (NEC, Canon, Panasonic та ін.). Найбільш цікаві наукові розробки цієї галузі представлені в [1].

Попередні роботи автора присвячені дослідженням параметрів і характеристик ПТ [2], аналізу можливостей застосування цих приладів у складі перетворювальних пристроїв [1, 3–5].

Метою роботи є отримання характеристик ВДЖ, що побудоване на основі ПТ. Для досягнення мети поставлено задачі: розробити та виготовити експериментальний зразок пристрою, визначити особливості його роботи та дослідити основні залежності параметрів, які найсуттєвіше впливають на його роботу.

**Структура пристрою.** На базі раніше проведених досліджень [2–4, 6], враховуючи особливості роботи ПТ, запропоновано структуру ВДЖ на основі ПТ, яка наведена на рисунку 1.



Рисунок 1 – Структура вторинного джерела живлення на основі ПТ

Стабілізатор напруги забезпечує живлення системи керування постійною стабілізованою напругою необхідного рівня.

Регулятор напруги призначений для зміни опорної напруги для інвертора та відповідно варіювання амплітуди імпульсів збудження для ПТ в потрібному діапазоні.

Формувач сигналів керування здійснює генерування імпульсів керування інвертором. Частота цих імпульсів повинна відповідати резонансній частоті ПТ, що підтверджено дослідженнями, які наведено в [2, 3]. Налаштування на необхідну частоту є принциповим, оскільки відхилення від резонансного режиму роботи призводить до істотного зменшення коефіцієнту передачі ПТ, а, отже, усього пристрою.

Інвертор формує безперервні імпульси для збудження ПТ. Крім того, він виконує функцію узгодження вихідного каскаду формувача сигналів керування зі збуджувальною секцією ПТ.

ПТ забезпечує безпосереднє перетворення енергії до рівня декількох кіловольт з відповідним коефіцієнтом трансформації [2].

Випрямляч здійснює випрямлення змінної напруги на виході ПТ.

Фільтр зменшує пульсації у випрямленій напрузі.

**Електрична принципова схема пристрою.** В результаті попередніх досліджень [3, 4, 6] були визначені принципи побудови окремих функціональних блоків ВДЖ, а саме формувача сигналів керування та інвертора. Електрична принципова схема всього пристрою представлена на рисунку 2.

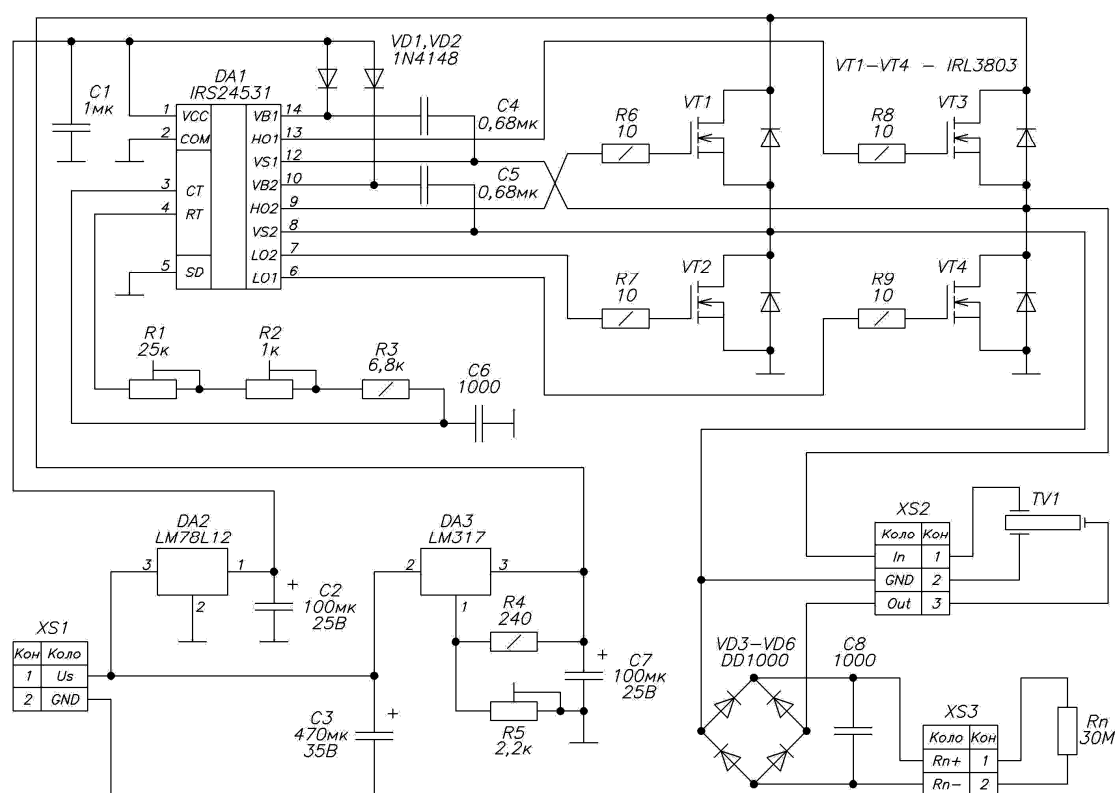


Рисунок 2 – Схема електрична принципова ВДЖ на основі ПТ

До клеми XS1 підключається джерело постійної напруги (акумулятор або випрямляч).

Стабілізатор напруги реалізований на мікросхемі DA2 L78L12, яка забезпечує стабільну вихідну напругу на рівні 12 В при коливаннях вхідної напруги у достатньо широкому діапазоні.

Регулятор напруги реалізований на мікросхемі DA3 LM317, яка забезпечує регулювання опорної напруги для інвертора в діапазоні від

1,25 В до значення, що відповідає вхідній напрузі від джерела постійної напруги. Варіювання рівня напруги здійснюється потенціометром R5.

Схема формувача сигналів керування побудована на базі мікросхеми DA1 IRS24531 [7], яка містить два вбудованих напівмостових драйвери, що працюють синхронно за мостовою схемою, опорний програмований генератор та схему, що формує «мертвий» час. Мікросхема DA1 забезпечує генерування сигналів у формі меандру (скважність імпульсів дорівнює двом).

В обв'язці мікросхеми є коло, що задає тривалість імпульсів керування (елементи R1–R3, C6), яке містить два потенціометри: для «грубого» й «точного» налаштування частоти імпульсів (елементи R1 та R2 відповідно). Параметри цього кола розраховуються за формулою:

$$f = \frac{1}{1,453 \cdot R_T \cdot C_T}, \quad (1)$$

де  $f$  – частота імпульсів, Гц;

$R_T$  – опір кола, що задає тривалість імпульсів, Ом;

$C_T$  – ємність кола, що задає тривалість імпульсів, Ф [7].

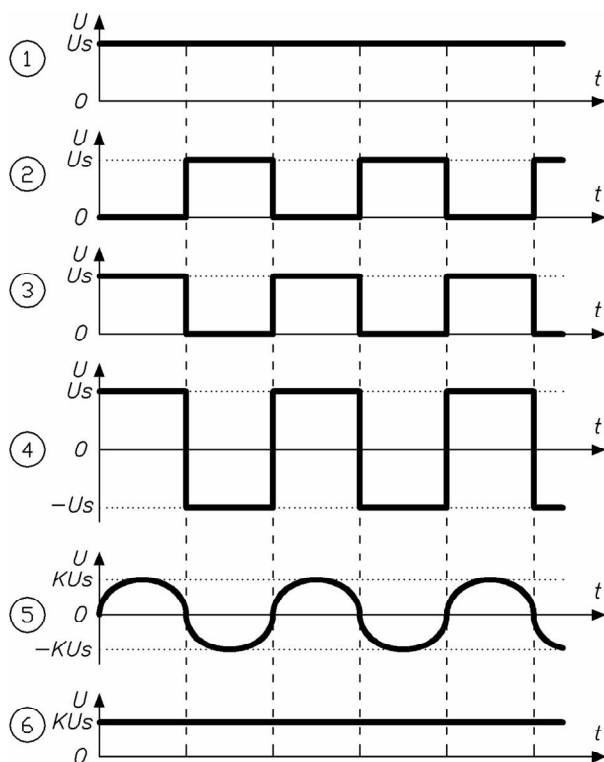
Інвертор побудований за мостовою схемою, в якості ключів використовуються чотири прилади MOSFET (VT1–VT4), передбачено резистори R6–R9, що обмежують струми заряду затворних ємностей, та накопичувальні ємності C4, C5 для живлення драйверу.

Підключення ПТ TV1 відповідає попереднім дослідженням [2, 4, 6], схеми включення випрямляча VD3–VD6 та фільтру C8 є традиційними і не потребують детального огляду.

**Принцип роботи пристрою** представлено графічно у вигляді діаграм на рисунку 3.

Підключення джерела постійної напруги (діаграма 1) змушує генерувати формувачем сигналів керування відповідні сигнали (діаграми 2, 3) у формі меандру для інвертора. У свою чергу, діставши енергію живлення й сигнали керування, інвертор починає формувати прямокутні двополярні імпульси з коефіцієнтом заповнення, що дорівнює 50 %, які відповідають резонансній частоті ПТ (діаграма 4). Вони змушують у збуджувальній секції ПТ почати формування механічних коливань, які, в свою чергу, проникаючи уздовж площини ПТ, викликають в його генераторній секції електричні коливання (діаграма 5). Електричні синусоїдальні коливання на виході ПТ перетворюються випрямлячем у

постійну високу напругу певної амплітуди з невеликими пульсаціями, що обумовлені характеристиками фільтру. Після цього випрямлена згладжена напруга (діаграма 6) прикладається до навантаження, викликаючи в ній електричний струм.



- 1 – напруга живлення від джерела постійної напруги
- 2 – сигнали керування ключами VT1, VT4
- 3 – сигнали керування ключами VT2, VT3
- 4 – імпульси збудження ПТ
- 5 – напруга на виході ПТ
- 6 – випрямлена згладжена напруга на навантаженні

Рисунок 3 – Діаграми напруг, що ілюструють принцип роботи пристрою

**Експериментальний зразок пристрою** виготовлено у відповідності зі схемою електричною принциповою на рисунку 2. Фотографія експериментального зразка та обладнання, що використовувалося для зняття експериментальних даних, представлена на рисунку 4.

Дослідження проводились із використанням різних типів ПТ (таблиця 1), які вироблено в Білорусі Вітебським заводом радіодеталей «Моноліт» [8]. Фотографія досліджуваних зразків представлена на рисунку 5.

Далі представлено **результати експериментів**.

На рисунку 6 зображені характеристики вхідних струмів через секції збудників ПТ у вигляді тривимірних поверхонь, що отримані за результатами інтерполяції масиву експериментальних даних. Для порівняння дані представлено для одношарового та багатошарового ПТ залежно від двох аргументів – частоти імпульсів збудження та опору навантаження.

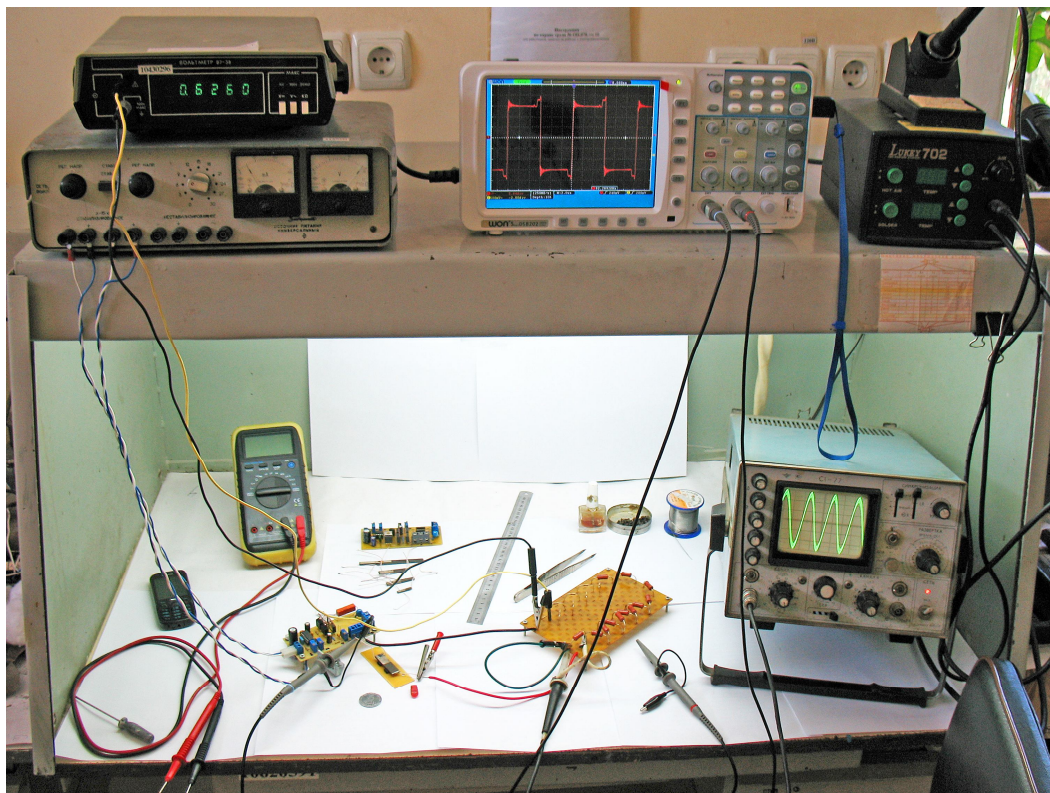
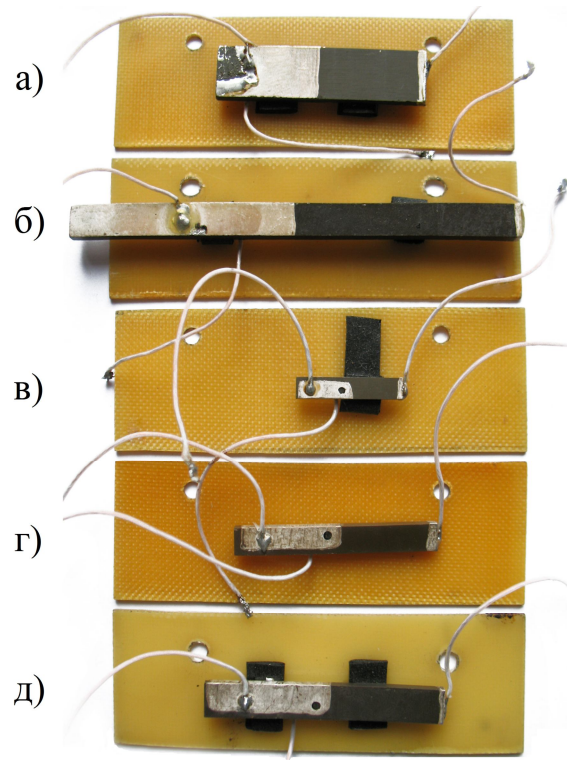


Рисунок 4 – Експериментальний зразок та обладнання для проведення експериментів

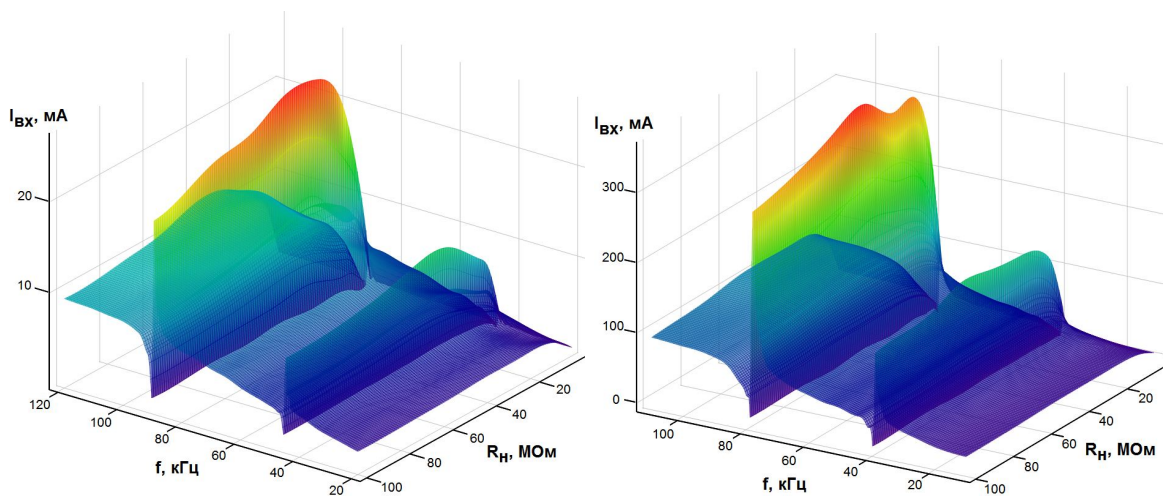
Таблиця 1 – Перелік досліджуваних п'єзотрансформаторів [8]

Тип	Технологічна будова	Тип п'єзо-кераміки	Геометричні розміри, мм	Частота основного резонансу, кГц	Вхідна ємність, нФ	Вихідна ємність, пФ
ТП-Р1 381002	Одношаровий	ЦТС-24	38×10×2	44–48	1,0	15,5
ТП-Р1 800603	Одношаровий	ЦТС-24	80×6×3	19–22	1,1	6,0
ТП-РМ 200402	Багатошаровий	ЦТССт-3	20×4×2	81–99	13,5	10,5
ТП-РМ 350502	Багатошаровий	ЦТССт-3	35×5×2	43–53	33,0	7,2
ТП-РМ 400602	Багатошаровий	ЦТССт-3	40×6×2	36–44	50,0	8,5



- а) ТП-Р1 381002
- б) ТП-Р1 800603
- в) ТП-РМ 200402
- г) ТП-РМ 350502
- д) ТП-РМ 400602

Рисунок 5 – Зовнішній вигляд досліджуваних п'єзотрансформаторів



а) ТП-Р1 381002

б) ТП-РМ 400602

Рисунок 6 – Залежності струмів через вхідні секції ПТ від частоти імпульсів збудження та опору навантаження

Згідно рисунку 6 найбільші струми в пристрої спостерігаються на резонансних частотах другої моди коливань, використання багат шарових ПТ призводить до більших струмів у навантаженні, максимальні значення зафіксовані при підключенні до пристрою навантаження, опір якого знаходиться в діапазоні 20 – 40 МОм.

Тривимірні поверхні для струмів навантаження в залежності від двох аргументів – частоти імпульсів збудження та опору навантаження, що отримані методом інтерполяції експериментальних даних, наведено на рисунку 7.

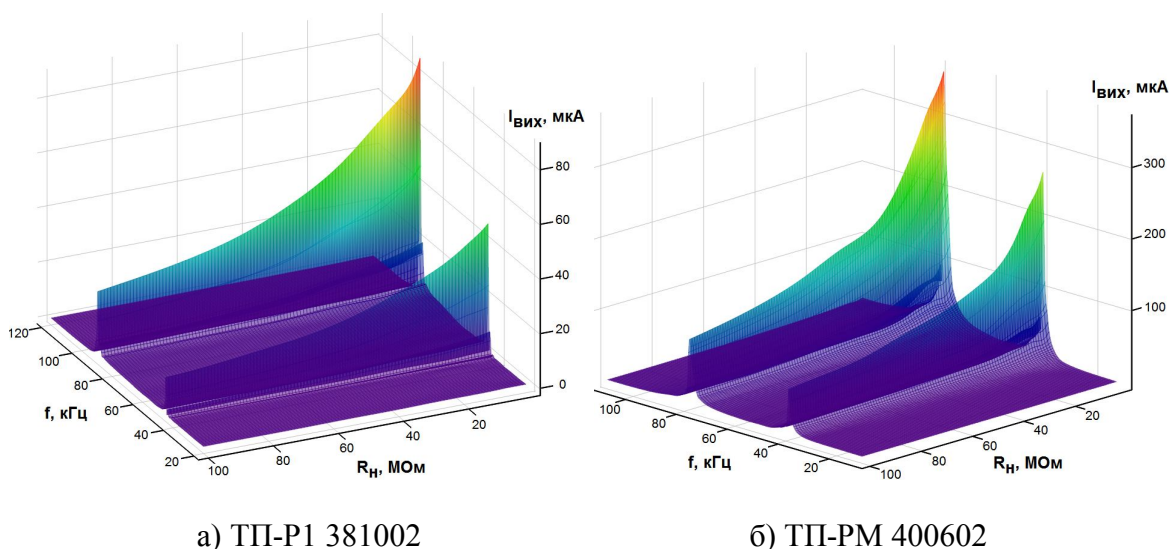


Рисунок 7 – Залежності струмів навантаження від частоти імпульсів збудження та його опору

Залежності струму навантаження від його опору є нелінійними. Максимальні струми у навантаженні забезпечуються в разі використання багат шарових ПТ, коли пристрій працює у резонансному режимі.

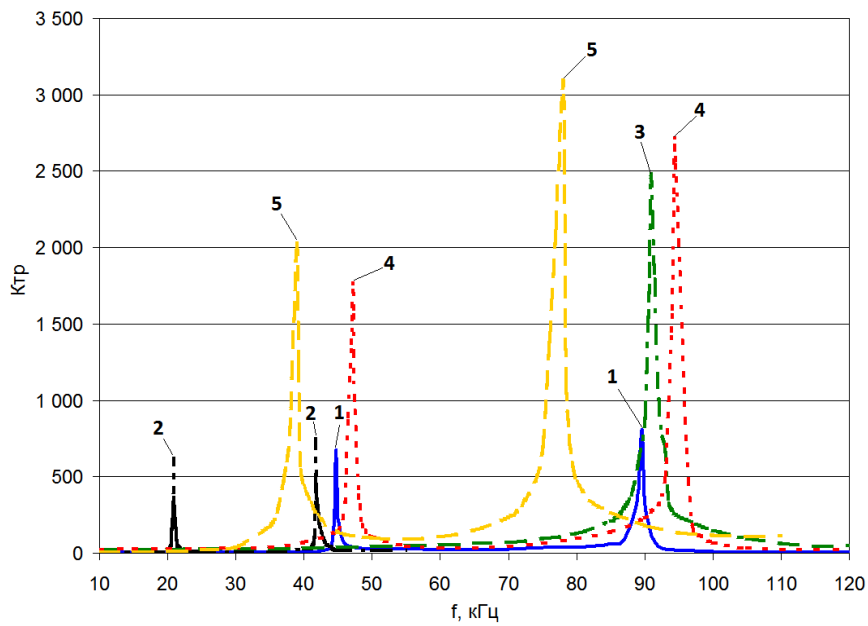
Залежності коефіцієнтів трансформації ПТ від частоти збуджувальних імпульсів при незмінному опорі навантаження 100 МОм наведені на рисунку 8.

Тривимірні поверхні залежностей коефіцієнту трансформації від частоти імпульсів збудження та опору навантаження за результатами інтерполяції експериментальних даних наведено на рисунку 9.

Залежності коефіцієнту трансформації від опору навантаження, як видно з рисунку 9, є нелінійними та суттєво залежать від робочої частоти, на якій працює пристрій.

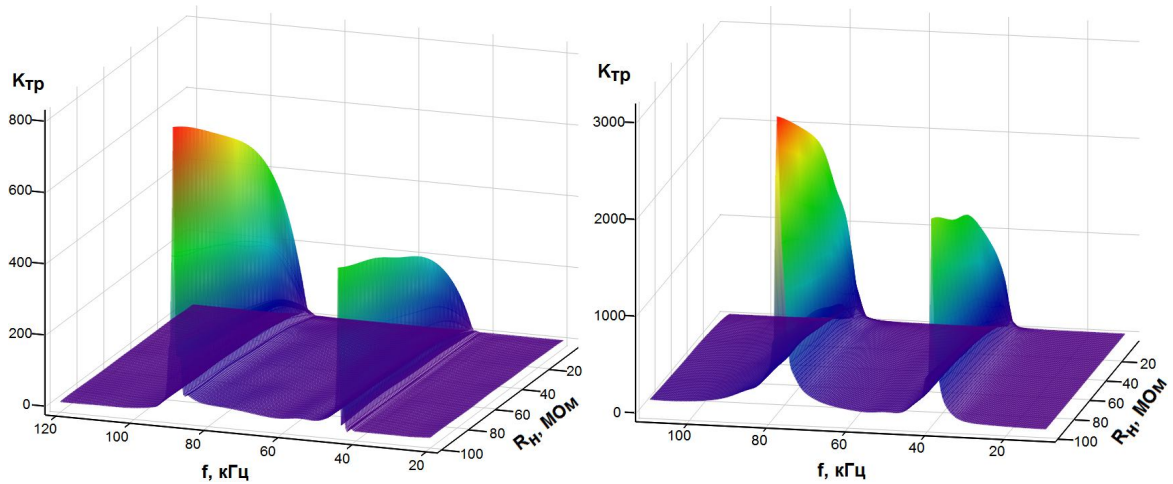
З рисунків 8, 9 видно, що багат шарові ПТ мають більший коефіцієнт трансформації у порівнянні з одношаровими, максимальне значення досягається, коли пристрій працює на резонансній частоті другої моди коливань для навантаження опором в десятки мегаом.





- 1 – ТП-Р1 381002
- 2 – ТП-Р1 800603
- 3 – ТП-РМ 200402
- 4 – ТП-РМ 350502
- 5 – ТП-РМ 400602

Рисунок 8 – Залежності коефіцієнтів трансформації ПТ від частоти імпульсів збудження

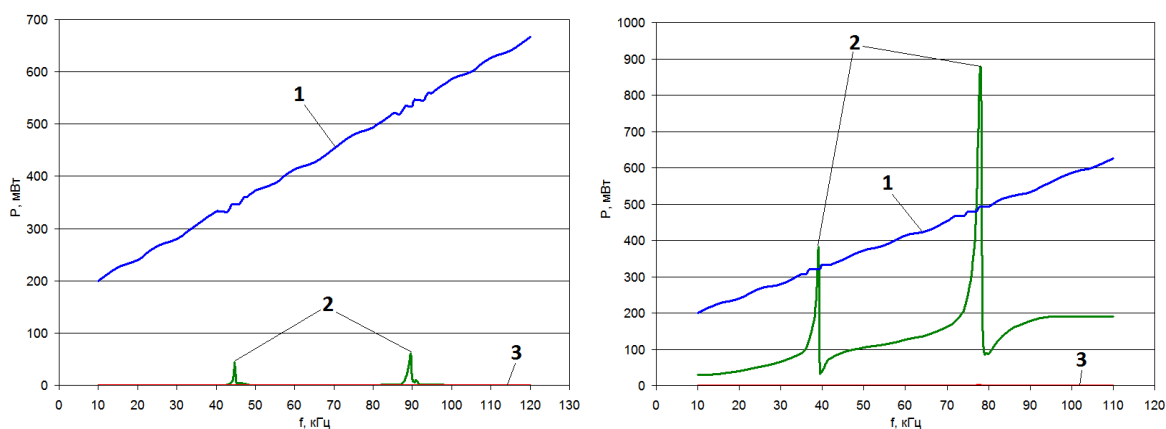


а) ТП-Р1 381002

б) ТП-РМ 400602

Рисунок 9 – Залежності коефіцієнтів трансформації ПТ від частоти імпульсів збудження та опору навантаження

Вигляд залежностей активної потужності, що розсіюється у трьох основних блоках пристрою (формувачі сигналів керування, інверторі та ПТ), від частоти показаний на рисунку 10.



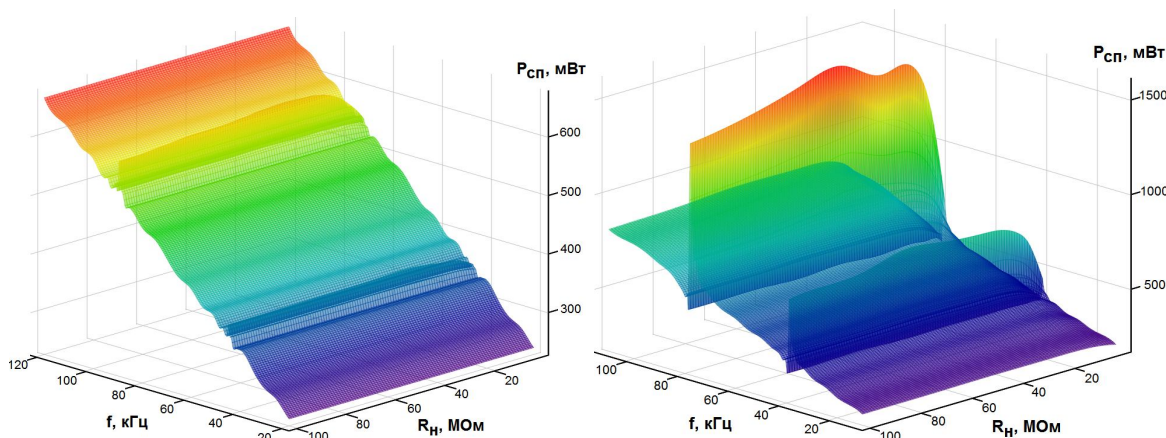
а) ТП-Р1 381002

б) ТП-РМ 400602

- 1 – формувач сигналів керування
- 2 – п'єзотрансформатор
- 3 – інвертор

Рисунок 10 – Характеристики активних потужностей в основних блоках пристрою

Сумарні активні потужності, що споживає пристрій, представлені на рисунку 11 у вигляді тривимірних поверхонь за результатами інтерполяції відповідних розрахункових даних.



а) ТП-Р1 381002

б) ТП-РМ 400602

Рисунок 11 – Залежності сумарних потужностей, що споживаються пристроєм, від частоти імпульсів збудження та опору навантаження

Залежність потужності, що споживає система керування, від частоти є лінійною: при підвищенні частоти пропорційно збільшується потужність споживання у її відповідних колах. В інверторі активна потужність помітно споживається лише в моменти перемикання ключів, які є нетривалими, тому вона є несуттєвою порівняно з іншими колами.

Таким чином, активна потужність системи керування є надто великою на рівні потужності, яку може передати одношаровий ПТ. Тобто, використання багатошарових ПТ у складі ВДЖ є найбільш ефективним. При цьому за рахунок використання в інверторі високоефективних приладів MOSFET його споживана потужність є дуже маленькою та не впливає істотним чином на енергетичні показники пристрою.

Тривимірні поверхні для активних потужностей у навантаженні наведені на рисунку 12.

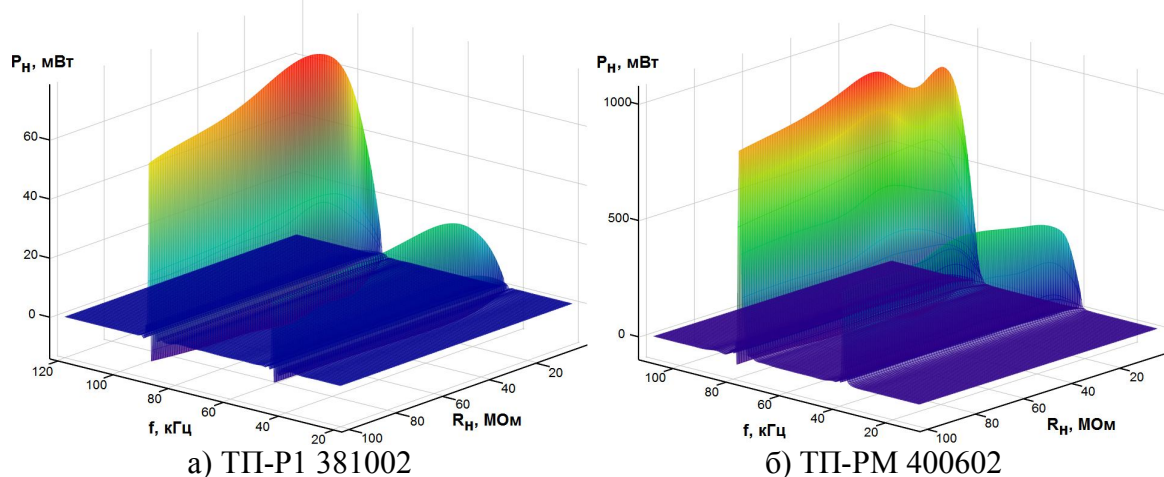


Рисунок 12 – Залежності активних потужностей у навантаженні від частоти імпульсів збудження та його опору

Рисунок 12 також показує, що найбільша активна потужність передається до навантаження багатошаровими ПТ, коли вони працюють на другій моді коливань для навантаження опором, що складає десятки мегаом.

Загальний коефіцієнт корисної дії експериментального зразка з використанням у його структурі одношарового та багатошарового ПТ обчислено та представлено на рисунку 13.

Рисунок 13 показує, що використання одношарових ПТ в експериментальному зразку є недоцільним з причини того, що його коефіцієнт корисної дії у такому випадку не перевищує навіть 10 %. Рекомендовано використовувати багатошарові ПТ, при цьому і на першій і на другій модах коливань при різних значеннях опору навантаження (окрім тих, що є меншими за 10 МОм) загальний коефіцієнт корисної дії пристрою є досить високим та в середньому перевищує рівень 50 %.

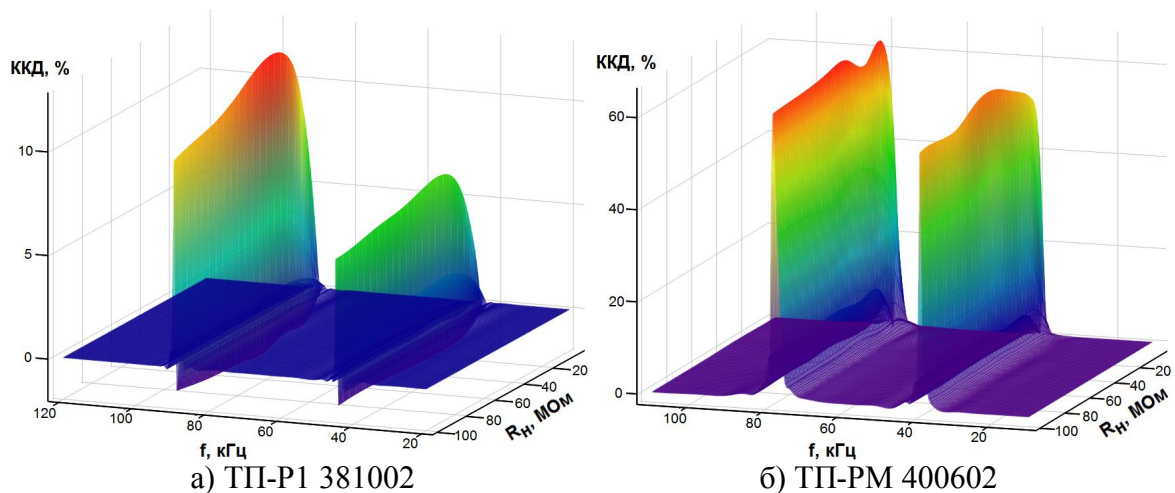


Рисунок 13 – Залежності коефіцієнтів корисної дії ВДЖ на основі ПТ від частоти імпульсів збудження та опору навантаження

**Висновки.** Отже за результатами досліджень встановлено доцільність використання багат шарових ПТ у структурі ВДЖ. Зазначено умови їх максимальної ефективності: пристрій повинен працювати на резонансній частоті другої моди коливань. Для досягнення найбільших перетворювальних властивостей пристрою рекомендовано застосовувати його для активного навантаження високого опору порядку десятків мегаом (наприклад, люмінесцентна лампа, іонізуючий або озонуючий прилад, помножувач напруги тощо). Визначено, що суттєві втрати енергії відбуваються в формувачі сигналів керування та є такими, що порівняні з потужностями, які передає одношаровий ПТ.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення структури ВДЖ на основі ПТ, оптимізацію його схемотехнічного рішення, розробку методів стабілізації резонансної частоти та параметрів імпульсів збудження, а також поліпшення технічних й експлуатаційних характеристик пристрою.

### Бібліографічний список

1. Кривошей Д.А. Преобразователи электрической энергии на основе пьезотрансформаторов / Д.А. Кривошей // *Технічна електродинаміка*. – Тем. вип. *Силова електроніка та енергоефективність: у 4-х ч.* – Ч. 3. – Харків: НТУ «ХПИ», 2012. – С. 5–10.

2. Паэрэнд Ю.Е. Дослідження характеристик п'єзоелектричних трансформаторів / Ю.Е. Паэрэнд, Д.А. Кривошей // *Електроніка та зв'язок*. – Тем. вип. *Електроніка і нанотехнології*. – 2010. – № 5. – С. 28–34.

3. Паэрэнд Ю.Э. Вторичные источники питания с пьезоэлектрическими трансформаторами / Ю.Э. Паэрэнд, Д.А. Кривошей // *Електроніка та зв'язок*. – Тем. вип. *Електроніка і нанотехнології*. – 2011. – № 3. – С. 121–125.

4. Кривошей Д.А. Дослідження впливу технологічного розкиду параметрів компонентів на характеристики джерела живлення з п'єзотрансформатором / Д.А. Кривошей // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – № 2. – С. 139–140.

5. Розробка та дослідження електронного перетворювального пристрою на основі п'єзоелектричного трансформатора: звіт про НДР: № 33-К / Донбаський державний технічний університет; керівн. Паєранд Ю.Е.; викон. Кривошей Д.А. – Алчевськ, 2012. – 109 с. – № ДР 0110U007767.

6. Kryvoshei D. High-Voltage Power Supply Based on Piezoelectric Transformer / Dmytro Kryvoshei, Yuriy Paerand // *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*. – 11th International Conference TCSET'2012 Proceedings. – Lviv. – 2012. – P. 498.

7. Компанія «International Rectifier» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.irf.com/>. – Назва з екрану.

8. Вітебський завод радіодеталей «Моноліт» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.monolit.by/>. – Назва з екрану.

**Рекомендовано до друку д.т.н., проф. Заблодським М.М.**