

С.А. Найда, Ю.О. Оникієнко, О.І. Дрозденко, О.І. Смоленська, В.С. Баран, Н.О. Якуніна

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ІНДУКТИВНОСТІ НАВАНТАЖЕННЯ НА СПРИЧИНЕНІ «МЕРТВИМ ЧАСОМ» НЕЛІНІЙНІ СПОТВОРЕННЯ ПІДСИЛЮВАЧА КЛАСУ D

В роботі досліджено вплив індуктивності навантаження підсилювача класу D на значення коефіцієнту гармонічних спотворень (КГС) на виході для різних значень тривалості «мертвого часу» або вимкненого стану вихідних транзисторів. Оцінена адекватність існуючих математичних моделей для розрахунку КГС на виході підсилювача в залежності від тривалості «мертвого часу». Наведено результати комп'ютерного моделювання підсилювача класу D та досліджено значення КГС на виході в залежності від різних номіналів індуктивності вихідного дроселя. Виконано порівняння теоретично обчислених значень з результатами комп'ютерного моделювання. В результаті дослідження встановлено, що КГС, спричинений наявністю «мертвого часу» залежить від індуктивності навантаження. Отриманий у результаті моделювання КГС співпадає з розрахованим за формулою тільки для певних значень індуктивності навантаження. В моделі використано GaN транзистори, що дозволило дослідити роботу підсилювача у широкому діапазоні частот перемикання. Бібл. 10, табл. 2, рис. 8.

Ключові слова: GaN транзистори, підсилювачі класу D, нелінійні спотворення, «мертвий час», коефіцієнт гармонічних спотворень.

В работе исследовано влияние индуктивности нагрузки усилителя класса D на значение коэффициента гармонических искажений (КГИ) на выходе для различных значений продолжительности «мертвого времени» или выключенного состояния выходных транзисторов. Оценена адекватность существующих математических моделей для расчета КГИ на выходе усилителя в зависимости от продолжительности «мертвого времени». Приведены результаты компьютерного моделирования усилителя класса D и исследованы значения КГИ на выходе в зависимости от различных номиналов индуктивности дроселя. Выполнено сравнение теоретически вычисленных значений с результатами компьютерного моделирования. В результате исследования установлено, что КГИ, вызванный наличием «мертвого времени» зависит от индуктивности нагрузки. Полученный в результате моделирования КГИ совпадает с рассчитанным по формуле только для определенных значений индуктивности нагрузки. В модели использованы GaN транзисторы, что позволило исследовать работу усилителя в широком диапазоне частот переключения. Библ. 10, табл. 2, рис. 8.

Ключевые слова: GaN транзисторы, усилители класса D, нелинейные искажения, мертвое время, коэффициент гармонических искажений.

Вступ. Підсилювачі класу D широко використовуються в електроприводі, аудіоапаратурі та в інших сферах, де потрібно підсилити вхідний сигнал з максимальним ККД та мінімальними спотвореннями. Ключовий режим роботи забезпечує ККД теоретично до 100 %, а самі підсилювачі класу D мають невеликі габарити та масу у порівнянні з лінійними підсилювачами. Недоліком ключового режиму є електромагнітні завади. Для підсилювачів класу D, як і для інших типів підсилювачів, притаманні також нелінійні спотворення підсилюваного сигналу. Одним з різновидів нелінійних спотворень є спотворення спричинені так звані «мертвим часом» – часовим інтервалом, впродовж якого вихідні транзистори мають бути вимкненими для уникнення наскрізних струмів. Нелінійні спотворення вихідного сигналу внаслідок «мертвого часу» часто ігнорують, внаслідок їх порівняно невеликих значень. Однак при підсилюванні звукового сигналу такі спотворення добре помітні на слух і суттєво знижують якість сприйняття фонограм. Також небажані спотворення вихідної напруги для перетворювачів, які працюють у складі енергосистем (power grid).

Дослідження впливу «мертвого часу» на рівень нелінійних спотворень на виході підсилювача класу D достатньо описані в літературі. Аналіз спотворень, спричинених «мертвим часом», описано в [1], де проаналізовано відмінності між формами вхідного та вихідного сигналів для різних типів модуляції. В результаті отримані розрахункові спектри сигналу на

виході для заданих значень «мертвого часу». В статті [2] вихідний сигнал представлено як вхідний ШІМ сигнал з додаванням інтервалів «мертвого часу», наведені аналітичні вирази для обчислення значень гармонік вихідного сигналу.

В роботі [3] розглянуто механізми створення нелінійних спотворень, спричинених «мертвим часом» для перетворювача напруги. Проаналізовано вплив паразитних вихідних ємностей транзисторів та пульсацій струму вихідного дроселя на рівень спотворень, запропоновано спосіб їх компенсації. Однак не наведено відповідної методики для розрахунку коефіцієнта гармонічних спотворень (КГС). Експериментальне дослідження факторів, які впливають на КГС підсилювача класу D на GaN/SiC транзисторах виконано в [4]. Встановлено зростання КГС з ростом «мертвого часу» для активного навантаження. В роботі [5] виконано дослідження залежності КГС від струму навантаження для різних значень «мертвого часу», показано, що основний внесок дають непарні гармоніки.

Грунтовні дослідження впливу тривалості «мертвого часу» на КГС виконано Черчі (Chierchie) та ін. у [6-8]. Наведено теоретичні розрахунки, виконано комп'ютерне моделювання та експериментальні дослідження залежності КГС від значення «мертвого часу», надано практичні рекомендації по вибору його тривалості.

Однак у наведених вище роботах вплив величини індуктивності навантаження на КГС не оцінюється, хоча струм через вихідний дросель розглядається як якості одного з чинників нелінійних спотворень.

Параметри ШІМ сигналу

Частоти перемикання	1 кГц, 2 кГц, 100 кГц, 400 кГц
Частоти сигналу	50 Гц
Глибина модуляції	0,6

Таким чином є доцільним дослідити залежність процесів формування нелінійних спотворень на виході підсилювача впродовж інтервалу «мертвого часу» від індуктивності навантаження.

Метою роботи є аналіз впливу індуктивності навантаження підсилювача класу D на КГС, спричинених наявністю «мертвого часу» та оцінка адекватності існуючих математичних моделей для розрахунку КГС на виході підсилювача для різних значень тривалості «мертвого часу».

Для досягнення поставленої мети було необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати за допомогою комп'ютерної моделі значення КГС на виході підсилювача класу D в залежності від різних номіналів індуктивності дроселя для активно-індуктивного навантаження;
- порівняти обчислений теоретично КГС з результатами комп'ютерного моделювання;
- дати пояснення отриманим результатам та визначити необхідність та подальші шляхи проведення досліджень.

Опис комп'ютерної моделі. Дослідження впливу «мертвого часу» на КГС виконано з використанням комп'ютерної моделі плати напівмостового перетворювача EPC9035 від компанії Efficient Power Conversion. Ця плата містить GaN транзистори EPC2022 eGaN®, відповідний драйвер управління та інші необхідні для роботи елементи. Використання GaN транзисторів дозволило дослідити роботу у широкому діапазоні частот перемикання, як для керування електродвигуном, так і для підсилення звукового сигналу. Основні параметри ШІМ сигналу при моделюванні вказано в табл. 1.

Для комп'ютерного моделювання використано модифіковану модель напівмостового перетворювача на GaN транзисторах, яка описана у роботі [9]. Особливістю даної моделі є те, що мікросхему драйвера вихідних транзисторів LM5113 замінено на віртуальні ключі S1, S2 та джерела напруги керування транзисторами V4, V5. Існуюча модель мікросхеми LM5113 не забезпечує точне відтворення процесів у часі, як описано в [10], крім того використання ключів і джерел напруги спрощує модель та зменшує час симуляції. В запропонованій моделі джерело живлення представлено двополярним для симетричного підсилення синусоїдального сигналу.

Комп'ютерну модель підсилювача на GaN транзисторах наведено на рис. 1. Елемент U1 є широтно-імпульсним модулятором з вбудованим генератором пилкоподібної напруги. Логічні елементи U2 і U3 є вхідними буферами. Елемент U2 також інвертує вхідний сигнал. Логічні елементи U4 і U5 є буферами кіл формування «мертвого часу». RC-коло R1, C1 і діод D1 формують час затримки вмикання («мертвий час») транзистора Q1, RC-коло R2, C2 і діод D2 формують час затримки вимкання транзистора Q2. На високих частотах перетворення RC-кола є єдиним способом формування «мертвого часу», коли його тривалість складає десятки наносекунд і менше. При достатньо низьких частотах перетворення формування мертвого часу можливо цифровими методами [3].

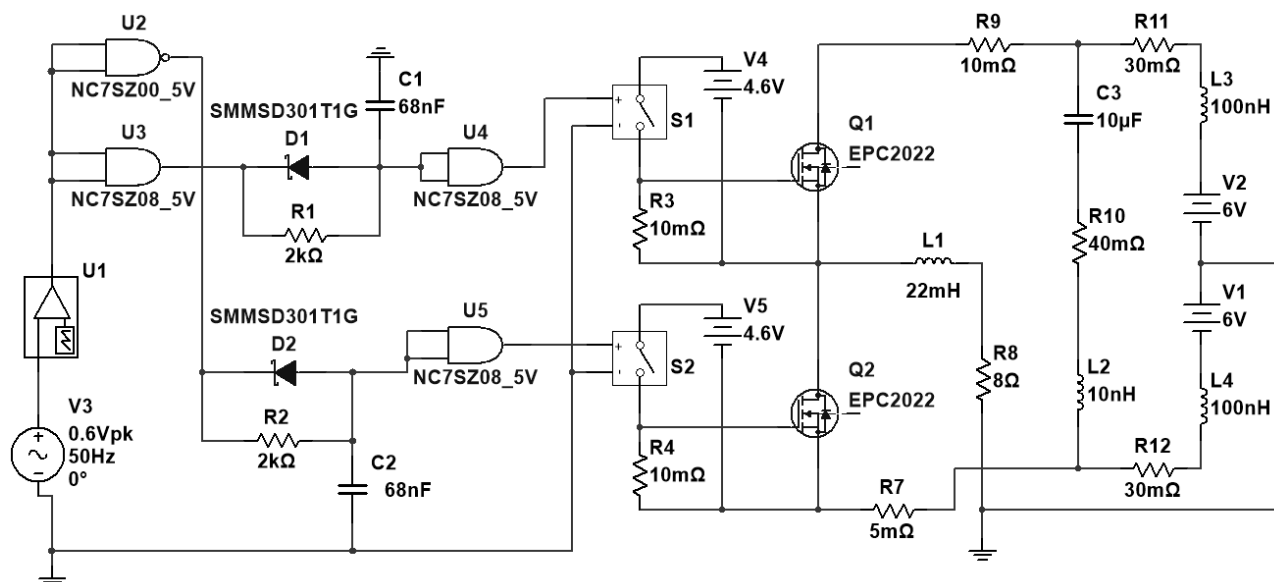


Рис. 1. Комп'ютерна модель напівмостового перетворювача для оцінки впливу тривалості «мертвого часу» на КГС

Ключі S1, S2, використано для формування керуючих напруг транзисторів Q1, Q2. При замиканні ключа S1 напруга джерела V4 прикладається між витком і затвором транзистора Q1. Струм заряду вхідної ємності транзистора Q1 обмежується внутрішнім опором ключа S1. Після розмикання цього ключа

розряд вхідної ємності відбувається через резистор R3. Аналогічні процеси відбуваються і при керуванні транзистором Q2. Навантаженням підсилювача є дросель L1 і резистор R8. Компоненти для моделювання втрат на друкованій платі це резистори R1, R10. Розв'язувальний конденсатор C3 подано на схемі

з паразитними параметрами: дроселем L2 (індуктивність виводів), та резистором R10 (внутрішній опір). Паразитні параметри дротів живлення подано дроселями L3, L4 і резисторами R11, R12. Джерело живлення 12 В для прискорення процесу моделювання розділено навпіл. Точка з'єднання джерел підключена до «землі», що дало можливість відмовитись від використання у схемі конденсаторного дільника, який необхідний при роботі напівмостового перетворювача при живленні від однополярного джерела.

Опис проблеми. На рис. 2 проілюстровано процес створення нелінійних спотворень внаслідок введення «мертвого часу». Вхідні ШІМ імпульси $U_{in}(t)$ позначено лінією з трикутниками, імпульси на виході підсилювача $U_o(t)$ – суцільною лінією, вихідний струм $I_o(t)$ – пунктирною, «мертвий час» – заштриховано. Як видно з рис. 2, тривалість вхідних і вихідних імпульсів не співпадає, коли знак вихідного струму є незмінний. У цьому випадку на виході підсилювача виникають нелінійні спотворення сигналу, що підсилюється, причому не залежно від способу реалізації ШІМ. Причиною є те, що на протязі обох інтервалів «мертвого часу» працює діод тільки одного з транзисторів і забезпечує протікання струму через дросель у інтервал «мертвого часу», затягуючи зміну знаку сигналу на виході, коли вхідний сигнал вже змінив знак.

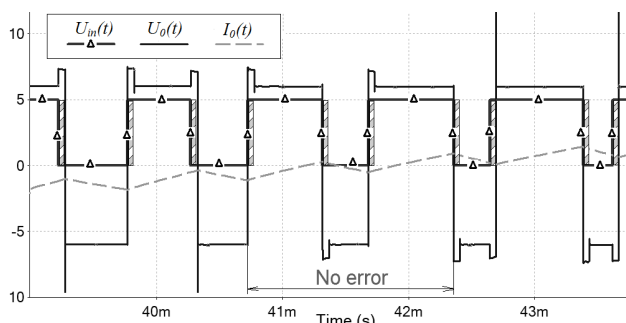


Рис. 2. Ілюстрація процесу створення нелінійних спотворень в наслідок введення «мертвого часу»

Якщо знак вихідного струму змінюється впродовж тривалості імпульсу, то струм через дросель в різні інтервали «мертвого часу» протікає через діоди різних транзисторів. Тривалість вхідних і вихідних імпульсів співпадає, і спотворення не виникають. Цей інтервал позначено на рис. 2 як «No error». Таким чином, при певних значеннях індуктивності на виході підсилювача та глибини модуляції затримка зміни знаку вихідної напруги зникає, а отже і загальне значення КГС зменшується. Тому доцільно дослідити вплив індуктивності дроселя на виході підсилювача на КГС, враховуючи те, що індуктивність навантаження, зокрема звукових підсилювачів класу D, може мати широкий діапазон значень.

Опис математичної моделі спектру вихідного сигналу для розрахунку залежності КГС від тривалості «мертвого часу». В роботі [6] автори запропонували метод розрахунку КГС, розділивши широтно-модульований сигнал на виході підсилювача на три складові: симетричний прямокутний сигнал з коефіцієнтом заповнення $0,5p_c(t)$; послідовність імпульсів,

тривалість яких залежить від модулюючого сигналу, $p_s(t)$ та сигналу похибки $e(t)$, спричиненої «мертвим часом». Вихідну напругу підсилювача обчислено за формулою, наведеною в [6]:

$$v_o(t) = p_c(t) + p_s(t) - e(t). \quad (1)$$

Відповідно, спектр вихідного сигналу є сумою спектрів складових. Повний спектр на виході підсилювача та амплітуди окремих гармонік C_n розраховано за наступними формулами [6]:

$$V_{o,p}(f) = P_{c,p}(f) + P_{s,p}(f) - E_p(f), \quad (2)$$

де

$$P_{c,p}(f) = jT \operatorname{sinc}\left(\frac{T}{2}f\right) \sin\left(\pi \frac{T}{2}f\right) \frac{\sin(\pi MTf)}{\sin(\pi Tf)}, \quad (3)$$

$$P_{s,p}(f) = \sum_{k=0}^{M-1} \frac{1}{j\pi f} \left(e^{-j2\pi(k+1/2)Tf} - e^{-j2\pi(kT+\tau_k)f} \right); \quad (4)$$

$$E_p(f) = \left(\sum_{k=0}^{\frac{M-1}{2}} e^{-j2\pi(kT)} - \sum_{k=\frac{M}{2}}^{M-1} e^{-j2\pi(kT+\tau_k)} \right) \times \quad (5)$$

$$\times 2\Delta \frac{\sin(\Delta f)}{\Delta f} e^{-j\pi\Delta f};$$

$$\tau_k = \frac{T}{2} \left[1 + \frac{M}{\pi} \cot(\theta_k) + \frac{M}{2m\pi^2} \csc \theta_k (-2M + \right. \quad (6)$$

$$\left. + \sqrt{4M^2 + 6m_0^2\pi^2 - 2m\pi[4M \cos \theta_k + m\pi \cos(2\theta_k)]} \right];$$

$$\theta_k = 2\pi(k+0,5)/M; \quad (7)$$

$$C_n = \frac{1}{MT} V_{o,p}(f) \Big|_{f=\frac{n}{MT}}, \quad (8)$$

де $M = f_c/f_s$ – коефіцієнт відношення частоти перемикавання f_c до частоти сигналу f_s , $T = 1/f_c$ – період перемикавання, Δ – тривалість «мертвого часу» відносно періоду T , m – глибина модуляції, k – номер інтервалу перемикавання.

КГС, який використовувався для порівняння з результатами комп'ютерного моделювання, розраховано за формулою в %, наведеною нижче [6]:

$$THD = \frac{100}{|C_1|^2} \sum_{n=2}^6 |C_n|^2, \quad (9)$$

де C_1 – амплітуда першої гармоніки сигналу.

Оцінювання впливу індуктивності навантаження на значення КГС, спричинених «мертвим часом». Обчислення КГС на виході підсилювача виконано за формулою

$$THD = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + A_4^2 + \dots + A_k^2}}{A_1}, \quad (10)$$

де A_1, A_2, \dots, A_k – гармоніки вихідного сигналу.

Для обчислення КГС взято 7 перших гармонік, за аналогією з формулою (9).

Комп'ютерна модель, що наведена на рис. 1, містить широтно-імпульсний модулятор U1, який збільшує нелінійні спотворення вихідного сигналу. Для того, щоб оцінити внесок нелінійних спотворень модулятора у загальний рівень, розраховано КГС на його виході для кожної з робочих частот підсилювача.

Результати розрахунків наведено в табл. 2.

Таблиця 2
КГС на виході елемента PWM для різних частот перетворення

Параметри	КГС, %
$f_c = 1$ кГц	0,033
$f_c = 2$ кГц	0,05
$f_c = 100$ кГц	0,012
$f_c = 400$ кГц	0,01

Як видно з табл. 2 значення КГС для різних частот перетворення змінюються у діапазоні 0,01–0,05 % і будуть враховані при подальшому порівнянні результатів. Варто зауважити, що особливістю ШІМ елемента U1 є зменшення КГС на високих частотах перетворення.

На рис. 3 наведено результати обчислення КГС на виході підсилювача в залежності від значення індуктивності вихідного дроселя. Моделювання виконано для частоти сигналу 50 Гц і частот перетворення 1 кГц, 2 кГц, 100 кГц та 400 кГц. Тривалість «мертвого часу» під час моделювання складала 10 %. Значення індуктивності змінювалися в діапазоні від 47 мкГн до 22 мГн. Значення резистора навантаження залишались незмінним – 8 Ом.

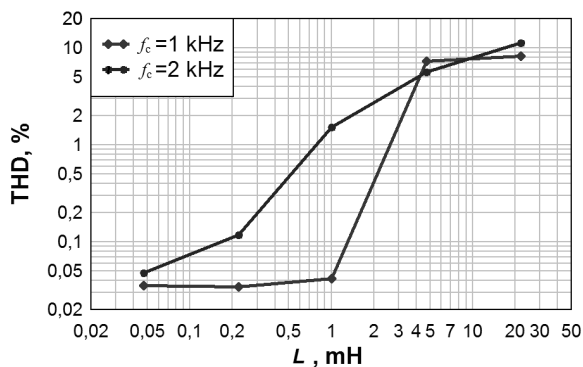


Рис. 3. Залежність КГС від значення індуктивності вихідного дроселя

Як видно з рис. 3, зі збільшенням індуктивності навантаження зростає КГС. При максимальному значенні індуктивності 22 мГн спостерігається максимальний КГС як для частоти перетворення 1 кГц, так і для частоти 2 кГц. Хоча залежність для частоти 2 кГц має більш пологий характер.

Схожі залежності спостерігаються і при підсиленні звукового сигналу, з частотами перетворення 100 кГц і 400 кГц (рис. 4). Зі збільшенням індуктивності дроселя збільшуються спотворення, спричинені «мертвим часом». Хоча для частоти 400 кГц після певного максимуму є зменшення КГС.

Таким чином можна стверджувати, що значення індуктивності на виході підсилювача впливає на рівень нелінійних спотворень, спричинених «мертвим часом», зміною співвідношення інтервалів коли знак струму не змінюється (вхідний і вихідний сигнали не співпадають по тривалості) і змінюється (тривалість імпульсів ШІМ сигналу на вході і виході співпадає). Зменшення постійної часу кола навантаження також зменшує КГС вихідного сигналу, що відзначено в роботі [5].

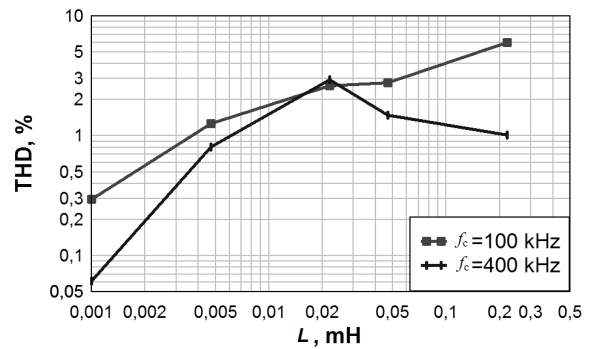


Рис. 4. Залежність КГС від значення індуктивності вихідного дроселя для частот перетворення 100 та 400 кГц

Додатковими чинниками, які впливають на КГС при низьких напругах живлення, можуть бути викиди напруги на діодах транзисторів в режимі, коли знак струму не змінюється впродовж періоду перемикавання. Збільшенню КГС може сприяти те, що обидва транзистори закриті, а струм дроселя двічі протікає через діод одного з транзисторів. Падіння напруги на діоді U_d додається до напруги живлення (рис. 5,а) і змінює амплітуду струму $I_o(t)$ через дросель. Зменшення тривалості «мертвого часу» зменшує вплив викидів вихідної напруги $U_o(t)$ на КГС. Вплив падіння напруги на діодах на КГС потребує подальших досліджень.

На рис. 5,б наведено форму вихідних імпульсів для частоти перемикавання 400 кГц (суцільна лінія), коли знак вихідного струму $I_o(t)$ не змінюється. При зміні вхідної напруги $U_{in}(t)$ до нуля спостерігається процес затягування спаду вихідної напруги $U_o(t)$ внаслідок заряду вихідної ємності транзистора на інтервалі «мертвого часу». На наступному інтервалі «мертвого часу» струм протікає через діод і створює затримку переключення вихідної напруги у порівнянні зі вхідним сигналом (лінія з трикутниками).

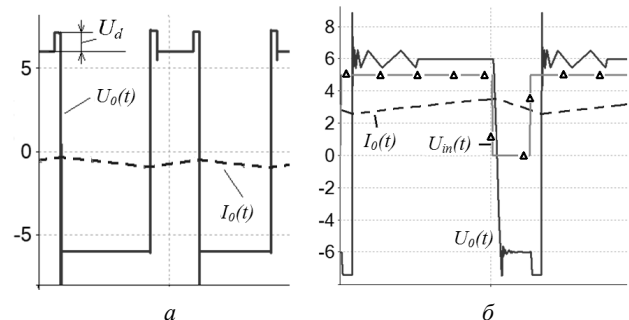


Рис. 5. Викиди вихідної напруги внаслідок падіння напруги на діодах (а) та вплив вихідної ємності транзистора на форму вихідних імпульсів (б)

Порівняння результатів математичного та комп'ютерного моделювань. Далі виконано порівняння КГС, розрахованого згідно з формулами, наведеними вище, з КГС, отриманим в результаті моделювання для різних значень індуктивності дроселя. На рис. 6 наведено залежності КГС від тривалості «мертвого часу» розраховані за формулою (1) і змодельовані для таких параметрів підсилювача: частота сигналу $f_s = 50$ Гц, частоти перетворення $f_c = 1$ кГц, 2 кГц, глибина модуляції $m = 0,6$.

З кривих видно, що залежність КГС від тривалості «мертвого часу» у результаті моделювання перевищує розрахунки за формулою (1) на 0,6% – 4%. Високі значення КГС можна пояснити тим, що індуктивність вихідного дроселя забезпечує знак струму незмінним практично впродовж всього періоду сигналу, який підсилюється, тому КГС зростає зі збільшенням Δ .

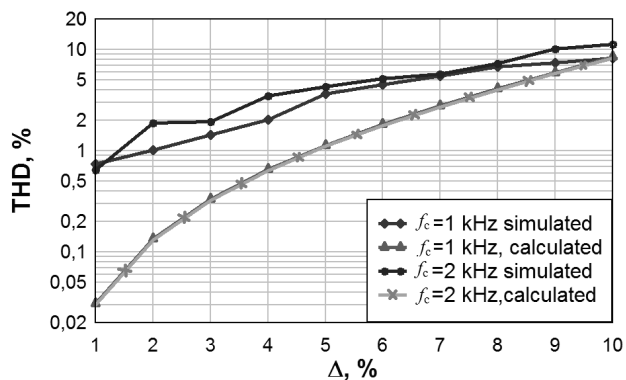


Рис. 6. Залежність КГС від значення Δ для індуктивності дроселя 22 мГн

На рис. 7 наведено криві залежності КГС від тривалості «мертвого часу» для випадку, коли вихідна індуктивність забезпечує зміну знаку струму двічі на період перемикавання. У цьому випадку КГС значно не змінюється при зміні Δ від 1% до 10%, що відрізняється від значень КГС на виході підсилювача, розрахованих за формулою (9).

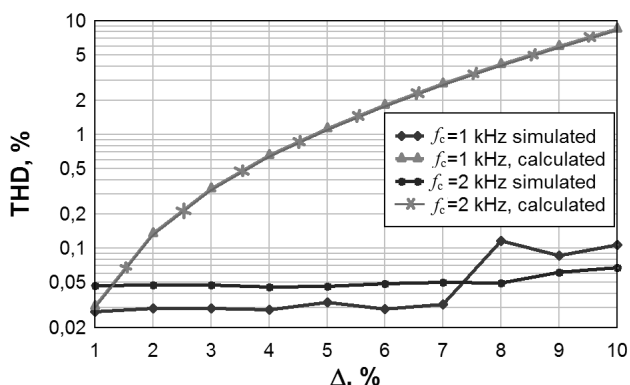


Рис. 7. Залежність КГС від значення Δ для індуктивності дроселя 470 мГн

Найбільший інтерес становить вплив індуктивності навантаження на КГС на частотах перемикавання від 100 кГц, на яких працюють звукові підсилювачі класу D. Залежності КГС від тривалості «мертвого часу» наведено на рис. 8 для індуктивності 47 мГн. Використання GaN транзисторів у цьому випадку забезпечує частоту перемикавання в 400 кГц і вище.

Якщо для частоти перемикавання 100 кГц спостерігається ріст КГС зі збільшенням Δ від 0,5% до 3%, то для частоти перемикавання 400 кГц рівень спотворень при значеннях $\Delta > 6%$ практично не зростає. При тому, що вплив індуктивності 47 мГн має бути більшим на частоті 100 кГц. Такий результат можна пояснити перезарядом вихідної ємності транзисторів, яка компенсує викиди напруги (див. рис. 3,б).

Таким чином, залежність КГС від тривалості «мертвого часу» у результаті моделювання відрізняється від розрахованої.

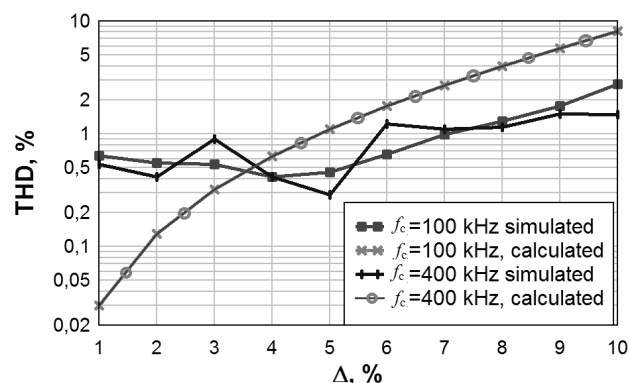


Рис. 8. Залежність КГС від значення Δ для індуктивності дроселя 47 мГн

Висновки.

В роботі оцінено вплив індуктивності навантаження на виході підсилювача класу D на рівень нелінійних спотворень, які спричинені «мертвим часом». В результаті встановлено, що зменшення у певних межах значення індуктивності знижує КГС. Це відбувається внаслідок зменшення кількості похибок між вхідним і вихідним сигналом, які мають місце при незмінному знаку струму індуктивності впродовж вихідного імпульсу. При зменшенні індуктивності збільшується кількість інтервалів, у яких похибка відсутня. Таким чином, зміна величини індуктивності навантаження призводить до зміни співвідношення інтервалів з похибкою і без неї, а отже і до зміни КГС.

На високих частотах перетворення викиди напруги, спричинені струмом через вбудовані діоди, впродовж «мертвого часу» частково компенсуються перезарядом вихідної ємності транзисторів, що також зменшує нелінійні спотворення.

Наступним етапом досліджень є створення математичної моделі ШІМ сигналу на виході підсилювача класу D, яка враховує вплив індуктивності навантаження на КГС, та її експериментальна перевірка.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Koeslag F., du T. Mouton H., Beukes H. J., Midya P. A detailed analysis of the effect of dead time on harmonic distortion in a class D audio amplifier. *AFRICON 2007*, 2007, pp. 1-7. doi: <https://doi.org/10.1109/afcon.2007.4401640>.
2. Wu C. M., Lau Wing-Hong, Shu-Hung Chung H. Analytical technique for calculating the output harmonics of an H-bridge inverter with dead time. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 1999, vol. 46, no. 5, pp. 617-627. doi: <https://doi.org/10.1109/81.762927>.
3. Li C., Gu Y., Li W., He X., Dong Z., Chen G., Ma C., Zhang L. Analysis and compensation of dead-time effect considering parasitic capacitance and ripple current. *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2015, pp. 1501-1506. doi: <https://doi.org/10.1109/apec.2015.7104546>.
4. Mauerer M., Tüysüz A., Kolar J. W. Distortion analysis of low-THD/high-bandwidth GaN/SiC class-D amplifier power stages. *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2015, pp. 2563-2571. doi: <https://doi.org/10.1109/ecce.2015.7310020>.

5. Mauerer M., Kolar J. W. Distortion minimization for ultra-low THD class-D power amplifiers. *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, 2018, vol. 3, no. 4, pp. 324-338. doi: <https://doi.org/10.24295/cpsstpea.2018.00032>.
6. Chierchie F., Paolini E. E. Analytical and numerical analysis of dead-time distortion in power inverters. *2010 Argentine School of Micro-Nanoelectronics, Technology and Applications (EAMTA)*, 2010, pp. 6-11. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5606373> (accessed 22 June 2020).
7. Chierchie F., Paolini E. E. Quasi-analytical spectrum of PWM signals with dead-time for multiple sinusoidal input. *2011 IEEE International Symposium of Circuits and Systems (ISCAS)*, 2011, pp. 1033-1036. doi: <https://doi.org/10.1109/iscas.2011.5937745>.
8. Chierchie F., Stefanazzi L., Paolini E. E., Oliva A. R. Frequency analysis of PWM inverters with dead-time for arbitrary modulating signals. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, vol. 29, no. 6, pp. 2850-2860. doi: <https://doi.org/10.1109/tpel.2013.2276098>.
9. Онукієнко Ю.О., Пілінський В.В., Попович П.В., Лазебний В.С., Смоленська О.І., Баран В.С. Моделювання режимів роботи та електромагнітних завад перетворювача на GaN транзисторах. *Електротехніка і електромеханіка*, 2020, № 3, С. 37-42. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.3.06>.
10. Gedz O., Lazebnyi V., Onikienko Y., Vlasjuk A. EMI simulation of GaN power stage for audio class D amplifiers. *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, 2018, pp. 204-207. doi: <https://doi.org/10.1109/tcset.2018.8336187>.

REFERENCES

1. Koeslag F., du T. Mouton H., Beukes H. J., Midya P. A detailed analysis of the effect of dead time on harmonic distortion in a class D audio amplifier. *AFRICON 2007*, 2007, pp. 1-7. doi: <https://doi.org/10.1109/afcon.2007.4401640>.
2. Wu C. M., Lau Wing-Hong, Shu-Hung Chung H. Analytical technique for calculating the output harmonics of an H-bridge inverter with dead time. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 1999, vol. 46, no. 5, pp. 617-627. doi: <https://doi.org/10.1109/81.762927>.
3. Li C., Gu Y., Li W., He X., Dong Z., Chen G., Ma C., Zhang L. Analysis and compensation of dead-time effect considering parasitic capacitance and ripple current. *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2015, pp. 1501-1506. doi: <https://doi.org/10.1109/apec.2015.7104546>.
4. Mauerer M., Tüysüz A., Kolar J. W. Distortion analysis of low-THD/high-bandwidth GaN/SiC class-D amplifier power stages. *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2015, pp. 2563-2571. doi: <https://doi.org/10.1109/ecce.2015.7310020>.
5. Mauerer M., Kolar J. W. Distortion minimization for ultra-low THD class-D power amplifiers. *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, 2018, vol. 3, no. 4, pp. 324-338. doi: <https://doi.org/10.24295/cpsstpea.2018.00032>.
6. Chierchie F., Paolini E. E. Analytical and numerical analysis of dead-time distortion in power inverters. *2010 Argentine School of Micro-Nanoelectronics, Technology and Applications (EAMTA)*, 2010, pp. 6-11. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5606373> (accessed 22 June 2020).
7. Chierchie F., Paolini E. E. Quasi-analytical spectrum of PWM signals with dead-time for multiple sinusoidal input. *2011 IEEE International Symposium of Circuits and Systems (ISCAS)*, 2011, pp. 1033-1036. doi: <https://doi.org/10.1109/iscas.2011.5937745>.
8. Chierchie F., Stefanazzi L., Paolini E. E., Oliva A. R. Frequency analysis of PWM inverters with dead-time for arbitrary modulating signals. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, vol. 29, no. 6, pp. 2850-2860. doi: <https://doi.org/10.1109/tpel.2013.2276098>.

9. Onikienko Y.O., Pilinsky V.V., Popovych P.V., Lazebnyi V.S., Smolenska O.I., Baran V.S. Modelling of operation modes and electromagnet interferences of GaN-transistor converters. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 3, pp. 37-42. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.3.06>.
10. Gedz O., Lazebnyi V., Onikienko Y., Vlasjuk A. EMI simulation of GaN power stage for audio class D amplifiers. *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, 2018, pp. 204-207. doi: <https://doi.org/10.1109/tcset.2018.8336187>.

Надійшла (Received) 03.04.2021
 Прийнята (Accepted) 10.05.2021
 Опублікована (Published) 25.06.2021

Найда Сергій Анатолійович¹, д.т.н., проф.,
 Онукієнко Юрій Олексійович¹, к.т.н., доц.,
 Дрозденко Олександр Іванович¹, к.т.н., доц.,
 Смоленська Олександра Ігорівна¹, аспірант,
 Баран Вадим Сергійович¹, аспірант,
 Якуніна Наталія Олександрівна¹, к.ф.-м.н., доц.,
¹ Національний технічний університет України
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
 03056, Київ, пр. Перемоги, 37,
 e-mail: yurionik@gmail.com (Corresponding author)

S.A. Naida¹, Y.O. Onykienko¹, O.I. Drozdenko¹,
 O.I. Smolenska¹, V.S. Baran¹, N.O. Iakunina¹
¹ National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv
 Polytechnic Institute»,
 37, Prospect Peremohy, Kyiv-56, 03056, Ukraine.

Analysis of the influence of load inductance on nonlinear distortions of a class D amplifier caused by «dead time».

Goal. Analysis of the effect of load inductance at the output of the class D amplifier for different values of the duration of «dead time» and assessment of the adequacy of existing mathematical models for calculating the THD at the output of the amplifier depending on the duration of «dead time». **Methodology.** The study of the effect of «dead time» on the THD was performed using a computer model of the half-bridge converter board EPC9035 from Efficient Power Conversion. This board contains GaN transistors EPC2022 eGaN®, the corresponding control driver and other necessary elements for operation. The use of GaN transistors has made it possible to investigate the operation in a wide range of frequent switching, both to control the motor and to amplify the audio signal. **Results.** It is established that the value of load inductance affects the level of nonlinear distortions caused by «dead time». At inductance values that provide a constant sign of the output current, a difference arises between the duration of the input and output pulses, which increases the THD. At inductance values, when the choke current changes sign during a pulse, there is no error between the duration of the input and output pulses. Changing the inductance changes the relationship between the error signal and the non-error signal. THD changes accordingly. At high conversion frequencies, the voltage spikes caused by the choke current through the built-in diodes during the dead time are partially compensated by overcharging the output capacitance of the transistors, which also reduces harmonic distortion. **Originality.** For the first time, the value of the THD at the outlets in the fallowness of the different indices of the inductance of the choke and the theoretical calculation of the value in the results of the computer model was obtained. **Practical significance.** The dependence of the THD values on the inductance of the choke for converters with a switching frequency range from 1 kHz to 400 kHz, which allows them to be used both to control the motor and to amplify the audio signal. References 10, tables 2, figures 8.

Key words: GaN transistors, class D amplifier, nonlinear distortion, dead time, THD.