

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТУСА

ТРЕТЯК ДЕНИС РОМАНОВИЧ

Допускається до захисту:
Завідувач кафедри
інформаційних технологій,
к.т.н., доцент
_____ Нескородєва Т. В.
«__» _____ 20__ р.

**РОЗРОБКА СИСТЕМИ ПІДСТРОЮВАННЯ ПІДСИЛЮВАЧА
КЛАСУ Е І АЛГОРИТМУ ЇЇ РОБОТИ В УМОВАХ, ЗМІНИ ВІДСТАНІ
ДО ПОВЕРХНІ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ**

Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали
Кваліфікаційна (бакалаврська) робота

Науковий керівник:

Сергієнко С.П.,
к.ф.-м.н, доцент кафедри
інформаційних технологій

(підпис)

Оцінка: _____ / _____ / _____
(бали/зашкалою ЄКТС/занаціональною шкалою)

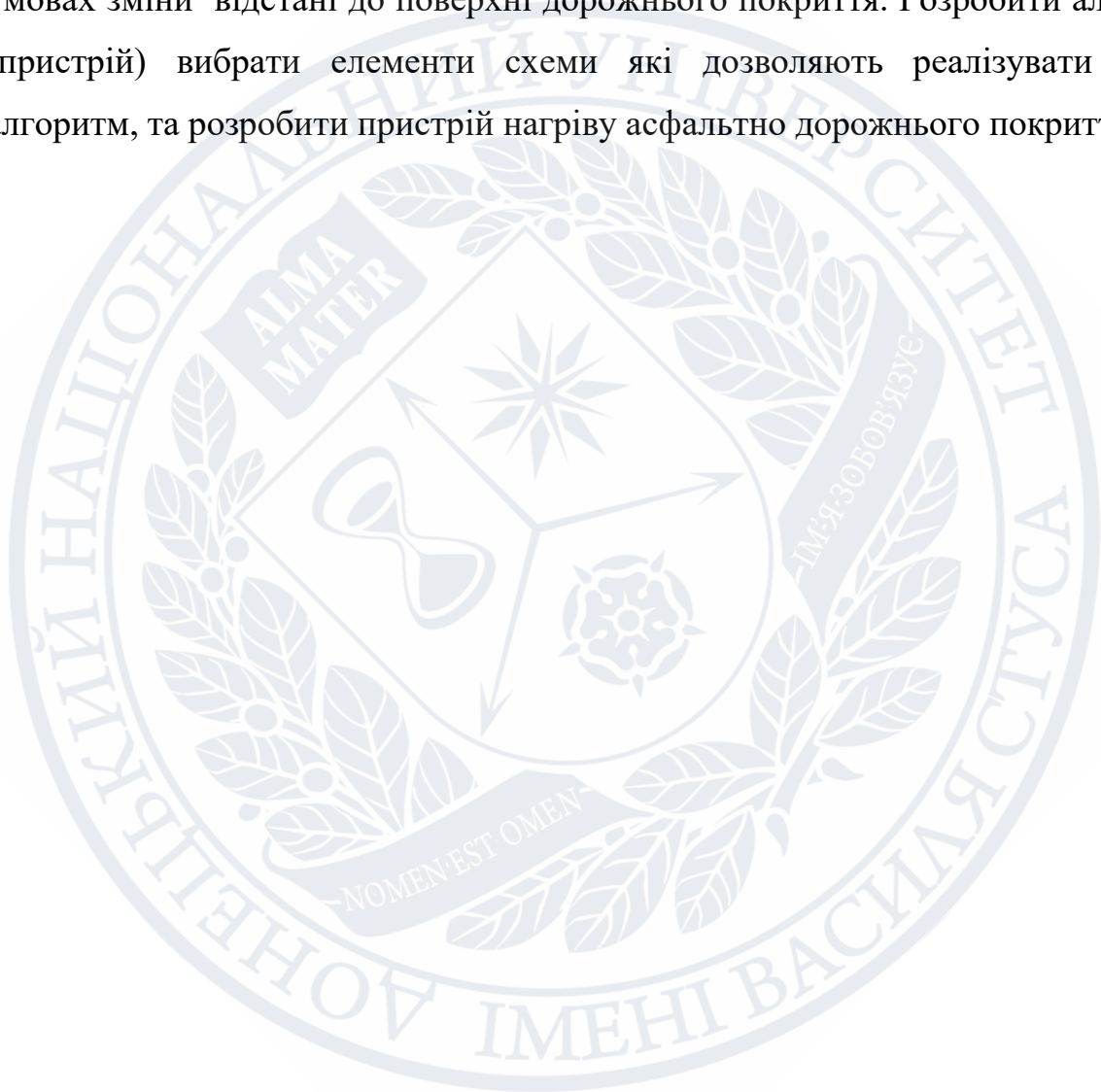
Голова ЕК: _____
(підпис)

Вінниця 2021

Об’єктом дослідження є підсилювач класу Е в процесі роботи реального пристрою.

Предметом дослідження є розробка системи підстроювання підсилювача класу Е і алгоритму її роботи.

Метою роботи є розробка алгоритму схеми автоматичного налаштування підсилювача класу Е для нагріву асфальтного покриття в умовах зміни відстані до поверхні дорожнього покриття. Розробити алгоритм (пристрій) вибрати елементи схеми які дозволяють реалізувати даний алгоритм, та розробити пристрій нагріву асфальтно дорожнього покриття.



АНОТАЦІЯ

Третяк Д. Р. Розробка системи підстроювання підсилювача класу Е і алгоритму її роботи в умовах, зміни відстані до поверхні дорожнього покриття. Спеціальність 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» Спеціалізації «Фізика» Освітньої програми «Технології інтернету речей» Донецький національний університет імені Василя Стуса Вінниця 2021.

У кваліфікаційній (бакалаврській) роботі досліджено алгоритм схеми автоматичного налаштування підсилювача класу Е для нагріву асфальтно дорожнього покриття в умовах зміни відстані до дорожнього покриття, вибрано елементи схеми які дозволяють реалізувати даний алгоритм, та розроблено пристрій.

Ключові слова:

Підсилювач класу Е, асфальтно дорожнє покриття, індукційний нагрів.

ABSTRACT

Tretyak D. R. Development of the system of adjustment of the amplifier of a class E and algorithm of its work in the conditions, change of distance to a road surface. Specialty 105 "Applied Physics and Nanomaterials" Specialization "Physics" of the Educational Program "Internet of Things Technologies" Vasyl Stus Donetsk National University, Vinnytsia 2021.

In the qualification (bachelor's) work the algorithm of the scheme of automatic adjustment of the amplifier of class E for heating of an asphalt pavement in the conditions of change of distance to a pavement is investigated, elements of the scheme allowing to realize this algorithm are chosen, and the device is developed.

Keywords:

Class E amplifier, asphalt pavement, induction heating.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ЗМІСТ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ЕЛЕКТРИЧНИЙ ІНДУКЦІЙ НАГРІВ	7
1.1 Загальні відомості	7
1.2 Як працює індукційна котушка	8
1.3 Робоча резонансна частота.....	9
1.4 Система індукційного нагріву.	10
1.5 Методи укладання «ремікс» (Remix) і «ремікс-плюс» (Remix Plus). Метод реміксерів.	11
РОЗДІЛ 2. ПРИНЦИП ДІЇ СУЧАСНОГО НАГРІВАЧА	12
2.1 Введення.....	12
2.2 Підсилювачі потужності класу E RF, перемикання нульової напруги ...	14
2.3 Опис Ланцюга.....	14
2.4 Підсилювач потужності класу E RFZVS	16
2.5 Схема роботи	17
2.6 Експлуатація підсилювача класу E (ZVS та ZDS).....	19
2.7 Субоптимальна операція	21
2.8 Вхідний опір резонансної схеми серії.....	24
2.9 Двотактний підсилювач класу E ZVSRF	25

ВСТУП

Як саме працює індуктивне нагрівання:

Індукція створює електромагнітне поле в котушці, передаючи енергію заготовці і таким чином розігрівуючи її. Навколо дроту, в якому протікає, утворюється магнітне поле.

Електричний струм змінного напрямку створює змінне магнітне поле. При розташуванні у цьому змінному магнітному полі другого дроту в ньому також утворюється змінний струм. У другому провіднику струм прямо пропорційний до струму у першому провіднику і обернено пропорційний до квадрату відстані між провідниками.

Якщо в цій моделі ми замінимо перший провідник котушкою, змінний струм в котушці утворить електромагнітне поле. Роль другого провідника може виконувати заготовка, яку треба нагріти. Тепло генерується у заготовці через втрати енергії на електричний опір матеріалу відповідно до закону Джоуля-Ленца.

Способи індукційного нагрівання:

При застосуванні індукції існує два способи нагрівання:

1. Нагрівання вихровими струмами у зв'язку з втратами енергії на електричний опір матеріалу.
2. Гістерезисне нагрівання, коли енергія утворюється в заготовці через те, що котушка змінює магнітну полярність заготовки. Таке нагрівання триває до досягнення температури Кюрі, коли магнітна проникність зменшується до 1 і гістерезисне нагрівання мінімізується. Ефект індукційного нагрівання, що залишається, зумовлений першим способом.

РОЗДІЛ 1. ЕЛЕКТРИЧНИЙ ІНДУКЦІЙ НАГРІВ.

1.1 Загальні відомості.

Це швидкий, ефективний, точний, безконтактний метод нагрівання металів або інших електропровідних матеріалів з можливістю багаторазового повторення процесу за зразком. До системи індукційного нагріву входить джерело живлення, яке конвертує струм з електромережі та спрямовує його до індукційної котушки, в якій генерується електромагнітне поле. В заготовці, яка розміщена всередині котушки чи розташована поряд із котушкою, створюється струм, який і розігріває оброблюваний матеріал. Котушка має водяне охолодження, вона розташовується навколо заготовки або біля неї. Контакт між котушкою та заготовкою немає, тепло утворюється виключно індукованим струмом, що проходить через заготовку.

Матеріалом робочої заготовки може бути метал (такий, як сталь, мідь, алюміній чи латунь) або напівпровідники (наприклад, графіт або карбід кремнію). Для індукційного нагрівання таких непровідних матеріалів, як пластик або скло, можна використовувати електропровідний струмоприймач (зазвичай графітовий), який передає тепло не електропровідній заготовці. Індукційне нагрів може використовуватись у процесах з низькими (100 °C) і високими (3000 °C) температурами. Тривалість таких процесів також може бути різною – від менш ніж півсекунди до кількох місяців.

Індукційний нагрів використовується для приготування їжі в домашніх умовах і в комерційних установах. До застосувань цього методу належать також плавка, термообробка, попереднє розігрівання перед зварюванням, паяння твердим і м'яким припоєм, герметизація, гаряче пресування та ін. – у виробництві та науково-дослідницькій роботі.

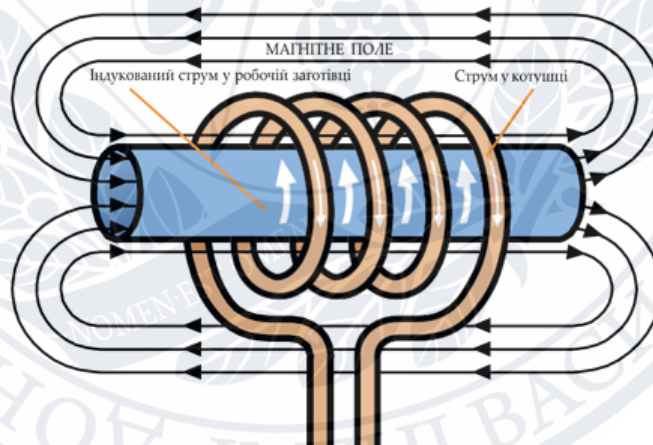
1.2 Як працює індукційна котушка.

Робоча котушка використовується для передачі енергії заготовці за допомогою змінного електромагнітного поля.

Змінний струм, що протікає через котушку, утворює електромагнітне поле, яке, в свою чергу, генерує струм у робочій заготовці (який є таким собі "дзеркальним відображенням" струму в котушці).

Робоча котушка, яка називається також індуктором, є компонентом системи індукційного нагріву, що визначає ефективність та економічність нагріву заготовки.

Робочі котушки можуть бути різними за складністю виготовлення – від кількох витків звернутої у спіраль мідної трубки до виготовлених на високоточному обладнанні з литої міді котушок зі спаяними разом витками.



1.3 Робоча резонансна частота.

Робоча частота індукційного нагрівання зумовлюється особливостями заготовки і матеріалом, з якого вона зроблена. Важливо, щоб індукційна система була здатна забезпечити струм з частотами, які відповідають потребам її застосування.

Для полегшення розуміння потреби в різних частотах роботи розгляньмо явище, відоме як "скін-ефект". Коли електромагнітне поле утворює струм в заготовці, він протікає в першу чергу в її поверхні. Що вища робоча частота, тим тонше скін-шар; чим частота нижча, тим шар глибший і тим сильніше проникнення ефекту нагрівання.

Глибина скін-шару (або ж глибина проникнення) залежить від робочої частоти, властивостей матеріалу та температури заготовки. Наприклад, як видно у нижченаведеній таблиці, сталеву заготовку товщиною 20 мм можна розм'якшити нагріванням до 540 °C за допомогою індуктивної системи з частотою 3 кГц. Однак для загартовування цієї ж заготовки за температури 870 °C знадобиться 10 кГц.

Зазвичай нагрівання індукцією невеликих заготовок вимагає більш високих робочих частот (часто більших за 50 кГц), а більші заготовки ефективніше нагріваються нижчими частотами.

Сучасні системи живлення із вбудованим мікропроцесорним керуванням дозволяють багаторазово виконувати однакові процеси нагрівання за зразком (головне, щоб заготовки мали постійне розташування всередині котушки).

Приблизний найменший діаметр заготовки за різних робочих частот

Матеріал	Температура	1 кГц	3 кГц	10 кГц	30 кГц
Сталь, холодніша за темп. Кюрі	540 °C	8.89 мм	5.08 мм	2.79 мм	1.27 мм
Сталь, гарячіша за темп. Кюрі	870 °C	68.58 мм	38.10 мм	21.59 мм	9.65 мм

1.4 Система індукційного нагріву.

Система індукційного нагріву складається з джерела живлення (інвертора), резонансного контура та індуктора. При застосуванні у виробництві для охолодження індуктора необхідне рідинне охолодження, тому типова установка індукційного нагріву зазвичай обладнана системою водяного охолодження.

Система живлення конвертує змінний струм з мережі у змінний струм, який протікає в послідовному резонансному контурі, котрий складається з ємності під'єданого конденсатора, індуктивності котушки та опору заготовки.

Потрібне живлення визначається: видом матеріалу, розміром заготовки, потрібним підвищенням температури, часом, потрібним для нагрівання до визначеної температури. Сталь і залізо нагріваються легко, оскільки мають високий опір, в той час як мідь та алюміній вимагають більше електроенергії через свій низький опір.

Деякі марки сталі мають магнітні властивості, тому на них можуть бути використані обидва способи індукційного нагрівання. Нагріваючись вище

температури Кюрі (від 500 до 600 °C), сталь втрачає магнітні властивості, але високочастотне нагрівання працює для більш високих температур.

Робоча частота системи індукційного нагріву визначається з огляду на розмір заготовки для обробки. Менші за розміром заготовки для ефективного нагрівання вимагають вищої частоти (> 50 кГц), а більші – нижчої (< 10 кГц), і сильнішого проникнення згенерованого тепла.

З підвищенням температури робочої заготовки збільшуються теплові втрати з неї. Випромінення та втрати через конвекцію стають тим більш важливим фактором, чим сильніше підвищується температура. Задля зниження втрат енергії, при роботі за високих температур часто застосовуються ізоляційні технології.

1.5 Методи укладання «ремікс» (Remix) і «ремікс-плюс» (Remix Plus).

Метод реміксер.

За допомогою надпотужних випромінювачів йде попереду нагрівач і реміксер 4500 які нагрівають верхній шар асфальту. Оберткові фрезерні барабани розпушують покриття при дозованому сприскуванню в'язучого. Матеріал який вільно лежить підхоплюється скребковим транспортером. Різці, розташовані на фрезерних барабанах, направляють його в змішувальну камеру, в якій він перемішується з новим асфальтом до отримання однорідної суміші. Потім шнековий розподільник розподіляє знятий матеріал на розігрітій поверхні. Це гарантує ідеальне зчеплення шарів за методом «гаряче на гаряче». Потім розрівнювальний брус виконує укладку з попередніми ущільненням і відповідно до заданого профілю положенням. Завершують процес катки, які виконують ущільнення.

Метод «ремікс-плюс» (Remix Plus)

Аналогічно з методом «ремікс» в разі «ремікс-плюс» додатково наноситься тонкий шар нової суміші. Новий матеріал витягується з приймального бункера за допомогою конвеєрної стрічки і поміщається на коротко перед цим перероблену суміш. Другий шнек, розташований нижче першого, рівномірно розподіляє новий матеріал, другий розрівнюють брус безпосередньо укладає свіжий шар. Тонкий верхній тонкий шар може бути виготовлений з високоякісної спеціальної суміші.

РОЗДІЛ 2. ПРИНЦИП ДІЇ СУЧАСНОГО НАГРІВАЧА

2.1 Введення

Для санації великих за площею пошкоджених асфальтових покриттів гарячий ресурсозберігаючий ресайклінг є найшвидшим і економічним способом. При цьому ключова роль відводиться для самохідного нагрівача НМ 4500. Автомобільний нагрівач рухається безпосередньо перед гарячим Ресайклером Remixer 4500 і в якості першого етапу інноваційного процесу обробки полотна ефективно розігріває асфальтобетонне покриття. Завдяки регульованій потужності нагріву пошкоджене асфальтне покриття м'яко нагрівається до необхідної температури. Оптимально відрегульований процес згоряння пропану гарантує високу теплоємність при низькому споживанні газу. Великий, зручний багаторазовий газовий резервуар зберігає теплову енергію на весь довгий робочий день плюс деякі її запаси. Використання двох або навіть більше нагрівачів підвищує продуктивність навіть в умовах холодних температурах або наявності вологих поверхонь.

Існує два типи підсилювачів класу Е, які також називається інверторами постійного струму класу Е. Перші це підсилювачі потужності з перемиканням нульової напруги (ZVS) класу Е. Та другі це підсилювачі потужності класу Е з перемиканням нульового струму (ZCS). У підсилювачах класу Е, транзистор працює як перемикач. Підсилювачі потужності класу Е ZVS є найефективніші підсилювачі, відомі на сьогодні. Форми хвилі струму та напруги коммутатора зміщуються щодо часу, утворюючи дуже низьку потужність, що розсіюється в транзисторі. Зокрема перемикач вмикається при нульовій напрузі, якщо складові значення резонансу ланцюга правильно обрані. Оскільки форми струму та напруги коммутатора не перериваються під час інтервалів перемикання, втрати від перемикання практично дорівнюють нулю, це дає високу ефективність.

Почнемо з простого але якісного представлення опису роботи підсилювача класу Е (ZVS). Цей опис дасть значне уявлення про ефективність підсилювача як основного елементу живлення. Далі ми перейдемо до кількісного опису підсилювача, і в кінці ми представимо відповідні резонансні схеми і дати процедури проектування підсилювача. В кінці ми зможемо швидко аналізувати, та проектувати одноступеневий підсилювач (ZVS) класу Е.

2.2 Підсилювачі потужності класу E RF, перемикання нульової напруги

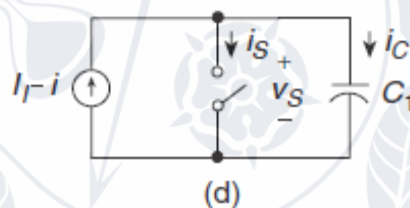
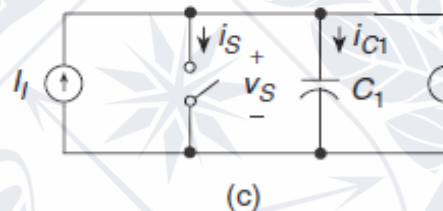
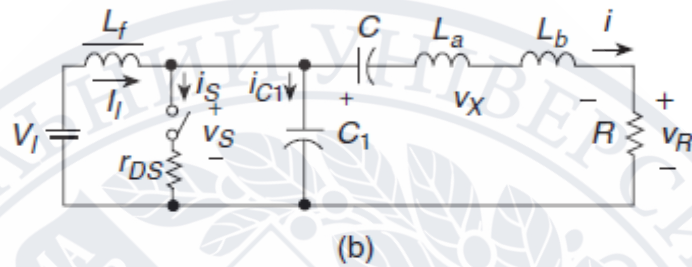
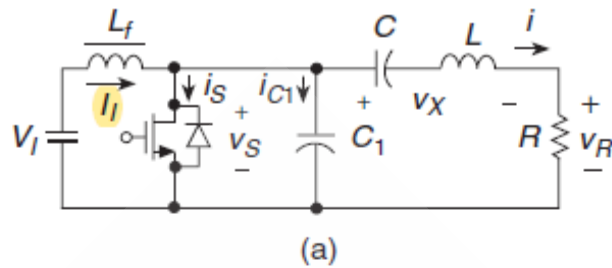


Рисунок 1.1 Підсилювач потужності з нульовою напругою класу E(a). Схема (b) еквівалентна схема для роботи над резонансом. (c) Еквівалентна схема з джерелом постійної напруги V_I та радіочастотним дроселем L_f замінено джерелом постійного струму I_I , а послідовно резонансна схема замінена джерелом змінного струму. Та (d) Еквівалентна схема з двома джерелами струму, об'єднаними в одне джерело струму $I_I - i$.

2.3 Опис Ланцюга.

Основна схема підсилювача потужності ZVS класу E показана на рисунку (1.1). Вона полягає в потужності польового транзистору, що працює

як перемикач послідовно резонансна схема L-C-R, шунтуючий конденсатор C_1 та дросель дроселя L_f . Вимикач вмикається і вимикається на робочій частоті $f = \omega / (2\pi)$ і визначається водієм. Вихідна ємність транзистора паразитна ємність дроселя, а розсіяні ємності включені в шунтуючу ємність C_1 . Для високих частот вся ємність C_1 може забезпечуватися загальною паразитною ємністю шунта. Резистор R є змінним навантаженням. Припускається, що індуктивність дроселя L_f досить висока що пульсацією змінного струму на струмі постійного струму I_l можна знехтувати. Мала індуктивність при великій струмовій пульсації також можлива. Коли перемикач увімкнений, резонансна схема складається з L, C та R, оскільки ємність C_1 замикається перемикачем. Однак, коли перемикач вимкнений резонансна схема складається з C_1 , L, C і R, з'єднаних послідовно. Оскільки C_1 і C пов'язані послідовно.

$$C_{eq} = \frac{CC_1}{C + C_1}$$

Еквівалентна ємність, нижче ніж C і C_1 . Мережа навантажень характеризується двома резонансними частотами і двома завантаженими факторами якості, коли перемикач увімкнено.

$$f_{o1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$Q_{LI} = \frac{\omega_{o1}L}{R} = \frac{1}{\omega_{o1}CR}$$

2.4 Підсилювач потужності класу E RFZVS

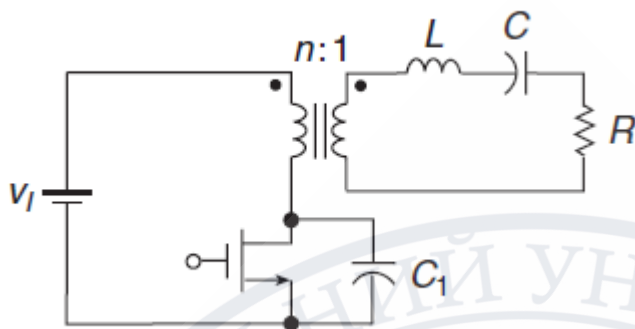


Рисунок 1.2 Підсилювач потужності RF з нульовою напругою класу E з трансформатором, коли перемикач вимкнений:

$$f_{o2} = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{LCC_1}{C+C_1}}}$$

$$Q_{L2} = \frac{\omega_{o2}L}{R} = \frac{1}{\frac{\omega_{o2}RCC_1}{C+C_1}}$$

Співвідношення двох резонансних частот становить:

$$\frac{f_{o1}}{f_{o2}} = \frac{Q_{L1}}{Q_{L2}} = \sqrt{\frac{C_1}{C_1+C}}$$

Еквівалентна схема підсилювача для роботи над резонансом показана на рисунку 1.0(b). На рисунку 1.0(c) джерело постійного струму V_I та RF дросель L_f замінюється струмом постійного струму джерело I_I , а послідовно резонансна схема замінена джерелом змінного струму. Рисунок 1.0(d) показує еквівалентну схему підсилювача класу E з двома джерелами струму разом в одне джерело струму I_I — i . Якщо робоча частота f більша за

резонансну частоту f_{01} серія L-C-R резонансна схема представляє індуктивне навантаження на робочій частоті f . Тому індуктивність L можна розділити на дві індуктивності, L_a та L_b з'єднані послідовно так, що $L = L_a + L_b$ і L_a резонує з C на робочій частоті f , тобто:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_a C}}.$$

Навантажений коефіцієнт якості визначається на робочій частоті як:

$$Q_L = \frac{\omega L}{R} = \frac{\omega(L_a + L_b)}{R} = \frac{1}{\omega C R} + \frac{\omega L_b}{R}.$$

Трансформаторна версія підсилювача класу Е показана на малюнку 1.2. Трансформаторна індуктивність витoku може поглинатися індуктивністю L .

2.5 Схема роботи

Схеми з жорсткою комутацією напівпровідникових компонентів, таких як ШІМ контролер, потужність перетворювачів та цифрові ворота страждають від комутаційних втрат. Форма сигналу напруги ланцюгів в них різко зменшується від високого значення, часто рівного напрузі живлення постійного струму V_l до майже нульового, коли включається комутаційний пристрій. Енергія що зберігається на виході транзистора ємність C безпосередньо перед включенням переходів (припускаючи що ці ємності лінійні).

$$W = \frac{1}{2} C V_l^2$$

Де V_l -напруга живлення постійного струму. Коли транзистор включений, струм циркулює через транзистор r_{DS} , з опором і вся накопичена енергія

втрачається в опорі r_{DS} як тепло. Ця енергія не залежить від опору r_{DS} транзистора. Перемикання втрати потужності транзистора задаються величиною втрат від перемикання, їх можна уникнути, якщо напруга на транзисторі v_S дорівнює нулю, коли транзистор включається.

$$P_{sw} = \frac{1}{2} f C V_1^2. \quad v_S(t_{turn-on}) = 0.$$

Тоді заряд, що зберігається у вихідній ємності транзистора, дорівнює нулю, а енергія зберігається в цій ємності дорівнює нулю. Основна ідея підсилювача потужності класу Е полягає в тому, що транзистор включається як перемикач при нульовій напрузі, що призводить до нульових втрат на комутацію і високу ефективність. Підсилювач потужності класу Е у своїй базовій формі містить один перемикач. Перемикач вмикається при нульовій напрузі (ZVS), а перемикач також може включатися при нульовій похідній (ZDS). Загалом такий тип операцій називається плавним перемиканням.

На **рисунку 1.3** показані форми струму та напруги в підсилювачі класу EZVS для трьох випадків: (1) $dv_S(\omega t)/d(\omega t) = 0$; (2) $dv_S(\omega t)/d(\omega t) < 0$; та (3) $dv_S(\omega t)/d(\omega t) > 0$. $\omega t = 2\pi$ при включенні вимикача. У всіх трьох випадках напруга v_S на комутаторі і ємність шунта C_1 дорівнює нулю при включенні вимикача. Отже, енергія, накопичена в ємність шунта C_1 дорівнює нулю при включенні перемикача, що дає нульове перемикання включення втрата. Таким чином, умова ZVS виражається як індуктор дроселя L_f змушує постійний струм I_l .

$$v_S(2\pi) = 0.$$

Для досягнення включення нульової напруги перемикача, робоча частота $f = \omega/(2\pi)$ повинна бути більшою, ніж резонансна частота $f_{o1} = 1/(2\pi\sqrt{LC})$, тобто $f > f_{o1}$. Однак робоча частота зазвичай нижче $f_{o2} = 1/(2\pi\sqrt{LC_{eq}})$, тобто $f < f_{o2}$. Форма сигналу струму і залежить від завантаженого коефіцієнта якості. Якщо Q_L високий (тобто $Q_L > 2.5$), то форма хвилі струму приблизно синусоїдальна.

Якщо Q_L низький, то форма сигналу струму стає близькою до експоненціальної функції. Поєднання дросельний дросель L_f і послідовно резонансна схема L-C-R діє як джерело струму, чи є струм I_l -і. Коли перемикач вимкнений, струм I_l -і протікає через конденсатор C_1 , виробляючи напругу на шунтовий конденсатор C_1 і перемикач. Тому шунтований конденсатор C_1 формує напругу через перемикач.

2.6 Експлуатація підсилювача класу E (ZVS та ZDS).

Коли транзистор включається при $\omega t = 2\pi$ в підсилювачі потужності класу E, нульова напруга (умова) перемикання (ZVS) та умова перемикання нульових похідних (ZDS) задовольняються

$$v_s(2\pi) = 0$$

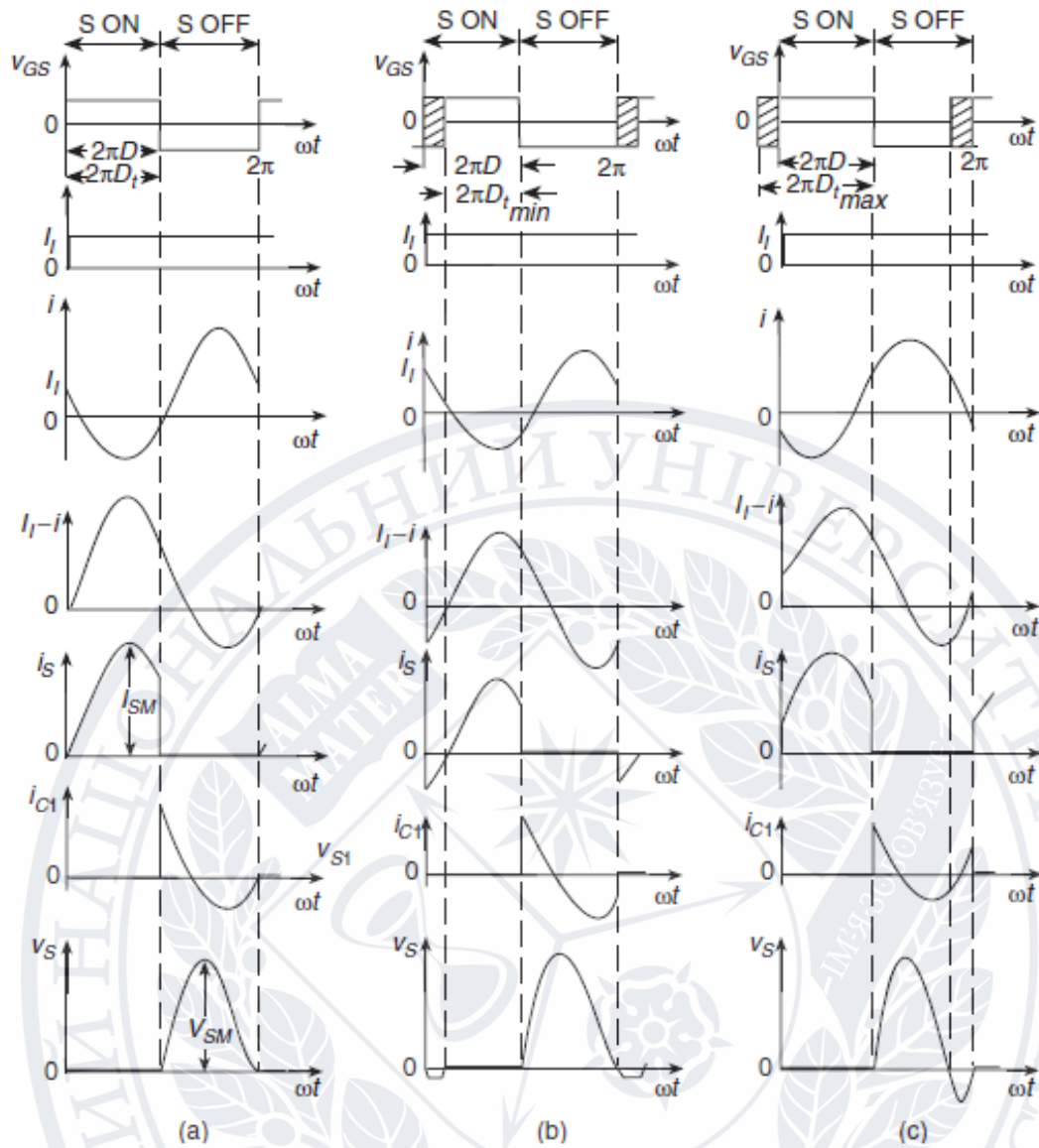


Рисунок 1.3 Форми сигналу в підсилювачі нульової напруги класу Е (а). Для оптимальної роботи (b), для неоптимальної роботи $dv_S(\omega t)/d(\omega t) < 0$ при $\omega t = 2\pi$. (c). Для неоптимальної роботи з $dv_S(\omega t)/d(\omega t) > 0$ при $\omega t = 2\pi$.

$$\frac{dv_S(\omega t)}{d(\omega t)} = 0.$$

Форми сигналів струму та напруги для роботи ZVStа ZDSпоказані на рисунку 1.3 (а). Перемикання нульової напруги означає, що енергія, що зберігається в шунтуючій ємності C_1 , дорівнює нулю коли транзистор увімкнеться, даючи

нульові втрати при включенні. Оскільки похідна від v_S дорівнює нулю в той час коли перемикач вмикається, струм i_S перемикача поступово збільшується від нуля після замикання перемикача. Операція, для якої обумовлені як ZVS, так і ZDS задовольняються одночасно, називаються номінальною роботою або оптимальною роботою. Наруга комутатора і форми струму комутатора є позитивними для оптимальної роботи. Отже немає необхідності додавати будь-який діод до комутатора.

Співвідношення між C_1, L_b, R, f , і D повинні бути виконані для досягнення оптимальної роботи. Отже оптимальна робота досягається лише для оптимального опору навантаження $R = R_{opt}$. Крім того повинна знаходитися робоча частота f для оптимальної роботи між двома резонансними частотами.

$$f_{01} < f < f_{02}.$$

Якщо $R > R_{opt}$, амплітуда I_m струму і через L-C-Резонансний ланцюг нижче, ніж потрібно для оптимальної роботи, падіння напруги на шунті конденсатора C_1 зменшується. Крім того, напруга перемикача V_S перевищує нуль при включенні. З іншого боку, якщо $R < R_{opt}$, амплітуда I_m перевищує необхідну для оптимальної роботи, падіння напруги на шунтуючому конденсаторі C_1 збільшується, а напруга комутатора V_S менше ніж нуль при включенні. В обох випадках припускаючи лінійну ємність C_1 енергія, що зберігається в C_1 безпосередньо перед включенням перемикача становить $W(2\pi) = \frac{1}{2} C_1 v_S^2(2\pi)$. Ця енергія розсіюється в транзисторі у вигляді нагрівання після включення перемикача, що призводить до втрат на перемикання при включенні. Для отримання роботи ZVS при більш широкому діапазоні навантаження може бути встановлений антипаралельний або послідовний діод доданий до транзистора. Це вдосконалення гарантує, що перемикач автоматично включається в нульову напругу для $R < R_{opt}$.

2.7 Субоптимальна операція

У багатьох додатках опір навантаження змінюється в певному діапазоні. Увімкнений перемикач при нульовій напрузі може бути досягнутий при неоптимальній роботі для $0 < R < R_{opt}$. Для неоптимальної роботи, $v_S(2\pi) = 0$, або $dv_S(\omega t)/d(\omega t) < 0$ або $dv_S(\omega t)/d(\omega t) > 0$. На рисунку 1.3(b) показано форми сигналів струму та напруги для випадку, коли $v_S(2\pi) = 0$ і $dv_S(\omega t)/d(\omega t) < 0$ при $\omega t = 2\pi$. Польові транзистори живлення є двонаправленими перемикачами, оскільки їх струм може протікати в обох напрямках, але їх напруга може бути лише більше -0,7 В. Коли напруга перемикача досягає -0,7 В, вмикається антипаралельний діод, отже перемикач автоматично вмикається. Діод прискорює час включення вимикача, цей час більше не визначається напругою від затвора до джерела. Так як перемикач включається в нуль напруги, втрати на вмикання при включенні дорівнюють нулю, що дає високу ефективність. Така операція може бути досягнута для $0 < R < R_{opt}$. Крім того, якщо $R < R_{opt}$, робоча частота f і транзистор увімкнений, робочий цикл D_t перемикача може змінюватися в обмежених діапазонах. Коли струм перемикача мінусовий, антипаралельний діод увімкнений, але транзистор може бути ввімкнений або вимкнений. Отже, робочий цикл D_t перемикача транзистора увімкнений менше, або дорівнює робочому циклу вимикача ОНвсього перемикача D. Коли струм перемикача позитивний, діод вимкнений, а транзистор повинен бути увімкнений. Отже діапазон D_t становить $D_{t\min} < D_t < D$, як показано на малюнку 1.3 (b) затінену ділянку. На рисунку 1.3 (c), зображено форми сигналів струму та напруги для випадку коли $v_S(2\pi) = 0$ і $dv_S(\omega t)/d(\omega t) > 0$ при $\omega t = 2\pi$. Зверніть увагу, що струм комутації i_S завжди позитивний, але напруга перемикача v_S має позитивні та негативні значення. Тому для односпрямованого комутатора струму необхідний двонаправлений вимикач напруги. Такий перемикач можна отримати шляхом додавання діода послідовно з польовим транзистором. Коли напруга комутатора v_S від'ємна, діод вимкнений і підтримує напругу комутатора незалежно від стану польового транзистора.

Транзистор вмикається протягом тимчасового інтервалу, коли напруга комутатора від'ємна. Одного разу напруга комутатора досягає 0,7 В при позитивній похідній, діод включається, повертаючи вмикаючи весь перемикач. Середній діод затримує час, коли включається вимикач. Асортимент D_t дорівнює $D < D_t < D_{tmax}$, як показано на рисунку 1.3(с) затіненою площею. Недоліки перемикача з послідовним діодом мають більшу напругу і вищі втрати провідності. Інший недолік пов'язаний з вихідною ємністю транзистора.

Коли напруга перемикача збільшується, вихідна ємність транзистора заряджається через послідовний діод до пікового значення напруги комутатора, а потім залишається на цій напрузі, поки транзистор не ввімкнеться (оскільки діод вимкнений). В цей час вихідна ємність транзистора розряджається через MOSFET-опір, розсіюючи накопичену енергію.

Аналіз

Аналіз підсилювача ZVS класу E на рисунку 1.1(а) проводиться за наступним припущенням.

Транзистор і антипаралельний діод утворюють ідеальний перемикач, опір якого становить нуль, опір нескінченність, а час перемикання нуль

Індуктивність дроселя досить висока, щоб компонент змінного струму був набагато нижчим ніж постійного струму, ніж постійного та вхідного струму.

Навантажений коефіцієнт якості Q_L послідовно резонансної схеми LCR досить високий, щоб струм і через резонансний контур був синусоїдальним.

Коефіцієнт мита D становить 0.5.

2.8 Вхідний опір резонансної схеми серії.

Струм через послідовно резонансний контур є синусоїдальним. Отже, вищі гармоніки вхідної потужності дорівнюють нулю. Тому достатньо врахувати вхідний опір послідовно резонансна схема на робочій частоті f на рисунку 1.4 показано еквівалентну схему, послідовно резонансну схему над резонансом на робочій частоті f . Фазову діаграму напруг на фундаментальній складовій зображено на рисунку 1.5. Напруга на опір навантаження R є де $V_{Rm} = RI_m$ амплітуда вихідної напруги, а φ початкова фаза. Напруга v_x на компонентах L - C не синусоїдальна, дорівнює $v_x = v_s - v_R$. Фундаментальна складова напруги в ланцюзі C - L_a дорівнює нулю, оскільки опір схеми на робочій частоті f дорівнює нулю. Основна складова напруги поперек індуктивності L_b .

$$V_{Lb1} = V_{Lbm1} \cos(\omega t + \varphi)$$

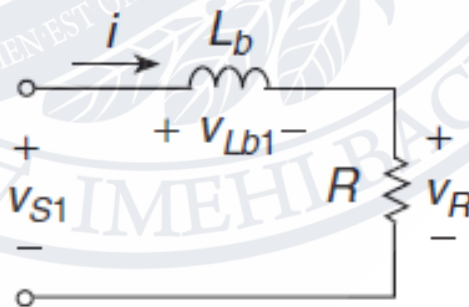


Рисунок 1.4. Еквівалентна схема послідовно резонансної схеми над резонансом у робочому режимі частоти f .

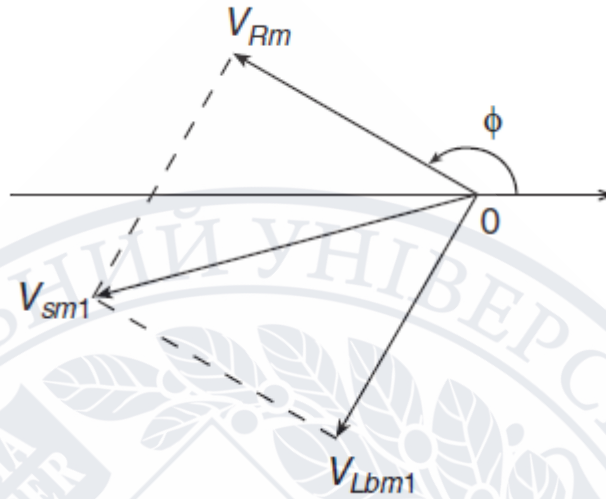


Рисунок 1.5. Фазова діаграма напруг на робочій частоті f .

2.9 Двотактний підсилювач класу E ZVSRF

Двотактний підсилювач потужності класу ZVS з двома радіочастотними дроселями зображений на рисунку 1.6. Схему з двома радіочастотними дроселями можна спростити до форми, зображеної на рисунку 1.7(5.18). Цей підсилювач складається з двох транзисторів, двох шунтуючих конденсаторів C_1 , RF дроселя з центральним відводом трансформатора і послідовно резонансної схеми, що приводиться в дію вторинною обмоткою трансформатора. Індуктивність витoku трансформатора поглинається в резонансну індуктивність L , а вихідні ємності транзистора поглинаються в шунтуючі ємності C_1 .

Форми хвилі напруги та струму, що пояснюють принцип роботи підсилювача на рисунку 1.6 (5.18), зображені на рисунку 1.7 (5.19). Джерело

напруги живлення постійного струму V_I підключено через дросель до центрального крана первинної обмотки вихідного трансформатора. Комутаційні транзистори (MOSFET) вводяться і вимикаються в протилежній фазі. Напруга поперек вторинної обмотки складається з позитивних і негативних імпульсів класу Е. Серія резонансного ланцюга фільтрує всі гармоніки і лише напруга основної складової з'являється на всьому опорі навантаження R_L . Дивні гармоніки в ідеалі дорівнюють нулю у всіх двотактних підсилювачах. Амплітуда вихідної напруги вдвічі більша за амплітуду одно транзисторного підсилювача класу Е. В результаті вихідна потужність збільшується в чотири рази.

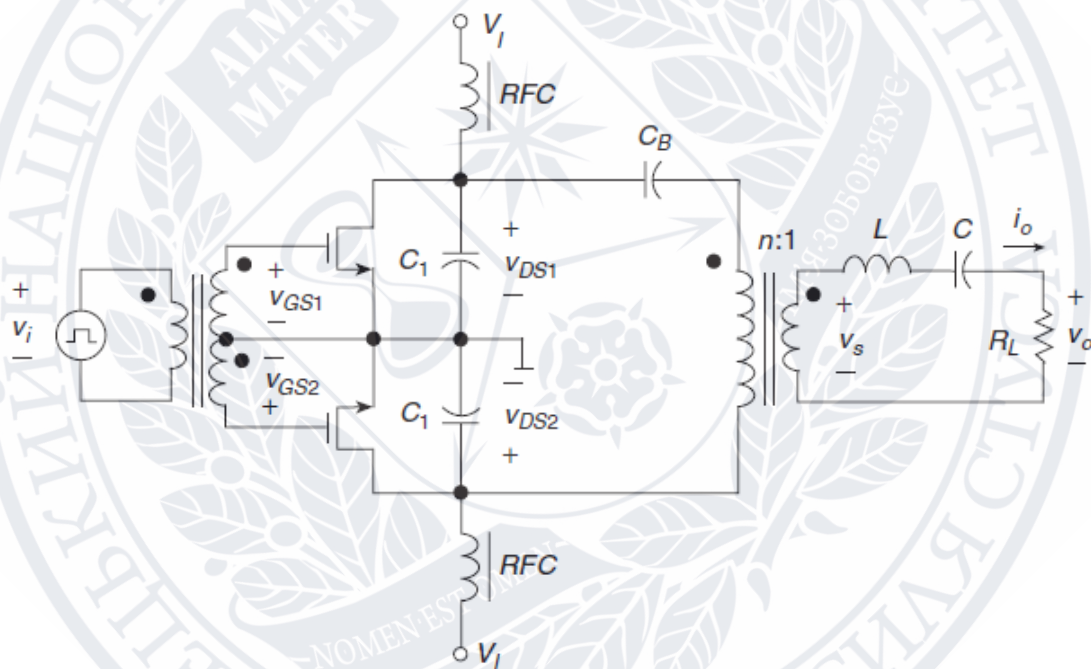


Рисунок 1.6(5.17) Двотактний підсилювач потужності класу Е ZVS з двома радіочастотними дроселями.

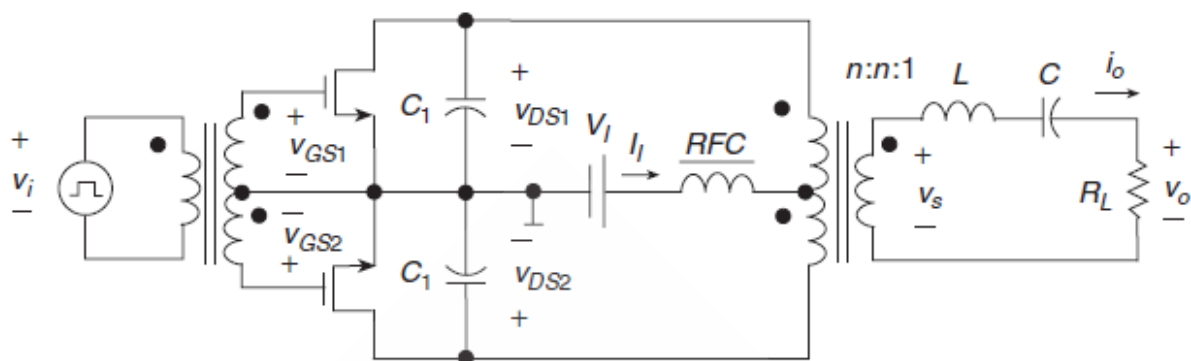


Рисунок 1.7(5.18) Рівночастотний підсилювач потужності класу E ZVS.

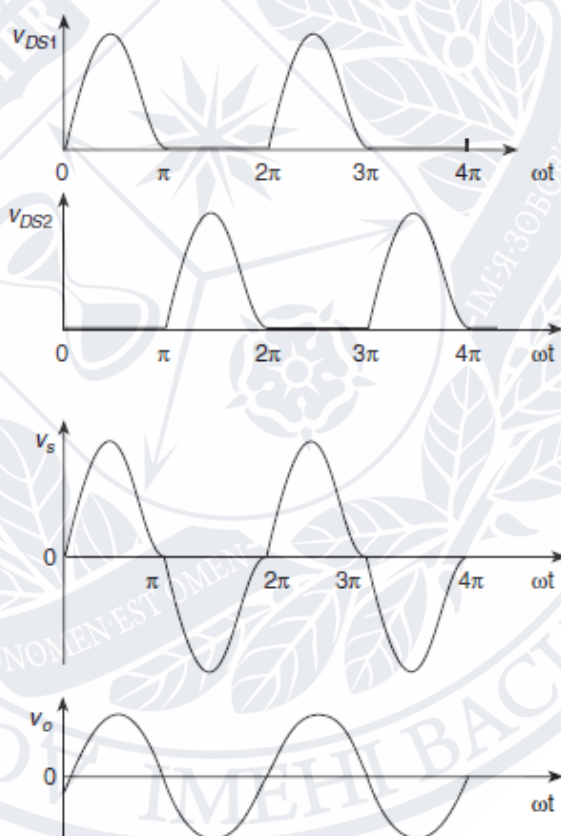


Рисунок 1.8(5.19)Форми сигналу в радіочастотному підсилювачі потужності класу E ZVS.

Опір навантаження, яке бачить кожен транзистор на кожній первинній обмотці, визначається так, де n – відношення обертів трансформатора до числа

витків однієї первинної обмотки до кількості витків первинної обмотки.

Зв'язок між значеннями компонентів є:

$$R = n^2 R_L$$

$$\omega C_1 = \frac{8}{\pi(\pi^2+4)R} = \frac{8}{\pi(\pi^2+4)n^2 R_L} \frac{\omega L_b}{R_L} = \frac{\pi(\pi^2-4)}{16} i$$

$$\frac{1}{\omega C R_L} = \left(Q_L - \frac{\omega L_b}{R_L} \right) = \left[Q_L \frac{\pi(\pi^2-4)}{16} \right].$$

Вихідна потужність:

$$P_o = \frac{32}{\pi^2+4} \frac{V_I^2}{n^2 R_L}.$$

Симетричні RFпідсилювачі потужності класу E ZVSпоказані на рисунку 1.9(5.20) Амплітуди гармонік у навантаженні в цих підсилювачах зменшені, як у двотактних підсилювачах.

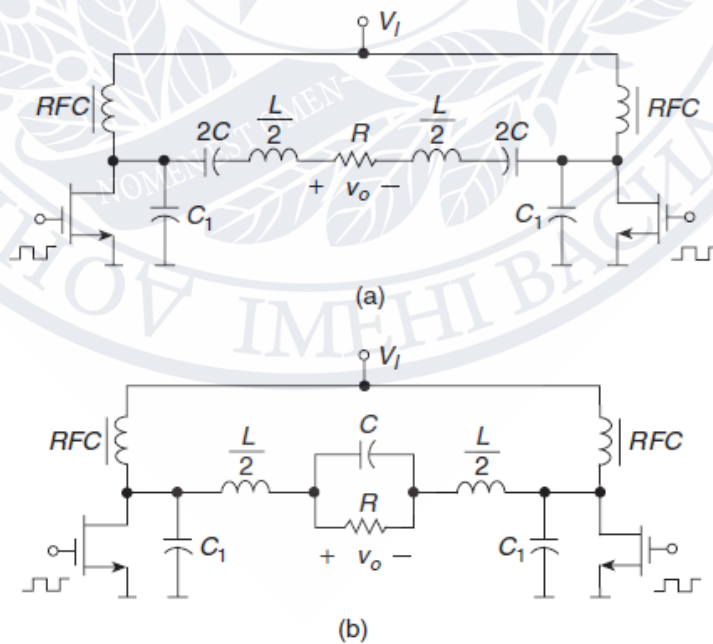


Рисунок 5.20 Симетричні підсилювачі потужності ZVS класу Е із зменшеними гармоніками в навантаженні. (а) Симетричний підсилювач класу Е із послідовно резонансним ланцюгом. (б) Симетричний підсилювач класу Е з послідовно паралельною схемою.



Третяк Денис Романович

Прізвище, ім'я, по батькові

Інформаційних і прикладних технологій

Факультет

105 Прикладна фізика та наноматеріали

Шифр і назва спеціальності

Технології інтернету речей

Освітня програма

ДЕКЛАРАЦІЯ

Усвідомлюючи свою відповідальність за надання неправдивої інформації, стверджую, що подана кваліфікаційна (бакалаврська) робота на тему: «Безпроводна передача даних у тренажері «боксерська груша»» є написаною мною особисто.

Одночасно заявляю, що ця робота:

- не передавалась іншим особам і подається до захисту вперше;
- не порушує авторських та суміжних прав закріплених статтями 21-25 Закону України «Про авторське право та суміжні права»;
- не отримувались іншими особами, а також дані та інформація не отримувались в недозволений спосіб.

Я усвідомлюю, що у разі порушення цього порядку моя кваліфікаційна (бакалаврська) робота буде відхилена без права її захисту, або під час захисту за неї буде поставлена оцінка «незадовільно».

дата

підпис здобувача

