Mise en œuvre d’un amplificateur audio de classe D

Auteur : Steve Bowling, architecte produit chez Microchip Technology

Il est possible d'utiliser un microcontrôleur 16 bits associé à quelques périphériques externes pour créer un amplificateur audio de classe D

Les amplificateurs de classe D sont très populaires comme topologie d’amplificateur audio en raison de leur haut rendement pour un prix abordable. L’étage de sortie à courant élevé utilise des commutateurs binaires, ce qui engendre peu de génération de chaleur et peu de pertes de puissance. L’alimentation, le dissipateur thermique et la taille générale de l’amplificateur peuvent ainsi être réduits.
Un amplificateur de classe D a une efficacité typique supérieure à 90 %, contre 50 % pour les amplificateurs typiques de classe AB. Dans les modèles de type AB, la majeure partie de l’inefficacité est due aux composants de l’étage de sortie nécessaires pour fonctionner en zone linéaire. À mesure que le courant traverse les composants, il est converti en chaleur au lieu de fournir la charge.
On peut réaliser un amplificateur de classe D symétrique (push/pull) en pont complet et à une seule voie en utilisant seulement les caractéristiques analogiques d'un microcontrôleur 16 bits ainsi que quelques composants externes. Cela laisse le processeur disponible pour les autres applications.

Topologie de la classe D
Un amplificateur audio de classe D est essentiellement un amplificateur utilisant la modulation de largeur d’impulsion (MLI, ou PWM pour *Pulse-Width Modulation*). Le signal audio d’entrée est utilisé comme référence de modulation pour la porteuse PWM. Le signal PWM en résultant entraîne un étage de sortie à plus forte puissance, et est filtré afin de retrouver le signal audio amplifié. Comme le montre la figure 1, il existe quatre principales fonctions sur ce type de composant : générateur de forme d’onde triangulaire, comparateur de modulation audio, contrôleur de commutation et étage de sortie, et filtre passe-bas.

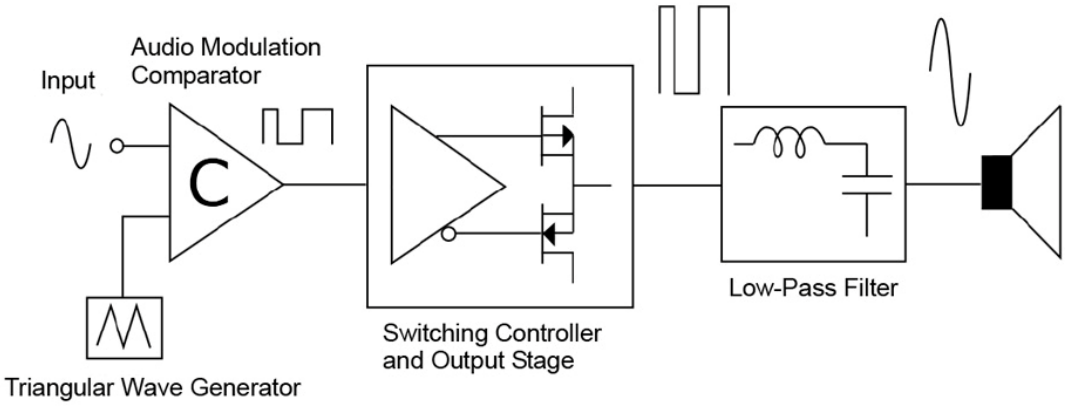


Figure 1 : Schéma électronique d'un amplificateur de classe D

À l'aide d'un comparateur, le signal audio analogique est tout d'abord comparé avec une onde triangulaire à haute fréquence, pour créer une forme d'onde pulsée qui soit directement proportionnelle aux valeurs instantanées du signal audio. Ceci débouche sur une représentation numérique du signal analogique qui peut piloter les composants de sortie uniquement pour les états allumé et éteint (ON/OFF).
Les circuits logiques supplémentaires produisent le signal numérique inverse pour piloter les deux commutateurs complémentaires. Après quoi, le contrôleur de commutateur fournit une synchronisation du signal et les tensions de pilotage des grilles pour les composants externes. Les commutateurs de sortie fournissent un gain de tension proportionnel à la tension d'entrée, ainsi qu'une capacité de courant élevée pour entraîner la bobine du haut-parleur. Enfin, un filtre passe-bas supprime la fréquence porteuse et recrée le signal audio analogique.

Entrée analogique
Le signal audio entrant a besoin d'être traité et filtré avant d'être comparé avec l'onde triangulaire. Le filtre passe-bas peut prévenir le crénelage, avec un niveau qui doit être inférieur à celui de l'onde triangulaire. L'amplitude du signal audio peut avoir besoin d'être atténuée ou amplifiée pour correspondre à celle fournie par le comparateur et à l'amplitude de l'onde triangulaire.
Pour améliorer le rapport signal sur bruit (SNR), le niveau crête de l'entrée audio doit être aussi proche que possible de la pleine gamme du système. Selon l'application et le haut-parleur à piloter, il peut s'avérer intéressant de limiter la bande du signal d'entrée. Par exemple, si un petit haut-parleur, qui ne peut produire des sons inférieurs à 100 MHz, est utilisé, l'entrée doit être filtrée avec un filtre passe-haut pour réduire la perte d'énergie et les dommages éventuels subis par le haut-parleur.

Alimentations
Une alimentation DC stable est importante car elle joue un rôle critique dans les performances de l'amplificateur, y compris pour le gain, le taux de distorsion harmonique (THD) et le bruit. Les amplificateurs de classe D affichent peu voire pas du tout de réjection du bruit au niveau de l'alimentation ; tout bruit ou chute de tension dans la charge sera

répercuté sur la sortie. En raison de la nature numérique du modèle de classe D, l'alimentation doit fournir des transitoires de courant élevés chaque fois que les composants de sortie commutent. L'alimentation peut également être affectée par les éléments de stockage de l'énergie dans le filtre passe-bas et la bobine du haut-parleur.

Étage de sortie

En utilisant un étage de sortie en pont plein, comme montré sur la figure 2, qui peut être mis en œuvre avec un seul rail, on peut réduire l'effet de l'alimentation sur la dégradation des performances.

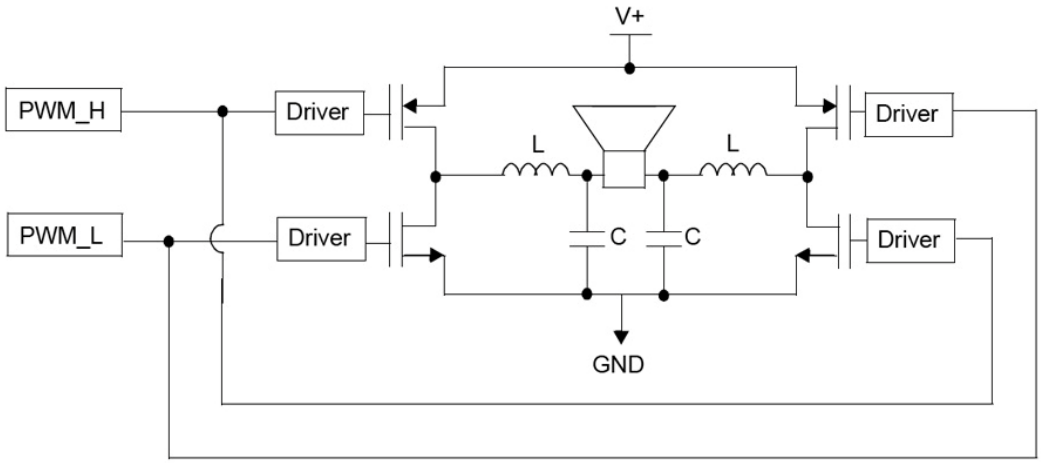


Figure 2 : Diagramme d'un circuit de sortie en pont plein

Un temps mort est nécessaire pour empêcher le débit de courant d'être endommagé en passant par les commutateurs. Le temps mort est un délai instauré avant le passage des commutateurs à l'état haut, nécessaire à cause des effets de chute capacitive du commutateur de sortie. Ceci empêche que les deux commutateurs soient fermés en même temps, ce qui diminue de manière effective la tension V+ vers la terre (GND). La durée du temps mort dépend du délai entre les états ON/OFF du commutateur, et affecte le taux THD. La topologie en pont plein réduit le décalage et le taux THD par rapport à celle en demi pont, et peut être mise en œuvre sans circuit résonnant. À l'état de repos, le cycle de service PWM est de 50 % et la tension moyenne aux deux extrémités de la bobine du haut-parleur est de V+/2.

Filtre de sortie

Un filtre de sortie de classe D typique est un filtre passe-bas LC de second ordre sans aucun composant résistif induisant une perte de puissance. Le filtre lisse la fréquence, qui doit être au moins quatre fois inférieure à la fréquence de commutation du générateur de l'onde triangulaire. L'impédance nominale du haut-parleur de l'application guidera les valeurs initiales des inducteurs et condensateurs. Cependant, l'inductance et la capacité de la bobine du haut-parleur interagissent également avec les éléments du filtre et doivent être prises en compte pendant la conception.

Le niveau de puissance de l'amplificateur et le courant de sortie fourni par le filtre dictent la puissance nominale des éléments du filtre. Enfin, certains systèmes peuvent afficher des restrictions concernant les émissions rayonnées en termes de perturbation électromagnétiques (EMI). La conception du filtre, son emplacement et les pistes qui l'entourent doivent être pris en compte pour atteindre des performances optimales.

Mise en œuvre

Un microcontrôleur 16 bits, comme le PIC24FV16KM202 de Microchip, peut être accompagné d'un large éventail de périphériques analogiques et numériques pour créer un amplificateur analogique de classe D. Le composant KM possède également des connexions internes configurables entre les périphériques, ce qui réduit les pistes externes sur la carte électronique et libère des broches d'E/S pour d'autre usages. Le modèle FV de la famille a été choisi pour sa tension de fonctionnement de 5 V, qui améliore le rapport signal sur bruit (SNR) du système. La figure 3 montre les périphériques et connexions utilisés pour l'amplificateur.

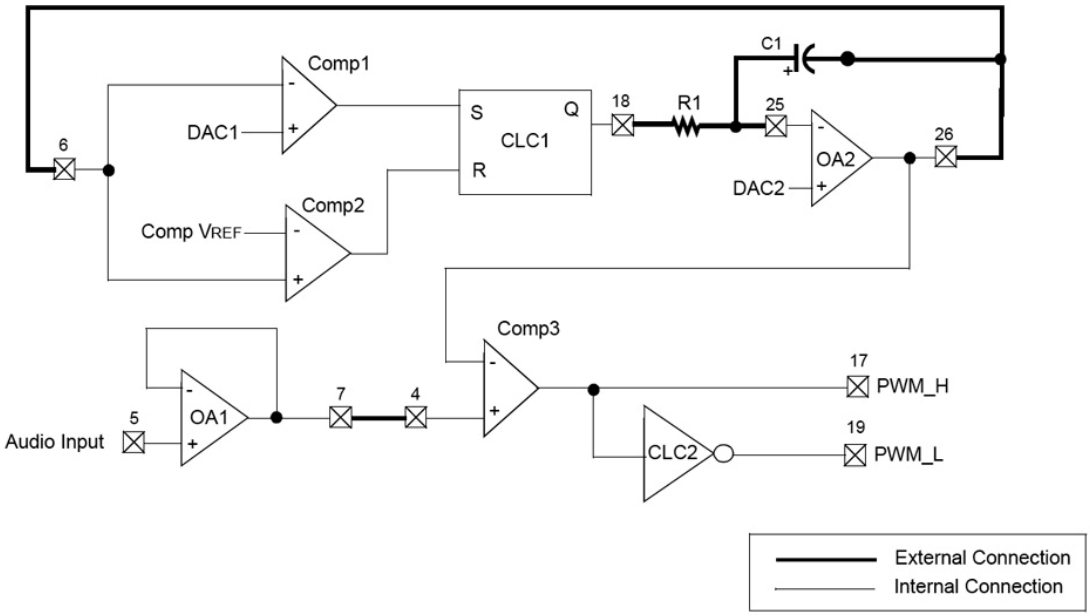


Figure 3 : Connexions périphériques pour le microcontrôleur PIC24FV16KM202

L'amplificateur opérationnel OA1 joue le rôle de tampon pour le signal audio entrant. Le générateur d'onde triangulaire utilise deux comparateurs, un réglage de module CLC (cellule logique configurable) comme bascule RS et un AOP configuré comme amplificateur intégrateur. Les comparateurs sont câblés comme comparateur à fenêtre, avec des seuils fixés par DAC1 ainsi que par la référence de tension du comparateur.

La sortie des comparateurs à fenêtre est convertie en onde carrée à l'aide de la bascule RS, puis finalement en onde triangulaire grâce à la fonction d'intégration de OA1. L'onde triangulaire est renvoyée vers le

comparateur à fenêtre, complétant le circuit auto-résonnant.
Le comparateur Comp3 crée la forme d'onde impulsionnelle en comparant la forme d'onde triangulaire et celle de l'entrée audio. Le module CLC2, en tant qu'inverseur, fournit le signal complémentaire pour la topologie en pont plein.
Le système comporte trois comparateurs. Les comparateurs Comp1 et Comp2 fonctionnent comme comparateurs à fenêtre, utilisant la référence de tension du comparateur et DAC1 pour définir les niveaux des seuils de tension. Le comparateur 3, quant à lui, compare le signal audio avec l'onde triangulaire pour créer le signal PWM numérique.
L'amplificateur opérationnel OA1 joue le rôle de tampon pour le signal audio analogique entrant. Il est paramétré comme suiveur de tension à l'aide de la connexion interne sélectionnable depuis la sortie vers l'entrée inverseuse. De manière optionnelle, OA1 peut être paramétré comme filtre avec ou sans gain. OA2 est utilisé dans le générateur d'onde triangulaire comme amplificateur intégrateur, avec sa sortie renvoyée vers le comparateur à fenêtre afin de créer un oscillateur.
Les convertisseurs N/A ou DAC sont utilisés à l'état statique pour fournir un niveau de tension DC programmable pour le générateur d'onde triangulaire. DAC1 est connecté de manière interne à l'entrée non inverseuse du comparateur Comp1 comme seuil de tension supérieur du comparateur à fenêtre. DAC2 est connecté de manière interne à l'entrée non inverseuse de OA2 et utilisé pour définir le niveau de polarisation DC à 2,5 V (V+/2).
Les cellules CLC fournissent le circuit logique numérique pour le générateur d'onde triangulaire et la sortie numérique. CLC1 est configuré comme bascule SR pour créer une seule onde carrée à partir des sorties du comparateur à fenêtre. Les entrées de CLC1 sont connectées de manière interne aux sorties du comparateur. CLC2 est paramétré comme inverseur pour créer le signal PWM complémentaire pour les commutateurs côté basse tension.

Conclusion

Le large éventail de périphériques analogiques et numériques des microcontrôleurs permet de les utiliser pour créer un amplificateur de classe D complet. Les connexions internes entre les périphériques réduisent le nombre de broches nécessaire pour sa mise en œuvre, laissant libres les broches d'E/S pour d'autres usages. En utilisant les périphériques au lieu de composants discrets pour réaliser un système de classe D, les pistes sur la carte électronique sont limitées ainsi que les coûts généraux.