МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. Ю.М. Потебні

Кафедра Електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення

ЗВІТ З ВИРОБНИЧОЇ ПРАКТИКИ 1 (ППС 5)

термін з 20 листопада 2023 р. по 17 грудня 2023 р.

на (в) Приватне підприємство «Науково-виробнича комерційна фірма «ЕКОТЕХ»
(найменування бази практики)

Виконав (ла)
студ. гр. 8.1713 _____ **Шляховський С.Ю.**
(шифр групи) (підпис) (призвище, ініціали)

Керівник практики від підприємства
заступник директора _____ **Шершов С.А.**
(посада) (підпис) (призвище, ініціали)

Керівник практики від кафедри
викладач _____ **Туришев К.О.**
(посада) (підпис) (призвище, ініціали)

Члени комісії
професор _____ **Алексієвський Д.Г.**
(посада) (підпис) (призвище, ініціали)
проф. зав. каф. _____ **Критська Т.В.**
(посада) (підпис) (призвище, ініціали)

Оцінка		
За шкалою ВНЗ	За шкалою ECTS	За нац. шкалою

Залікова оцінка з практики

Запоріжжя
2023

РЕФЕРАТ

Звіт з виробничої практики (ППС 5) містить: 28 стор., 14 рис., 1 табл., 11 джерел літератури.

РЕЗОНАНС, ДОБРОТНІСТЬ, РЕЗОНАНСНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, РЕЗОНАНСНА ЧАСТОТА, СНАББЕР, РЕЛЕЙНЕ РЕГУЛЮВАННЯ, ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНЕ РЕГУЛЮВАННЯ, ПП НВКФ «ЕКОТЕХ»

У ході практики розглянуті історія заснування підприємства ПП НВКФ «ЕКОТЕХ», продукція, що виробляється підприємством, основна елементна база, що використається при виробництві продукції та питання охорони праці на підприємстві.

В якості індивідуального завдання виконані:

- аналіз явища резонансу в електричних ланцюгах;
- аналіз пристрою та переваг резонансного перетворювача з шунтуючим дроселем;
- аналіз загальнодоступної літератури на тему диплома;
- аналіз ринку резонансних перетворювачів.

ЗМІСТ

		Стор.
	Вступ	4
1	Аналіз явища резонансу в електричних ланцюгах	5
2	Аналіз пристрою та переваг резонансного перетворювача з шунтуючим дроселем	8
3	Аналіз принципів роботи резонансних перетворювачів	11
3.1	Розрахунок втрат у резонансних перетворювачах при режимах неперервних і розривних струмів.	11
3.2	Розрахунок характеристик послідовно-резонансного перетворювача з релейним регулюванням.	13
3.3	Резонансний перетворювач з широтно-імпульсним регулюванням вихідної напруги.	18
4	Аналіз ринку резонансних перетворювачів.	24
	Висновки.	27
	Список використаних джерел.	28

ВСТУП

Виробнича практика – це обов'язкова складова освітнього процесу, необхідна підготовка кваліфікованих працівників, яка дозволяє добре орієнтуватися не лише у профільній теорії, а й у реаліях трудових буднів. Цей етап навчання зазвичай здійснюється поза стінами вузу – на базі установ, що відповідають майбутній спеціальності студента. Перенесення навчального процесу в умови, максимально схожі зі станом майбутньої професійної діяльністю студента – обов'язковий етап на шляху здобуття вищої освіти.

Метою виробничої практики є систематизація, узагальнення та поглиблення теоретичних знань, формування практичних умінь, загальнокультурних, професійних компетенцій та професійних компетенцій профілю на основі вивчення роботи організацій, у яких студенти проходять практику.

Завданнями виробничої практики є:

– оволодіння професійними навичками роботи та вирішення практичних завдань;

– набуття студентами практичного досвіду роботи у колективі;

– вивчення та аналіз зовнішніх та внутрішніх умов діяльності компанії.

Місце проходження практики – компанія ПП «НВКФ «Екотех» — українська інжинірингова компанія, основною діяльністю якої є розробка та виробництво оптоелектронних енергозберігаючих систем освітлення, світлової індикації та сигналізації; систем обліку електроенергії та управління її споживанням; генераторів озону побутового та промислового призначення.

Під час проходження практики мали змогу детально ознайомитись із структурою компанії, прийняти участь у різних етапах виробництва та здобути нові знання та практичні навички.

1 АНАЛІЗ ЯВИЩА РЕЗОНАНСУ В ЕЛЕКТРИЧНИХ ЛАНЦЮГАХ

Резонанс – це явище різкого зростання амплітуди вимушених коливань системи, що настає при наближенні частоти зовнішнього впливу до певних значень (резонансних частот), обумовлених властивостями системи. Таким чином, причиною резонансу є збіг зовнішньої (збуджуючої) частоти з внутрішньою (власною) частотою коливальної системи [1].

Резонанс зустрічається у механіці, електроніці, оптиці, акустиці, астрофізиці.

Явище резонансу лежить в основі проектування музичних інструментів: роялю, скрипки, флейти тощо.

Резонансна частота — частота сили, що вимушує, яка рівна власній частоті коливальної системи, при якій досягається максимальна амплітуда.

Резонанс виникає у будь-яких пружних середовищах: твердих, рідких та газоподібних, головне – це наявність резонансної частоти.

Електричний резонанс – це збільшення струмів і напруг на окремих ділянках ланцюга при зміні частоти гармонійного сигналу. Електричний резонанс відбувається, коли в ланцюзі, що містить індуктивності та ємності, струм збігається по фазі з напругою [2].

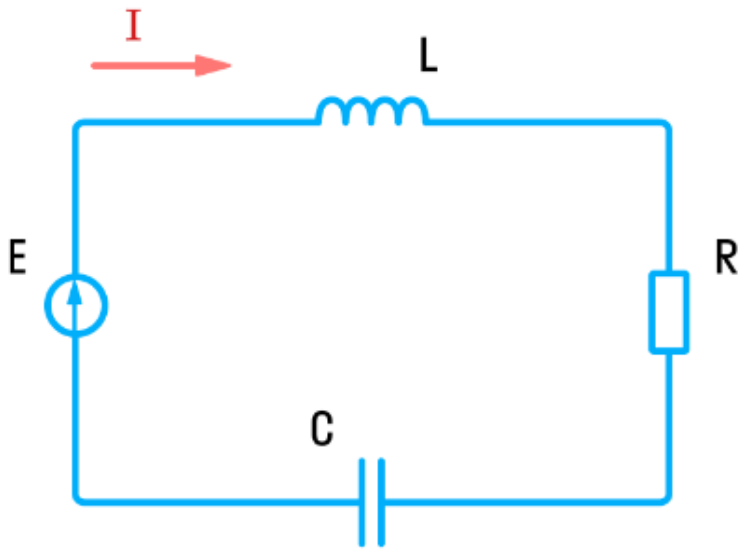

Рисунок 1.1 – Схема послідовного резонансного контуру.

Резонанс в електричних ланцюгах виникає при обміні енергією між ємнісними елементами - конденсаторами та індуктивними елементами - котушками, які включені в цей ланцюг. Амплітуда досягає максимального значення на певній частоті, коли індуктивна та ємнісна складові системи врівноважені, і енергії можуть вільно циркулювати між магнітним полем котушки та електричним полем конденсатора. Магнітне поле індуктивного елемента породжує електричний струм, що заряджає конденсатор, а розрядка конденсатора створює магнітне поле в котушці. Цей процес здатний повторюватися багаторазово.

Умову виникнення резонансу в електричному ланцюзі можна виразити формулою:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

де ω_0 - резонансна частота,

L - індуктивність котушки,

C - ємність конденсатора.

Розрізняють резонанс струмів (при паралельному з'єднанні котушки та конденсатора) та резонанс напруг (при послідовному з'єднанні елементів).

Явище резонансу напруг використовується у техніці для посилення коливань напруги будь-якої певної частоти [3].

Явище резонансу струмів використовується в резонансних підсилювачах, що дозволяє виділити одне певне коливання з сигналу складної форми.

На принципах електричного резонансу функціонують такі прилади, як електричні резонансні трансформатори, котушка Тесла та багато сучасних електронних пристроїв.

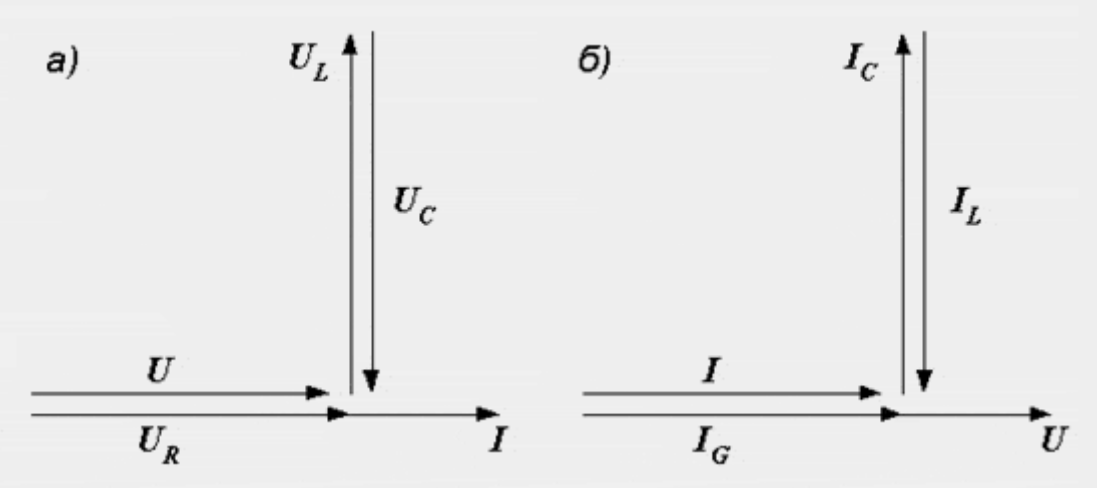

Рисунок 1.2 – Векторні діаграми при резонансі напруг(а) та струмів(б).

Напруги на індуктивності та ємності можуть значно перевищувати напруги на вході ланцюга. Їхнє відношення, зване добротністю контуру Q, визначається величинами індуктивного (або ємнісного) та активного опорів:

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{X_{L\,\text{рез}}}{R} = \frac{X_{C\,\text{рез}}}{R}$$

Добротність показує, у скільки разів напруги на індуктивності і ємності при резонансі перевищують напругу, прикладену до ланцюга [4]. У радіотехнічних ланцюгах вона може досягати кількох сотень одиниць.

2 АНАЛІЗ ПРИСТРОЮ ТА ПЕРЕВАГ РЕЗОНАНСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З ШУНТУЮЧИМ ДРОСЕЛЕМ

Спроби отримати щільність потужності імпульсного джерела живлення, що постійно зростає, були обмежені розміром пасивних компонентів. Робота на вищих частотах значно зменшує розміри пасивних компонентів, таких як трансформатори та фільтри; однак втрати на перемикання були перешкодою для роботи на високих частотах. Щоб зменшити втрати на перемикання та забезпечити роботу на високих частотах, були розроблені методи резонансного перемикання. Ці методи обробляють потужність синусоїдально, а пристрої, що перемикають, м'яко комутуються. Таким чином, втрати на перемикання та шум можуть бути значно зменшені [5].

Серед різних типів резонансних перетворювачів найпростішим і найпопулярнішим резонансним перетворювачем є резонансний перетворювач серії LC, в якому мережа навантаження випрямляча включена послідовно з резонансним ланцюгом LC, як показано на рис. 2.1. У цій конфігурації резонансна мережа та навантаження діють як дільник напруги. При зміні частоти збудливої напруги Vd змінюється опір резонансного кола. Вхідна напруга ділиться між цим опором та відбитим навантаженням. Оскільки це дільник напруги, коефіцієнт посилення постійного струму резонансного перетворювача LC-серії завжди <1. У разі малого навантаження імпеданс навантаження дуже великий проти імпедансом резонансної мережі; вся вхідна напруга покладається на навантаження. Це ускладнює регулювання потужності при невеликому навантаженні. Теоретично частота має бути нескінченною, щоб регулювати вихідну потужність без навантаження.

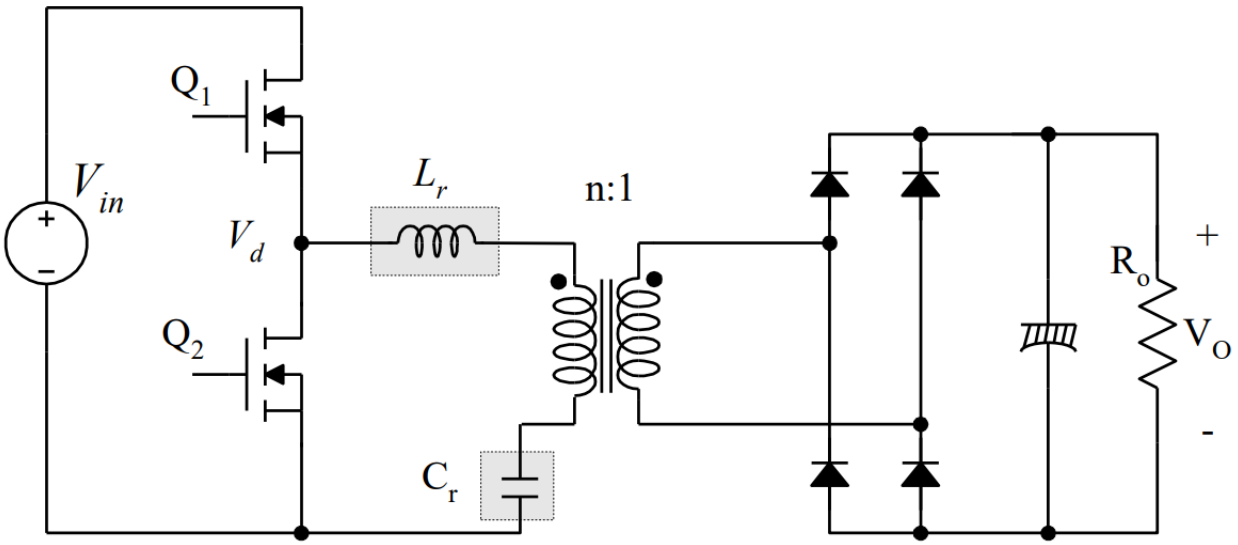

Рисунок 2.1 – Напівмостовий послідовний LC резонансний перетворювач.

Щоб подолати обмеження послідовних резонансних перетворювачів, було запропоновано резонансний перетворювач LLC [5]. Резонансний перетворювач LLC являє собою модифікований резонансний перетворювач серії LC, реалізований шляхом розміщення шунтуючого індуктора на первинній обмотці трансформатора, як показано на рис. 2.2. Коли ця топологія була вперше представлена, їй не було приділено особливої уваги через суперечливу концепцію, згідно з якою збільшення циркуляції струму в первинній обмотці за допомогою індуктора, що шунтує, може бути корисно для роботи схеми. Тим не менш, він може бути дуже ефективним у підвищенні ефективності для застосування високої вхідної напруги, де втрати на перемикання набагато більші домінують, ніж втрати провідності.

У більшості практичних проектів цей індуктор, що шунтує, реалізується з використанням індуктивності намагнічування трансформатора. Принципова схема резонансного перетворювача LLC виглядає майже так само, як резонансний перетворювач серії LC: єдина відмінність полягає в номіналі індуктора, що намагнічує. Хоча послідовний резонансний перетворювач має індуктивність намагнічування набагато більшу, ніж резонансний індуктор серії LC (Lr), індуктивність намагнічування в резонансному перетворювачі

LLC становить всього в 3-8 разів більше Lr, що зазвичай досягається шляхом введення повітряного зазору в трансформаторі.

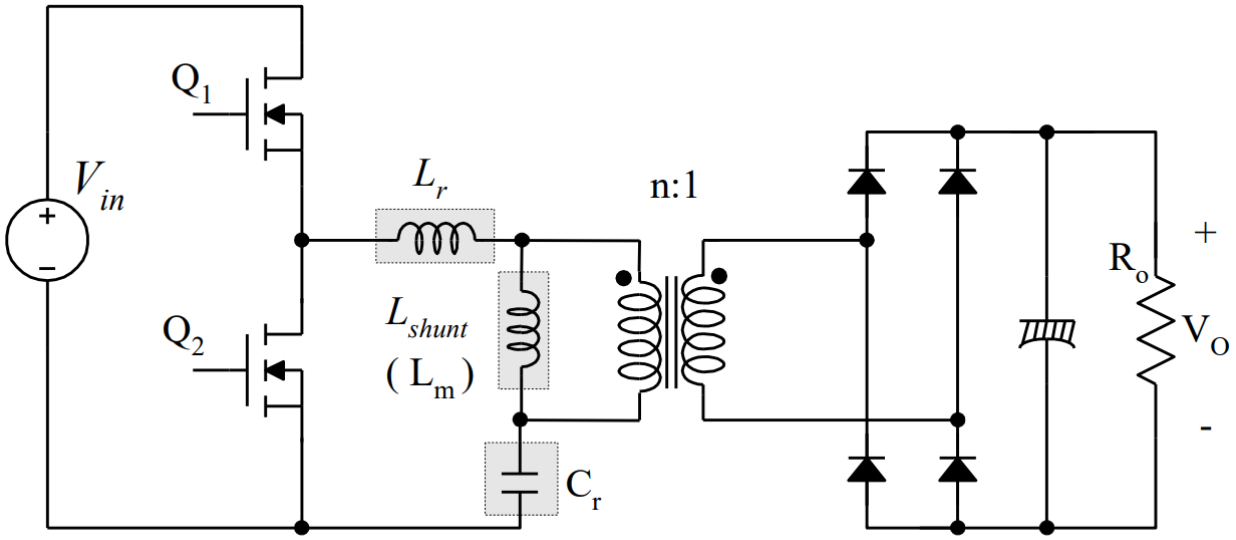

Рисунок 2.2 – Напівмостовий LLC резонансний перетворювач.

Резонансний перетворювач LLC має безліч переваг перед послідовним резонансним перетворювачем; він може регулювати вихід у широкому діапазоні коливання навантаження та напруги лінії з відносно малою зміною частоти перемикання. Він може забезпечити перемикання при нульовій напрузі (ZVS) у всьому робочому діапазоні. Для досягнення м'якого перемикання використовуються всі основні паразитні елементи, включаючи ємності переходу всіх напівпровідникових приладів, а також індуктивність розсіювання та індуктивність трансформатора намагнічування.

3 АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ РОБОТИ РЕЗОНАНСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

3.1 Розрахунок втрат у резонансних перетворювачах при режимах неперервних і розривних струмів [6]

У статті Харківського національного університету радіоелектроніки сказано, що основною відмінністю резонансних перетворювачів від перетворювачів з жорстким перемиканням силових ключів є застосування в силовому каскаді індуктивних і ємнісних елементів, які, утворюючи резонансний контур із власною частотою, вищою, ніж частота комутації, створюють квазігармонічну форму струму, в якій завжди існують моменти нульового значення струму та напруги [6].

Для зниження динамічних втрат та захисту силових ключів використовуються спеціальні ланцюги, що містять реактивні елементи, які коригують форму траєкторії переміщення робочої точки з метою недопущення її виходу за межі області безпечної роботи (ОБР).

Цель роботи – з'ясувати, наскільки виправдано застосування ланцюгів корекції, які керують переміщенням робочої точки транзистора для підвищення ефективності перетворення [6].

На початку наводиться математичний опис досліджуваних процесів.

Для цього береться типове виконання силового каскаду резонансного перетворювача електричної енергії, яке приведено на рис. 3.1.

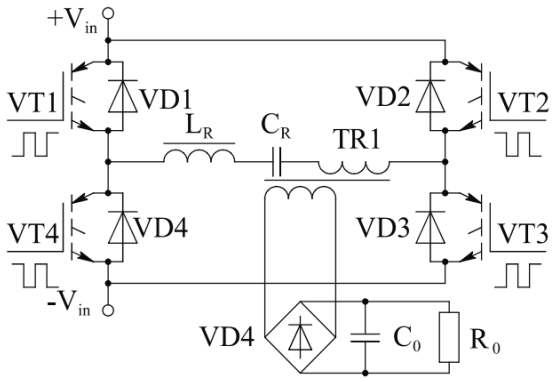

Рисунок 3.1 – Схема силового каскаду резонансного перетворювача.

Задаються такими спрощеннями:

- силові ключі, інверсні діоди та трансформатор – ідеальні;

- ємність конденсатора C0 нескінченно велика;

- напруга на навантаженні R0 постійна.

Дослідження проводиться для двох режимів роботи перетворювача:

1. Режим розривних струмів, при якому частота комутації транзисторів менша за половину власної резонансної частоти LC-ланцюга;

2. Режим нерозривних струмів, при якому частота комутації транзисторів більша або дорівнює половині власної резонансної частоти LC-ланцюга.

Також методом моделювання перевірено ефективність застосування снабберів струму. Отримані форми струмів та напруг показані на рис. 3.2.

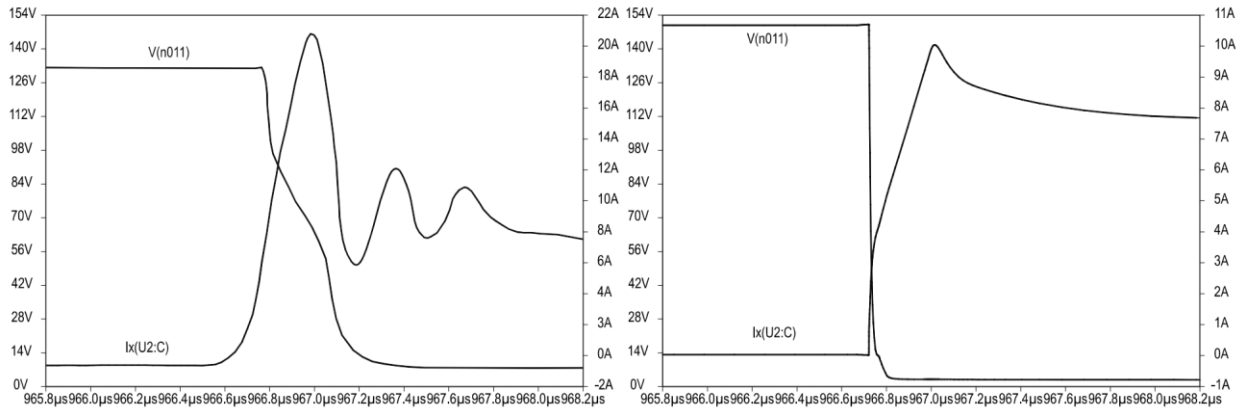

Рисунок 3.2 – Форми струму та напруги на транзисторі при включенні без снаббера (а) та зі снаббером струму (б).

В результаті досліджень встановлено, що втрати для резонансних перетворювачів у режимі безперервних струмів значно перевищують втрати в режимі розривних струмів за рахунок більшої величини втрат на резонансному дроселі та трансформаторі. Отже, резонансні перетворювачі в ряді випадків можуть виявитися досить неефективними через різке збільшення середньоквадратичного значення комутованого струму [6].

Результат моделювання показав, що застосування снабберів дозволило підвищити ефективність перетворювача лише на 1,8 %, що значно менше реального мінімуму для перетворювачів із жорстким перемиканням силових ключів. Ефективність застосування снабберів у резонансних перетворювачах напруги є неоднозначною. Отриманий результат може вважатися позитивним лише для перетворювачів великої потужності, наприклад, для зварювальних інверторів.

3.2 Розрахунок характеристик послідовно-резонансного перетворювача з релейним регулюванням [7]

У статті Миколаївського національного університету кораблебудування сказано, що резонансні перетворювачі електроенергії містять у своїх силових схемах ланцюги з ємностями та індуктивностями, у яких під час роботи перетворювача виникають резонансні явища, що сприяють формуванню синусоїдальних струмів та напруг у навантаженнях інвертора. У перетворювачах постійної напруги резонансні явища використовуються головним чином для зменшення комутаційних втрат у силових вентилях [7]. У двотактних схемах інверторів перетворювачів істотне зниження комутаційних втрат у транзисторах має місце за рівності частоти комутації резонансної частоти силового контуру. В інверторі з паралельним контуром стає можливою комутація транзисторів в нулі напруги, в інверторі з послідовним контуром - в нулі струму. У системах живлення часто використовують перетворювачі, що містять інвертори з послідовними контурами - послідовно-резонансні перетворювачі (ПРП), оскільки в них легше забезпечити захист від перевантажень [7].

При досить великому відношенні робочої частоти перетворювача до частот реакції навантаження можна регулювати потужність перетворювача шляхом введення частих і короткочасних переривань у роботі інвертора, що тривають від одного до декількох періодів комутації. Тривалість переривань

змінюється під час регулювання потужності, а частота резонансних коливань залишається незмінною. Таким чином, забезпечуються умови зниження втрат в транзисторах інвертора. Як регулятор може бути використаний релейний елемент, тому спосіб регулювання потужності в цьому випадку буде релейним.

Метою статті є отримання статичних характеристик ПРП, визначення факторів, що впливають на лінійність регулювання, та з'ясування основних переваг та недоліків релейного регулювання.

Схема силової частини ПРП на рис. 3.3 містить мостовий інвертор на транзисторах V1–V4, підключений до первинного джерела живлення з напругою Un, резонансний LCr-ланцюг (РЦ), випрямний міст на діодах V5–V7 та споживач енергії, представлений у вигляді джерела напруги Uн . Мостовий інвертор автономно генерує змінну напругу u_g прямокутної форми з величиною, що близька до напруги живлення Un . До виходу інвертора підключено послідовний резонансний контур, утворений РЦ та випрямлячем з навантаженням. Контур настроєно на робочу частоту інвертора [7].

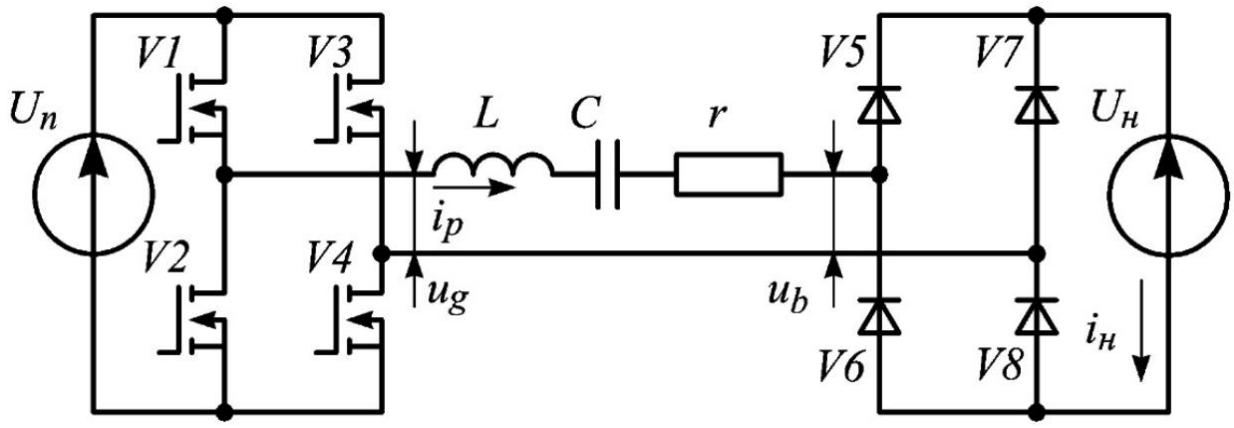

Рисунок 3.3 – Схема силової частини ПРП.

Принцип релейного регулювання тут полягає у періодичному включенні та виключенні режиму генерації прямокутної напруги інвертором ПРП, що впливає на РЦ з випрямлячем та навантаженням. Амплітуда резонансних

коливань, що виникають при цьому, буде наростати в режимі генерації інвертора і спадати при його виключенні. Середня потужність буде залежати від відносної тривалості роботи інвертора протягом кожного періоду регулювання.

Період регулювання, таким чином, містить два етапи: робочий режим інвертора, умовно етап G (generation - генерування), та режим зупинки інвертора і забезпечення близького до нуля напруги на його виході, умовно етап D (dissipation, dispersion - розсіювання). Порядок включення транзисторів протягом одного періоду перетворення повинен забезпечуватись локальною системою управління інвертором ПРП, як показано в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Порядок включення вентилів інвертора

Полярність напівперіоду струму	Режим роботи інвертора	
	G - генерація	D - розсіювання
Позитивна	V1, V4, V5, V8	V1, V3, V5, V8
Негативна	V2, V3, V6, V7	V2, V4, V6, V7

На рис. 3.4 представлена еквівалентна схема ПРП, що пояснює принцип релейного регулювання. У схемі інвертор І заміщений джерелом прямокутної напруги u_g та керованим комутатором режимів інвертора.

Увімкненням і вимкненням інвертора управляє регулятор - релейний елемент РЕ, що реагує на різницю між напругою $u_{зад}$, що задає, і напругою навантаження. Якщо на етапі G вихідна напруга перевищить верхній поріг стабілізації, регулятор вимкне інвертор. Коли вихідна напруга стане меншою від нижнього порога стабілізації, інвертор знову включиться. Для нормальної роботи перетворювача гістерезис регулятора повинен бути порівняним або більшим за розмах пульсацій вихідної напруги, викликаних резонансними коливаннями. Тригер Т синхронізується з роботою інвертора і служить для коректного перемикання режимів. Тоді період регулювання вміщатиме ціле число m напівперіодів коливань:

$$T_m = \frac{T \cdot m}{2},$$

де $T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_1}$ – період вільних коливань;

ω_1 – кутова частота коливань.

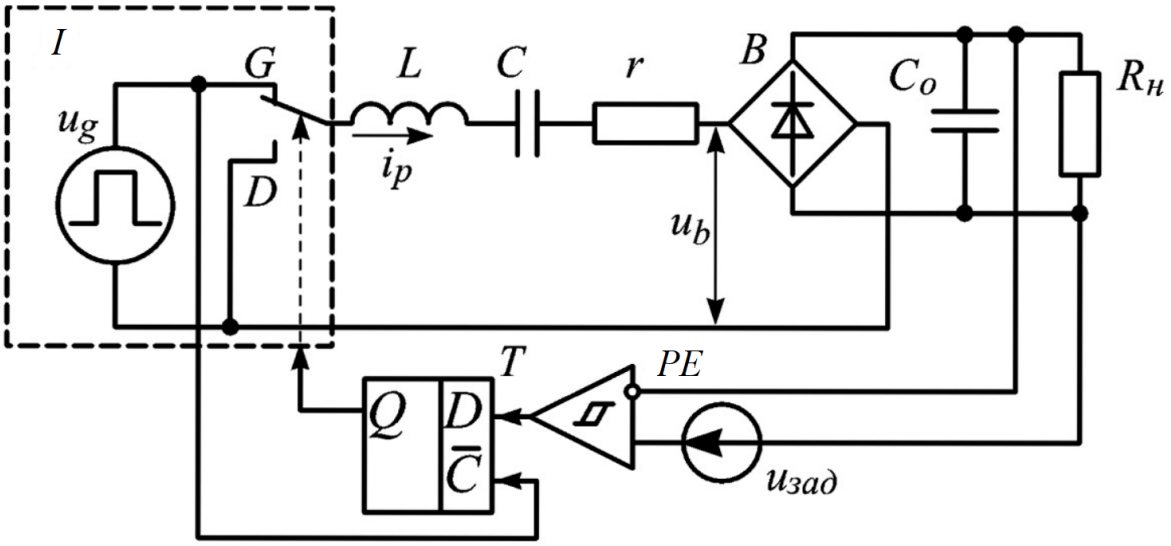

Рисунок 3.4 – еквівалентна схема ПРП.

Число напівперіодів коливань, що входять до етапу G, позначається як n. Як показник регулювання введено коефіцієнт $\gamma_m = \frac{n}{m}$, аналогічний відносної тривалості відбору енергії від джерела живлення імпульсних перетворювачах. При постійному періоді регулювання m = const і $\gamma_m < 1$ на етапі D резонансні коливання можуть припинитися раніше чергового включення інвертора. З'явиться пауза в резонансних коливаннях, або, іншими словами, настане режим переривчастих коливань. Якщо коливання не встигають згасати протягом періоду регулювання, ПРП працює у режимі безперервних коливань, що ілюструється на рис. 3.5 [7].

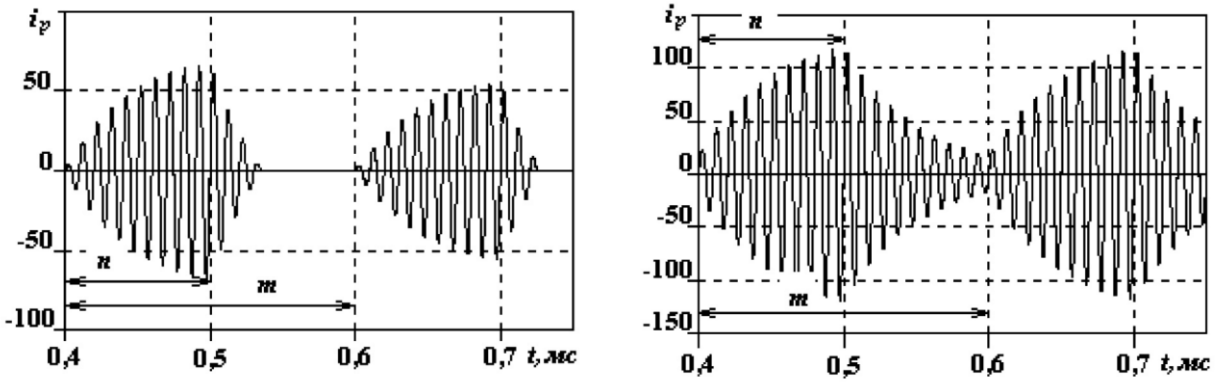

Рисунок 3.5 – Епюри резонансних коливань струму контуру ПРП у режимах переривчастих (а) та безперервних (б) коливань.

Методом математичного опису процесів силової схеми ПРП було побудовано сімейства регулювальних та зовнішніх характеристик перетворювача, що дозволило зробити наступні висновки [7]:

1. Релейне регулювання забезпечує близькі до лінійних регулювальні характеристики при постійному періоді регулювання та змінної тривалості етапу генерації G. Чим більша добротність контуру, тим вища лінійність регулювання. Зовнішні характеристики подібні до характеристик широтно-імпульсних перетворювачів.

2. Чим менше період регулювання m, тим менше впливає добротність контуру на лінійність регулювальних характеристик ПРП. Однак зменшення періоду m означає зменшення плавності регулювання, оскільки тривалість n етапу G може змінюватись лише дискретно в діапазоні 0…m за цілими значеннями. При деяких значеннях напруги можуть виникнути субгармонічні пульсації на виході.

3. Перевагою розглянутого релейного регулювання є відсутність спеціальних заходів для забезпечення стійкості регулювання зі зворотним зв'язком та висока швидкодія регулювання. Недолік - зменшення частоти пульсацій зі збільшенням періоду регулювання m, що веде до обтяження фільтра, що згладжує, на виході. Тому ПРП з релейним регулюванням

переважно використовувати для інертних споживачів, некритичних до пульсацій, наприклад електроприводів.

3.3 Резонансний перетворювач з широтно-імпульсним регулюванням вихідної напруги [8]

У статті Самарського національного дослідницького університету імені академіка С.П. Корольова сказано, що резонансний перетворювач нормально працює і має хороші властивості, якщо тривалість збудливих імпульсів з точністю до «мертвого часу» дорівнює напівперіоду коливань моста. При зміні тривалості цих імпульсів (наприклад, з метою регулювання вихідної напруги) "мертвий час" збільшується і режим коливань порушується [8].

Фірмою Texas Instruments запропоновано фазовий спосіб регулювання напруги резонансного перетворювача [9]. При цьому тривалість збудливих імпульсів не змінюється, а змінюється фаза між імпульсами лівої пари щодо імпульсів правої пари ключів моста. Тривалість імпульсів на виході мосту пропорційна зсуву фаз. При цьому вільні коливання не порушуються. Недоліком є те, що при зрушенні фаз "мертвий час" перериває струм ключів, що може порушити процес регулювання.

Вважається, що ШІМ регулювання резонансного перетворювача, тобто регулювання шляхом зміни «мертвого часу», неможливе, оскільки порушує коливальний процес у системі. Але виявилося, що ШІМ регулювання можливе, якщо вжити відповідні заходи для забезпечення вільних коливань.

Метою статті є дослідження резонансного перетворювача з ШІМ регулюванням вихідної напруги.

На рис. 3.6 представлена силова частина резонансного перетворювача [8]. Вона містить міст на чотирьох ключах VT1-VT4 зі зворотними діодами VD1-VD4; коливальний ланцюг, що складається з послідовного L1,C1,R та паралельного L2,C2,R контурів, і трансформатор Тр з навантаженням R. Зворотні діоди, разом з іншими заходами, служать не тільки для захисту

активних елементів, але й забезпечують вільні коливання при вимкненні ключів. Коливальний ланцюг – смуговий фільтр четвертого порядку з гарною вибірковістю та малим навантаженням реактивних елементів (добротність ланок Q = 1,5…2). Фільтр також забезпечує слабку залежність напруги від величини навантаження. Паралельний контур утворений з індуктивності трансформатора L2 і лише однієї додаткової ємності C2, тобто з малими витратами, порівняно з відомими схемами. Крім того, для забезпечення вільних коливань одна пара ключів (верхня або нижня) – регульована, а друга пара (нижня або верхня) – нерегульована.

Тривалість нерегульованих імпульсів дорівнює напівперіоду резонансних коливань $T_0/2$ і на величину «мертвого» часу менше напівперіоду коливань моста T/2 (як для нерегульованого перетворювача).

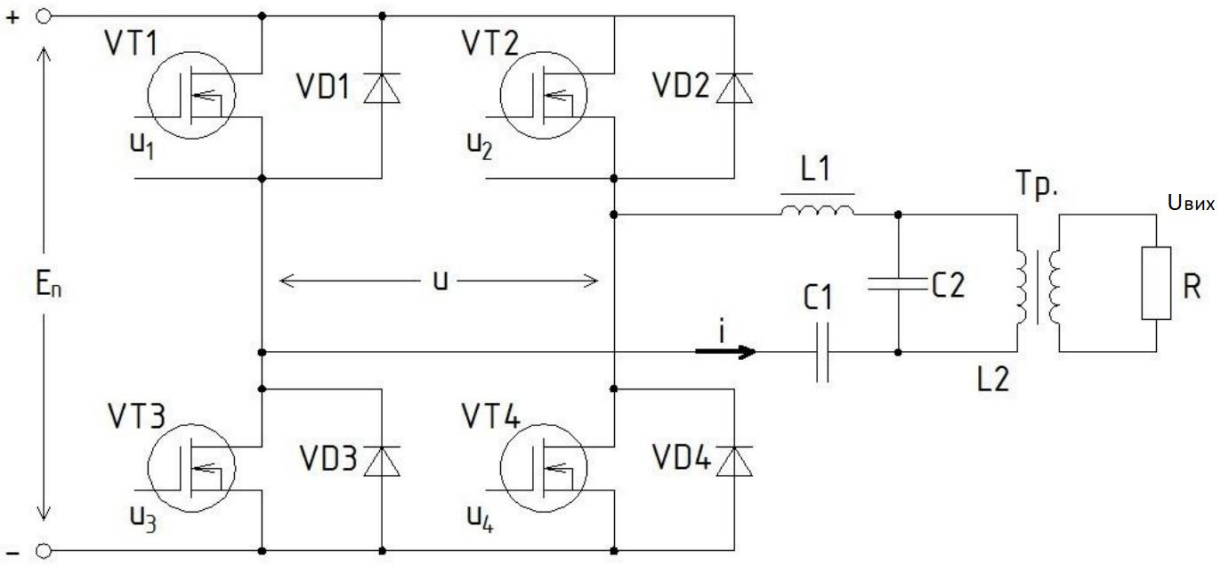

Рисунок 3.6 – Схема силової частини резонансного перетворювача напруги.

Залежно від розташування імпульсів на часовій осі існує два способи керування:

1. У всіх імпульсів збігаються передні фронти.

2. Усі імпульси центровані.

Робота перетворювача за першим способом управління пояснюється діаграмами (рис. 3.7). Ключі VT1, VT2 – регульовані та тривалість імпульсів u_1, u_2 – змінна (τ); ключі VT3, VT4 – нерегульовані та тривалість імпульсів u_3, u_4 – максимальна (T_0). u – напруга та i – струм на виході мосту (на вході коливального ланцюга), $u_{вих}$ – вихідна напруга перетворювача на навантаженні R. t_M – «мертвий час», тобто час, протягом якого всі транзистори у схемі закриті [8].

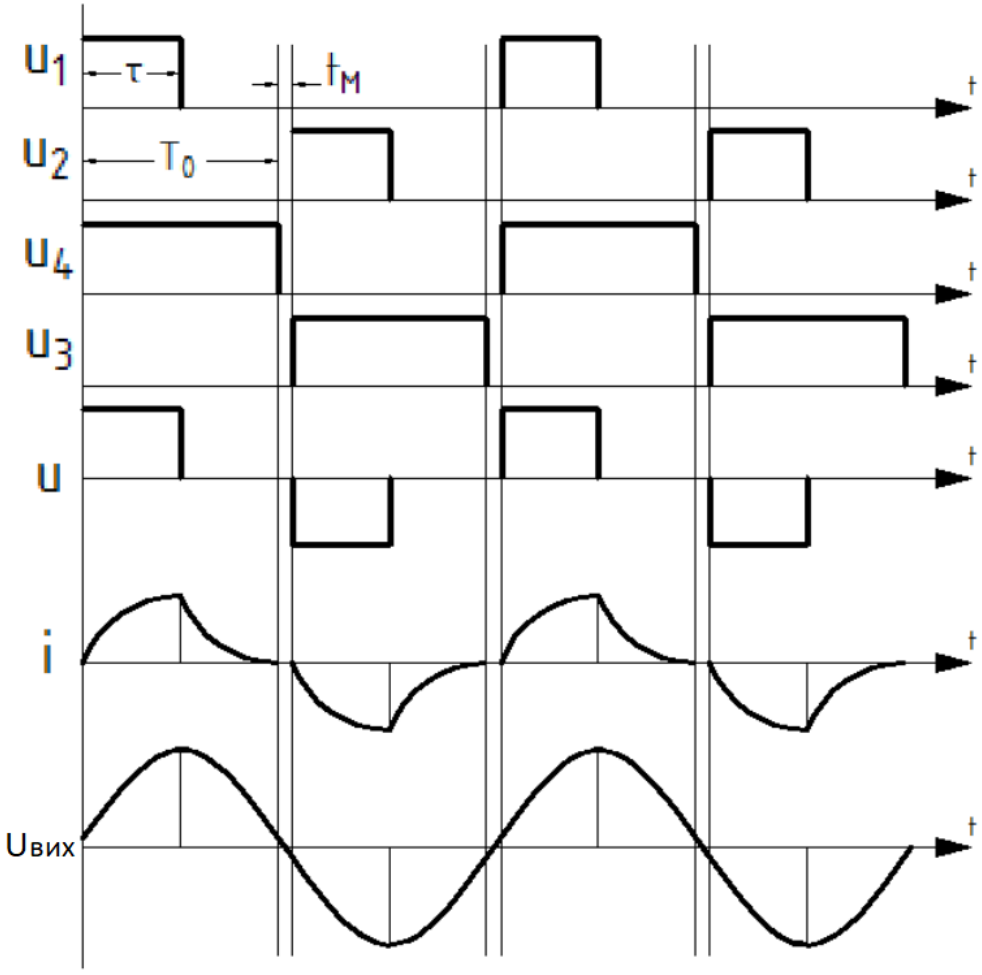

Рисунок 3.7 – Тимчасові діаграми перетворювача напруги з керуванням за першим способом.

Робота перетворювача відбувається наступним чином. У першому напівперіоді та інших непарних напівперіодах включені ключі VT1 і VT4. У результаті на коливальний ланцюг КЦ надходить регульований імпульс

напруги u. Цей імпульс можна представити як суму двох стрибків напруги нескінченної тривалості. При подачі позитивного стрибка напруги на вхід КЦ у ній виникають вимушені коливання та струм і наростає за гармонійним законом. З появою негативного стрибка напруги в ланцюзі КЦ – VT4 – VD3 – КЦ виникають вільні коливання і струм i зменшується за гармонійним законом до нуля. Це відбувається за будь-якої тривалості регулюючих імпульсів. У другому напівперіоді та інших парних напівперіодах те саме відбувається при включенні ключів VT2 і VT3 [8].

Вільні коливання у схемі не перериваються, а перемикання проводяться за нульовим струмом. Представлені імпульси струму ефективно фільтруються коливальним ланцюгом і на виході КЦ маємо гармонійну напругу з амплітудою, пропорційною тривалістю регульованих імпульсів.

Робота перетворювача за другим способом управління пояснюється часовими діаграмами (рис. 3.8). Ключі VT1, VT2 – регульовані та тривалість імпульсів u_1, u_2 – змінна (τ); ключі VT3, VT4 – нерегульовані та тривалість імпульсів u_3, u_4 – максимальна (T0). Усі імпульси центровані.

Робота перетворювача відбувається наступним чином. При включенні регулюючих та інших ключів у порядку, показаному на діаграмах (рис. 3.8), на вході коливального ланцюга отримуємо імпульсну напругу u з центрованими щодо напівперіодів імпульсами. Цю напругу можна представити у вигляді суми непарних гармонік – 1,3,5… Коливальний ланцюг пропускає у навантаження лише першу гармоніку напруги, в результаті маємо лише струм першої гармоніки i. При відключенні керуючих ключів у першому та інших непарних напівперіодах струм КЦ не переривається і проходить шляхом КЦ – VT4 – VD3 – КЦ, а при відключенні регулюючих ключів у другому та інших парних напівперіодах струм проходить шляхом КЦ – VT3 – VD4 – КЦ. Таким чином, у перетворювачі напруги з управлінням по другому способу маємо відповідні налаштуванням коливального ланцюга гармонійні струм і напругу на її виході.

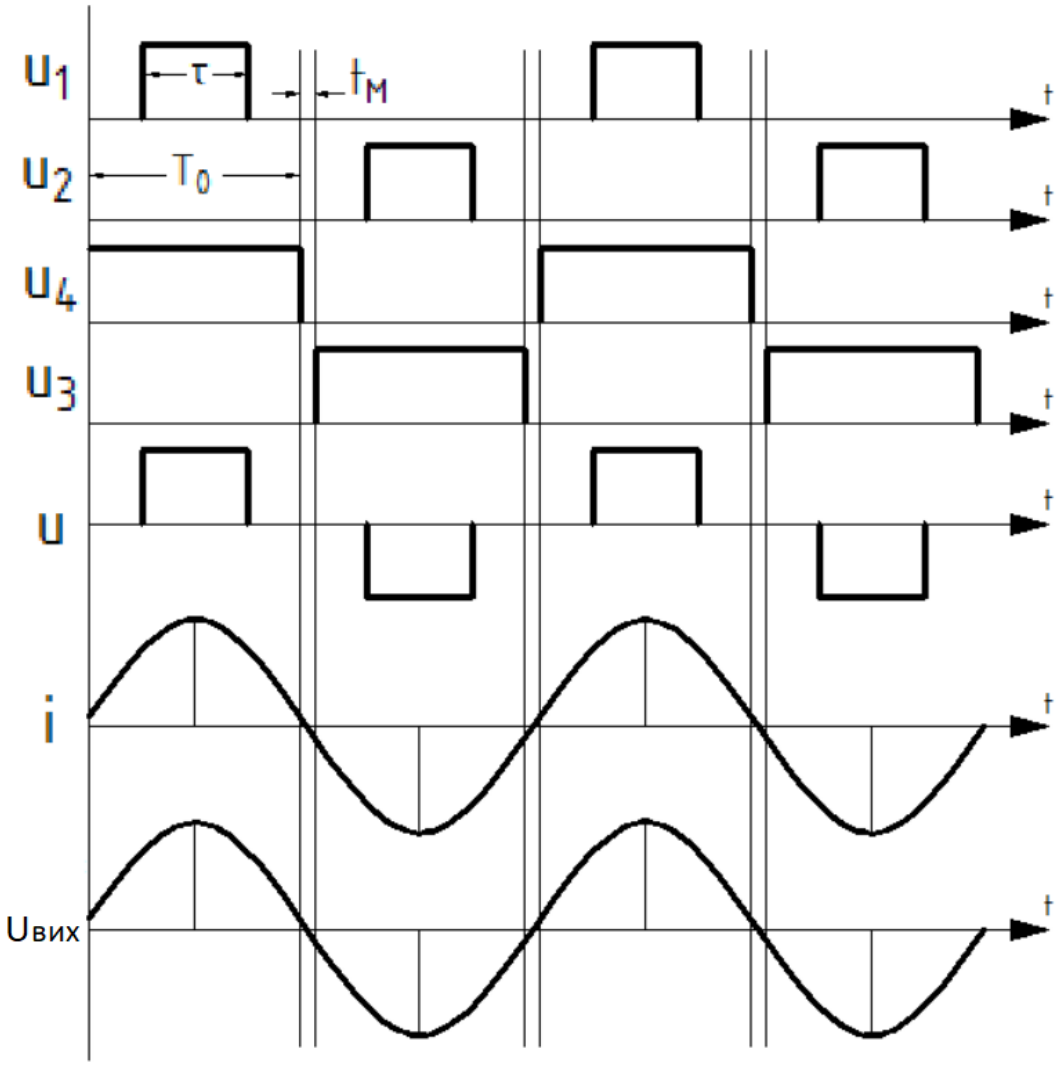

Рисунок 3.8 – Тимчасові діаграми перетворювача напруги з керуванням за другим способом.

З метою дослідження запропонованого резонансного перетворювача напруги проведено цифрове моделювання схеми його силової частини. Отримані при моделюванні осцилограми сигналів першого і другого способів управління. Побудовані навантажувальні та регулювальні характеристики з керуванням за першим та другим способом.

За результатами проведених досліджень підтверджено такі властивості перетворювачів [8]:

– діапазон регулювання вихідної напруги досягає 90% при високій лінійності;

− високий ККД - більше 95% при $U_{ном}$, $R_{ном}$ і не менше 75% - у всьому діапазоні регулювання напруги;

− слабкий вплив величини навантаження на вихідну напругу та ККД;

− мале перевантаження реактивних елементів (у 1,5… 2,0 рази);

− малий рівень гармонік у вихідній напрузі, що дозволяє рекомендувати перший спосіб управління для перетворювачів постійної напруги в постійну, а другий спосіб - для побудови ефективних генераторів гармонійних коливань.

4 АНАЛІЗ РИНКУ РЕЗОНАНСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

На українському ринку в даний час не представлено резонансних перетворювачів енергії.

На європейському та американському ринку представлено велику кількість резонансних перетворювачів різної потужності (від 65 Вт до 3 кВт і більше). Провідними виробниками резонансних перетворювачів є фірми STMicroelectronics, Infineon Technologies, GaN Systems і Texas Instruments.

Компанія GaN Systems виробляють ось такі LLC резонансні перетворювачі, рис. 4.1.

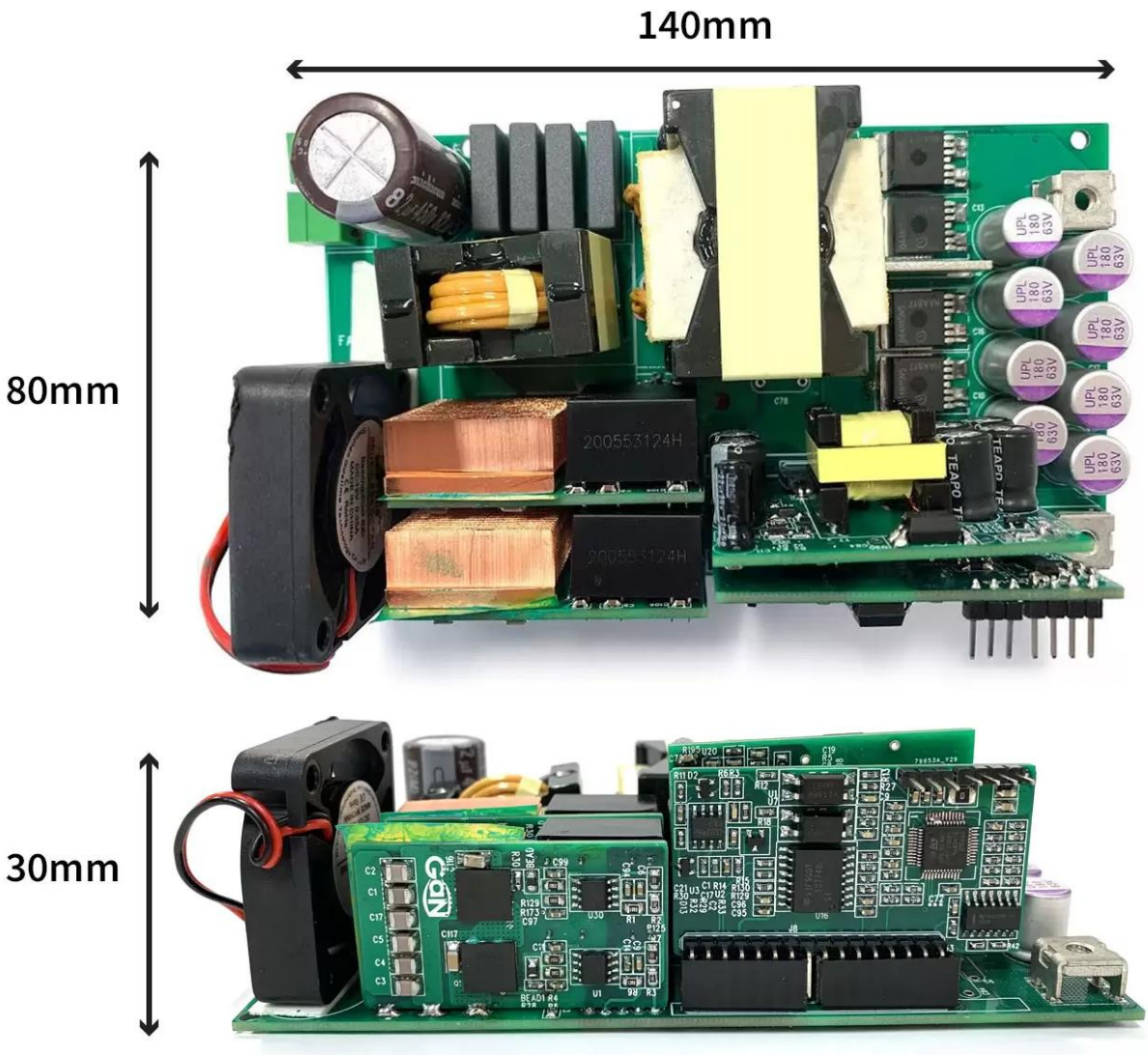

Рисунок 4.1 – Резонансний LLC перетворювач 3 кВт фірми GaN Systems.

Резонансний перетворювач LLC потужністю 3 кВт із високою щільністю та високою ефективністю на основі GaN для скорочення циклів проектування, витрат і часу виходу на ринок для центрів обробки даних, телекомунікаційних і промислових джерел живлення з комутаційним режимом (SMPS). Цей повномостовий резонансний перетворювач LLC перевищує стандарт 80+ Titanium для блоків живлення, досягаючи високої щільності потужності (PFC+DC/DC) понад 100 Вт/дюйм^3 і високої ефективності понад 96% [10].

Технічні характеристики:

– Діапазон вхідної напруги: 380 ~ 420 В постійного струму.

– Вихідна напруга: 54 В.

– Струм повного навантаження: 55 А.

– Топологія: Повномостовий LLC резонансний перетворювач із синхронізованим випрямленням.

– Цільова частота: 250 кГц (резонансна частота).

– Максимальна частота: 450 кГц.

– Розмір плати PCBA: 80 мм x 140 мм x 30 мм (включаючи примусове повітряне охолодження).

Цей перетворювач має комплексний захист, такий як захист від перевантаження по струму, короткого замикання та захист системи від перенапруги.

Компанія STMicroelectronics в свою чергу виробляють резонансні перетворювачі не тільки великої потужності, але й такі як наведено на рис. 4.2.

EVL012LED — це плата світлодіодного драйвера. Ця архітектура базується на двоетапному підході: передній регулятор PFC і вихідний резонансний напівмостовий перетворювач з використанням нової мікросхеми STNRG012, яка вбудовує контролери обох секцій в один пристрій. Завдяки STNRG012 основними характеристиками цієї конструкції є висока ефективність, низьке енергоспоживання без навантаження без допоміжного джерела живлення, хороший коефіцієнт потужності з низьким вмістом гармонік і зменшена кількість частин [11]. Плата також має повний набір

функцій захисту, включаючи вихідне перевантаження, коротке замикання та перенапругу; все це можна легко визначити як блокування або автоматичний перезапуск, просто змінивши значення в енергонезалежній пам’яті контролера.

Рисунок 4.2 – Резонансний LLC перетворювач EVL012LED фірми STM.

Технічні характеристики:

– Діапазон вхідної напруги: 90…277 В змінного струму, частота 45-65 Гц.

– Максимальна вихідна потужність: 200 Вт.

– Постійний вихідний струм: 3,6 А макс.

– Діапазон вихідної напруги: 36 ÷ 56 В постійного струму.

– Споживання мережі без навантаження: < 0,5 Вт.

– ККД: > 93% при повному навантаженні.

– Розміри: 210x55x15 мм, (Д x Ш x В)

Висновки

1. Показано, що місце проходження практики – компанія ПП «НВКФ «Екотех» — українська інжинірингова компанія, основною діяльністю якої є розробка та виробництво оптоелектронних енергозберігаючих систем освітлення, світлової індикації та сигналізації; систем обліку електроенергії та управління її споживанням; генераторів озону побутового та промислового призначення.

2. Проаналізовано явища резонансу в електричних ланцюгах.

3. Проаналізовано пристрій та переваги резонансного перетворювача з шунтуючим дроселем.

4. Проаналізовано загальнодоступна література на тему диплома.

5. Проаналізовано ринок резонансних перетворювачів.

Список використаних джерел

1. Резонанс – друг і ворог: веб-сайт. URL: https://kpi.ua/ru/resonance (дата звернення: 25.11.2023).

2. Явище резонансу: веб-сайт. URL: https://skysmart.ru/articles/physics/yavlenie-rezonansa (дата звернення: 26.11.2023).

3. Застосування резонансу напруги та резонансу струмів: веб-сайт. URL: https://electricalschool.info/spravochnik/electroteh/1860-primenenie-rezonansa-naprjazhenijj-i.html (дата звернення: 02.12.2023).

4. Явище резонансу електричних ланцюгах: веб-сайт. URL: https://toehelp.com.ua/lectures/027.html (дата звернення: 02.12.2023).

5. AN-4151. Half-Bridge LLC Resonant Converter Design Using FSFR-Series Fairchild Power Switch (FPS™): веб-сайт. URL: https://www.onsemi.com/pub/Collateral/AN-4151.pdf (дата звернення: 03.12.2023).

6. Н.М. Чернишов, Н.І. Сліпченко, В.М. Писаренко та інші. Розрахунок втрат у резонансних перетворювачах при режимах непреривних і розрівних струмів. Радіотехніка. 2015. Вип. 183, С. 147-154.

7. Г.В. Павлов, А.В. Обрубов. Розрахунок характеристик послідовно-резонансного перетворювача з релейним регулюванням. Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв, Україна.

8. Ворох Д.А., Махов А.І. Резонансний перетворювач із широтно-імпульсним регулюванням вихідної напруги. Вісник Самарського університету. Аерокосмічна техніка, технології та машинобудування. 2016. Т. 15, №3. С. 143-152.

9. UC1875-SP Rad-Tolerant Class-V, Phase Shift Resonant Controller: веб-сайт. URL: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/uc1875.pdf (дата звернення: 09.12.2023).

10. 3KW High Efficiency LLC Evaluation Board & Reference Design: веб-сайт. URL: https://gansystems.com/evaluation-boards/gs-evb-llc-3kw-gs/ (дата звернення: 10.12.2023).

11. 200W LED driver using the STNRG012: веб-сайт. URL: https://gansystems.com/evaluation-boards/gs-evb-llc-3kw-gs/ (дата звернення: 10.12.2023).