

Підсилювачі класу D.

Основним параметром, що визначає використання енергії вихідним підсилюючим каскадом є потужність, що розсіюється на його транзисторах. При цьому потужність не буде розсіюватися в двох випадках:

1. Струм, що протікає через транзистор при ненульовій напрузі рівний нулю.
2. Напряга на транзисторі при ненульовому струмі дорівнює нулю.

Ці умови виконуються під час роботи транзистора в ключовому режимі. Перша умова буде виконана, якщо транзистор повністю закрити (режим відсічки). Друга умова буде виконана, якщо транзистор повністю відкрити (режим насичення). [4]

У порівнянні з вихідним каскадом, що працює в D класі, потужність розсіювання в лінійних каскадах велика навіть у разі їх ідеальної реалізації.

Завдяки зовсім іншому принципу роботи, потужність розсіювання підсилювача класу D (рис. 1.4) набагато менше, ніж у класі A, B, AB. Ключі вихідного каскаду такого підсилювача комутують вихід з негативною і позитивною шиною живлення, створюючи тим самим серії позитивних і негативних імпульсів. Така форма вихідного сигналу суттєво зменшує потужність розсіювання, так як при наявності напруги струм через вихідні транзистори практично протікає (транзистор закритий), або, коли транзистор відкритий і протікає струм, на ньому падає невелика напруга. Миттєва потужність розсіювання в цьому випадку мінімальна.

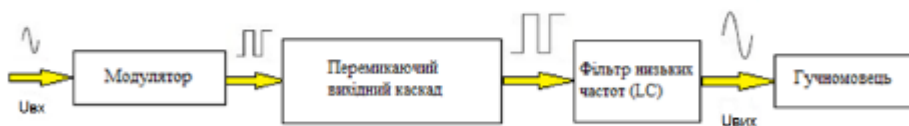


Рисунок 1.4 – Блок-схема підсилювача класу D без зворотного зв'язку

Оскільки звукові сигнали помітно відрізняються від послідовності імпульсів, для перетворення вхідного сигналу в набір імпульсів необхідний модулятор. [2]

Частотний спектр сигналу модулятора містить як звукову складову, так і високочастотну компоненту, яка проявляється в процесі модуляції. Тому для зменшення високочастотної складової між вихідним каскадом і гучномовцем часто включається фільтр низьких частот. Фільтр (рис. 1.5) повинен забезпечувати мінімальні втрати, щоб не розгубити перевагу економічності імпульсного режиму роботи вихідного каскаду. Більш детально застосування фільтрів описано в розділі 2.

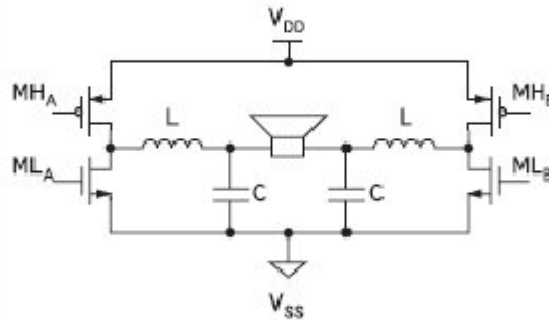


Рисунок 1.5 – Приклад застосування фільтра низьких частот в підсилювачі класу D [2]

Ефективність

На рис. 1.6 порівнюються теоретично розраховані значення потужності, що розсіюється в вихідних каскадах (P_{dis}) підсилювачів класів А і В зі значенням розсіюваної потужності підсилювача класу D, на прикладі підсилювача AD1994. [5]



Рисунок 1.6 – Потужність розсіювання вихідних каскадів А, В та D [5]

Потужність, що розсіюється розрахована в залежності від вихідної потужності (P_{load}), яку подають на гучномовець, із синусоїдальним сигналом звукової частоти. Вихідна потужність нормована до рівня $P_{load\ max}$, за якого синусоїдальний сигнал «зрізається» зверху так, що сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень становить 10%. Вертикальна лінія показує потужність P_{load} , при якій починається «зрізання» синусоїди.

На рисунку видно, що значні відмінності у значенні розсіюваної потужності спостерігаються в широкому діапазоні потужності на навантаженні, і особливо очевидні за великих і середніх навантажень. На початку «зрізання» синусоїди втрати в вихідному каскаді підсилювача класу D в 2,5 рази менше, ніж в каскаді класу B і в 27 разів менші, ніж в класі A. Варто відзначити, що в вихідному каскаді підсилювача класу A втрата енергії більше, ніж у гучномовці - це результат використання великого постійного струму зміщення. Коефіцієнт корисної дії вихідного каскаду (E_{ff}) визначає формула (1.1):

$$E_{ff} = P_{load} / (P_{load} + P_{diss}). \quad (1.1)$$

На початку «зрізу» синусоїди ККД дорівнює 25% для підсилювача класу A, 78,5% для класу B і 90% для підсилювача класу D.

Різниця в потужності розсіювання збільшується за помірних рівнів потужності на навантаженні. Це важливо, бо навіть за високого рівня гучності переважаючі миттєві значення потужності помітно менші пікових значень, $P_{load\ max}$ (в 5-20 разів, в залежності від типу звуку). Таким чином, для звукових підсилювачів $P_{load} = 0,19 \cdot P_{load\ max}$ є прийнятним середнім значенням вихідної потужності, для якої можна порахувати потужність розсіювання, P_{diss} . При такому рівні вихідної потужності підсилювач класу D розсіює в 9 разів менше, ніж підсилювач класу B, і в 107 разів менше, ніж підсилювач A класу. Для звукового підсилювача з $P_{load\ max} = 10$ Вт середня потужність $P_{load} = 1$ Вт може розглядатися як цілком реальна. При цих умовах вихідний каскад класу D буде розсіювати 282 мВт, класу B - 2,53 Вт і A класу - 30,2 Вт. ККД при цьому складе 78% для класу D, що трохи нижче 90% при максимальній потужності.

Але навіть в такому випадку це набагато більше, ніж ККД каскадів класу В і А - 28% і 3% відповідно.

Ця різниця має важливі наслідки для конструкції системи. За рівня потужності більше 1 Вт, щоб уникнути перегріву, лінійні вихідні каскади вимагають спеціальних засобів охолодження - зазвичай це масивні металеві радіатори або вентилятори. Якщо підсилювач виконаний у вигляді мікросхеми, для забезпечення відведення тепла може знадобитися спеціальний корпус, що підвищує вартість пристрою. Це особливо критично, наприклад, в плоских телевізійних приймачах, де простір обмежений, або в автомобільній аудіотехніці, де існує тенденція до збільшення числа каналів за збереження того ж об'єму.

Якщо використовуються потужності нижче 1 Вт основною проблемою є велика витрата енергії. За автономного живлення лінійний вихідний каскад розрядить батарею набагато швидше, ніж підсилювач класу D. У наведеному вище прикладі вихідний каскад D класу споживає в 2,8 рази менше енергії, ніж вихідний каскад класу В, і в 23,3 рази менше, ніж вихідний каскад класу А, що дає змогу істотно збільшити термін роботи джерел живлення мобільних телефонів, портативних ПК, mp3-програвачів. [5]

Модуляція

Всі способи модуляції в підсилювачах класу D кодують аудіо сигнал в потік імпульсів. Зазвичай ширина імпульсів пов'язана з амплітудою звукового сигналу, спектр імпульсів при цьому включає корисний звуковий сигнал і небажану (але немінучу) високочастотну складову. Загальна потужність високочастотної складової у всіх схемах приблизно однакова, так як практично однакова потужність імпульсів, а відповідно до теореми Парсеваля, сумарна потужність сигналу у часовій області дорівнює такій же в частотній області. Однак розподіл енергії по частоті варіюється в широких межах: у деяких випадках це ряд гармонік з амплітудою значно більшою, ніж середній

рівень завад в певному частотному діапазоні, тоді як в інших випадках більш рівномірний розподіл завад за діапазоном.

Широтно-імпульсна модуляцію реалізують за допомогою компаратора, на входи якого подаються корисний сигнал та пилоподібна напруга. У результаті ширина імпульсу на його виході є пропорційна амплітуді корисного сигналу (рис.1.7).

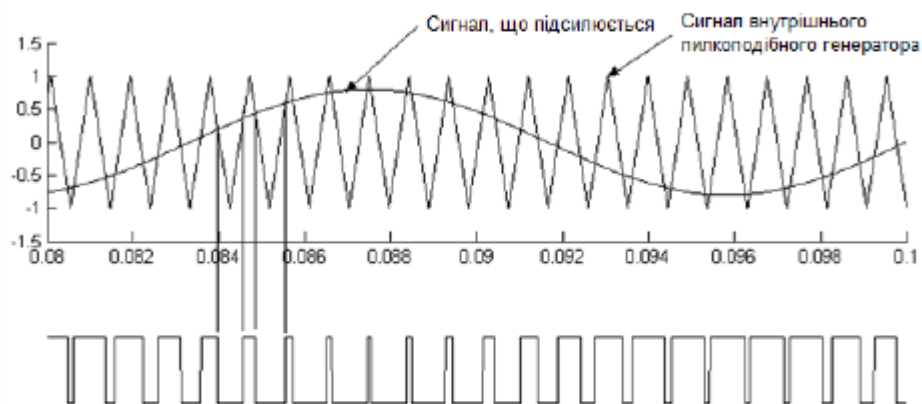


Рисунок 1.7 – Осцилограма роботи ШІМ

Найпростіша та найбільш розповсюджена схема підсилювача класу D – схема з синхронною широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), зображена на рис.1.8. Сигнал, отриманий за ШІМ, виділяється фільтром нижніх частот.

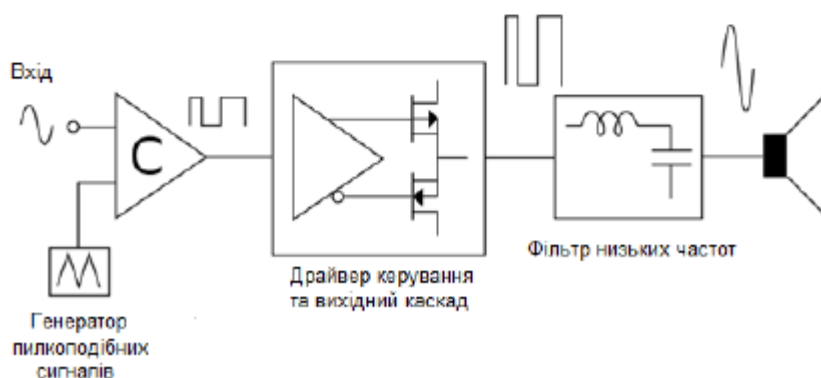


Рисунок 1.8 – Найпростіша схема підсилювача класу D [6]

Спосіб ШІМ має ряд переваг, тому що може забезпечити до 100дБ і вище відношення сигнал / шум за досить низької носійної частоти - в кілька сотень кілогерц, що дає можливість знизити втрати під час перемикання транзисторів вихідного каскаду. Крім того, підсилювачі з ШІМ стійкі майже до 100% - ї модуляції, що забезпечує стабільність їх роботи на максимальних потужностях, поблизу області перевантаження. Проте, ШІМ має ряд недоліків. По-перше, внаслідок своєї власної природи, спотворення вносить сам процес ШІМ. По-друге, гармоніки носійної ШІМ створюють завади в частотному радіодіапазоні з амплітудною модуляцією. По-третє, дуже коротка довжина імпульсів ШІМ в режимі, близькому до повної модуляції. Це в більшості випадків викликає проблеми в колах керування вихідним каскадом - через обмеження в швидкості перемикання транзисторів драйверів процес перемикання не може бути достатньо швидким, щоб отримувати імпульси тривалістю в одиниці наносекунд. Тому повна модуляція часто недосяжна в підсилювачах з ШІМ, обмежуючи тим самим максимальну потужність значеннями нижче теоретично можливої.

Альтернативою ШІМ є використання сигма-дельта модуляції, коли число імпульсів за певний відрізок часу пропорційне середньому значенню звукового сигналу. Ширина окремого імпульсу не є визначальною, як у ШІМ, замість цього імпульси "квантовані" кратно періоду генерації модулятора. В підсилювачах класу D використовують 1-бітний сигма-дельта модулятор. На рис. 1.9. представлена спрощена схема підсилювача класу D на основі сигма-дельта модуляції. Спектральні характеристики сигма-дельта модуляції аналогічні спектральним характеристикам ШІМ 1-го роду.

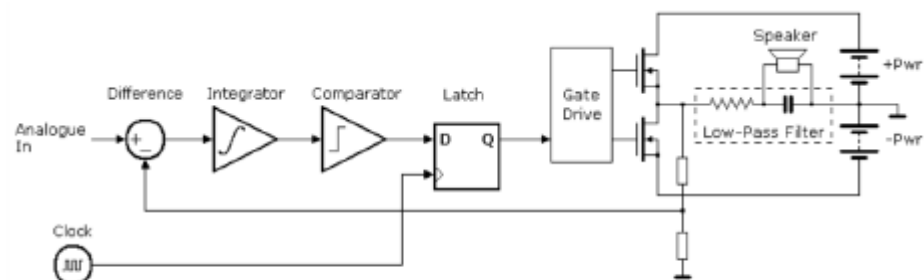


Рисунок 1.9 – Схема побудови підсилювача класу D з сигма-дельта модуляцією [7]

Значна частина ВЧ складової потужності сигма-дельта модулятора розподілена в широкому діапазоні частот без концентрації біля окремих гармонік з частотами, кратними носійній, як це відбувається в ШІМ. Це дає перевагу сигма-дельта модуляції в порівнянні з ШІМ в плані більш рівномірного спектра і відповідно формування кращої електромагнітної обстановки. Типові значення частоти перемикання становлять від 3 до 6 МГц, що значно вище звукового діапазону, і добре знижуються фільтром нижніх частот. Іншою перевагою сигма-дельта модулятора є те, що мінімальна тривалість імпульсу становить один період дискретизації навіть при великих сигналах, близьких до умови повної модуляції. Це спрощує конструкцію кіл керування вихідним каскадом і забезпечує їх надійну роботу аж до теоретично максимального рівня потужності. Незважаючи на це, звичайні 1-бітові сигма-дельта модулятори не дуже часто використовуються в підсилювачах класу D, тому що для досягнення прийнятної відносини сигнал / шум в звуковій смузі частот потрібно не менше, ніж 64-х кратну передискретизацію, що відповідає частоті імпульсів мінімум 1 МГц.

Останнім часом набули поширення підсилювачі класу D з самозбудженням (рис.1.10). У цих підсилювачах використовується зворотний зв'язок, що визначає частоту перемикання модулятора, при цьому зовнішній генератор не використовується. Спектр ВЧ складової, як правило, більш рівномірний, ніж в ШІМ, що забезпечує кращу електромагнітну сумісність. Зворотний зв'язок забезпечує високу якість звуку, проте підсилювач з автоколивальним режимом і змінною частотою генерації важко синхронізувати з будь-якою іншою підсилювальною системою або з'єднати з цифровим джерелом звуку без попереднього цифро-аналогового перетворення. [7]

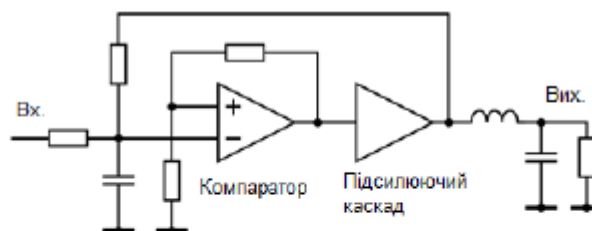


Рисунок 1.10 – Схема організації зворотного зв'язку в підсилювачу класу D із самозбудженням

Недоліки

Підсилювачі класу D мають і суттєвий недолік: значний рівень електромагнітних завад, що поширюються як по гальванічних колах, так і в навколишньому просторі. Тому під час проектування необхідно домагатися забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) підсилювачів класу D з іншими блоками звукопідсилюючої апаратури, мережею живлення і різними технічними засобами.

Виникнення і поширення електромагнітних завад (ЕМЗ) в сучасних джерелах електроживлення і в підсилювачах класу D відбувається подібним чином, обумовлених імпульсним режимом роботи, хоча на рівень ЕМЗ від підсилювачів класу D впливають додаткові фактори, пов'язані з модуляцією інформаційного сигналу. Забезпечення відповідності підсилювачів класу D вимогам стандартів в галузі ЕМС може бути досягнуто комплексним застосуванням спеціальних методів зниження рівня ЕМЗ, характерних тільки для підсилювачів класу D поряд із загальновідомими методами зниження завад, що застосовуються для всіх пристроїв, що працюють в ключових режимах.