

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Белякова Ірина Володимирівна

УДК 621.32.032

**Моделювання та розрахунок п'єзотрансформаторів,
навантажених люмінесцентною лампою**

05.09.07 – світлотехніка та джерела світла

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Тернопіль–2012

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Андрійчук Володимир Андрійович,
завідувач кафедри світлотехніки Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Рой Віктор Федорович,
кафедра електропостачання міст,
Харківська національна академія
міського господарства

кандидат технічних наук, доцент
Лупенко Анатолій Миколайович,
завідувач кафедри електротехніки
Тернопільського національного технічного
університету імені Івана Пулюя

Захист відбудеться 23 березня 2012 р. об 11.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 58.052.04 у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя (46001, Україна, м. Тернопіль, вул. Руська, 56).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Тернопільського національного технічного університету ім. Івана Пулюя (46001, Україна, м. Тернопіль, вул. Руська, 56).

Автореферат розісланий 21 лютого 2012 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

М. Г. Тарасенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Протягом останнього десятиліття спостерігається активне впровадження високочастотних пускорегулюючих напівпровідникових апаратів (НПРА) для запалювання розряду та стабілізації струму люмінесцентних ламп (ЛЛ) у побутових і промислових освітлювальних пристроях.

Їх впровадження дає можливість:

- а) зменшити втрати в пускорегулюючих апаратах (ПРА) і підвищити ККД освітлювальних пристроїв у цілому;
- б) зменшити пульсацію світлового потоку ЛЛ за рахунок живлення напругою високої частоти (20 кГц і вище);
- в) суттєво знизити витрати матеріалів, зокрема електротехнічної сталі та міді;
- г) підвищити світлову віддачу люмінесцентної лампи;
- д) забезпечити високу якість споживаної електроенергії – близький до одиниці коефіцієнт потужності завдяки споживанню синусоїдного струму з нульовим фазовим зсувом;
- е) регулювати світловий потік ЛЛ у широких межах без застосування додаткових пристроїв;
- є) забезпечити запалювання та роботу ЛЛ у широкому діапазоні температур навколишнього середовища (-15...+50 °С).

Разом з тим, повну заміну електромагнітних ПРА напівпровідниковими стримують:

- порівняно висока вартість НПРА;
- невисока надійність конструкцій більшості виробників, особливо в складних умовах роботи (висока вологість, низькі температури і т.п.);
- наявність електромагнітних елементів (високочастотних трансформаторів та дроселів), що перешкоджає мініатюризації конструкцій НПРА та впровадженню однотипних технологічних процесів у їх виробництві.

Тому важливим напрямком у розробленні високочастотних НПРА є заміна електромагнітних елементів п'єзоелектричними трансформаторами (ПТ), які за своїми характеристиками подібні до трансформаторів з розсіюванням, але мають значно меншу масу та габарити і не потребують налаштування. Це дозволить усунути основні недоліки, які перешкоджають широкому впровадженню НПРА.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Роботу виконано на кафедрі світлотехніки ТНТУ імені І. Пулюя. Автор брала участь у виконанні держбюджетної науково-дослідної теми ДІ 148-08 "Розробка методів вимірювання світлотехнічних параметрів та енергетичної ефективності напівпровідникових джерел світла", 2008–2010 рр.

Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є вивчення процесів, що виникають в п'єзоелектричному трансформаторі з нелінійним навантаженням, яким є люмінесцентна лампа, розроблення методики розрахунку та конструкції високочастотного

напівпровідникового пускорегулюючого апарата на базі п'єзоелектричного трансформатора в схемах стартерного та безстартерного ввімкнення в пусковому та робочому режимах роботи люмінесцентної лампи.

Для досягнення мети було вирішено такі завдання:

- розроблено схему високочастотного перетворювача, який забезпечує надійне функціонування ПТ в усіх можливих режимах його роботи (холостий хід, коротке замикання, режим максимального ККД);
- проведено експериментальні дослідження впливу зміни параметрів навантаження, напруги та частоти джерела живлення, температури довкілля на параметри п'єзотрансформатора;
- розроблено методичку розрахунку конструктивних та електричних параметрів п'єзотрансформатора, яка може бути рекомендована для визначення його параметрів при навантаженні люмінесцентною лампою.

Об'єктом дослідження є процеси, що виникають в п'єзоелектричних трансформаторах, на базі яких побудовано напівпровідникові пускорегулюючі апарати для запалювання та стабілізації струму люмінесцентних ламп.

Предмет дослідження – комплект п'єзотрансформатор струму–люмінесцентна лампа при дії різних збуджуючих факторів: зміни вхідної напруги, опору навантаження, робочої частоти.

Методи дослідження. Методологічною основою наукових досліджень вибрано експериментально-аналітичний метод та метод електромеханічних аналогій.

Достовірність отриманих результатів зумовлена коректністю виконаних експериментів та розрахунків і підтверджується малими значеннями розбіжності між результатами експериментальних досліджень і теоретичного аналізу, проведеного на підставі фундаментальних фізичних законів, а також порівняльним аналізом із результатами, отриманими іншими авторами.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Розроблено принципи побудови НППА для ЛЛ на основі п'єзотрансформаторів струму, які дозволяють підвищити ефективність та енергоощадність напівпровідникових пускорегулюючих апаратів.

2. Отримано функціональні залежності параметрів вихідної секції та підігрівних секцій п'єзотрансформатора, навантаженого люмінесцентною лампою, при зміні величини напруженості вхідного електричного поля, опору навантаження й температури середовища, що дозволило розширити можливості використання ПТ в НППА.

3. Удосконалено математичну модель п'єзоелектричного трансформатора, яка базується на експериментально визначених характеристиках нелінійного чотириполюсника. Це дозволило розробити методичку розрахунку параметрів комплекта ПТ–ЛЛ у пусковому та робочому режимах роботи.

4. Вперше дано математичне обґрунтування виникнення нелінійних функціональних залежностей параметрів п'єзотрансформатора, навантаженого люмінесцентною лампою.

Практичне значення отриманих результатів

1. Розроблено конструкцію НПРА з амплітудним способом керування параметрами п'єзотрансформатора, яка забезпечує запалювання та стабілізацію струму ЛЛ при зміні напруги живлення і температурного режиму роботи п'єзотрансформатора.

2. Запропоновано методику вимірювання параметрів комплексу п'єзотрансформатор–люмінесцентна лампа, яка дозволяє проводити аналіз характеристик НПРА при зміні електричних параметрів джерела живлення й температури середовища.

3. Розроблено спрощений метод розрахунку комплексу п'єзотрансформатор–люмінесцентна лампа, який дозволяє розрахувати параметри п'єзотрансформатора для ЛЛ заданої потужності з похибкою, що не перевищує 10 %.

4. Розроблено рекомендації щодо використання п'єзотрансформаторів в конструкціях НПРА для роботи з люмінесцентною лампою на основі аналізу параметрів конструкцій ПТ прямокутної форми зі збудженням коливань на 2-й та 3-й моді по ширині ПТ, та дискових, зі збудженням радіальних коливань.

Особистий внесок здобувача

Здобувачем проведено:

- дослідження характеристик комплексу п'єзотрансформатор–люмінесцентна лампа [1,6,7,9];

- дослідження характеристик НПРА на базі ПТ для люмінесцентних ламп [2,3,8,13];

- розроблення конструкції напівпровідникових ПРА на базі п'єзотрансформаторів струму [4,14];

- вдосконалення математичної моделі пускорегулюючого апарата на основі п'єзоелектричного трансформатора, навантаженого люмінесцентною лампою [5,12,];

- дослідження основних електричних характеристик комплексу п'єзотрансформатор –люмінесцентна лампа в схемах стартерного та безстартерного ввімкнення ЛЛ та їх залежності від основних збуджуючих факторів [10,11,15].

Апробація результатів дисертації

Основні результати роботи доповідались на восьмій науковій конференції ТДТУ ім. І. Пулюя (Тернопіль, 11–12 травня 2004 р.); дванадцятій науковій конференції ТДТУ ім. І. Пулюя (Тернопіль, 14–15 травня 2008 р.); III-ій Міжнародній науково-технічній конференції «Світлотехніка й електроніка: історія, проблеми і перспективи» (Тернопіль, 20–22 травня 2008 р.); всеукраїнській науковій конференції ТДТУ ім. І. Пулюя (Тернопіль, 13–14 травня 2009 р.); Міжнародній науково-технічній конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій", присвяченій 50-річчю заснування ТНТУ та 165-річчю з дня народження Івана Пулюя (Тернопіль, 19–21 травня 2010 р.); Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (Тернопіль, 21–22 грудня

2010 р.); науково-технічній конференції «Сучасний стан і перспективи розвитку світлотехніки та електроенергетики» (Тернопіль, 19 травня 2011 р.); IV Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми світлотехніки та електроенергетики» – СПСЕ–2011 (Харків, 13–14 квітня 2011 р.); п'ятнадцятій науковій конференції ТНТУ ім. І. Пулюя, (Тернопіль, 14–15 грудня 2011 р).

Публікації

За темою дисертації зроблено 9 виступів на науково-технічних конференціях та опубліковано 6 статей в ліцензованих ДАК України наукових журналах.

Структура й обсяг дисертації

Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації –172 сторінки, в тому числі: 109 рисунків та фотографій, 3 таблиці, список використаних літературних джерел із 112 найменувань та 5 додатків на 13 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації –148 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано її мету та основні завдання, наукову новизну отриманих результатів та їх практичне значення, відзначено особистий внесок здобувача та апробації результатів роботи.

Перший розділ присвячено аналізу перспектив впровадження високочастотних напівпровідникових пускорегулюючих апаратів для запалювання розряду й стабілізації струму люмінесцентних ламп. Проаналізовано конструктивні особливості побудови НПРА, вказано основні недоліки, які є перешкодою їх широкому впровадженню в освітлювальних пристроях.

Показано, що важливим напрямком у розробленні високочастотних НПРА, який усуває вказані недоліки, є заміна електромагнітних елементів (трансформатора, дроселя) п'єзоелектричними трансформаторами, які за своїми характеристиками подібні до трансформатора з розсіюванням, але мають значно менші масу та габарити, не є електромагнітними елементами, повністю пожегобезпечні.

Проаналізовано конструкції ПТ та існуючі електричні схеми управління роботою п'єзотрансформаторів.

Проведено аналіз відомих методів розрахунку параметрів п'єзотрансформаторів. Вказано на їх недоліки при розрахунках комплексу п'єзотрансформатор–люмінесцентна лампа у пусковому та робочому режимах роботи.

Сформульовано основні завдання дослідження високочастотних напівпровідникових пускорегулюючих апаратів для запалювання та стабілізації розряду люмінесцентної лампи на базі сегнетоелектричних елементів на основі проведеного аналізу існуючих конструкцій.

У **другому розділі** наведено методику та опис експериментальних установок для дослідження характеристик п'єзотрансформаторів струму в схе-

мах стартерного та безстартерного ввімкнення люмінесцентних ламп.

Описано конструкцію експериментальної установки для вимірювання характеристик ПТ струму в схемах стартерного (рис. 1) та безстартерного (рис. 2) ввімкнення люмінесцентних ламп, за допомогою якої досліджувалися такі характеристики п'єзотрансформаторів струму: вихідна напруга $U_{вих}$, вхідний $I_{вх}$ та вихідний $I_{н}$ струми, резонансна частота п'єзотрансформатора f_p .

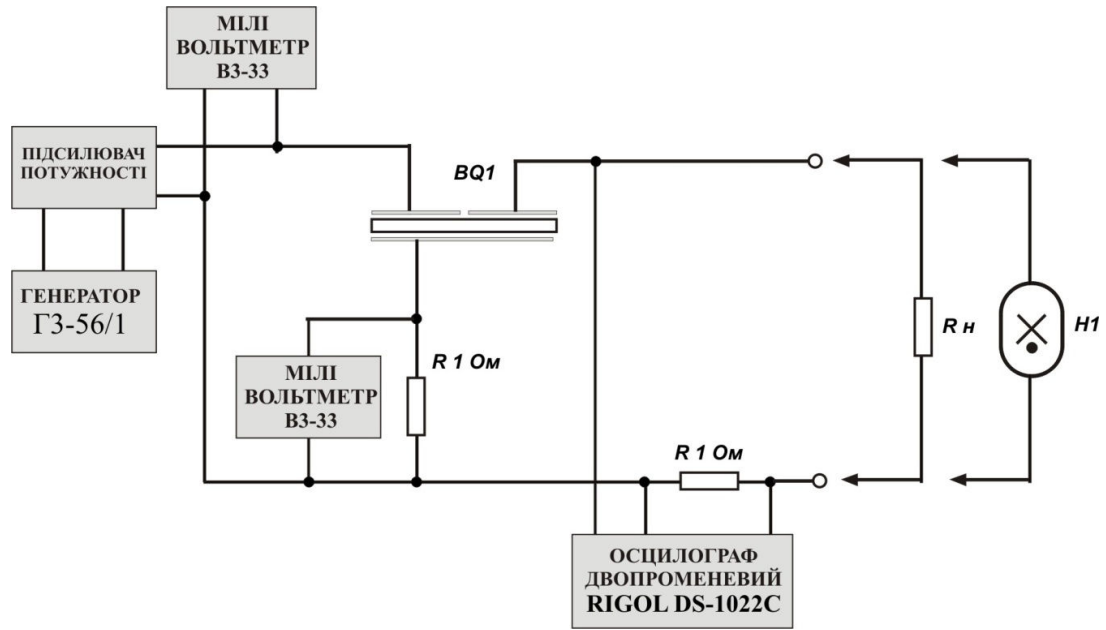


Рис. 1. Блок-схема установки для вимірювання характеристик ПТ струму в схемах стартерного ввімкнення люмінесцентних ламп

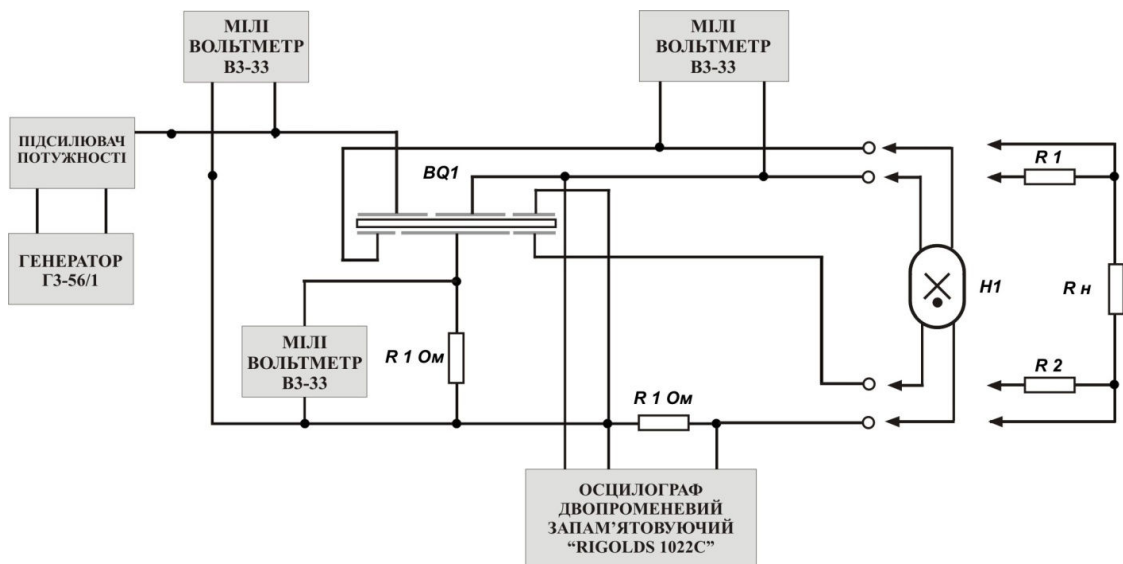


Рис. 2. Блок-схема установки для вимірювання характеристик ПТ струму в схемах безстартерного ввімкнення люмінесцентних ламп

На рис. 3 наведено блок-схему розробленого підсилювача потужності

для підсилення за напругою та потужністю синусоїдного сигналу від генератора до величини, достатньої для живлення п'єзотрансформатора струму, навантаженого люмінесцентною лампою чи еквівалентним опором, або для живлення люмінесцентних ламп потужністю 4...18 Вт при дослідженні їх вольт-амперних і частотних характеристик.

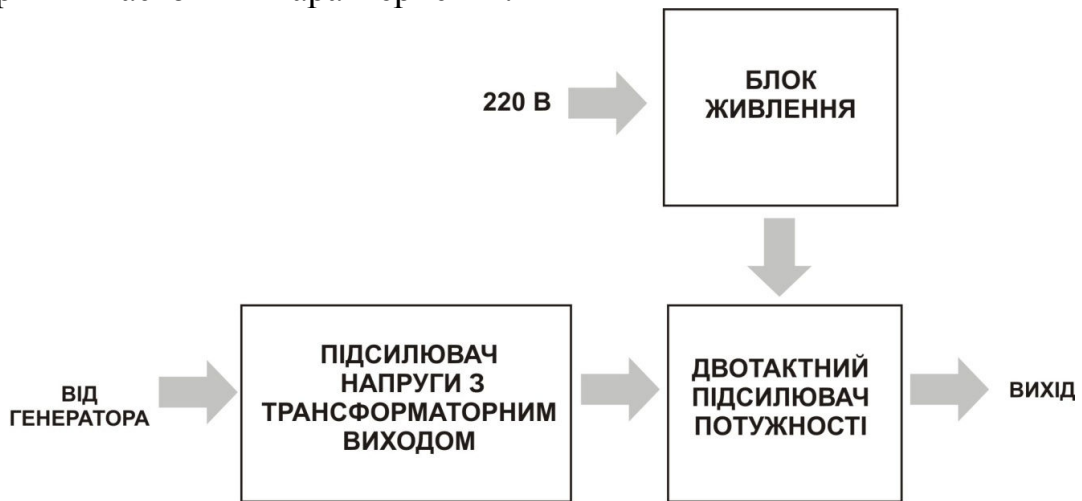


Рис. 3. Блок-схема підсилювача потужності синусоїдної напруги

Характеристики ПТ струму для схем стартерного та безстартерного ввімкнення ЛЛ вимірювалися за такою методикою:

1. Навантажувальну характеристику ПТ $U_{вих}=f(I_n)$ при $U_{ex}=const$ отримано вимірюванням напруги на навантаженні ПТ при зміні величини опору навантаження R_n , в якості якого використовувалися послідовно з'єднані між собою опори С2-33Н-2. Частота вхідної напруги при зміні величини опору навантаження підтримувалася такою, що дорівнювала частоті механічного резонансу ПТ. Вхідна напруга ПТ підтримувалася незмінною. Величина I_n визначалася вимірюванням діючого значення напруги на еталонному опорі R .

2. Залежність $P_{вих}=f(I_n)$ розраховувалася за отриманими експериментальним шляхом значеннями $U_{вих}$ та R_n при $U_{ex}=const$.

Були досліджені конструкції п'єзотрансформаторів струму поперечно-поперечного типу. Вихідний електрод ПТ навантажувався еквівалентним опором, що дорівнював опору люмінесцентної лампи на робочій частоті п'єзотрансформатора. На вхід ПТ подавалася синусоїдна напруга з частотою резонансу, яка визначалася по максимуму вихідної напруги п'єзотрансформатора.

3. При заданому значенні вхідної напруги U_{ex} (В) вимірювалися вихідна напруга п'єзотрансформатора U_n (В), вихідний струм I_n (А), кут зсуву між вхідною напругою та вхідним струмом φ (град), резонансна частота f_p (кГц). Розрахунковим шляхом визначалися вхідна та вихідна потужність P_n (Вт) п'єзотрансформатора, $\cos \varphi$, коефіцієнт підсилення за напругою K_u .

Навантаженням підігрівних секцій в схемах безстартерного ввімкнення ЛЛ були послідовно з'єднані між собою опори С2-33Н-2. У цьому випадку також визначалися потужність P_{el} (Вт) та коефіцієнт підсилення за напругою $K_{u\,el}$ на виході підігрівних секцій.

Розроблені установки дозволили проводити вимірювання таких параметрів НПРА на базі ПТ струму:

- форму кривих вихідної напруги та струму при навантаженні НПРА еквівалентним активним опором, який дорівнював сумарному опору двох електродів лампи в режимі з попереднім підігрівом та опору лампи в робочому режимі на заданій частоті;

- форму кривих вихідної напруги та струму при навантаженні НПРА люмінесцентною лампою потужністю 18 Вт (TLD-18/54) в пусковому режимі з попереднім підігрівом та в робочому режимі лампи;

- температурну залежність вихідної напруги та струму НПРА на базі п'єзотрансформатора струму при незмінному значенні напруги живлення.

Методика попереднього розрахунку конструктивних параметрів п'єзотрансформаторів базувалась на методі електромеханічних аналогій.

У **третьому розділі** наведено результати дослідження п'єзотрансформаторів струму поперечно-поперечного типу зі збудженням другої та третьої моди коливань по ширині для схем стартерного включення ЛЛ.

На вхід ПТ подавалася синусоїдна напруга з частотою резонансу. Опір навантаження ПТ змінювався в межах від 1,0 кОм до 50 Ом.

На основі отриманих результатів було побудовано такі залежності:

а) вихідної напруги U_n від опору навантаження R_n при фіксованих значеннях напруженості вхідного електричного поля A_{ex} ;

б) коефіцієнта трансформації за напругою K_u від величини опору навантаження R_n ;

в) частоти резонансу f_p від струму навантаження I_n при незмінному значенні напруженості A_{ex} (рис. 4);

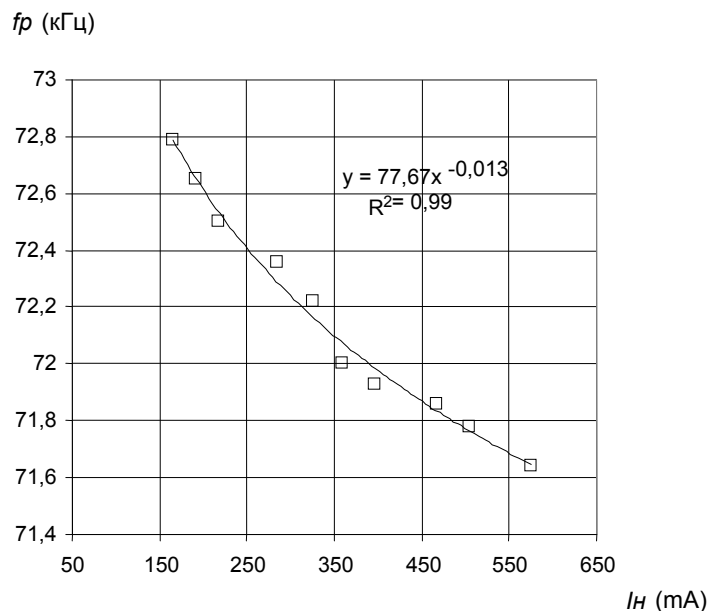


Рис. 4. Залежність резонансної частоти ПТ від величини струму навантаження $f_p = f(I_n)$ при $R_n = var$, $A_{ex} = const$, $T = const$, $f = f_p$

г) вихідної напруги $U_{вих}$ від струму навантаження I_n на частоті резонан-

су f_p при фіксованих значеннях напруженості A_{ex} (рис. 5);

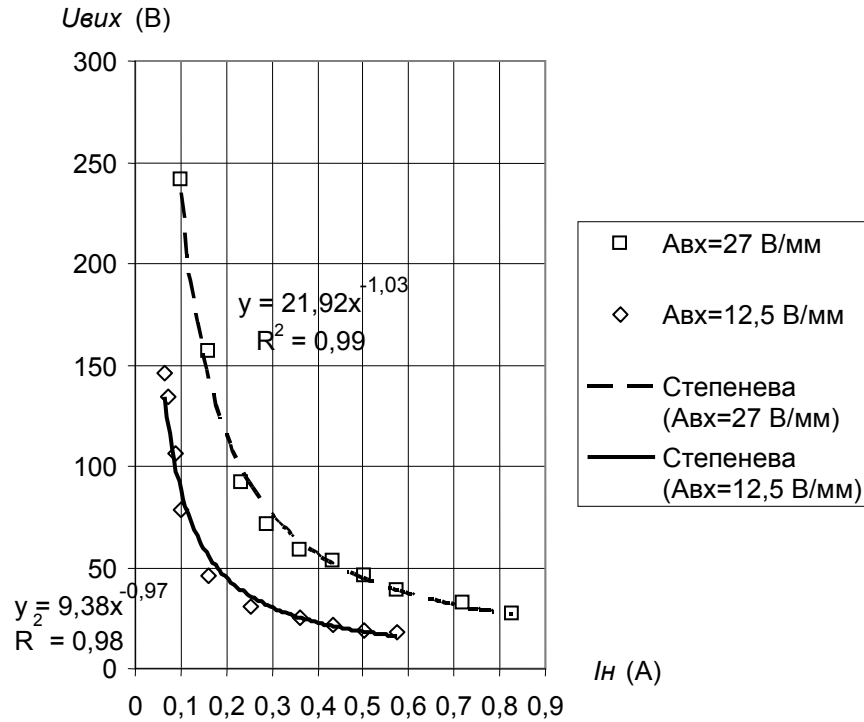


Рис. 5. Характеристики $U_{vix}=f(I_n)$ при різних значеннях напруженості вхідного електричного поля A_{ex}

д) зсуву фаз φ між вхідною напругою U_{ax} та вхідним струмом I_{ax} від зміни величини опору навантаження R_n на частоті резонансу f_p при фіксованих значеннях напруженості A_{ex} ;

е) коефіцієнта трансформації за напругою в режимі холостого ходу K_{u0} від напруженості A_{ex} при сталій температурі T довкілля;

є) вихідної напруги п'єзотрансформатора U_n від величини напруженості A_{ex} при фіксованому значенні опору навантаження R_n (рис. 6).

Представлено також результати дослідження комплексу п'єзотрансформатор з підігрівними секціями–змінне активне навантаження в схемах без-стартерного ввімкнення ЛЛ. П'єзотрансформатор працював на 2-й моді поперечних коливань.

Досліджувалися характеристики ПТ $U_{vix}=f(A_{ex})$, $K_u=f(A_{ex})$, $f_p=f(A_{ex})$, $I_n=f(A_{ex})$. Розрахунковим шляхом визначалися вхідна P_{ex} (Вт) та вихідна P_n (Вт) потужності п'єзотрансформатора, $\cos \varphi$, $KKД$ η , коефіцієнт підсилення за напругою на навантаженні K_u та на підігрівних секціях $K_{u_{el}}$.

За результатами дослідження встановлено, що параметри ПТ є незмінними лише в слабких електричних полях (до 10 В/мм) при незначних навантаженнях. При величинах напруженості вхідного електричного поля п'єзотрансформатора A_{ex} , які перевищують 10...15 В/мм, мають місце нелінійні залежності електричних параметрів ПТ $U_{vix}=f(A_{ex})$, $K_u=f(A_{ex})$, $f_p=f(A_{ex})$, $I_n=f(A_{ex})$ та ін. Нелінійність параметрів ПТ пояснюється нелінійною залежністю між відповідними компонентами електричних і механічних змінних та появою вищих гармонік у кривій струму, крім основної, у залежності параметрів

ε , d , $\operatorname{tg}\delta$ п'єзокераміки від напруженості електричного поля A_{ex} .

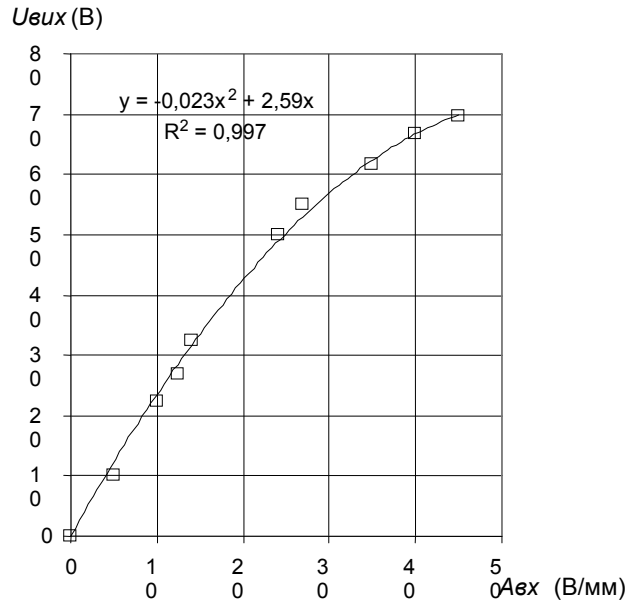


Рис. 6. Характеристика $U_{вих}=f(A_{ex})$ при $R_n=\text{const}$

Збільшення втрат у ПТ при значеннях A_{ex} , які перевищують 10...15 В/мм, призводить до зростання робочої температури п'єзотрансформатора, і, як наслідок, до зміни вихідних електричних параметрів ПТ (I_n , U_n , P_n).

При незмінному значенні вхідної напруги величина напруги на виході ПТ зменшується зі зменшенням опору навантаження. Залежність є лінійною при значеннях напруженості вхідного електричного поля до 7,5 В/мм. Нелінійність вихідної характеристики спостерігається при $A_{ex} \geq 7,5$ В/мм.

Резонансна частота ПТ зменшується зі зменшенням величини опору навантаження. При зростанні вхідної напруги спостерігається незначне зростання резонансної частоти.

Показано, що при розрахунку параметрів ПТ з підігрівними секціями для вихідної секції ПТ слід вибрати режим максимального ККД, а для підігрівних секцій – режим максимальної потужності (другий узгоджений режим). При цьому підігрівні секції ПТ струму в схемах безстартерного включення ЛЛ споживають не більше 5 % кожна від вихідної потужності п'єзотранс-форматора в робочому режимі лампи.

У четвертому розділі наведено методику розрахунку параметрів люмінесцентних ламп на частотах 20...150 кГц потужністю 4...18 Вт.

Навантажувальні характеристики люмінесцентних ламп (рис. 7) апроксимувалися степеневою функцією для заданого значення частоти напруги живлення

$$U_{лл f} = U_{лл 50} a (I_{лл f} / I_{лл 50})^b, \quad (1)$$

де $U_{лл f}$ – напруга на лампі на заданій частоті (В); $U_{лл 50}$ – номінальне значення напруги на лампі на частоті 50 Гц (В); $I_{лл f}$ – струм через лампу на заданій даній частоті (А); $I_{лл 50}$ – номінальне значення струму на частоті 50 Гц (А); a, b – константи.

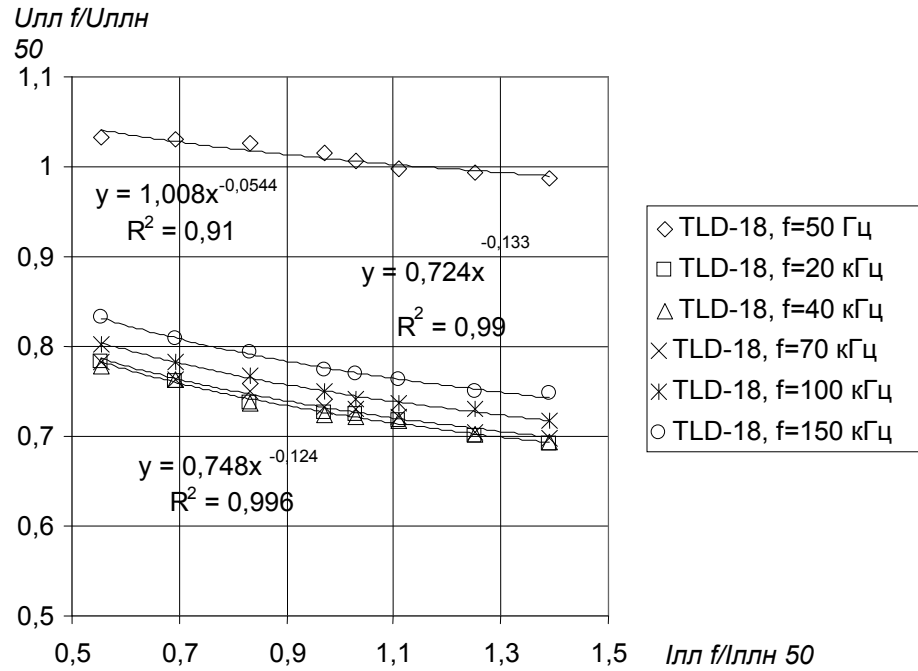


Рис. 7. Відносні вольт-амперні характеристики люмінесцентної лампи TLD-18 на різних робочих частотах

Характеристика ЛЛ, яка враховує вплив частоти напруги живлення на величину відносної напруги на лампі (рис. 8), записувалася у вигляді (2)

$$U_{лл f} = U_{ллн 50} c f^d (I_{лл f}/I_{ллн 50})^b. \quad (2)$$

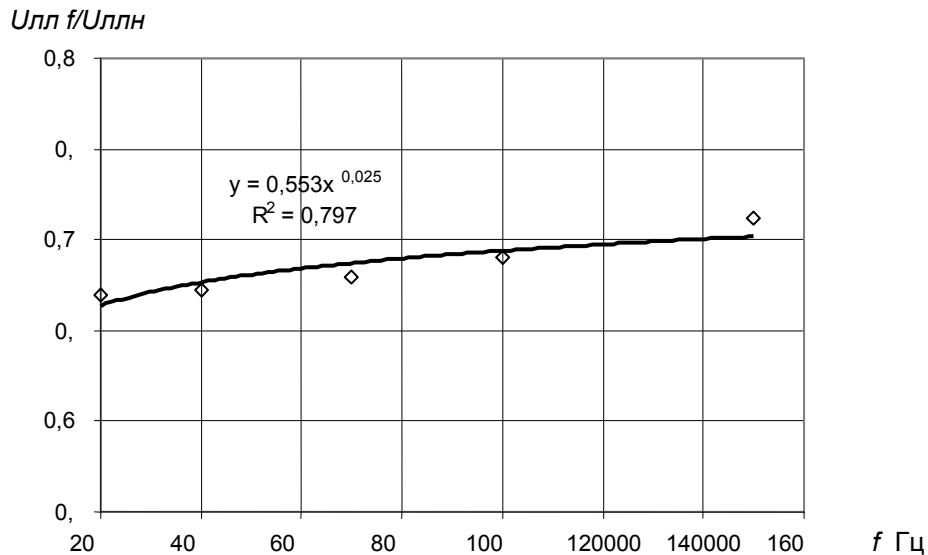


Рис. 8. Частотна залежність відносної величини напруги на люмінесцентній лампі TLD-18

Величини c, d є сталими для кожного типу люмінесцентних ламп і в діапазоні частот 20...150 кГц не залежать від частоти напруги живлення.

Константа $b = -0,21$ є незмінною для всіх типів ламп.

Поєднання методу електромеханічних аналогій з експериментально-аналітичним методом дозволило врахувати вплив основних збуджуючих факторів на параметри ПТ. На основі експериментальних характеристик ПТ отримано аналітичні вирази для розрахунку його конструктивних параметрів з похибкою, що не перевищувала 10 %. Для удосконалення математичної моделі комплексу п'єзотрансформатор–люмінесцентна лампа використовувалися експериментальні залежності характеристик ПТ, розрахованого для живлення ЛЛ потужністю 18 Вт.

Отримано такі аналітичні залежності для визначення параметрів ПТ, навантаженого нелінійним опором, яким є люмінесцентна лампа:

$$\begin{aligned} U_{ллf} &= U_{лн 50} c f^d (I_{ллf}/I_{лн 50})^b, \\ U_{вих} &= -0,023 A_{ex}^2 + 2,59 A_{ex}, \\ U_{вих} &= K_{уп} A_{ex} / I_n, \\ f_p &= -0,063 A_{ex} + 73,68, \\ f_p &= 77,76 I_n^{-0,013}, \\ \varepsilon_{33}^T * 10^9 &= 8,14 e^{0,003 T_p}, \\ K_{u0} &= -6,15 \ln(A_{ex}) + 28,9. \end{aligned}$$

У **п'ятому розділі** наведено результати дослідження розробленої конструкції НПРА на базі ПТ струму для роботи з ЛЛ у схемах стартерного включення, блок-схему якої зображено на рис. 9.

Автоколивання в пристрої підтримувалися за рахунок позитивного зворотного зв'язку з виходу секції зворотного зв'язку 4 ПТ (рис. 9) на вхід

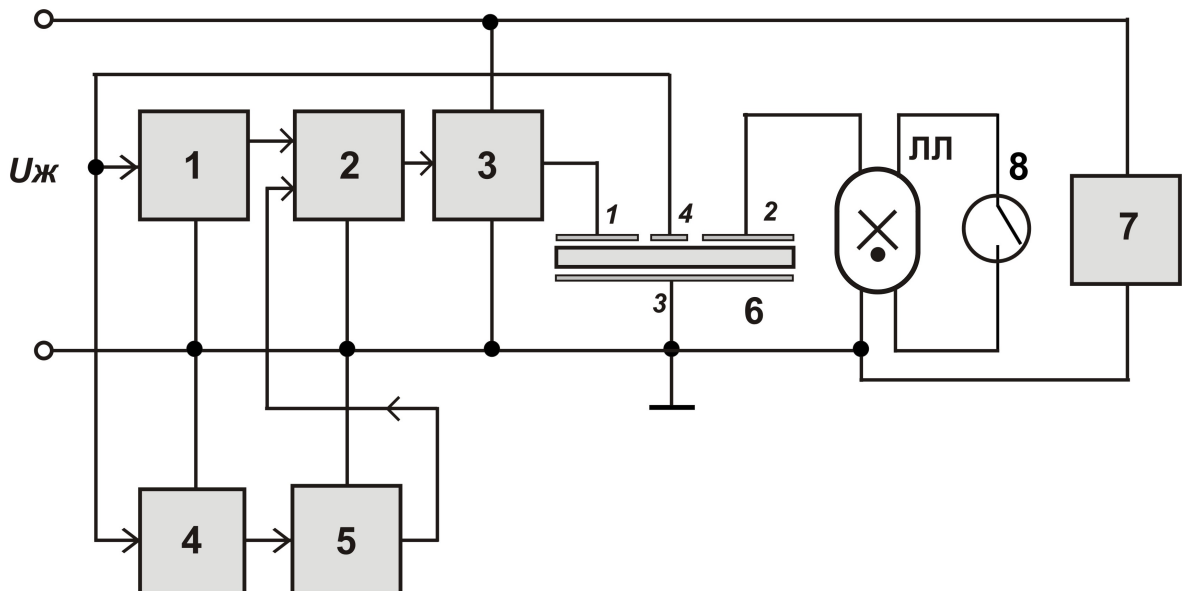


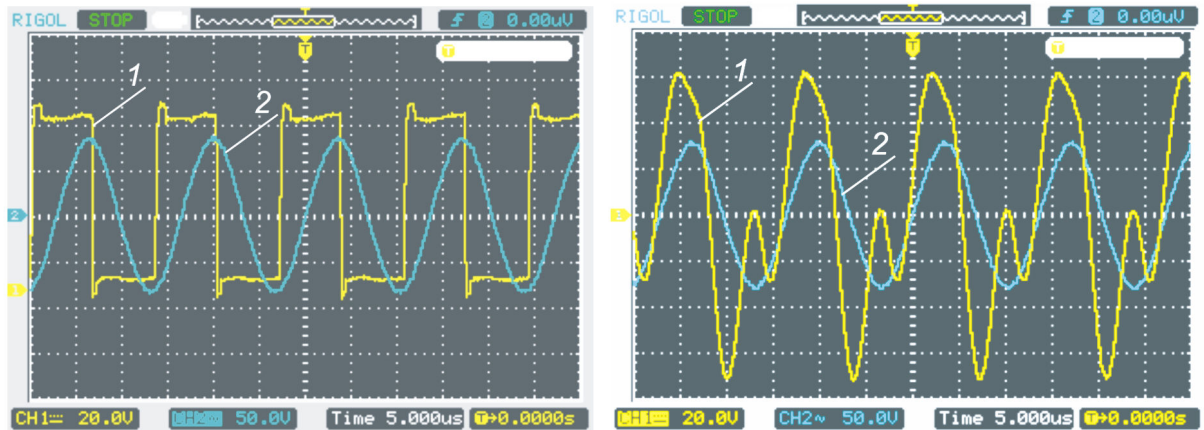
Рис. 9. Блок-схема НПРА стартерного типу на базі ПТ струму:

1– частотно-задаючий елемент; 2– формувач імпульсної напруги; 3– вихідний транзисторний каскад; 4– пристрій затримки в часі; 5– пристрій захисту; 6– п'єзотрансформатор струму з секціями: 1– вхідною, 2– вихідною, 3– спільною, 4– зворотного зв'язку; 7– блок управління станом геркона; 8– геркон

транзисторної схеми керування, робоча точка на амплітудно-частотній характеристиці ПТ визначалася частотно-задаючим елементом 1, який утримував робочу частоту ПТ рівною його власній частоті механічного резонансу ПТ.

Вихідна напруга підсилювача потужності була імпульсною форми (осцилограма 1 на рис. 10, а). Вихідні транзистори підсилювача перемикалися із затримкою в часі, що значно зменшило динамічні втрати, а, отже, покращило температурний режим роботи вихідного каскаду.

Вхідна напруга п'єзотрансформатора (осцилограма 1 на рис. 10, б) була близькою до синусоїдної, хоча, крім основної, містила також третю гармоніку, що обумовлено реактивним (ємнісним) характером навантаження вихідного каскаду НПРА. Параметри індуктивності, яка вмикалася послідовно із входом ПТ для компенсації ємнісної складової його вхідної секції, підбиралася таким чином, щоб зсув фаз між вихідною імпульсною напругою та вхідним струмом ПТ, форма якого наближена до синусоїдної, був близьким до нуля.



а)

б)

Рис. 10. Осцилограми для НПРА на базі ПТ, навантаженого ЛЛ TLD-18: а- вихідної напруги підсилювача потужності НПРА (1) та вихідної напруги п'єзотрансформатора (2); б- вхідної (1) та вихідної напруги п'єзотрансформатора

За допомогою установки, блок-схему якої представлено на рис. 1, досліджувалися вихідні характеристики розробленого НПРА:

- величини вихідної напруги та струму в пусковому та робочому режимах роботи люмінесцентної лампи;

- форми кривих вихідної напруги та струму при навантаженні люмінесцентною лампою потужністю 18 Вт (TLD-18) в пусковому та робочому режимах роботи ЛЛ.

На рис. 11 представлено осцилограми напруги (1) та струму (2) люмінесцентної лампи через фіксований час після запалювання лампи. Як видно з осцилограм, форма напруги на лампи на всіх осцилограмах була практично однаковою і близькою до синусоїди, а струм лампи мав наближену до купо-

лоподібної форму, особливо в усталеному режимі (рис. 11, б), що свідчить про наявність в його складі третьої гармоніки.

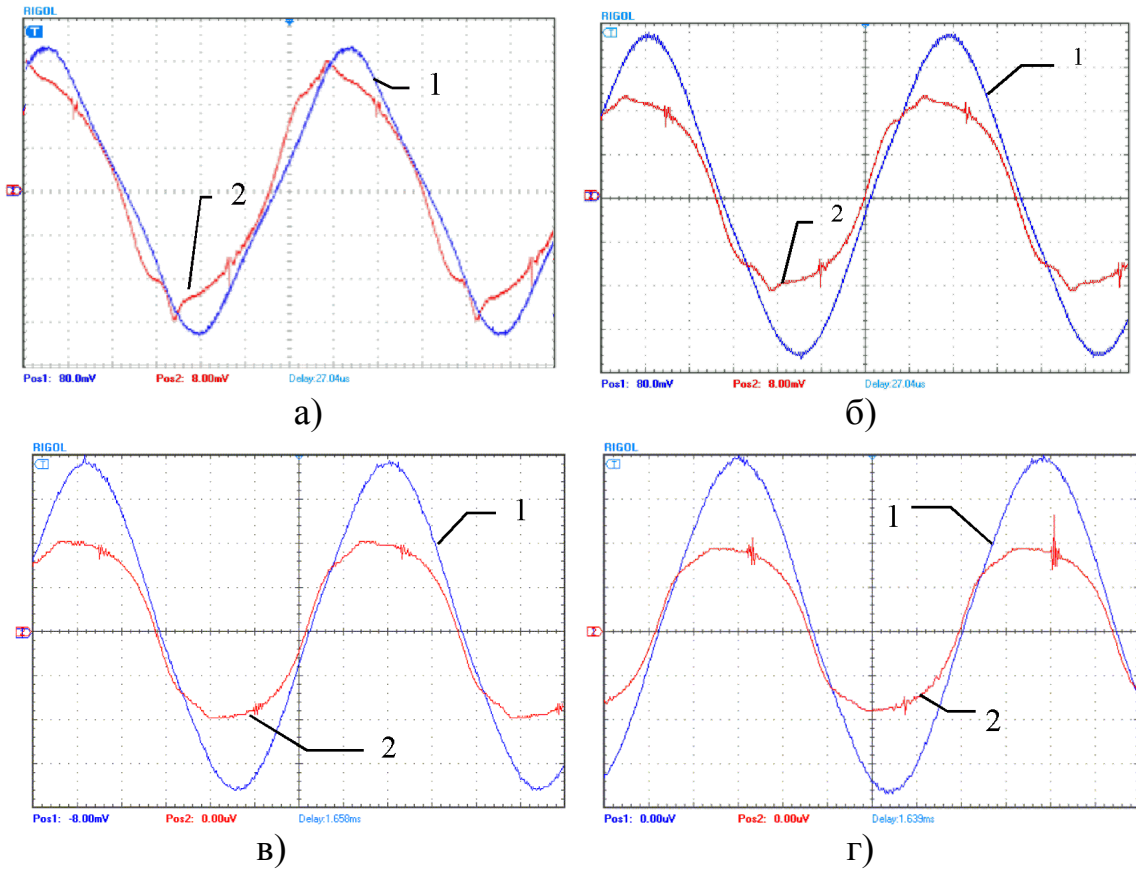


Рис. 11. Осцилограми кривих напруги (1) та струму (2) ЛЛ:
а - безпосередньо після запалювання ЛЛ; б - через 2 хв після запалювання;
в - через 5 хв; г - через 20 хв (усталений режим)

На рис. 12 показано осцилограми вихідної напруги (1) та струму (2) ПТ при активному навантаженні величиною 150 Ом безпосередньо після ввімкнення НПРА до джерела живлення, через фіксований час після ввімкнення та після досягнення усталеного температурного режиму роботи люмінесцентної лампи.

Як видно з осцилограм, форма напруги (1) на лампі є практично синусоїдною як у випадку навантаження п'єзотрансформатора люмінесцентною лампою (рис. 11), так і у випадку, коли ПТ навантажувався еквівалентним активним опором (рис. 12).

Разом з тим, форма струму при навантаженні НПРА лампою наближається до куполоподібної. Причиною цього є зменшення першої гармоніки та наявність третьої гармоніки в гармонічному складі вихідного струму ПТ.

Крім того, мав місце зсув по фазі між кривими напруги та струму, причому, струм випереджав напругу. Це можна пояснити нелінійністю вольт-амперної характеристики люмінесцентної лампи, що під'єднувалася до вихідної секції п'єзотрансформатора, опір якої був ємнісним.

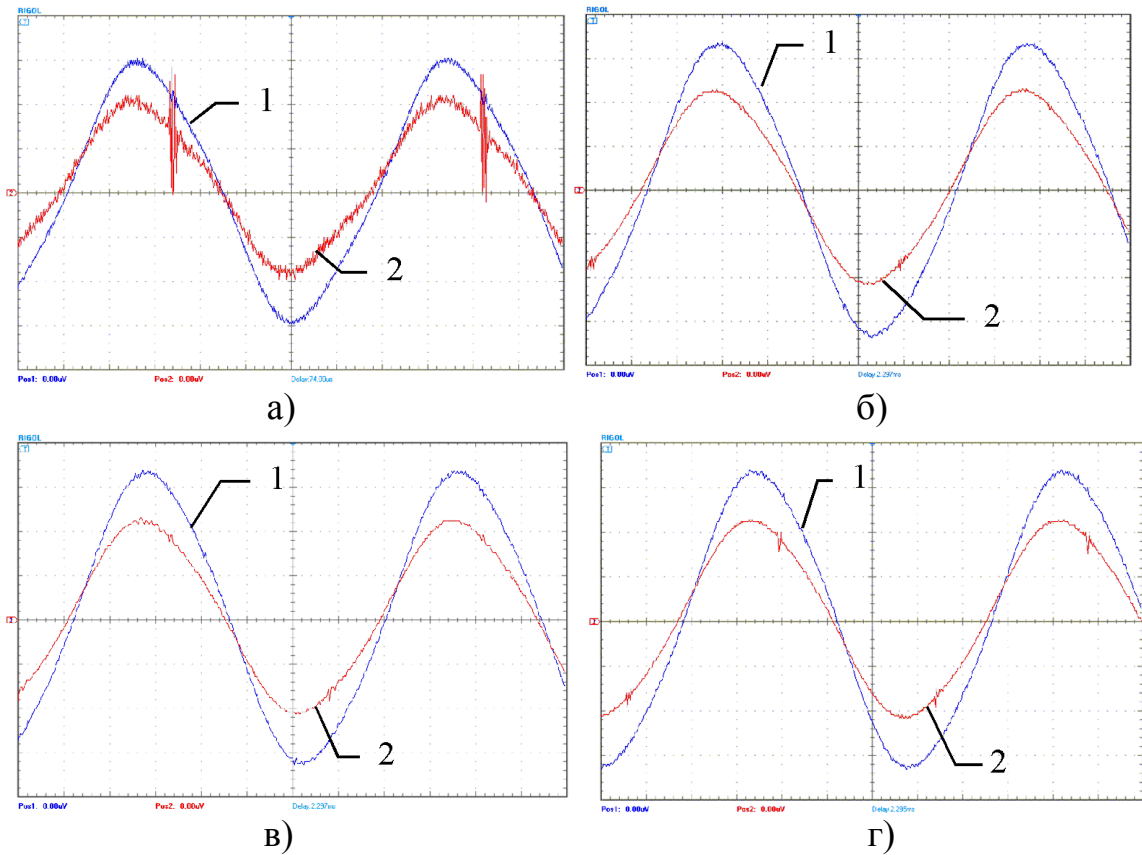


Рис. 12. Осцилограми вихідної напруги та струму ПТ при активному навантаженні 150 Ом: а - безпосередньо після ввімкнення НППРА до джерела живлення; б - через 5 хв після ввімкнення; в - через 10 хв, г - через 20 хв (усталений режим)

Блок-схему розробленої конструкції НППРА для живлення ЛЛ у схемах безстартерного ввімкнення зображено на рис. 13. Вона практично повністю повторює схему НППРА стартерного типу (рис. 9).

Схема не містить пристрою керування станом геркону та самого геркона, які забезпечують замикання пускового кола ЛЛ в НППРА стартерного типу для попереднього підігріву електродів лампи. Попередній підігрів електродів ЛЛ починається відразу після подання напруги живлення на НППРА.

За час підігріву електродів напруга запалювання ЛЛ зменшується і за рахунок високої напруги на виході генераторної секції п'єзоелектричного трансформатора, яка працює в режимі холостого ходу, відбувається запалювання лампи.

В робочому режимі ЛЛ напруга на її електродах (на виході підігрівних секцій ПТ) зменшується в декілька разів, що забезпечує високий ККД конструкції НППРА з ПТ у цілому.

З метою дослідження експериментальних електричних характеристик п'єзотрансформатора для НППРА безстартерного типу використовувалася установка, блок-схему якої зображено на рис. 2.

Результати досліджень показали, що НППРА з ПТ безстартерного типу (з підігрівними секціями) відносяться до схем з компенсацією напруги попере-

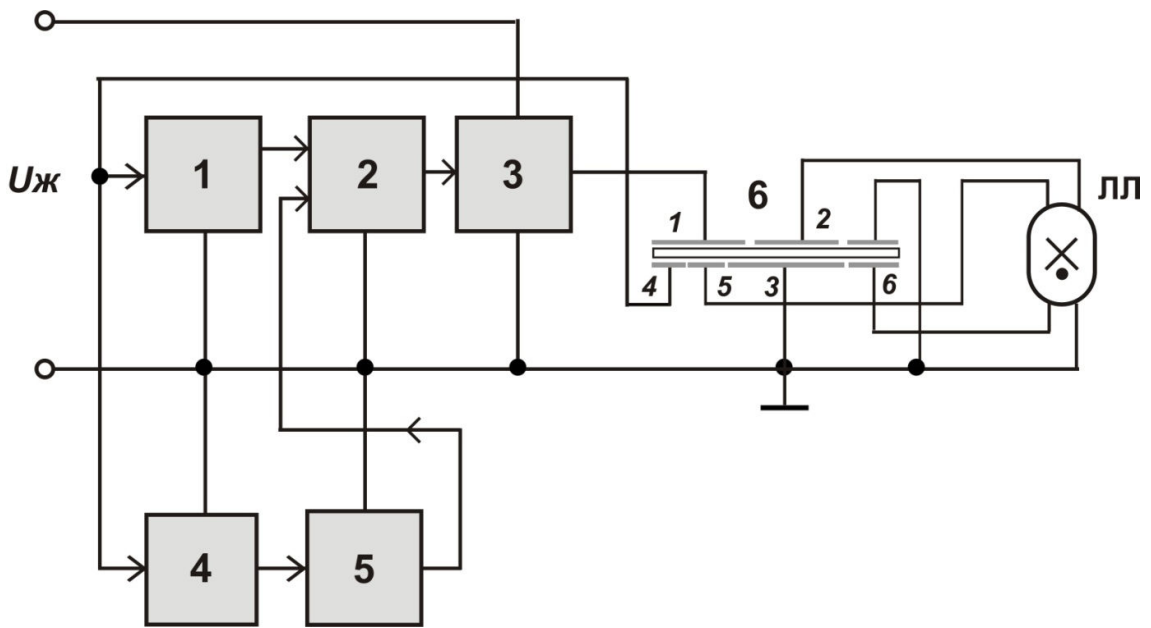


Рис. 13. Блок-схема НПРА безстартерного типу на базі ПТ струму: 1– частотно-задаючий елемент; 2–формуваць імпульсної напруги; 3– вихідний транзисторний каскад; 4– пристрій затримки в часі; 5– пристрій захисту; 6– п'єзотрансформатор струму з секціями: 1– входною, 2– вихідною, 3– спільною, 4– зворотного зв'язку, 5, 6 – підігріву електродів ЛЛ

днього підігріву електродів люмінесцентної лампи. Кратність компенсації зростає зі збільшенням електромеханічної добротності п'єзокераміки Q_M і є максимальною в режимі максимального ККД ПТ.

Було встановлено, що напруга на електродах лампи в пусковому режимі тим більша, чим більша добротність п'єзокераміки, є пропорційною величині ємнісного опору підігрівної секції й обернено пропорційною величині ємнісного опору вихідної секції, а кратність зростання вихідної напруги в режимі холостого ходу ПТ при зміні напруженості входного електричного поля A_{ex} в діапазоні 5...25 В/мм є приблизно такою ж, як і кратність зміни входного струму п'єзотрансформатора – 2,1...2,3.

На основі досліджень параметрів комолекту «НПРА на базі ПТ з підігрівними секціями – ЛЛ» зроблено висновок, що, як і в стартерних схемах, саме частотна залежність від зовнішніх збуджуючих факторів (вхідної напруги, входного струму, вихідного навантаження, температури середовища і т.п.) найбільш істотно впливає на зміну електричних характеристик п'єзотрансформатора, а, отже, і люмінесцентної лампи.

Осцилограми вихідної напруги ПТ $U_{вих}$ (1) (напруги на ЛЛ) та струму навантаження I_n (2) в схемі безстартерного ввімкнення лампи показано на рис. 14, а. Обидві криві по формі наближаються до синусоїди, у складі якої, крім основної, мають місце гармоніки вищих резонансних частот п'єзотрансформатора. На рис. 14, б приведено осцилограми входної U_{ex} (2) та вихідної $U_{ли}$ (1) напруги ПТ при навантаженні його вихідної секції люмінесцентною лампою Delux 4, а підігрівних секцій – електродами лампи.

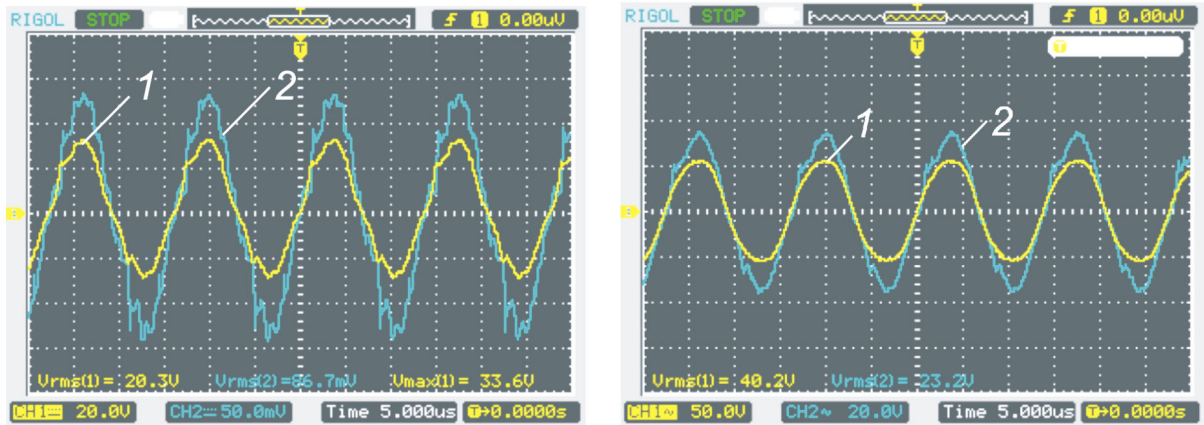


Рис. 14. Осцилограми напруг на секціях п'єзотрансформатора: а- вихідної напруги ПТ (1) та струму лампи (2); б- вихідної напруги (1) та вхідної напруги ПТ (2) при навантаженні лампою Delux 4

ВИСНОВКИ

1. Параметри ПТ є незмінними лише в невеликих, до 10 В/мм, електричних полях при навантаженнях, що складають одиниці та десятки кОм. Для п'єзотрансформаторів, навантажених люмінесцентною лампою, при значеннях напруженості вхідного електричного поля A_{ex} , що перевищують 10...15 В/мм, мають місце нелінійні залежності електричних параметрів ПТ $U_{вих} = f(A_{ex})$, $K_u = f(A_{ex})$, $f_p = f(A_{ex})$, $I_n = f(A_{ex})$.

2. Збільшення втрат у ПТ при вказаних значеннях A_{ex} призводить до зростання робочої температури п'єзотрансформатора, і, як наслідок, до зміни величини вихідних електричних параметрів ПТ: струму, напруги, потужності (до 10...15 %).

3. При незмінному значенні A_{ex} величина напруги на виході ПТ спадає зі зменшенням опору навантаження. Залежність є практично лінійною при значеннях напруженості A_{ex} до 5...7,5 В/мм. Нелінійність вихідної характеристики має місце при $A_{ex} \geq 7,5$ В/мм.

4. Резонансна частота ПТ зменшується (на 1...1,5 %) зі зменшенням опору навантаження й незначно змінюється (менше 1 %) зі зміною вхідної напруженості. При зростанні A_{ex} резонансна частота має тенденцію до зростання, хоча й незначного (менше 1 %).

5. При розрахунку параметрів ПТ з підігрівними секціями для вихідної секції ПТ слід вибрати режим максимального ККД, а для підігрівних секцій – режим максимальної потужності (другий узгоджений режим).

6. Показано, що при зростанні напруженості вхідного електричного поля ПТ A_{ex} коефіцієнт трансформації за напругою вихідної секції K_u зі зростанням A_{ex} нелінійно спадає, а підігрівної секції $K_{u_{el}}$ при такій же зміні A_{ex} лінійно зростає.

7. Вхідна потужність ПТ у заданому діапазоні зміни напруженості A_{ex} (0...25 В/мм) зростає (майже в 10 разів) при збільшенні A_{ex} в 2,5 рази. Це сві-

дчить про наростаюче збільшення втрат у п'єзотрансформаторі зі зростанням вхідної напруги за рахунок зростання втрат, а також і від швидкого нагрівання самого ПТ.

8. Кратність зростання вихідної напруги в режимі холостого ходу ПТ у заданому діапазоні зміни напруженості $A_{ex} = 5...25$ В/мм є приблизно такою ж, як і кратність зміни вхідного струму п'єзотрансформатора – 2,1...2,3.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Дослідження експериментальних характеристик комплексу п'єзотрансформатор–люмінесцентна лампа / О. Шкодзінський, І. Белякова, В. Пісьціо, В. Медвідь // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2008. – Т. 13, №3. – С.158–164.

2. Дослідження експериментальних характеристик п'єзотрансформатора струму / О. Шкодзінський, І. Белякова, В. Пісьціо, В. Медвідь // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2008. – Т. 13, №4. – С. 132–138.

3. Експериментальні характеристики п'єзотрансформатора поперечно-поперечного типу для стабілізації струму люмінесцентної лампи / О. Шкодзінський, І. Белякова, В. Пісьціо, В. Медвідь // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2010. – Т. 15, №4. – С. 113–120.

4. І. Белякова. Перспективи застосування п'єзотрансформаторів у світлотехніці / І. Белякова. // Світлолюкс. – 2011. – №1. – С. 41–45.

5. І. Белякова. Моделювання осциляційних складових відклику чотириполюсника / І. Белякова, І. Добротвор, Р. Цебрій // Світлотехніка та електротехніка. Міжнародний науково-технічний журнал. – 2011. – №2. – С. 55–60.

6. Експериментальні частотні характеристики п'єзотрансформатора поперечно-поперечного типу для стабілізації струму люмінесцентної лампи / О. Шкодзінський, І. Белякова, В. Пісьціо, В. Медвідь // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2011.– Т. 16, №3. – С. 142–148.

7. Особливості застосування п'єзоелектричних вторинних перетворювачів напруги в промисловості: матеріали восьмої наукової конференції ТДТУ ім. І. Пулюя, (Тернопіль, 11–12 трав. 2004 р.). – Т.: ТДТУ, 2004. – 240 с.

8. Експериментальне дослідження характеристик п'єзонапівпровідникового ПРА для люмінесцентних ламп: матеріали дванадцятої наукової конференції ТДТУ ім. І. Пулюя, (Тернопіль. 14–15 трав. 2008 р.). – Т.: ТДТУ, 2008. – 370 с.

9. Дослідження експериментальних характеристик комплексу п'єзотрансформатор-люмінесцентна лампа: матеріали III Міжнар. наук.-техн. конф. [“Світлотехніка й електроніка: історія, проблеми і перспективи”], (Тернопіль, 20–22 трав. 2008 р.). – Т.: ТДТУ, 2008. – 148 с.

10. Дослідження експериментальних характеристик п'єзотрансформатора з підігрівними електродами: матеріали Всеукраїнської наукової кон-

ференції ТДТУ ім. І. Пулюя, (Тернопіль. 13–14 трав. 2009 р.). – Т.: ТДТУ, 2008. – 468 с.

11. Експериментальні характеристики п'єзотрансформатора поперечно-поперечного типу: матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. [“Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій”, присв. 50- річчю заснув. ТНТУ та 165- річчю з дня народження Івана Пулюя], (Тернопіль, 19–21 трав. 2010 р.). – Т.: ТНТУ, 2010. – 560 с.

12. Виділення гармонійних складових відклику чотиріполюсника при зміні вхідного струму: матеріали IV Міжнар. наук.-техн. конф. [“Сучасні проблеми світлотехніки та електроенергетики”], (Харків, 13–14 квіт. 2011 р.). –Х.: ХНАМГ, 2011. – 179 с.

13. Дослідження h-параметрів п'єзоелектричних трансформаторів: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених [“Актуальні задачі сучасних технологій”], (Тернопіль, 21–22 груд. 2010 р.). – Т.: ТНТУ, 2010. – 98 с.

14. Експериментальні характеристики п'єзотрансформатора з підігрівними електродами: матеріали наук.-техн. конф. [“Сучасний стан і перспективи розвитку світлотехніки та електроенергетики”], (Тернопіль, 19 трав. 2011 р.). –Т.: ТНТУ, 2011. – 60 с.

15. Апроксимація характеристик люмінесцентних ламп на частотах 20...150 кГц: матеріали п'ятнадцятої наук. конф. ТНТУ ім. І. Пулюя, (Тернопіль, 14-15 грудня 2011 р.). –Т.: ТНТУ, 2011. – 60 с.

Анотація

Белякова І.В. Моделювання та розрахунків п'єзотрансформаторів, навантажених люмінесцентною лампою. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.07 – світлотехніка та джерела світла. – Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя.– Тернопіль, 2012.

У дисертації проведено дослідження високочастотних напівпровідникових пускорегулюючих апаратів (НПРА) на базі п'єзоелектричного трансформатора струму (ПТ), а також розроблено методику розрахунку, яка враховує як особливості самого ПТ, так і його нелінійного навантаження, яким є люмінесцентна лампа (ЛЛ) у схемах стартерного та безстартерного ввімкнення в пусковому та робочому режимах.

Розроблено та змонтовано експериментальні установки для вимірювання характеристик ПТ струму в схемах стартерного та безстартерного ввімкнення люмінесцентних ламп, за допомогою яких досліджувалися характеристики п'єзотрансформаторів струму.

Розроблено схему високочастотного перетворювача, який забезпечує надійне функціонування ПТ в усіх можливих режимах його роботи (холостий хід, коротке замикання, режим максимального ККД); розроблено методику розрахунку конструктивних та електричних параметрів п'єзотрансформатора, що може бути рекомендована для розрахунку параметрів п'єзотрансформатора з нелінійним навантаженням, яким є люмінесцентна лампа.

Проведено експериментальні дослідження впливу зміни параметрів навантаження, напруги та частоти джерела живлення, температури довкілля на параметри п'єзотрансформатора.

Удосконалено математичну модель п'єзоелектричного трансформатора, яка базується на експериментально визначених характеристиках нелінійного чотириполюсника, що дозволило розробити методику розрахунку параметрів комплексу ПТ–ЛЛ у пусковому та робочому режимах.

Ключові слова: напівпровідниковий пускорегулюючий апарат, люмінесцентна лампа, п'єзоелектричний трансформатор, секції п'єзотрансформатора, нелінійне навантаження п'єзотрансформатора, математична модель п'єзотрансформатора, конструкція НППРА.

Аннотація

Белякова И.В. Моделирование и расчет пьезотрансформаторов, нагруженных люминесцентной лампой. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.07 – светотехника и источники света. – Тернопольский национальный технический университет им. Ивана Пулюя, – Тернополь, 2012.

В диссертации проведены исследования для создания высокочастотного полупроводникового пускорегулирующего аппарата (ППРА) на базе пьезоэлектрического трансформатора тока (ПТ), а также разработана методика расчета, учитывающая как особенности самого ПТ, так и его нелинейной нагрузки, которой является люминесцентная лампа (ЛЛ) мощностью 4 ... 18 Вт в схемах стартерного и безстартерного включения в пусковом и рабочем режимах работы.

Разработаны и смонтированы экспериментальные установки для измерения характеристик ПТ тока в схемах стартерного и безстартерного включения люминесцентных ламп, с помощью которых исследовались характеристики пьезотрансформаторов тока.

Разработана схема высокочастотного преобразователя, который обеспечивает надежное функционирование ПТ во всех возможных режимах его работы (холостой ход, короткое замыкание, режим максимального КПД); разработана методика расчета конструктивных и электрических параметров пьезотрансформатора, которая может быть рекомендована для расчета параметров пьезотрансформатора с нелинейной нагрузкой, которой является люминесцентная лампа.

Проведены экспериментальные исследования влияния изменения параметров нагрузки, напряжения и частоты источника питания, температуры окружающей среды на параметры пьезотрансформатора.

Разработаны принципы построения ППРА для ЛЛ на основе пьезотрансформаторов тока, которые позволяют повысить эффективность и экономичность электронных балластов.

Усовершенствована математическая модель пьезоэлектрического транс-

форматора, которая базируется на экспериментальных характеристиках нелинейного четырехполюсника, что позволило разработать методику расчета параметров комплекта ПТ-ЛЛ в пусковом и рабочем режимах работы.

Впервые дано математическое обоснование возникновения нелинейных функциональных зависимостей параметров пьезотрансформатора, нагруженного люминесцентной лампой.

Ключевые слова: полупроводниковый пускорегулирующий аппарат, люминесцентная лампа, пьезоэлектрический трансформатор, секции пьезотрансформатора, нелинейная нагрузка пьезотрансформатора, математическая модель пьезотрансформатора, конструкція ППРА.

Summary

Belyakova I. Simulation and calculation of piezoelectric transformers, loaded with fluorescent lamps. - Manuscript.

Thesis to attain a Doctor of Philosophy (science) degree, specialty code 05.09.07 - Lighting and Light Sources. Ternopil State Technical University named after Ivan Pul'uj, Ternopil, 2012.

In this work the studies of high-frequency semiconductor starter devices, based on piezoelectric current transformers, were undertaken, and the method of calculation was devised, which takes into account both - properties of the piezoelectric transformer and its non-linear load (which is a fluorescent lamp) during launch and in operational modes, with and without starter arrangements.

The experimental equipment for measuring the properties of piezoelectric transformer and currents it produces, in arrangement with and without a starter, was designed and constructed.

The scheme for high-frequency transducer was devised, which provides reliable operation of piezoelectric transformer in all possible modes of operation (idling, short circuit, the regime of maximum efficiency); the method of calculation of structural and electrical properties of piezoelectric transformer was also developed, which could be recommended for calculating the properties of piezoelectric transformer with non-linear load (e.g. fluorescent lamp).

Experimental studies of the impact the change in load, current, frequency of power source and ambient temperature has on the properties of piezoelectric transformer have been conducted.

The mathematical model of piezoelectric transformer has been improved, which is based on the properties of non-linear quadripole that have been established by the experiment. This has enabled to develop the methodology for calculation of the parameters of combination of piezoelectric transformer and fluorescent lamp during launch and in operational modes.

Keywords: solid-state ballasts, fluorescent lamp, piezoelectric transformer, segments of piezoelectric transformer, non-linear load of piezoelectric transformer, mathematical model of piezoelectric transformer, composition of ballast.