

Національна академія наук України
Інститут електродинаміки

ГУРІН ВІКТОР КОСТЯНТИНОВИЧ

УДК 621.314.58 : 621.391.82 : 621.372.54

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОТИЗАВАДНИХ ЗАСОБІВ У
СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З ВИСОКОЧАСТОТНИМИ
ТРАНЗИСТОРНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ**

Спеціальність 05.09.12 “Напівпровідникові перетворювачі електроенергії”

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті електродинаміки НАН України (м. Київ).

Науковий керівник

- доктор технічних наук
Юрченко Олег Миколайович,
завідувач відділом транзисторних
перетворювачів Інституту електродинаміки
НАН України (м.Київ).

Офіційні опоненти:

- доктор технічних наук, професор
Денисов Юрій Олександрович,
завідувач кафедри електроніки,
автоматики, робототехніки та
мехатоніки Чернігівського національного
технологічного університету МОН
України (м.Чернігів);
- кандидат технічних наук, професор
Пілінський Володимир Володимирович,
професор кафедри звукотехніки та
реєстрації інформації Національного
технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського» (м. Київ).

Захист дисертації відбудеться “ 12 ” червня 2019 р. об 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.187.01 в Інституті електродинаміки НАН України за адресою: 03057, Київ–57, проспект Перемоги, 56. Тел.: 366-26-45.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту електродинаміки НАН України за вищевказаною адресою.

Автореферат розісланий « » 2019 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради

Ю.М. Гориславець

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми досліджень. Прогрес більшості областей сучасної техніки значною мірою визначається успіхами силової електроніки та розвитком перетворювальної техніки. Разом з тим практичне застосування сучасних методів перетворення напруги показало, що такі методи мають серйозний недолік, а саме – вони спричиняють генерацію інтенсивних електромагнітних завад (ЕМЗ) в мережу електроживлення та в навколишнє середовище в широкому спектрі частот від 100 кГц до 30 МГц і вище. Це створює серйозні проблеми із забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) для споживачів електричної енергії.

У розвинених країнах і в Україні жорстко лімітують рівень напруги завад у діапазоні частот від 150 кГц до 30 МГц на електромережному вході будь-якого електро-та радіоелектронного обладнання і рівень електромагнітного поля завад, які випромінює таке обладнання, у діапазоні частот (30..1000) МГц.

ЕМС на таких високих частотах можна умовно назвати «високочастотною ЕМС».

Проблемами високочастотної ЕМС та дослідженнями засобів зменшення ЕМЗ глибоко і плідно займалися І.С. Гурвіч, О.С. Бландова, Henry W. Ott, Donald R.J. White, Shuo Wang та ін., а також вітчизняні вчені – Пілінський В.В., Темніков В.О., Швайченко В.Б., Родіонова М.В., Іванов В.О., П'яних Б.Є., Павловський В.О. та інші.

Традиційні засоби зменшення ЕМЗ, зокрема електромережні протизавадні фільтри (ЕПФ), можуть займати до 30% маси, об'єму та вартості всього перетворювача. Крім того, вони мають струм витoku, який погіршує електробезпеку перетворювача. Це визначає актуальність та важливість робіт по удосконаленню ЕПФ, а також обґрунтовує дослідження таких методів і відповідних їм засобів зменшення завад у транзисторних перетворювачах, які дозволять спростити і здешевити схему і конструкцію ЕПФ або навіть зовсім обійтись без використання останніх.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Науковий напрямок дисертаційної роботи відповідає науково-дослідним роботам відділу транзисторних перетворювачів Інституту електродинаміки НАН України. Робота виконана відповідно до державних та галузевих програм науково-технічних досліджень, а саме: НДР «Розвинути теорію силових високочастотних транзисторних перетворювачів та розробити на її основі надійні, ефективні системи електроживлення перспективного електротехнологічного обладнання» («Частота» №ДР 0109U007912, 2009–2014 рр.); НДР «Розвинути теорію силових високочастотних транзисторних перетворювачів для побудови сучасного енергоефективного технологічного устаткування з урахуванням особливостей різноманітних типів навантаження» («Частота-2», №ДР 0115U002580, 2014–2019 рр.); НДР «Розробка теорії високоефективних перетворювальних пристроїв, що забезпечують електромагнітну сумісність джерел живлення та споживачів енергії в нестационарних режимах» («СИГМА-ШЗ» №ДР 0112U002289, 2012-2016 рр.); НДР «Розроблення теорії та принципів побудови енергоефективних перетворювальних пристроїв стабілізації та регулювання параметрів

електромагнітної енергії для систем живлення сучасних електротехнологічних комплексів» («Сіґма-Ш4» №ДР 0117U000291, 2017-2021 рр.).

Мета і завдання досліджень.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності засобів забезпечення електромагнітної сумісності у системах електроживлення з високочастотними транзисторними перетворювачами за рахунок розробки та впровадження нових схемотехнічних та конструктивних методів їх побудови.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішують такі основні завдання:

- критичний огляд та аналіз інформації щодо ЕМЗ у колах електроживлення та протизавадних засобів у перетворювачах напруги (ПН) ключового типу;
- визначення ефективності протизавадних фільтрів як традиційного засобу покращення показників ЕМС;
- критичний аналіз безфільтрового методу зменшення несиметричних завад від ключових перетворювачів з активною корекцією коефіцієнта потужності (АККП) на основі використання компенсації паразитної ємності перетворювача у несиметричному колі;
- визначення впливу паразитних та конструктивних параметрів реальних компонентів схеми компенсації паразитної ємності перетворювача з АККП у несиметричному колі на рівень його електромагнітних завад, зокрема ступеню магнітного зв'язку між обмотками накопичувального дроселя, міжвиткової ємності та опору втрат згаданого дроселя, а також індуктивності виводів та опору високочастотних втрат компенсувального конденсатора схеми компенсації;
- розроблення математичної моделі перетворювача з АККП як джерела несиметричних завад зі схемою компенсації його паразитної несиметричної ємності для випадку неідеального магнітного зв'язку між обмотками накопичувального дроселя перетворювача;
- електронне моделювання безфільтрового методу зменшення несиметричних завад у типовій схемі ключового перетворювача з АККП та реальними компонентами схеми компенсації з метою перевірки результатів теоретичного розгляду цього методу;
- експериментальні дослідження ефективності безфільтрового методу зменшення несиметричних завад в експериментальному зразку ключового перетворювача з АККП, аналіз результатів експериментальних досліджень та розробка рекомендацій для практичного застосування безфільтрового методу зменшення несиметричних завад у ключових перетворювачах з АККП.

Об'єктом дослідження – є транзисторні перетворювачі ключового типу як генератори електромагнітних завад.

Предмет досліджень – ефективність засобів зменшення електромагнітних завад у перетворювачах напруги ключового типу з АККП.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених у роботі завдань використовувалися методи теорії електричних кіл. Підтвердження достовірності результатів теоретичних досліджень забезпечено комп'ютерним імітаційним моделюванням за допомогою програм OrCAD-PSpice і натурними експериментами.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше доведено ефективність компенсації паразитної ємності обмоток дроселя електромережного протизавадного фільтра (ЕПФ) для випадку неідеального магнітного зв'язку між згаданими обмотками та встановлено прямий зв'язок між коефіцієнтом магнітного зв'язку між цими обмотками та граничною частотою, до якої ефективно працює компенсація паразитної ємності обмотки.

2. Розвинуто метод зменшення взаємних паразитних параметрів у ЕПФ шляхом зменшення магнітного зв'язку між індуктивностями його вхідних та вихідних конденсаторів, який дає змогу збільшити загасання, внесені фільтром, у діапазоні частот (1...20) МГц в середньому на 20 дБ.

3. Вперше визначено необхідні умови ефективної компенсації паразитної ємності між стоком (колектором) силового ключа і корпусом («землею») в транзисторних перетворювачах з АККП для випадку неідеального магнітного зв'язку між обмотками накопичувального дроселя та встановлено прямий зв'язок між ємністю конденсатора схеми компенсації, ступенем магнітного зв'язку і паразитною ємністю перетворювача; що дало змогу мінімізувати напругу несиметричних завад від таких перетворювачів.

4. Вперше розроблено математичну модель перетворювача з АККП як джерела несиметричних завад зі схемою компенсації його паразитної несиметричної ємності для випадку неідеального магнітного зв'язку між обмотками накопичувального дроселя перетворювача, що дозволяє безпосередньо оцінювати вплив паразитних та конструктивних параметрів схеми компенсації з реальними компонентами на рівень несиметричних завад, генерованих перетворювачем.

5. Отримав подальший розвиток безфільтровий метод ефективного зменшення напруги несиметричних завад від транзисторних перетворювачів з АККП для випадку застосування в схемі компенсації реального конденсатора, що має певні високочастотні втрати та індуктивність виводів, і вперше встановлено прямий зв'язок між опором високочастотних втрат такого конденсатора і напругою несиметричних завад від перетворювачів з АККП, що дало змогу сформулювати конкретні технічні вимоги до параметрів та типу такого конденсатора.

Практичне значення отриманих результатів

1. Запропоновано конструкцію двообмоткового накопичувального дроселя (НД) перетворювача, який забезпечує високий ступінь магнітного зв'язку між неоднаковими та зустрічно увімкненими обмотками, який необхідний для ефективної компенсації паразитної ємності між стоком (колектором) силового ключа і корпусом («землею») в транзисторних перетворювачах з АККП у регламентованому діапазоні частот.

2. Запропонований в роботі підхід для побудови ЕПФ дозволив ефективно компенсувати міжвиткову ємність його дроселя у регламентованому діапазоні частот.

3. Розглянуті підходи до електронного моделювання еквівалентної схеми перетворювача з АККП як джерела несиметричних завад і схемою компенсації його

паразитної несиметричної ємності дали змогу сформулювати рекомендації щодо доцільності та особливостей використання кожного виду моделей на різних етапах розробки перетворювача.

4. Розроблено спосіб плавного змінювання ємності конденсатора для схеми компенсації паразитної несиметричної ємності перетворювача з накопичувальним дроселем на вході, який працює в штатному режимі, що дав змогу точно фіксувати момент досягнення мінімальних завад від перетворювача.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові положення та результати, що викладені в дисертаційній роботі, отримані здобувачем особисто.

У друкованих працях, які були опубліковані у співавторстві, здобувачеві належить: у [2] аналіз впливу власних та взаємних паразитних параметрів ЕПФ для джерел електроживлення ключового типу на рівень його загасання; в [1] аналіз ефективності методу зменшення взаємних паразитних параметрів у протизавадних фільтрах для джерел електроживлення ключового типу; в [3] аналіз впливу на ефективність роботи власних та взаємних паразитних параметрів елементів протизавадного фільтра; в [4] теоретичний розрахунок оптимальних значень компонентів схеми компенсації несиметричних завад у транзисторних ВЧ перетворювачах напруги; в [5] аналіз ефективності способу по зменшенню магнітного зв'язку між індуктивностями виводів вхідних та вихідних конденсаторів; в [6] аналіз ефективності протизавадних засобів у високочастотних транзисторних перетворювачах; в [7] модельні дослідження ефективності роботи методу зменшення несиметричних завад від перетворювача напруги з АККП; в [8] розрахунки необхідної ємності конденсатора схеми компенсації несиметричних завад для її максимально ефективної роботи; в [10] імітаційна модель схеми компенсації паразитної ємності між стоком силового транзистора АККП і заземленим корпусом; в [11] розрахунок високочастотних втрат реального накопичувального дроселя у блоці АККП, розрахунок впливу згаданих вище втрат на рівень внесеного загасання схемою компенсації паразитної ємності між стоком силового транзистора і заземленим корпусом; в [9] імітаційна модель для дослідження впливу втрат реального конденсатора на ефективність роботи схеми по зменшенню несиметричних завад на вході ВЧ транзисторного перетворювача з АККП.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на 5 міжнародних науково-технічних конференціях, а саме: XII, XIV і XV конференціях «Проблеми сучасної електротехніки» (м. Вінниця – 2012р. і м. Київ – 2016; 2018 рр.); XXII і XXIV конференціях «Силова електроніка та енергоефективність» (м. Одеса – 2016 р., м. Харків – 2018 рр.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи відображено в 11 наукових працях, опублікованих у наукових фахових виданнях, з яких 5 робіт опубліковано у виданнях, що цитуються у міжнародній наукометричній базі *SCOPUS*.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, трьох додатків та списку використаних джерел з 98

найменувань, 4 додатків. Загальний обсяг роботи становить 151 сторінка, у тому числі 132 сторінки основного тексту, 60 рисунків і 4 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність та доцільність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, викладено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено дані про зв'язок роботи з науковими програмами, апробацію результатів роботи.

У першому розділі проведено аналіз ЕМЗ у колах електроживлення та традиційних методів зменшення ЕМЗ, генерованих в мережу електроживлення транзисторними ПН.

Показано, що важливе місце серед сучасних транзисторних ПН займають ВЧ ПН в тому числі з АККП, оскільки вони покращують форму вхідного струму та збільшують коефіцієнт потужності до значень, близьких до одиниці. Однак високий рівень електромагнітних завад, генерованих такими перетворювачами в діапазоні частот від сотень кілогерц до десятків і сотень мегагерц, вимагає застосування ефективних засобів зменшення згаданих вище завад з метою забезпечення вимог міжнародних стандартів в області ЕМС для таких перетворювачів.

Традиційним і широко розповсюдженим засобом є електромережні протизавадні фільтри. Проведені дослідження показують, що ЕПФ займають до 30 % об'єму, маси та вартості перетворювача. Крім того, ЕПФ на вході перетворювача зменшує електробезпеку останнього, спричинену струмом витoku ЕПФ.

На підставі проведеного аналізу зроблено висновок про те, що ефективність традиційних ЕПФ обмежена також власними та взаємними паразитними параметрами, що зумовлює необхідність покращення їх характеристик. Ефективним протизавадним засобом є так званий безфільтровий метод зменшення завад. Він значно спрощує вимоги до ЕПФ, а у багатьох випадках дозволяє зовсім обійтись без використання фільтрів.

У другому розділі проведено аналіз впливу власних та взаємних паразитних параметрів компонентів ЕПФ на рівень внесеного ним загасання та запропоновані методи по зменшенню цих паразитних параметрів, а також проведене математичне моделювання роботи схем компенсації паразитних параметрів компонентів ЕПФ.

У роботі описано ефективний метод компенсації паразитного магнітного зв'язку між індуктивностями виводів вхідного і вихідного конденсаторів ЕПФ. Він полягає у взаємно перпендикулярному розміщенні двох вхідних і вихідних конденсаторів ЕПФ (рис.1) і дав змогу в десятки разів збільшити загасання, внесені фільтром.

На рис. 2 показано результати математичного моделювання для двох випадків взаємного розташування вхідних і вихідних конденсаторів ЕПФ. З порівняння кривих рис. 2 видно, що взаємно перпендикулярне розміщення вхідного та вихідного конденсаторів ЕПФ дозволяє збільшити загасання, внесені фільтром в діапазоні частот (1..20) МГц, на (15...20) дБ, тобто приблизно у (5...10) разів.

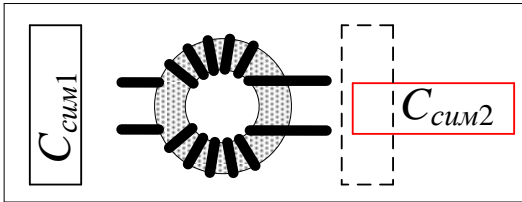


Рис. 1 ЕПФ, вид зверху

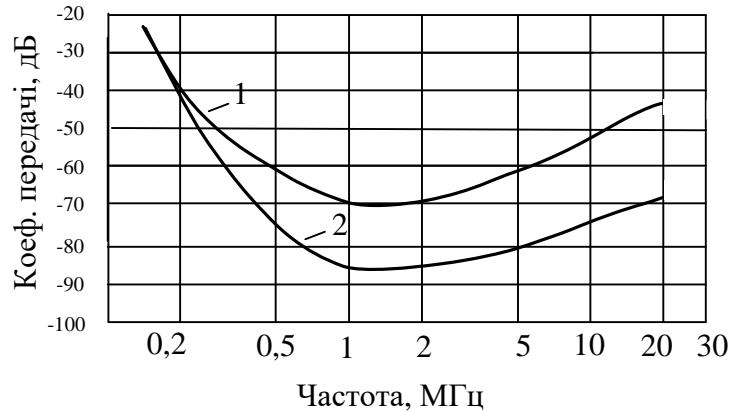


Рис. 2 Коефіцієнти передачі ЕПФ

Одним з основних власних паразитних параметрів ЕПФ є конструктивна міжвиткова ємність дроселя, який входить до складу ЕПФ. Тому для збільшення рівня загасання ЕПФ на високих частотах міжвиткову паразитну ємність потрібно всіляко зменшувати. На рис. 3 представлено схему компенсації зазначеної паразитної міжвиткової ємності C_i .

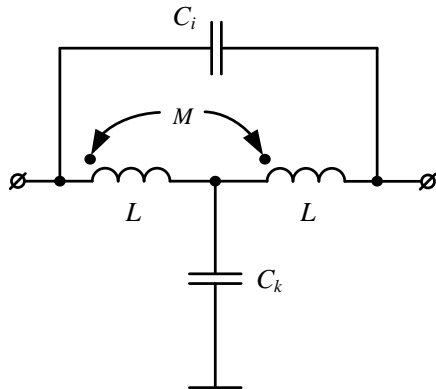


Рис. 3 Схема компенсації паразитної ємності

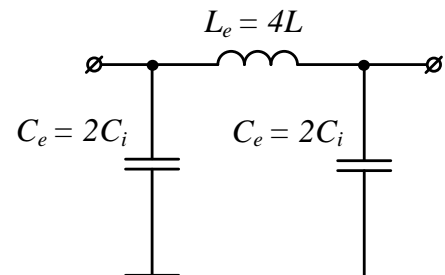


Рис. 4 Магнітно «розв'язана» схема

Для ефективної роботи цієї схеми потрібно, щоб конденсатор C_k схеми компенсації був під'єднаний до точки з'єднання двох однакових обмоток L , які охоплені сильним магнітним зв'язком та увімкнені узгоджено. У роботі було показано, що за наявності граничного індуктивного зв'язку між обмотками (коли коефіцієнт індуктивного зв'язку $k_{зв} = 1$), а ємність конденсатора C_k пов'язана з міжвитковою ємністю дроселя простим співвідношенням $C_k = 4C_i$, відбувається повна компенсація паразитної міжвиткової ємності дроселя. Тоді схема на рис. 3 перетворюється у П – подібну ланку ідеального фільтра нижніх частот, у якого дросель L_e не має міжвиткової ємності (рис. 4). У роботі також досліджено ефективність згаданої вище схеми компенсації за умови неідеального магнітного зв'язку, тобто коли $k_{зв} < 1$. Проведений аналіз дав змогу отримати вираз для ємності конденсатора C_k схеми компенсації за умови $k_{зв} < 1$, при якому відбувається повна компенсація паразитної міжвиткової ємності дроселя ЕПФ:

$$C_k = \frac{k_{зв} + 1}{k_{зв}} 2C_i. \quad (1)$$

Для перевірки правильності виразу (1) були проведені розрахунки загасання, внесеного схемою на рис. 3, за допомогою програми orCAD PSpice. На рис.5 показані криві внесеного загасання при варіації ємності конденсатора C_k на $\pm 25\%$ відносно оптимального значення $C_k^{(opt)}$, обрахованого згідно з виразом (1). Значення $k_{зв}$ було прийнято рівним $k_{зв} = 0,999$.

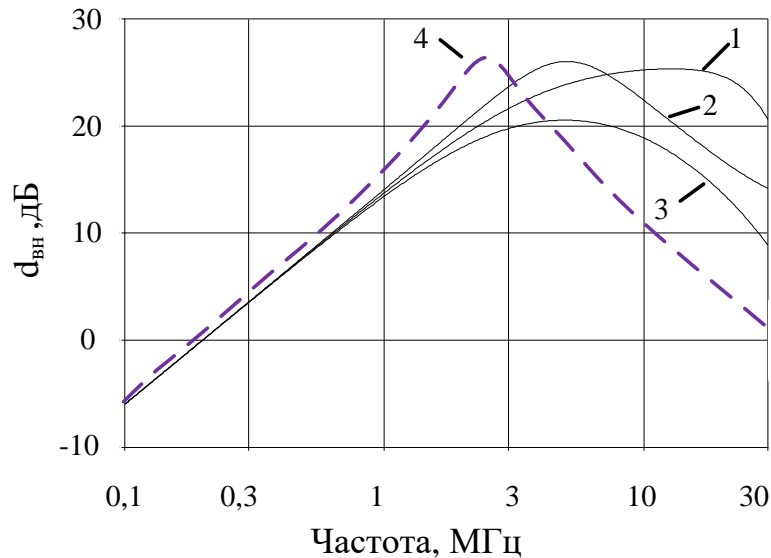


Рис. 5 Внесене загасання схеми при $C_k = \text{varia}$

На рис. 5 прийняті позначення: крива 1 – загасання, внесене схемою, коли ємність $C_k = C_k^{(opt)}$; крива 2 – загасання, коли ємність $C_k = C_k^{(opt)} - 25\%$; крива 3 – загасання, для ємності $C_k = C_k^{(opt)} + 25\%$; крива 4 – загасання без схеми компенсації.

З розгляду графіків рис. 5 видно, що якщо ємність C_k відрізняється всього на $\pm 25\%$ від оптимальної, тоді внесене загасання схеми швидко зменшується на частотах вище 5 МГц відносно загасання згаданої схеми для випадку, коли $C_k = C_k^{(opt)}$. Це свідчить про те, що вираз (1) справді визначає оптимальне значення ємності C_k , яке забезпечує мінімальний рівень завад на вході перетворювача.

Таким чином, проведені дослідження запропонованих методів зменшення власних та взаємних паразитних параметрів ЕПФ підтвердили їх ефективність.

У третьому розділі синтезовано еквівалентну схему транзисторного перетворювача з АККП та проаналізовано її роботу як генератора несиметричних завад, показана важлива роль паразитної ємності між стоком силового транзистора і заземленим корпусом, яка утворює основний шлях для проходження струму несиметричної завади, а також розглянуто роботу схеми компенсації цієї паразитної ємності.

На рис. 6 показана спрощена схема ПН з АККП разом з основними паразитними елементами його схеми і схемою вимірів завад, генерованих цим ПН.

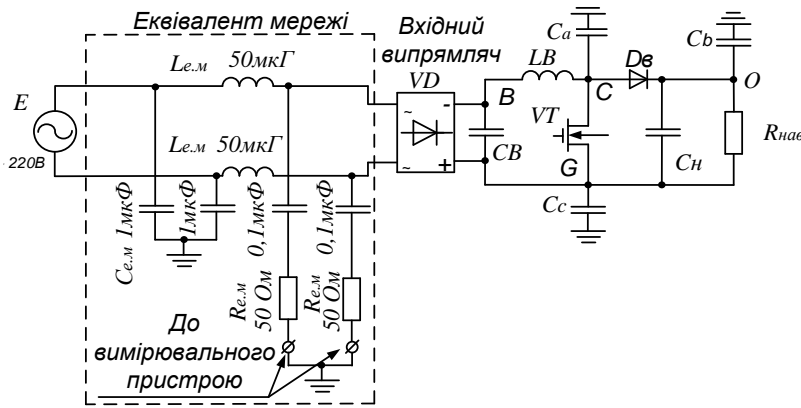


Рис. 6 Спрощена схема перетворювача з АКП

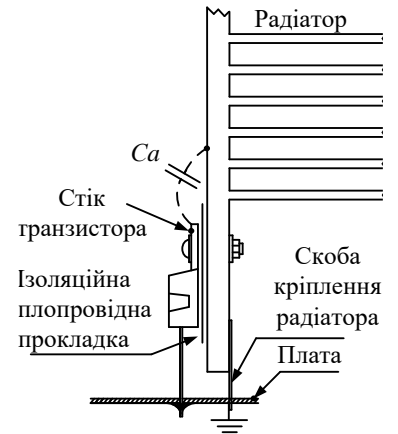


Рис. 7 Силовий транзистор з радіатором

На рис. 7 показана паразитна ємність C_a між стоком силового транзистора і заземленим корпусом радіатора.

Ефективний метод зменшення паразитної ємності C_a , реалізує схема, показана на рис. 8 а. Вона представляє собою дві обмотки з неоднаковою кількістю витків, які охоплені сильним магнітним зв'язком і увімкнені послідовно та зустрічно, а також конденсатор ємністю $C_{комп.}$, увімкнений між точкою з'єднання обмоток і корпусом.

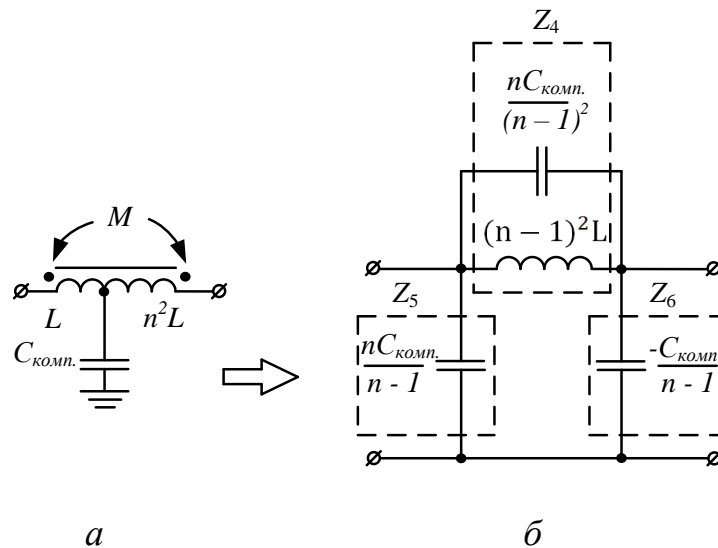


Рис.8 Т-Π перетворення схеми компенсації

Перейшовши від Т-подібної (рис. 8 а) до Π-подібної схеми (рис.8 б), бачимо, що на боках Π - подібної схеми виникають позитивна і негативна ємності.

Замінивши вхідний дросель перетворювача схемою, яка генерує негативну ємність у несиметричному колі, але при цьому зберігає функції звичайного накопичувального дроселя, одержимо схему, зображену на рис. 9 а.

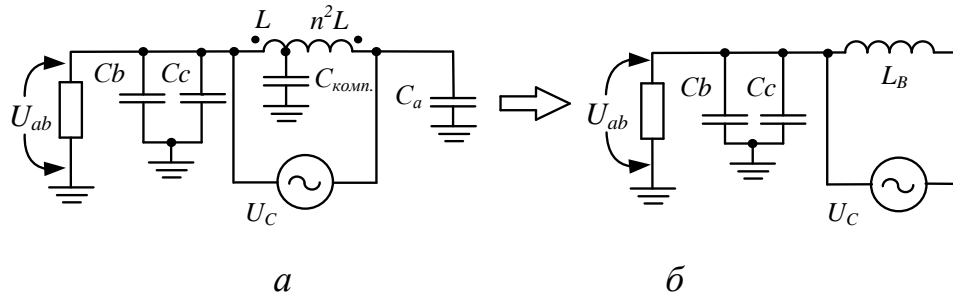


Рис.9 Еквівалентні схеми перетворювача

При певному співвідношенні між витками обмоток дроселя та ємностями $C_{комп}$ і C_a при $k_{зв} = 1$ може відбутись повна компенсація паразитної ємності C_a , тобто розривається шлях для проходження струму несиметричної завади (рис. 9 б). Для його визначення в роботі було знайдено вираз для напруги завади на вході перетворювача:

$$\dot{U}_{ab(p)} = \frac{C_a \dot{U}_c R_1 p + \dot{U}_c R_1 p C_{комп} - C_a \dot{U}_c R_1 n p}{n - R_1 p C_{комп} - C_1 R_1 p - C_a R_1 p + C_1 R_1 n p + C_a R_1 n p + R_1 n p C_{комп} - 1}$$

З цього рівняння отримано вираз для оптимального значення компенсуючого конденсатора, при якому напруга завади U_{ab} від перетворювача $U_{ab} \rightarrow 0$: $C_{комп} = C_a \cdot (n-1)$. Для такого значення $C_{комп}$ відбувається розрив електричного кола між правим виводом джерела напруги U_c і корпусом (рис. 9 б), отже зникає шлях для протікання струму несиметричної завади. Для перевірки правильності одержаного виразу в роботі проведено електронне моделювання еквівалентної схеми, зображеної на рис. 9 а, в програмному пакеті схемотехнічного моделювання orCAD PSpice. Результат електронного моделювання зі схемою компенсації паразитної ємності C_a та без такої компенсації показано на рис. 10. На цьому рисунку прийняті такі позначення:

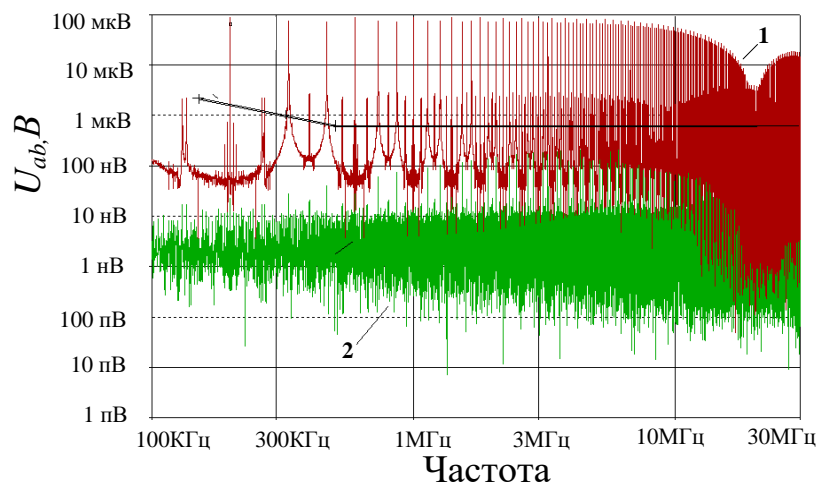


Рис. 10 АЧХ рівня завад на вході перетворювача:

графік 1 – рівень завад без схеми компенсації паразитної ємності C_a ; графік 2 – рівень завад зі схемою компенсації паразитної ємності C_a .

З розгляду рис. 10 видно, що запропонований метод компенсації паразитної ємності C_a в сотні разів зменшує інтенсивність несиметричних завад, генерованих перетворювачем напруги з накопичувальним дроселем на вході, в діапазоні частот від 100 кГц до 10 МГц. У діапазоні частот від 10 МГц до 30 МГц вираш від роботи схеми компенсації зменшується, але залишається достатньо великим.

У четвертому розділі розглянуто вплив паразитних та конструктивних параметрів (високочастотні втрати конденсатора, неідеальний магнітний зв'язок між обмотками дроселя тощо) схеми компенсації паразитної ємності перетворювача з АККП на рівень генерованих ним завад.

На рис. 11 наведена еквівалентна схема перетворювача, в якій конденсатор $C_{комп}$ має високочастотні втрати R_{c1} .

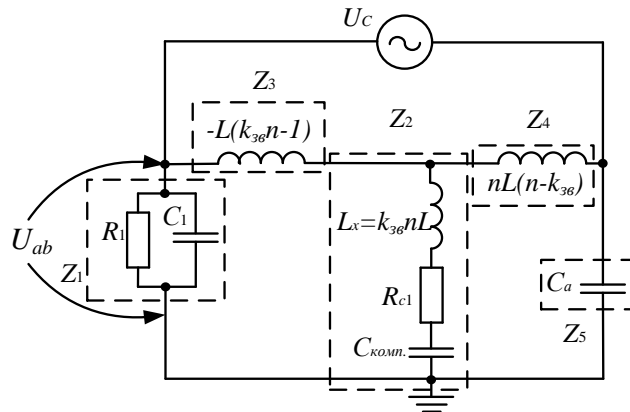


Рис. 11 Еквівалентна схема перетворювача з високочастотними втратами конденсатора $C_{комп}$

Після розрахунку цієї схеми методом контурних струмів та спрощень одержаних виразів одержано формулу для знаходження $C_{комп}$ при врахуванні паразитних високочастотних втрат R_{c1} :

$$C_{комп} = C_a(n-1) \cdot \frac{1}{C_a R_{c1} 2\pi f - C_a R_{c1} n 2\pi f + 1} \quad (2)$$

Проаналізувавши правий співмножник у виразі (2), можна переконатися, що в регламентованому діапазоні частот 100 кГц...30 МГц для типових значень $C_a = 20...50$ пФ, і $R_{c1} = (0,2...0,5)$ Ом та типових значень $n = 50$ цей співмножник мало відрізняється від одиниці. Це означає, що

$$C_{комп} \approx C_a \cdot (n-1) \quad (3)$$

Отже, ємність конденсатора схеми компенсації, обрахована у відповідності з виразом (3), має забезпечити мінімальний рівень напруги завад U_{ab} від перетворювача з АККП порівняно з будь-яким іншим значенням цієї ємності незалежно від високочастотних втрат зазначеного конденсатора.

Для перевірки одержаних результатів проведено моделювання схеми, наведеної на рис. 11, за допомогою програми orCAD PSpice. Результати моделювання показані на рис. 12. Суцільною лінією позначено залежність напруги

U_{ab} від частоти для випадку, коли $C_{комн} \approx C_a \cdot (n-1)$, пунктирною лінією позначена аналогічна залежність, коли ємність конденсатора $C_{комн}$ має невеликий розкид $\pm \Delta C_1$ відносно значення, обрахованого згідно з виразом (3).

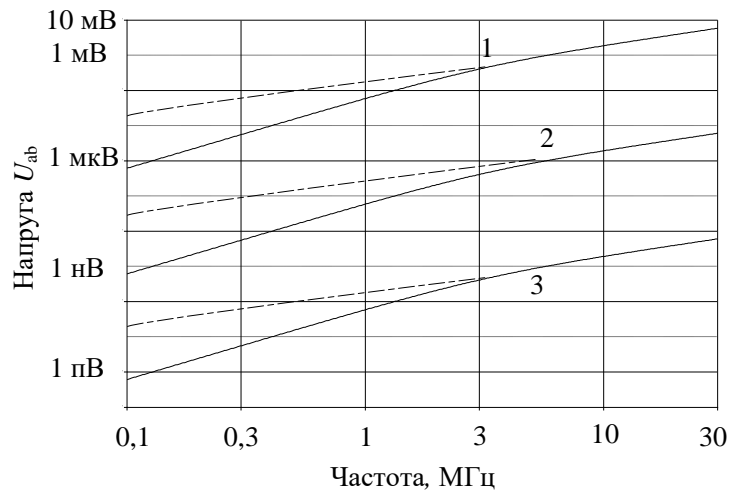


Рис. 12 Напруга завади на виході перетворювача

Криві 1 на рис. 12 побудовані для $R_{c1} = 1$ Ом, криві 2 – для $R_{c1} = 1$ мОм, криві 3 – для $R_{c1} = 1$ мкОм.

З рис. 12 випливає, що для будь-якого фіксованого опору втрат конденсатора $C_{комн}$, ємність цього конденсатора, обрахована згідно з виразом (3), забезпечує мінімально можливу напругу завад U_{ab} порівняно з будь-яким іншим значенням ємності конденсатора $C_{комн}$. З рис. 12 також видно, що напруга завад U_{ab} є обернено пропорційною опору втрат R_{c1} конденсатора, тобто чим менші височастотні втрати у конденсаторі $C_{комн}$, тим ефективніше працює схема компенсації.

Для аналізу впливу магнітного зв'язку між двома обмотками дроселя схеми компенсації паразитної ємності перетворювача на напругу завади від перетворювача у роботі отримано формулу (4):

$$U_{ab} = Z_1 \cdot \left[- \frac{U_c (Z_2 Z_3 + Z_2 Z_4 + Z_3 Z_4 + Z_3 Z_5)}{Z_1 Z_2 Z_3 + Z_1 Z_2 Z_4 + Z_1 Z_3 Z_4 + Z_1 Z_3 Z_5 + Z_1 Z_4 Z_5 + Z_2 Z_3 Z_5 + Z_2 Z_4 Z_5 + Z_3 Z_4 Z_5} \right] \quad (4)$$

Після проведення перетворень отримано:

$$|U_{ab}| = \frac{\left| \frac{1 - nk_{36}}{n(n - k_{36})} \left(\omega n^2 L - \frac{C + C_a}{\omega C C_a} \right) + \omega n L k_{36} - \frac{1}{\omega C} \right|}{\sqrt{\left(K_1^{(M)} \cdot K_3^{(M)} - K_2^{(M)} \cdot K_4^{(M)} \right)^2 + a_{11}^2 \cdot \left[K_4^{(M)} \right]^2}} \cdot \frac{R_1}{\sqrt{1 + (\omega R_1 C_1)^2}} \quad (5)$$

У виразі (5) коефіцієнти $K_1^{(M)} \dots K_4^{(M)}$ - це вирази, які залежать від елементів схеми та від ступеню магнітного зв'язку між обмотками дроселя.

Після перетворень та спрощень було отримано вираз для напруги U_{ab} :

$$U_{ab} \sim \frac{1-n \cdot k_{3\phi}}{n \cdot (n-k_{3\phi})} \left(\omega \cdot n^2 L - \frac{C+C_a}{\omega \cdot C \cdot C_a} \right) + \omega \cdot n \cdot k_{3\phi} - \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (6)$$

За умови, що $n \cdot k_{3\phi} \gg 1$, а коефіцієнт магнітного зв'язку $k_{3\phi} = 0,7 \dots 0,99$, вираз (6) можна додатково спростити:

$$U_{ab} \sim \frac{1}{\omega \cdot C} \left[\frac{k_{3\phi}}{n} \cdot \left(\frac{C}{C_a} + 1 \right) - 1 \right] \quad (7)$$

З виразу (7) видно, що для того, щоб $U_{ab} \rightarrow 0$, потрібно, щоб $\frac{k_{3\phi}}{n} \cdot \left(\frac{C}{C_a} + 1 \right) - 1 = 0$, звідки:

$$C_{\text{комп.}} = C_a \cdot (n/k_{3\phi} - 1) \quad (8)$$

Якщо для виразу (8) прийняти, що $k_{3\phi} = 1$, то він переходить у вираз (3), що підтверджує правильність математичних розрахунків.

Для перевірки ефективності компенсації паразитної ємності C_a з урахуванням магнітного зв'язку досліджено коефіцієнт передачі по напрузі K_u схеми компенсації, зображеної на рис. 9 а, у діапазоні робочих частот від 100 кГц до 30 МГц та коефіцієнта магнітного зв'язку $k_{3\phi} = 0,9$ за допомогою електронного моделювання.

На графіках рис. 13 показано коефіцієнт передачі K_u для таких трьох випадків:

- 1) компенсація відсутня;
- 2) ємність компенсуючого конденсатора визначалась виразом $C_{\text{комп.}} = C_a \cdot (n-1)$, який був одержаний для коефіцієнта магнітного зв'язку $k_{3\phi} = 1$;
- 3) ємність компенсуючого конденсатора визначалась виразом (9).

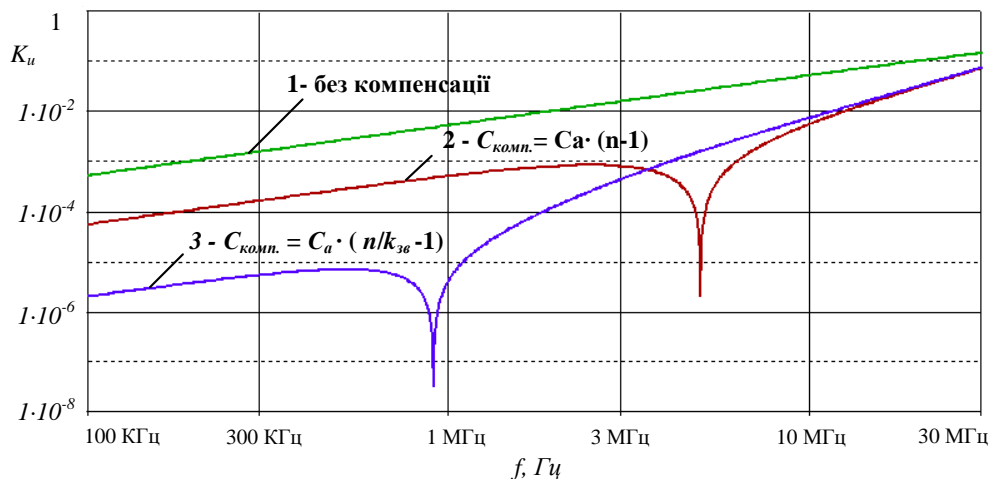


Рис.13 АЧХ напруги на виході перетворювача для трьох випадків $k_{3\phi}$

З розгляду кривих на рис.13 видно, що коефіцієнти передачі, які зображені на кривих 2 і 3, мінімум на порядок менші, ніж коефіцієнт передачі, зображений на кривій 1. Це підтверджує ефективність роботи схеми компенсації, а також практичне значення формули (9) для розрахунку $C_{\text{комп}}$ при $k_{3\phi} \leq 1$. Крім того, з

кривих 2 і 3 видно чітке збільшення коефіцієнтів передачі із збільшенням частоти, що підтверджено результатами практичних досліджень.

Ефективність роботи схеми компенсації паразитної ємності C_a також досліджена для випадку, коли джерелом завади є напруга U_c , яка по формі близька до меандру. Така форма напруги наближує моделювання схеми компенсації до реальних умов її роботи.

Результати моделювання показані на рис. 14 (суцільна лінія). Для порівняння на цьому ж рисунку пунктиром показано напругу завад, коли ємність $C_{\text{комп}}$ конденсатора схеми компенсації паразитної ємності C_a обраховували згідно з виразом (3). Крім того, штрих-пунктирною лінією на тому ж графіку показана напруга завад при відсутності компенсації ємності C_a .

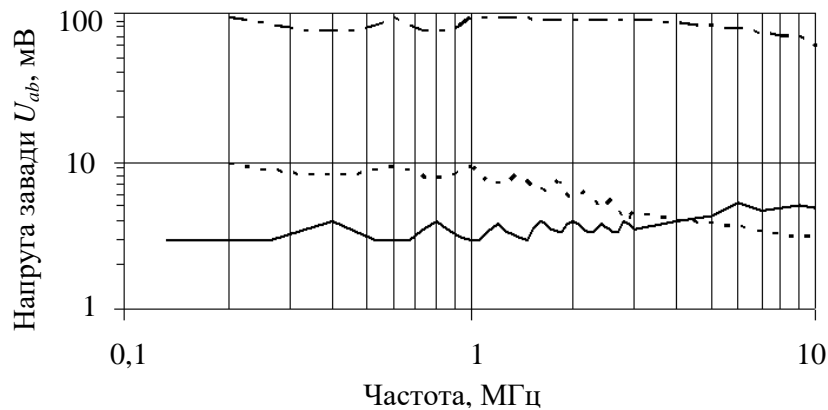


Рис. 14 Напруга завад, генерована перетворювачем

З розгляду кривих на рис. 14 видно, що при відсутності компенсації паразитної ємності C_a напруга завад від перетворювача сягає майже 100 мВ у діапазоні частот від 0,15 МГц до 10 МГц. Такий рівень завад в сто і більше разів перевищує гранично припустимий рівень, який регламентується вітчизняними і міжнародними стандартами з електромагнітної сумісності. З (рис. 14) також видно, що введення компенсації значно зменшує рівень завад, генерованих перетворювачем, а розрахунок ємності компенсуючого конденсатора з врахуванням реально досяжного магнітного зв'язку $k_{зв} < 1$ між обмотками накопичувального дроселя дозволяє ще у декілька раз зменшити напругу завад на вхідних контактах перетворювача у порівнянні з використанням формули (3), отриманої для ідеального випадку $k_{зв} = 1$.

Таким чином, результати електронного моделювання підтвердили правильність математичних розрахунків, та показали ефективність запропонованого методу компенсації паразитної ємності і як наслідок зменшення напруги несиметричних завад, генерованих транзисторним ПН з АККП.

Щодо таких паразитних і конструктивних параметрів схеми компенсації, як міжвиткова ємність накопичувального дроселя перетворювача з АККП та індуктивність виводів компенсуючого конденсатора, то проведені дослідження показали, що ці параметри практично не впливають на ефективність компенсації.

У п'ятому розділі наведені результати експериментального дослідження впливу компенсації паразитної ємності у несиметричному колі перетворювача на рівень його електромагнітних завад. На (рис. 15) зображений макет експериментального зразка перетворювача з АККП разом із схемою компенсації паразитної несиметричної ємності його силового транзистора і баластним навантаженням. Номінальна потужність перетворювача склала 560 Вт.

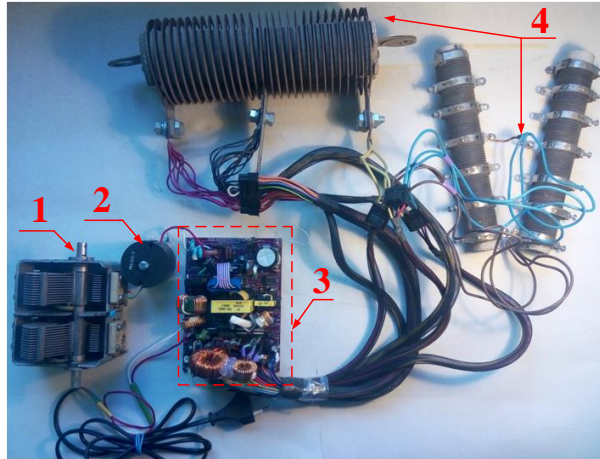


Рис. 15 Макет перетворювача зі схемою компенсації і баластним навантаженням

1 – конденсатор змінної ємності; 2 – двообмотковий вхідний дросель;
3 – ІБЖ типу HPU-4K580 разом з блоком АККП; 4 – баластне навантаження.

Вимірювання напруги кондуктивних несиметричних електромагнітних завад виконувались згідно із методикою, викладеної у ДСТУ EN 55022:2014, ДСТУ EN 55024:2014, CISPR 16-2-1-2016. На рис. 16 показано розташування вимірювальних і досліджуваного пристроїв згідно зі стандартизованою методикою вимірів напруги завад.

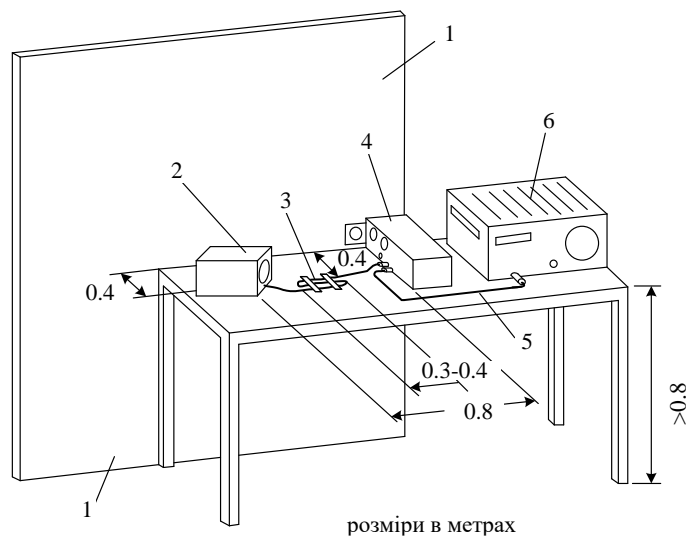


Рис. 16 Стенд для вимірювання ЕМЗ від перетворювача напруги

1 – металевий екран розміром 2x2 м; 2 – експериментальний зразок перетворювача;

3 – надлишок проводу живлення; 4 – еквівалент мережі; 5 – коаксіальний кабель;
6 – спектроаналізатор або селективний мікровольтметр.

Для перевірки ефективності методу компенсації проведені прямі виміри напруги завад, генерованих експериментальним зразком перетворювача у регламентованому діапазоні частот від 100 кГц до 30 МГц. На рис. 15 цифрою 1 показано рівень завад від перетворювача без схеми компенсації паразитної несиметричної ємності, цифрою 2 – рівень завад за наявності такої компенсації.

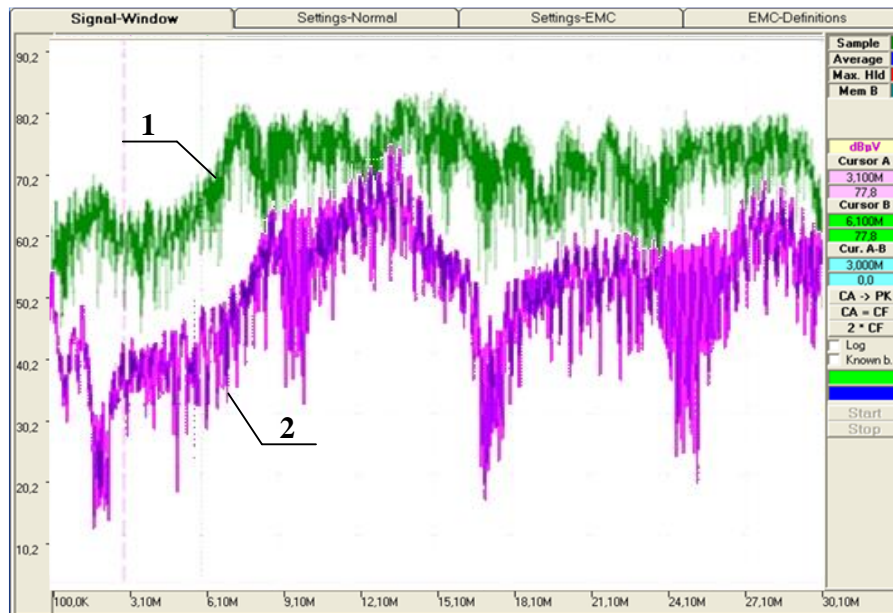


Рис. 17 Рівень несиметричних завад, генерованих експериментальним зразком перетворювача з АККП

З рис. 17 видно, що застосування схеми компенсації паразитної несиметричної ємності у перетворювачі з АККП знижує рівень його несиметричних завад у регламентованому діапазоні частот на (10...35) дБ, тобто у 3..56 разів.

Таким чином, експериментальна перевірка впливу компенсації паразитної ємності у несиметричному колі перетворювача з АККП на рівень його електромагнітних завад у регламентованому діапазоні частот підтвердила ефективність цього безфільтрового протизавадного засобу.

У додатках представлено список опублікованих праць за темою дисертації, матеріали щодо впровадження результатів дисертаційної роботи, а також матеріали деяких математичних розрахунків методу зменшення ЕМЗ у ПН з АККП.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі результатів проведених досліджень вирішено актуальне наукове завдання підвищення ефективності засобів забезпечення електромагнітної сумісності у системах електроживлення з високочастотними транзисторними перетворювачами за рахунок дослідження, розробки та впровадження нових схемотехнічних та конструктивних методів їх побудови.

При цьому отримано такі результати:

1. Показано, що сучасні перетворювачі напруги створюють інтенсивні електромагнітні завади у діапазоні частот від десятків кілогерц до сотень і тисяч мегагерц, які розповсюджуються у навколишнє середовище у вигляді електромагнітних полів та поступають в мережу електроживлення у вигляді напруги кондуктивних завад. Завади спричинені електромагнітними процесами, які виникають в реактивних компонентах перетворювача під час періодичної комутації його силових транзисторних ключів, а рівень цих завад часто перевищує гранично допустимі значення, регламентовані вітчизняними та міжнародними стандартами з електромагнітної сумісності.

2. Проведено електронне моделювання еквівалентної схеми ЕПФ з урахуванням власних та взаємних паразитних параметрів, яке дозволило оцінити вплив цих паразитних параметрів на рівень загасання, внесеного ЕПФ.

3. Досліджено метод компенсації паразитної ємності обмотки дроселя у ЕПФ для випадку неідеального зв'язку між обмотками схеми компенсації. Одержано вираз для оптимального значення ємності конденсатора у схемі компенсації в залежності від ступеню магнітного зв'язку між згаданими обмотками, а також вирази для граничної частоти та мінімально допустимого коефіцієнта магнітного зв'язку з точки зору ефективної компенсації паразитної ємності обмотки згаданого дроселя.

4. Запропоновано метод зменшення впливу власних та взаємних паразитних параметрів ЕПФ, а саме - зменшення магнітного зв'язку між індуктивностями виводів його вхідних та вихідних конденсаторів, який дозволив збільшити загасання, внесене ЕПФ у діапазоні частот 1...20 МГц, в середньому на 20 дБ, тобто на цілий порядок.

5. Проведено аналіз безфільтрового методу зменшення несиметричних завад від ключових перетворювачів з АККП і одержано співвідношення, які дозволили кількісно оцінити вплив паразитних та конструктивних параметрів реальної схеми компенсації паразитної несиметричної ємності перетворювача з АККП на ефективність роботи схеми компенсації.

6. Розроблено математичну модель перетворювача з АККП як джерела несиметричних завад, яка дозволила безпосередньо оцінити вплив паразитних та конструктивних параметрів схеми компенсації з реальними компонентами на рівень несиметричних завад, генерованих перетворювачем.

7. Вперше одержано вираз для оптимального значення ємності компенсуючого конденсатора схеми компенсації у ПН з АККП в залежності від ступеню магнітного зв'язку між обмотками його дроселя.

8. Електронне моделювання безфільтрового методу зменшення несиметричних завад у перетворювачі з АККП з використанням пакета програм PSpice підтвердило результати аналітичних досліджень (похибка не перевищує 5 %).

9. Порівняльний аналіз результатів електронного моделювання з експериментальними даними, отриманими за допомогою розробленого та виготовленого макету ключового перетворювача з АККП, підтвердив адекватність створених моделей.

10. Запропонований метод збільшення загасання ЕПФ використано у ТОВ «ЕМСБІ», що підтверджено відповідним актом. Результати дисертаційної роботи також впроваджено в навчальний процес кафедри промислової електроніки НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

11. Наукові результати роботи можуть бути використані для розробки та удосконалення засобів зменшення електромагнітних завад у високочастотних транзисторних перетворювачах напруги, а також у навчальних програмах кафедр промислової електроніки та електротехнічних профілів у закладах вищої освіти України.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Гурін В.К., Павловський В.О., Юрченко О.М. Методи зменшення взаємних паразитних параметрів у протизавадних фільтрах для джерел електроживлення ключового типу. *Технічна електродинаміка. Темат. вип. "Силова електроніка та енергоефективність"*. 2012. С. 24-26.

2. Гурін В.К., Павловський В.О., Юрченко О.М. Власні та взаємні паразитні параметри елементів протизавадних фільтрів для джерела електроживлення ключового типу. *Техн. електродинаміка*. 2012. № 2. С.119-120.

3. Юрченко О.М., Юрченко М.М., Гуцалюк В.Я., Павловський В.О., Герасименко П.Ю., Твердохліб Ю.О., Гурін В.К. Підвищення ефективності високочастотних транзисторних перетворювачів для систем електроживлення технологічних установок. *Праці ІЕД НАН України*. 2012. №32. С. 129-139.

4. Юрченко О.М., Юрченко М.М., Гуцалюк В.Я., Павловський В.О., Герасименко П.Ю., Твердохліб Ю.О., Гурін В.К. Розробка високоефективних транзисторних перетворювачів для систем електроживлення технологічних установок. *Праці ІЕД НАН України*. 2013. №35. С. 123 -134.

5. Гурін В.К., Павловський В.О., Юрченко О.М. Особливості магнітного зв'язку між індуктивностями виводів вхідних і вихідних конденсаторів у протизавадних фільтрах. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 1. С.51-55.

6. Юрченко О.М., Юрченко М.М., Гуцалюк В.Я., Гурін В.К., Павловський В.О., Герасименко П.Ю., Твердохліб Ю.О., Високочастотні транзисторні перетворювачі для високоефективних систем електроживлення технологічних установок. *Праці ІЕД НАН України*. 2014. №38. С.137-145.

7. В.К. Гурін, В.О. Павловський, Юрченко О.М. Метод зменшення несиметричних завад від перетворювача напруги з накопичувальним дроселем. *Праці ІЕД НАН України*. 2015. № 41. С. 117-120.

8. Гурін В.К., Павловський В.О., Юрченко О.М. Зменшення кондуктивних завад на вході транзисторних перетворювачів з накопичувальним дроселем. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 4. С. 50-52.

9. Гурін В.К., Павловський В.О., Юрченко О.М. Вплив втрат реального конденсатора при застосуванні оригінального метода зменшення кондуктивних

завад від транзисторних перетворювачів з накопичувальним дроселем. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 1. С.21-24.

Наукові праці апробаційного характеру:

10. Гурін В.К., Павловський В.О., Юрченко О.М. Підвищення ефективності засобів поліпшення електромагнітної сумісності у системах електроживлення з високочастотними транзисторними перетворювачами. Електротехніка та електромеханіка. Спец. вип. до 22 МНТК «Силова електроніка та енергоефективність». Київ. 2016. Т.2. С. 46-53. (Опубліковано за матеріалами XXII міжнародної науково-технічної конференції «Силова електроніка та енергоефективність»).

11. Гурін В.К., Павловський В.О., Юрченко О.М., Твердохліб Ю.О. Вплив високочастотних втрат у реальному накопичувальному дроселі транзисторних перетворювачів при застосуванні безфільтрового методу зменшення кондуктивних завад. *Вісник НТУ "ХПІ"*. Вип. 26. Том 1. 2018. С.162 -166. (Опубліковано за матеріалами XXIV міжнародної науково-технічної конференції «Силова електроніка та енергоефективність»).

АНОТАЦІЇ

Гурін В.К. Підвищення ефективності протизавадних засобів у системах електроживлення з високочастотними транзисторними перетворювачами. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії. – Інститут електродинаміки Національної академії наук України, Київ, 2019.

Дисертація присвячена підвищенню ефективності засобів забезпечення електромагнітної сумісності у системах електроживлення з високочастотними транзисторними перетворювачами за рахунок дослідження, розробки та впровадження нових схемотехнічних та конструктивних методів їх побудови.

Проаналізовано вплив власних та взаємних паразитних параметрів ЕПФ на внесене ним загасання та досліджено метод зменшення одного з цих параметрів шляхом взаємно-перпендикулярного розташування його вхідних та вихідних конденсаторів, який дозволив збільшити на 20 дБ загасання внесене ЕПФ у діапазоні частот (1...20) МГц, тобто на цілий порядок.

Вперше доведено ефективність компенсації паразитної ємності обмоток дроселя ЕПФ для випадку неідеального магнітного зв'язку між згаданими обмотками та встановлено прямий зв'язок між коефіцієнтом магнітного зв'язку та граничною частотою, до якої ефективно працює компенсація.

Вперше визначено необхідні умови ефективної компенсації паразитної ємності між стоком (колектором) силового ключа і корпусом («землею») в транзисторних перетворювачах з АККП для випадку неідеального магнітного зв'язку між обмотками накопичувального дроселя та встановлено прямий зв'язок між ємністю конденсатора схеми компенсації, ступенем магнітного зв'язку і згаданою вище паразитною ємністю перетворювача.

Розроблено математичну модель перетворювача з АККП як джерела несиметричних завад зі схемою компенсації його паразитної несиметричної ємності для випадку неідеального магнітного зв'язку між обмотками накопичувального дроселя перетворювача.

Результати теоретичних досліджень перевірено електронним моделюванням безфільтрового методу зменшення несиметричних завад від перетворювача з АККП з використанням пакета програм PSpice. Моделювання підтвердило результати аналітичних досліджень, похибка між результатами не перевищувала 10 %.

Для експериментальної перевірки отриманих результатів розроблено та виготовлено лабораторний макет перетворювача напруги з АККП разом зі схемою компенсації несиметричної паразитної ємності перетворювача; в макеті був використаний комп'ютерний блок живлення типу HPU-4K580. Порівняльний аналіз результатів електронного моделювання з експериментальними даними підтвердив адекватність створених моделей.

Ключові слова: перетворювач напруги, коректор коефіцієнта потужності, електромагнітна сумісність, електромагнітні завади, протизавадні фільтри.

Gurin V.K. Improving the effectiveness of noise reduction means in power supply systems with high-frequency transistor converters. – Qualification scientific paper on the rights of manuscript.

A dissertation for the degree of candidate of technical sciences on the specialty 05.09.12 – semiconductor converters of electric energy – Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the efficiency increase of electromagnetic compatibility (EMC) providing means in power supply systems with high - frequency transistor converters by research, development and implementation of new circuit engineering and design methods.

The influence of self and mutual parasitic parameters of the EMI filter on its insertion loss has been analyzed and a simple method of reducing one of these parameters is investigated by the mutually perpendicular arrangement of its input and output capacitors; due to this, the insertion loss of the EMI suppression filter in the frequency range of 1 ... 20 MHz has been increased by 20 dB, that is an order of magnitude.

For the first time it is proved the efficiency of the EMI suppression filter's choke parasitic capacitance cancellation for the non-ideal magnetic coupling between choke's windings and the direct connection between the mutual-coupling coefficient and the upper frequency, to which the choke's parasitic capacitance cancellation is effective.

For the first time necessary conditions for effective canceling of the parasitic capacitance between the drain (collector) of the power switch and the case ("earth") in transistor converters with APFC for the non-ideal magnetic coupling between the windings of the accumulation choke were determined, and the direct connection between the canceling circuit capacitor's capacitance, the degree of magnetic coupling and the above mentioned parasitic capacitance of the converter was established.

A mathematical model of the converter with APFC as a source of CM noise with the circuit of compensation of its parasitic CM noise for the case of non-ideal magnetic

connection between the windings of the accumulation choke of the converter was developed.

Results of theoretical studies were checked by electronic simulation of the filter-free method of reducing the CM noise from the converter with APFC using the PSpice software package. The simulation confirmed the results of analytical research, the error between the results did not exceed 10%.

For experimental verification the obtained results, a prototype of the voltage converter with APFC was developed and manufactured together with the parasitic CM capacitance canceling circuit; a computer power supply HPU-4K580 was used in the prototype as its basic part. A comparative analysis of the electronic modeling results and experimental data confirmed the adequacy of the created models.

Keywords: voltage converter, active power factor correction, electromagnetic compatibility, electromagnetic noise, electromagnetic interference (EMI) suppression filters.