

Комп'ютерне моделювання нелінійних спотворень звукового підсилювача класу D на GaN-транзисторах

Смоленська^f О. І., ORCID [0000-0003-0512-7978](https://orcid.org/0000-0003-0512-7978)

Баран^f В. С., ORCID [0000-0002-4476-5350](https://orcid.org/0000-0002-4476-5350)

Оникієнко^s Ю. О., к.т.н., ORCID [0000-0001-7508-8391](https://orcid.org/0000-0001-7508-8391)

Кафедра АМЕС ames.kpi.ua

Факультет електроніки

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" kpi.ua

Київ, Україна

Анотація—Розроблено комп'ютерну модель вихідного каскаду підсилювача класу D на GaN-транзисторах за допомогою моделювання з використанням SPICE моделей GaN-транзисторів в програмному середовищі Multisim 14.1. Досліджено залежність нелінійних спотворень від частоти перемикання для 100 кГц, 250 кГц, 500 кГц, 1000 кГц для звукових сигналів 1 кГц, 2 кГц, 5 кГц та 10 кГц. Визначено кращі умови роботи для отримання мінімальних значень коефіцієнта нелінійних спотворень. Встановлено, що використання GaN-транзисторів у підсилювачів класу D для звукових трактів є ефективним, оскільки дозволяє отримати коефіцієнт нелінійних спотворень значно менше допустимого стандарту в 1%, а висока частота перетворення дозволяє знано зменшити габарити підсилювача.

Ключові слова — підсилювачі класу D; GaN-транзистори; нелінійні спотворення; комп'ютерне моделювання; широтно-імпульсна модуляція.

I. ВСТУП

У області звуковідтворювального обладнання використовують підсилювачі класів А, В, АВ та D, але кожний з них має свої особливості. У підсилювачів класу А через транзистор протікає постійний струм, тому в процесі роботи потужність розсіювання велика і відповідно підсилювач має найнижчий ККД, але якість звучання має високі показники. В підсилювачів класу В практично відсутній постійний струм через вихідний каскад, тому знижується потужність розсіювання, але і якість звуку погіршується. Клас АВ є компромісним варіантом класів А і В, який має ККД вище ніж у класу А при прийнятному рівні нелінійних спотворень [1].

Принцип роботи підсилювачів класу D базується на широтно-імпульсній модуляції (ШІМ). Модульований сигнал у підсилювачах класу D змінюється дискретно. По суті, транзистори виступають в ролі ключа, перебуваючи або в закритому, або у відкритому стані без проміжних значень. Все, що потрібно в такому режимі від транзистора – максимально швидко реагувати на зміну рівня сигналу, а поведінка його на проміжних значеннях амплітуди не має значення.

Теоретично ККД підсилювачів класу D може бути 100%. ККД реальних підсилювачів класу D дорівнює приблизно 90%, в найбільш економічних зразках —

95%, при цьому він мало залежить від вихідної потужності. Завдяки цьому у підсилювачі класу D відсутні габаритні радіатори для розсіювання теплової потужності. Це робить такі підсилювачі більш компактними. Виходячи з необхідності отримати високі значення ККД та економію енергоспоживання, наразі підсилювачі класу D найбільш поширені. Підсилювачі класу D зазвичай побудовані за мостовою або напівмостовою схемами [2].

Транзистори на основі нітриду галія мають ряд переваг перед кремнієвими. Завдяки високій дрейфовій рухливості носіїв заряду опір GaN-транзисторів у відкритому стані малий. Критична напруженість електричного поля, і в результаті напруга пробою вища, ніж у кремнію. Пристрої на основі нітриду галія можуть працювати при більш високих температурах [3]. Хоча витрати на виготовлення GaN-транзисторів більші, порівняно з кремнієвими транзисторами, такі транзистори мають більшу швидкість перемикання та менші втрати у відкритому стані [4]. Тому, використання GaN-транзисторів є перспективне при проектуванні імпульсних генераторів, потужних hi-fi підсилювачів класу D з малими габаритами. Саме тому виконано дослідження підсилювача класу D на GaN-транзисторах.



II. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Попри позитивні особливості підсилювачів класу D, варто зазначити і негативні. А саме нелінійні спотворення, що виникають. Адже вони напряду впливають на якість звучання. Спотворення включають нелінійність, що визначається способом модуляції і “мертвим” періодом, котрий необхідний для запобігання виникнення наскрізного струму у момент, коли обидва транзистори напівмосту відкриті.

Інформація про рівень сигналу зазвичай кодується шириною імпульсу модулятора. Наявність “мертвих” періодів тягне за собою нелінійну помилку тактування по відношенню до імпульсів ідеальної довжини.

Для підсилювачів класу D спосіб модуляції ШІМ може забезпечити до 100 дБ та вище зниження завади джерела живлення при частоті перемикання в декілька сотень кілогерц. Також багато різновидів ШІМ стійкі до майже 100% модуляції. Це забезпечує стабільність роботи підсилювача на максимальних потужностях. Проте ШІМ має певні недоліки:

- внаслідок своєї природи, спотворення привносить сам процес ШІМ;
- гармоніки частоти перемикання ШІМ створюють завади в радіодіапазоні довгих та середніх хвиль;
- ширина імпульсів ШІМ стає дуже малою поблизу повної модуляції.

Останній пункт породжує в більшості випадків проблеми в колах керування вихідним каскадом, через природні обмеження процес перемикання не може бути достатньо швидким, щоб отримати імпульси довжиною в одиниці наносекунд. Тому повна модуляція часто недосяжна в підсилювачах з ШІМ [5].

Моделювання параметрів підсилювача класу D, особливо на ранньому етапі розробки, є необхідним інструментом, що дозволяє значно зменшити витрати часу і коштів на його розробку та виробництво. Як згадано вище підсилювач класу D є мостовим, або рідше напівмостовим, перетворювачем постійної напруги в змінну.

На сьогодні для аналізу й моделювання рівнів ЕМЗ існують два підходи:

- 1) моделювання з використанням моделей як активних, так і пасивних елементів, заснованих на їх фізичних властивостях (device physics-based model) або SPICE моделювання [6];
- 2) моделювання з використанням методів еквівалентних кіл [7].

Особливості комп’ютерного моделювання підсилювачів класу D:

- для підсилювачів в інтегральному виконанні більшість параметрів вихідних каскадів транзисторів не відомо;

- вихідний каскад підсилювача має декілька ключів та часто є мостовим;
- одночасно досліджуються сигнали у дуже широкому діапазоні частот (наприклад, частота звукового сигналу 1 кГц, частота перемикання 100 кГц і вище).

Враховуючі результати комп’ютерного моделювання електромагнітних завад вихідного каскаду підсилювача класу D на GaN-транзисторах, виконаного в [8] доцільно провести дослідження інших характеристик підсилювача класу D. Тим більше, що перетворювач на GaN-транзисторах може працювати на частотах до одиниць мегагерц.

Мета даного дослідження полягає у створенні моделі вихідного каскаду підсилювача класу D на GaN транзисторах таким чином, щоб мати змогу дослідити вплив нелінійних спотворень при зміні частоти переключення для різних частот сигналу.

III. ОПИС МОДЕЛІ

У якості основи для створення моделі підсилювача було обрано напівмостовий перетворювач на базі GaN транзисторів EPC2022, який зібрано на платі для досліджень EPC9035.

Моделювання проводилося у програмному середовищі Multisim 14.1.

Основні параметри плати EPC9035 такі:

- вихідна напруга: 80 В;
- вихідний струм: 25 А;
- час наростання та спадання вихідної напруги: 3-5 нс;
- мінімальна ширина вхідного імпульсу у “високому” стані: 50 нс;
- мінімальна ширина вхідного імпульсу у “низькому” стані: 100 нс;
- опір транзисторів у відкритому стані 4 мОм.

У моделі (Рис. 1) елементи U2 та U3 використано як буфери і для інвертування вхідного сигналу. Компоненти R8, C1 і D1 формують затримку вмикання транзистора Q1. R7, C4 і D2 формують затримку вмикання транзистора Q2. Мікросхема U1 — драйвер транзисторів Q1 і Q2. Компоненти, для моделювання поширення електромагнітних завад і втрат на друкованій платі (дроселі L1, L2, резистори R20, R21), чотири розв’язувальні конденсатори C5-C8 наведено на схемі з паразитними параметрами: дроселі L5, L7, L8, L18 (індуктивність виводів) і резистори R13-R16 (внутрішній опір). Паразитні параметри дротів живлення подано дроселем L3 і резистором R8. Навантаженням перетворювача є дросель L9, навантажувальний резистор R12 і конденсатор фільтра C14 з індуктивністю виводів. На схему додано елемент ШІМ U4 та генератор синусоїдальних імпульсів V3 для моделювання роботи каскаду та визначення впливу нелінійних завад.



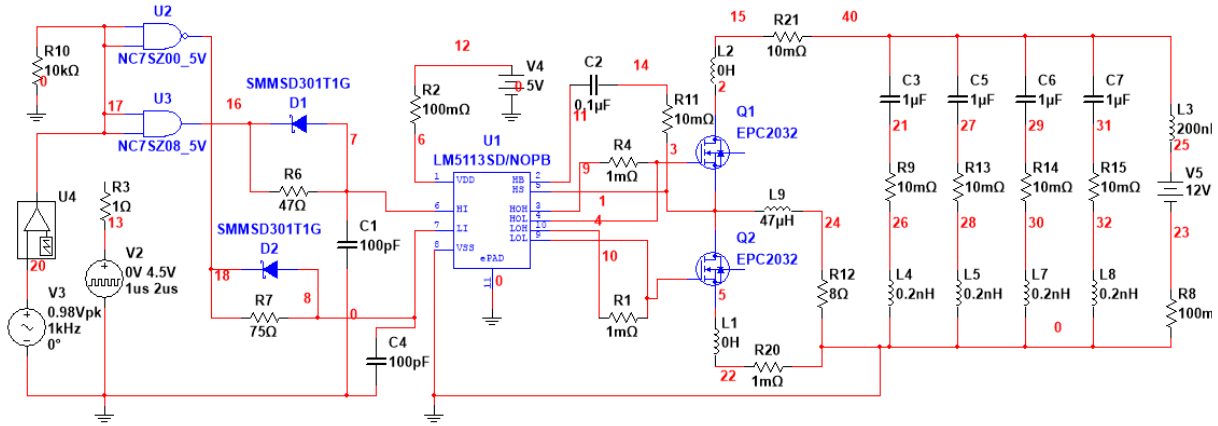


Рис. 1 Комп'ютерна модель підсилювача класу D на платі EPC9035

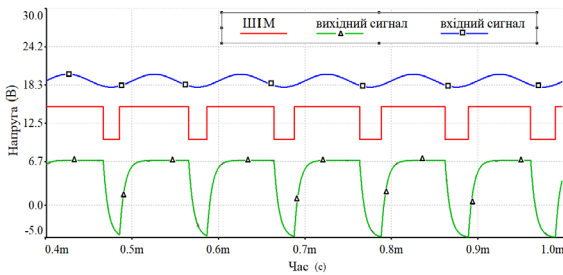


Рис. 2 Осцилограма ШІМ, вхідного та вихідного сигналів

На Рис. 2 показано осцилограми елементу ШІМ, вхідного сигналу, генератора синусоїдальних імпульсів та форму вихідного сигналу.

IV. ОБЧИСЛЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ СПОТВОРЕНЬ

Зміна форми сигналу на виході каскаду називається нелінійним спотворенням. Вони впливають на формування вихідного сигналу позитивно (наприклад, при демодуляції) та негативно (наприклад у підсилювачах). У GaN транзисторах на підсилювачах класу D форма сигналу на виході підсилювача відрізняється від форми сигналу на вході [9].

Причиною виникнення нелінійних спотворень є те, що при подачі на вхід гармонійного сигналу частотою f на виході з'являється сигнал, що включає постійну складову, основну частоту і вищі гармоніки з частотами $2f, 3f, 4f, \dots$ т.д. Амплітуди вищих гармонік зі збільшенням їхніх номерів стрімко зменшуються. Визначальними зазвичай є друга та третя гармоніки [10].

Нелінійні спотворення зумовлені особливостями будови підсилювача, що описані при постановці проблеми даного дослідження.

Нелінійні спотворення характеризуються коефіцієнтом нелінійних спотворень K_n . Він визначається як відношення середньоквадратичного значення напруги суми всіх гармонік сигналу, крім першої, до значення напруги першої гармоніки:

$$K_n = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1}, \quad (1)$$

де U_1 – значення напруги першої гармоніки; $U_2 \dots U_n$ – значення напруги всіх гармонік, крім першої.

Для визначення спотворень обрано частоти синусоїдальних сигналів в 1 кГц, 2 кГц, 5 кГц, 10 кГц. Частота перемикання транзисторів: 100к, 250к, 500к та 1000 кГц.

Виконано Фур'є аналіз вихідного сигналу для кожної з частот перемикання. Частота сигналу також задана відповідно 1 кГц, 2 кГц, 5 кГц, 10 кГц. Як приклад, для сигналу 1 кГц та частоти переключення 500 кГц графіки мають вигляд – рис. 3.

Дані експортовані у зручний для підрахунку формат. Для кожної з частот сигналу підраховано по десять гармонік. Коефіцієнти нелінійних спотворень розраховані за формулою (1). У результаті отримано значення коефіцієнта нелінійних спотворень, які наведено в Таблиця 1.

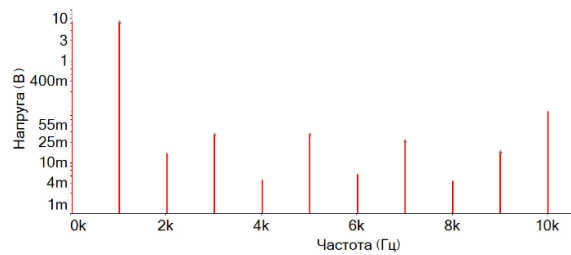


Рис. 3 Результат Фур'є аналізу для сигналу 1 кГц та частоти переключення 500 кГц

ТАБЛИЦЯ 1 РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

Частота сигналу, Гц	Частота перемикання транзистора, Гц			
	100к	250к	500к	1000к
1к	0,009017	0,085598	0,02023	0,016576
2к	0,007553	0,025067	0,043393	0,016921
5к	0,004811	0,005119	0,008766	0,013734
10к	0,207618	0,003583	0,006754	0,01174



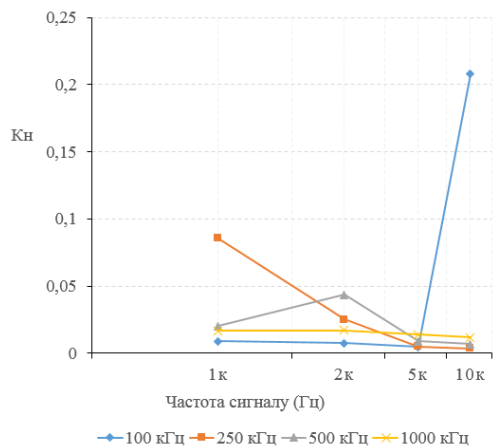


Рис. 4 Графік залежності K_n від частоти гармонічного сигналу

За даними з цієї таблиці побудовано графік залежності K_n від частоти перемикання транзисторів (Рис. 4).

З графіка видно, що для частоти перетворення 100 кГц відбувається різке збільшення спотворень на верхніх частотах. Це обумовлено недостатнім ослабленням гармонік вихідним фільтром. Також для частот перетворення 250 кГц, 500 кГц, 1000 кГц спостерігається зменшення нелінійних спотворень з ростом частоти, що обумовлено зменшенням вищих гармонік вихідним фільтром. Проте для частоти перемикання 500 кГц спостерігається зростання спотворень майже в 2 рази на частоті сигналу 2 кГц.

Аналізуючи результати, в багатьох проведених дослідях, підсилювач класу D на GaN-транзисторах має K_n , що не перевищує 1%. Що позитивно впливає на якість звучання.

ВИСНОВКИ

Створена модель доводить ефективність використання підсилювачів класу D на GaN-транзисторах для звукових трактів. Така ефективність зумовлена високим ККД класу D низьким коефіцієнтом нелінійних спотворень та високою частотою перемикання, що дозволяє відмовитись від габаритних радіаторів для розсіювання тепла та зменшити розміри підсилювача.

Нелінійні спотворення для різних частот перетворення мають різні залежності від частоти. Для досліджуваних частот перетворення спостерігається зниження спотворень з ростом частоти, що зумовлене зниженням високочастотних гармонік вихідним фільтром.

Таким чином для зменшення коефіцієнта нелінійних спотворень необхідно підвищувати частоту перетворення. Проте з ростом частоти зменшується ККД підсилювача. Тому частоту перемикання, виходячи

з дослідів, можна рекомендувати обирати в межах 250 – 500 кГц.

У подальших дослідженнях необхідно розширити діапазон досліджуваних частот до повного звукового. Також визначити вплив інтермодуляційних спотворень. Для цього необхідно підключити ще один генератор синусоїдальних імпульсів до ШІМ модулятора і проводити вимірювання за стандартом SMPTE.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] "Elektronnye usiliteli v promyshlennoj elektronike [Electronic amplifiers in industrial electronics]." [Online]. Available: <http://electricalschool.info/electronica/1517-jelektronnye-usiliteli-v-promyshlennoj.html>. [Accessed 19 03 2020].
- [2] "Kak rabotaet usilitel' klassa D, ili Ne takoj kak vse [How does a Class D amplifier work, or Not like everyone else]." [Online]. Available: <https://stereo.ru/to/t808p-kak-rabotaet-usilitel-klassa-d-ili-ne-takoy-kak-vse>. [Accessed 19 03 2020].
- [3] J. Biela, M. Schweizer, S. Waffler and J. W. Kolar, "SiC versus Si—Evaluation of Potentials for Performance Improvement of Inverter and DC–DC Converter Systems by SiC Power Semiconductors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 7, pp. 2872-2882, July 2011. DOI: [10.1109/TIE.2010.2072896](https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2072896)
- [4] M. Goltsova, *Moshchnye GaN-tranzistory. Istinnno revolyucionnaya tekhnologiya [Powerful GaN-transistors. Truly revolutionary technology]*, Elektronika. Nauka/Technologiya/Biznes, vol. 4, no. 00118, 2012, pp. 86-100. ISSN 1992-4178. [Online]. Available: http://www.electronics.ru/files/article_pdf/3/article_3287_152.pdf [Accessed 19 03 2020].
- [5] E. Gaalaas, Class D Sound Amplifiers: What, Why, and How, Analog Dialogue 40-06, 2006. [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/class-d-audio-amplifiers.html>. [Accessed 18 03 2020].
- [6] S. Taylor, *EPC GaN FET Open-Loop Class-D Amplifier Design – Final Report*, Elegant Audio Solutions, Inc., 2013. [Online]. Available: <https://epc-co.com/epc/portals/0/epc/documents/articles/EPC%20GaN%20FET%20Open-Loop%20Class-D%20Amplifier%20Design.pdf>. [Accessed 16 03 2020].
- [7] Y. A. Onikienko, "Modelirovanie konduktivnyh pomekh usilitelya klassa D [Class D Conductors Modeling]," *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Radioelektronika*, vol. 57, no. 5, pp. 45-52, 2014. DOI: [10.20535/S0021347014050057](https://doi.org/10.20535/S0021347014050057).
- [8] Y. O. Onykienko and Y. O. Makaranko, *Komp'yuterna modelyuvannya konduktivnyh zavod napivmostovogo vihidnogo kaskadu na GaN-tranzistorah [Computer simulation of conductive noises shaft output staff on GaN transistors]*, Naukovi pratsi DonNTU. Seriya: «Obchislvalna tehnika ta avtomatizatsiya», vol. 1, no. 31, 2018, pp. 108-116. ISSN 2075-4272. [Online]. Available: https://scinse.donntu.edu.ua/ot-arhiv/31/033_onykiienko.pdf. [Accessed 18 03 2020].
- [9] H. C. Foong and M. T. Tan, "An Analysis of THD in Class D Amplifiers," APCCAS 2006 - 2006 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, Singapore, 2006, pp. 724-727. DOI: [10.1109/APCCAS.2006.342110](https://doi.org/10.1109/APCCAS.2006.342110).
- [10] "Izmerenie nelinejnyh iskazhenij [Distortion Measurement]." [Online]. Available: <https://vitta201.jimdofree.com/%D0%BD%D0%B8/>. [Accessed 19 03 2020].

Computer Simulation of Nonlinear Distortion of Class D Sound Amplifier on GaN-Transistors

O. I. Smolenska^f, ORCID [0000-0003-0512-7978](https://orcid.org/0000-0003-0512-7978)

V. S. Baran^f, ORCID [0000-0002-4476-5350](https://orcid.org/0000-0002-4476-5350)

Yu. O. Onikienko^s, PhD, ORCID [0000-0001-7508-8391](https://orcid.org/0000-0001-7508-8391)

Department AMES ames.kpi.ua

Faculty of Electronics.

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" kpi.ua
Kyiv, Ukraine

Abstract—Class A, B, AB and D amplifiers are used in the field of sound reproduction equipment, but each has its own peculiarities. The principle of operation of class D amplifiers is based on pulse width modulation. Transistors act as switches, either in the closed or opened state without intermediate values. The efficiency of real class D amplifiers is approximately 90%, in the most economical models 95%, and they have low dependence of the output power. The class D amplifiers are compact in size. For this paper, GaN-transistors were selected as the base. Because they are, compared to silicon transistors, low resistance in the open state, high breakdown voltage, higher switching speed of the transistors. They also work at high temperatures.

The nonlinear distortions is negative features of Class D amplifiers. They directly affect the sound quality. The distortions include nonlinearity, which is determined by the modulation method and the "dead" period, which is necessary to prevent the occurrence of cross-current at the moment when both half-transistors are open. Modeling the parameters of a Class D amplifier, especially at an early stage of development, is a necessary tool that can significantly reduce the time and money spent on development and production. In this paper, simulations were performed using equivalent circle methods.

Changing the shape of the signal at the output of the cascade is called nonlinear distortion. They affect the output signal formation positively (e.g. in demodulation) and negatively (e.g. in amplifiers). When investigating GaN transistors on Class D amplifiers, the signal shape at the amplifier output will be different from the signal shape at the input nonlinear distortions occur. They are due to the features of the structure of the amplifier.

The purpose of this work is to create a model of the output stage of a class D amplifier on GaN transistors so as to be able to investigate the effect of nonlinear distortions when changing the switching frequency for different signal frequencies.

The GaN transistor EPC2022 transistor based on GaN transducer, which is assembled on the EPC9035 board for researching, it was selected as the basis for the amplifier model.

The simulation was performed in the Multisim 14.1 software environment. The dependence of the occurrence of nonlinear distortions for switching frequencies of 100 kHz, 250 kHz, 500 kHz, 1000 kHz for sound signals of 1 kHz, 2 kHz, 5 kHz and 10 kHz is investigated. The study finds that nonlinear distortions for different conversion frequencies have different frequency dependencies. For the studied conversion frequencies, there is a decrease in the distortion with increasing frequency, which is caused by the decrease of the high-frequency harmonics of the output filter.

The optimal working conditions for obtaining the minimum values of the coefficient of nonlinear distortions are determined. It is investigated that the created model proves the efficiency of using class D amplifiers on GaN transistors for audio paths. Because it allows to obtain a coefficient of nonlinear distortion of up to 1% and high efficiency.

Keywords — Class D amplifiers; GaN transistors; nonlinear distortion; computer simulation; wide-pulse modulation.

