

# تقویت کننده های سوئیچینگ صوتی با بازده بالا

غلامعلی حیدری

بخش مهندسی برق

دانشکده فنی دانشگاه شهید باهنر کرمان

[gheydari@yahoo.com](mailto:gheydari@yahoo.com)

**چکیده:** امروزه طراحی های الکترونیکی به سوی کوچکتر شدن و صرفه جویی در جا و انرژی پیش میروند. تقویت کننده های کلاسیک مورد استفاده در طبقات خروجی حجم و انرژی زیادی نیاز دارند که مانع صرفه جویی در طراحی می شوند. تقویت کننده های سوئیچینگ خصوصا در محدوده فرکانس صوتی با حجم کم و تلفات پایین می توانند راه حلی برای این مشکل باشند. ترانزیستور در این تقویت کننده ها فقط قطع یا اشباع میباشد و انرژی بسیار کمی تلف می کند. با این روش بازده عملا بیش از ۹۰٪ می گردد.

**کلمات کلیدی:** تقویت کننده، سوئیچینگ، بازده

*Class S, Class D, PWM*

## ۱- مقدمه

تقویت کننده های صوتی از ابتدایی ترین مباحث الکترونیک می باشند، اما به علت کاربرد گسترده ای که دارند مطالعه بر روی آنها می تواند مفید باشد. بزرگترین مشکل تقویت کننده های معمولی بازده پایین و تلفات حرارتی زیاد آنهاست. هدف این مقاله معرفی تقویت کننده های سوئیچینگ صوتی (کلاس D) و تشریح اجمالی ساختمان آنها می باشد. این تقویت کننده ها از لحاظ تئوری می توانند بازده ۱۰۰٪ داشته باشند و در عمل بازده آنها در تولیدات تجاری تا ۹۸٪ هم می رسد.

## ۲- کلاسهای تقویت کنندگی

تقویت کننده ها از لحاظ نوع بایاسینگ ترانزیستور و نواحی کار آن به کلاسهای مختلفی تقسیم می شوند. کلاسهای A، B و AB معروفترین انواع در تقویت کننده های صوتی به شمار می روند اما در عمل پر بازده ترین آنها نمی تواند بیش از ۵۰ تا ۶۰ درصد راندمان داشته باشد، با این حال برای کاربرد های صوتی با کیفیت بسیار بالا هنوز هم کلاس AB کاربرد دارد.

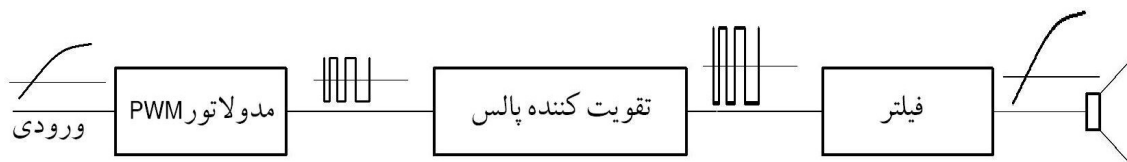
اما در بسیاری از کاربردهای معمولی مخصوصا در مواردی که دستگاه باید قابل حمل باشد و منابع تغذیه محدود می باشند، این تقویت کننده ها کارایی خود را از دست می دهند.

کلاس D (یا S) که موضوع بحث این مقاله است، از انواع سوئیچینگ با تکنیک PWM می باشد که می تواند در باند صوتی کار کند. البته در بعضی مراجع کلاس D از نوع مخابراتی شمرده شده و بجای آن کلاس S معرفی گردیده است. [۱]

لازم به تذکر است که کلاسهای C, E و F برای باند RF به کار می روند و خارج از بحث این مقاله می باشند.

### ۳- تقویت کننده های سوئیچینگ

اساس کار این تقویت کننده ها بر این مبنا استوار است که سیگنال ورودی بوسیله یک مدولاتور PWM به سیگنال PWM تبدیل میشود و سپس این سیگنال توسط یک تقویت کننده پالس که معمولا به صورت کلاس B بسته می شود تقویت شده و توسط یک فیلتر در خروجی دمدموله می گردد و به بلندگوها داده می شود. (شکل ۱)

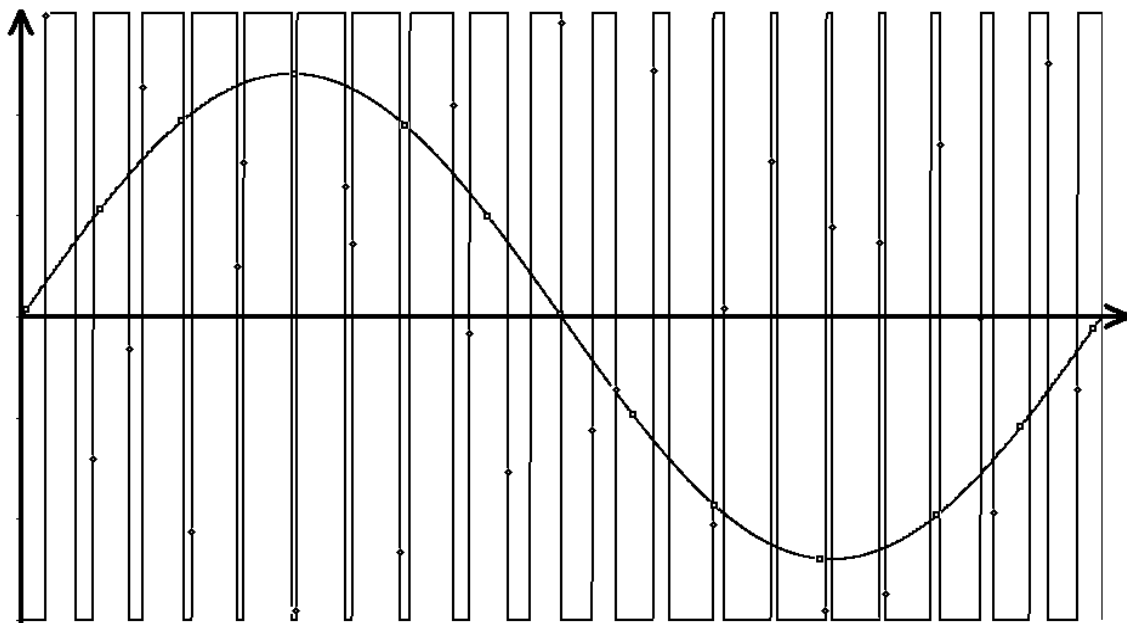


شکل ۱- بلوک دیاگرام تقویت کننده سوئیچینگ صوتی

بیشترین صرفه جویی توان در تقویت کننده پالس صورت می گیرد و در واقع ترانزیستورهای این طبقه طوری بایاس می شوند که در صورت وجود پالس در ورودی اشباع، و در صورت نبود آن قطع باشند و تنها در مدت زمان کوتاهی که از قطع به اشباع یا بالعکس تغییر وضعیت می دهند وارد ناحیه فعال می شوند. چون افت ولتاژ روی ترانزیستور در اشباع ناچیز است و جریان آن هم در ناحیه قطع تقریبا صفر است؛ پس در این دو ناحیه که قسمت عمده مدت زمان کار ترانزیستور را تشکیل می دهند توان بسیار کمی روی ترانزیستور تلف می شود. باید توجه داشت که در حین انتقال از قطع به اشباع و بالعکس تلفات توان ترانزیستور زیاد می شود اما چون زمان این انتقال بسیار کوتاه است انرژی تلف شده ناچیز می باشد.

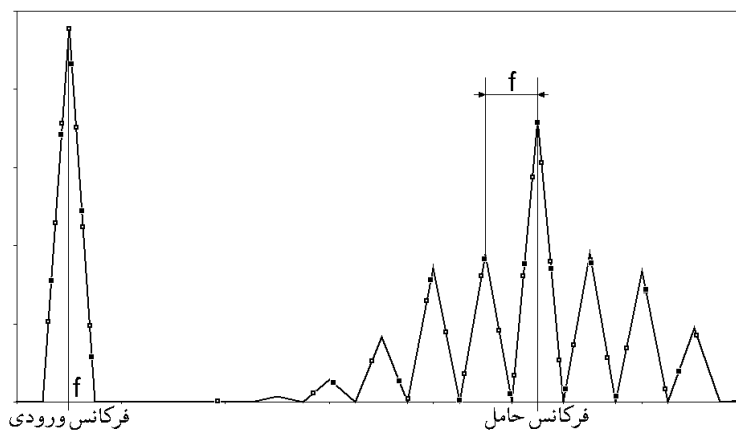
#### ۳-۱- مدولاسیون پهنای پالس (PWM)

مدولاسیون پهنای پالس یا PWM در واقع نوعی نمونه برداری آنالوگ از یک سیگنال با تغییرات کند بوسیله یک پالس مربعی با تغییرات سریع است که در آن پهنای پالس مربعی تولید شده متناسب با دامنه سیگنال مورد نظر در لحظه نمونه برداری است. (شکل ۲) باید توجه داشت که فرکانس پالس مربعی ثابت است و فقط Duty Cycle آن تغییر می کند.



شکل ۲- مدولاسیون پهنای پالس

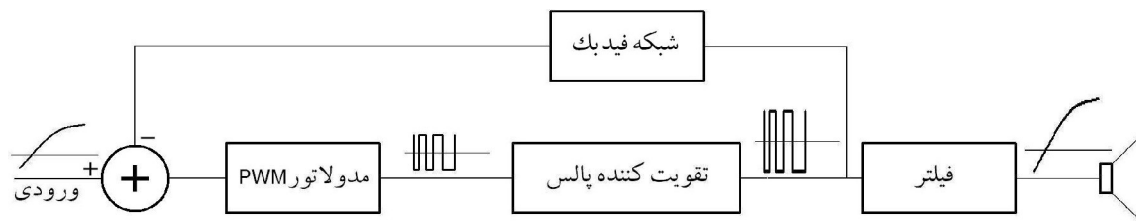
تحلیل طیفی شکل موج PWM (شکل ۳) نشان می‌دهد که اطلاعات سیگنال مدوله شده به صورت پایین گذر در باند سیگنال موجود است اما در فرکانس حامل و کنار باند های آن که باندازه فرکانس پیام و ضرایب آن از فرکانس حامل فاصله دارند، مؤلفه هایی وجود دارد که با فاصله گرفتن از فرکانس حامل دامنه آنها به تدریج کم میشود. پس در صورتی که فرکانس حامل به قدر کافی بزرگ باشد (۱۰ تا ۱۰۰ برابر فرکانس پیام) کنار باندهای مزاحم به اندازه کافی از باند پیام دور می شوند و دامنه آنها در باند پیام ناچیز می گردد. در این وضعیت می توان به سادگی بایک فیلتر پایین گذر پیام را آشکار کرد.



شکل ۳- تحلیل طیفی شکل موج PWM

برای بهبود کیفیت خروجی و کاهش هارمونیکهای اضافی می توان از فیدبک سود جست؛ (شکل ۴) زیرا به خاطر ایده آل نبودن قطعات و بلوک های مورد استفاده و آثار غیر خطی المانهای الکترونیکی و سلفها، همواره ممکن است در خروجی ضرابی از هارمونیکهای اصلی پیام نیز ظاهر شود که با وجود فیدبک دامنه آنها بسیار کم می شود. سیستم

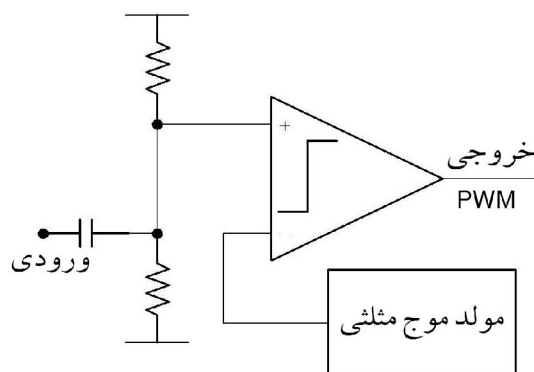
فیدبک دار هم می تواند به صورت خطی و هم به صورت غیر خطی بکار رود و باید در آن ملاحظات مربوط به پایداری و سرعت پاسخ مناسب رعایت گردد که در ادامه خواهد آمد.



شکل ۴- تقویت کننده سوئیچینگ با فیدبک

### ۳-۲- نحوه تولید PWM

یکی از ساده ترین راه های ایجاد شکل موج PWM مقایسه کردن موج ورودی با یک شکل موج مثلثی یا دندان اره ای فرکانس بالا می باشد. [۲] در این حالت هرگاه اندازه ورودی از موج مثلثی بزرگتر بشود خروجی مقایسه کننده High و در غیر این صورت Low می گردد. (شکل ۵)



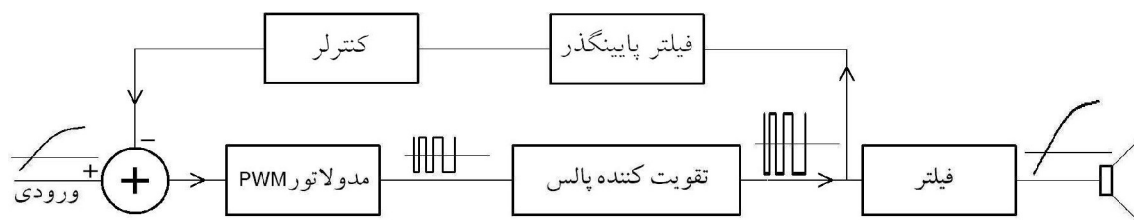
شکل ۵- مدولاسیون PWM بوسیله مقایسه با موج مثلثی

با توجه به طیف سیگنال خروجی در می یابیم که مثلثی بودن یا دندان اره ای بودن این شکل موج چندان اهمیتی ندارد؛ بلکه خطی بودن و فرکانس بالای آن مهم است. در واقع تفاوت طول اضلاع مثلث در هر تناوب بر روی مؤلفه های فرکانس بالا و فاز خروجی تاثیر دارد که هیچیک در باند صوتی مورد توجه نیستند. با این حال شکل موج دندان اره ای ترجیح دارد زیرا تولید آن ساده تر است.

### ۳-۳- فیدبک

به طور کلی در تقویت کننده های سوئیچینگ به دو صورت خطی و غیرخطی می توان حلقه فیدبک تشکیل داد که در این جا نوع خطی [۴] آن بررسی می شود؛ در این روش سیگنال خروجی قبل از فیلتر شدن نمونه برداری شده و

سمت پایین گذر آن که حامل اطلاعات صوتی است بوسیله یک فیلتر با انحراف فاز کم جدا می شود<sup>۱</sup> و بعد از گذشتن از یک کنترلر وارد جمع کننده می شود. (شکل ۶)



شکل ۶- فیدبک خطی برای تقویت کننده سوئیچینگ

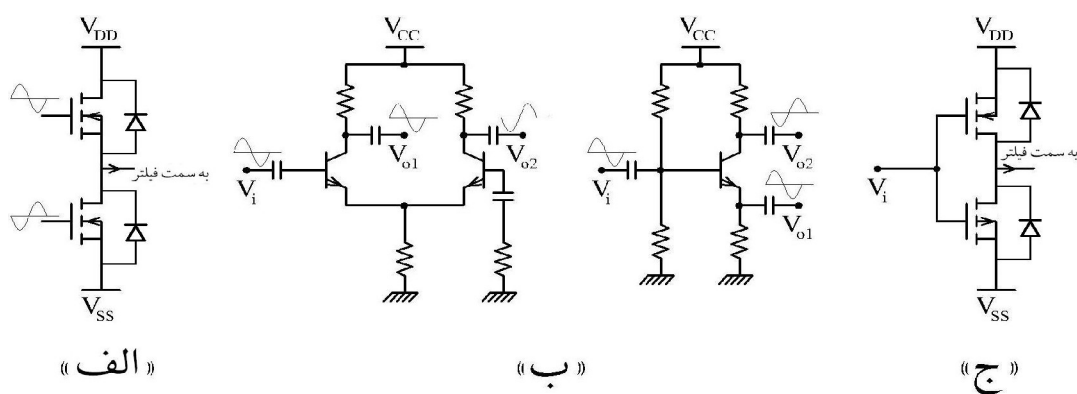
چون سیگنال فیدبک گرفته شده دامنه کوچکی دارد، و فاز فیلتر فیدبک هم در دامنه های کم تقریباً خطی است، پس فاز سیگنال اعوجاج نمی یابد و مطابق فاز ورودی است؛ با این وجود می توان بوسیله یک کنترلر (مثلاً یک PID) بهره کل و پایداری را تثبیت کرد و هارمونیک های اضافی را در خروجی کم نمود.

### ۳-۴- طبقه قدرت

بعد از اینکه سیگنال PWM به اندازه کافی در طبقات مقدماتی تقویت شد، در آخر به طبقه قدرت که یک تقویت کننده کلاس B است می رسد. (شکل ۷- الف)

امروزه در این طبقه معمولاً از VMOSFET، DMOS و یا دیگر انواع ماسفت های قدرت استفاده می شود. [۳] در انواع قدیمی تر BJT های باند RF بکار برده می شدند. [۱]

سیگنال ورودی قبل از اعمال شدن به گیتها ابتدا از یک ترانسفورماتور سه سر یا یک جدا کننده فاز الکترونیکی<sup>۲</sup> گذشته و پس از جدا شدن فاز مثبت و منفی آن آماده اعمال به گیتها می گردد.<sup>۳</sup>



شکل ۷

<sup>۱</sup> علت فیدبک نگرفتن از سیگنال بعد از فیلتر، اعوجاج فاز زیادی است که فیلتر خروجی در آن ایجاد می کند.

<sup>۲</sup> جدا کننده فاز الکترونیکی می تواند یک تقویت کننده تفاضلی تک ورودی یا یک مدار امپتر مشترک باشد. (شکل ۷- ب)

<sup>۳</sup> چنانچه ماسفت های بکار رفته به صورت مکمل (P- کانال - N- کانال) باشند نیازی به جدا کننده فاز نیست. (شکل ۷- ج) [۳]

چون در هر نیم سیکل جهت جریان فیلتر تغییر میکند و بخاطر وجود سلف در فیلتر این تغییر نمی تواند ناگهانی رخ دهد، به همین منظور دو دیود با ترانزیستورها موازی شده اند تا اجازه دهند هنگام سوئیچ کردن جریان سلفها از منبع تامین شود و به ترانزیستورها تحمیل نگردد.

مزیت استفاده از ماسفت، نیاز نداشتن به مدار بایاس پیچیده و مناسب بودن نحوه سوئیچینگ آن است. امروزه با وجود تکنولوژی ماسفتهای ولتاژ بالا میتوان طبقه خروجی را مستقیماً به منابع ولتاژ بزرگ (در حد ۱۰۰ ولت) متصل کرد. در این صورت سیگنال خروجی تولید شده دامنه ولتاژ بزرگی خواهد داشت و میتوان مستقیماً آن را به شبکه مچینگ بلندگوها متصل کرد؛ با این روش احتیاجی به نصب ترانس مچینگ در خروجی تقویت کننده نیست و با حذف آن می توان کیفیت خروجی را افزایش داد. زیرا این ترانسفورماتورها به علت داشتن پاسخ فرکانسی نامناسب و غیر خطی بودن هسته آنها کیفیت صدا را به خصوص در فرکانس های بالایی آن کم می کنند.

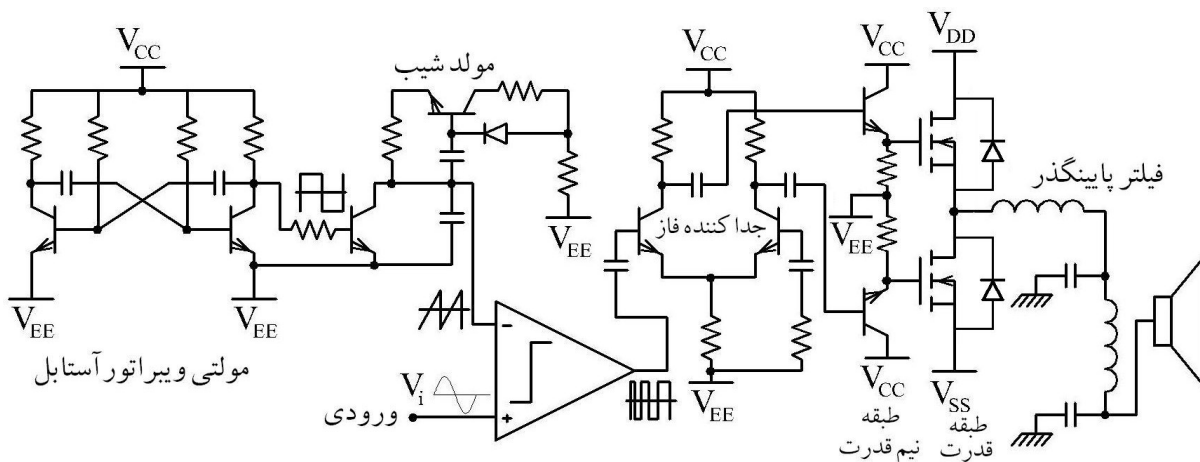
### ۳-۵- فیلتر خروجی

بعد از طبقه قدرت یک فیلتر پایین گذر قرار می گیرد تا قسمت فرکانس بالای سیگنال خروجی (حامل) را حذف کند و پیام را به بلندگوها انتقال دهد. معمولاً ترجیح بر این است که از یک فیلتر باترورث استفاده شود؛ چرا که دامنه پاسخ فرکانسی این فیلتر صاف و بدون ریبیل است اگر چه فاز پاسخ آن مطلوب نیست اما به دلیل حساسیت نداشتن گوش انسان به فاز صدا این مطلب باعث کم شدن کیفیت خروجی نمی شود. در یک طرح اقتصادی باید بین فرکانس کار مدار و مرتبه فیلتر مصالحه ای صورت گیرد؛ زیرا با افزایش فرکانس حامل میتوان از فیلترهای با مرتبه و حجم کمتری استفاده کرد در عوض قیمت المان های نیمه هادی افزایش می یابد؛ و در صورتیکه فرکانس حامل کمتر گردد (حداقل ۱۰ برابر ماکزیمم فرکانس ورودی) احتیاج به فیلترهای با مرتبه بالاتر و قطعات بزرگتر می باشد. ولی قیمت المانهای نیمه هادی کمتر میشود. در هر صورت باید در طراحی فیلتر کیفیت خروجی را هم در نظر گرفت به طوریکه مؤلفه های صوتی فرکانس بالا خیلی تضعیف نشوند.

در برخی موارد که پهنای باند خروجی خیلی عریض نباشد و کیفیت در حد معمولی مورد نظر باشد، می توان فیلتر را به کلی حذف کرد مشروط بر اینکه سیم پیچ بلندگو دارای اندوکتانس کافی باشد (معمولاً در بلندگوهای بزرگ با قطر زیاد این امکان وجود دارد). در این حالت باید حتی الامکان فاصله تقویت کننده تا بلندگو را کم کرد تا از انتشار امواج فرکانس بالا از خروجی و ایجاد نویز در محیط اطراف جلوگیری شود.

### ۳-۶- مدار نمونه

در ادامه مدار نمونه ای بعنوان تقویت کننده سوئیچینگ معرفی می گردد. گر چه امروزه بعضی اجزاء این مدار به صورت مدار مجتمع در دسترس قرار دارند؛ ولی برای درک بهتر فقط مقایسه کننده به صورت بلوک نشان داده شده و بقیه مدار به صورت گسترده رسم شده است. (شکل ۸)



شکل ۸- مدار نمونه برای تقویت کننده سوئیچینگ صوتی

### ۷-۳-نتیجه گیری

#### ۷-۳-۱-معایب

مهمترین عیب تقویت کننده های سوئیچینگ آثار غیر خطی آنهاست که باعث تولید هارمونیک های اضافی در خروجی می شود. اگر چه می توان با فیدبک گرفتن از خروجی به ورودی، مقدار زیادی از این هارمونیک ها را تضعیف کرد؛ اما همیشه مقداری از آنها در خروجی وجود دارد. این مقدار اعوجاج معمولاً در کیفیتهای معمولی و نسبتاً خوب اثر زیادی ندارد و قابل توجه نیست. اما در کارهای کیفیت بالا و در قدرت های زیاد، کم کردن هارمونیک های اضافی مشکل می گردد و کار طراحی را پیچیده می کند.

عیب دیگر این تقویت کننده ها، فرکانس بالای مدارات آنها خصوصاً مدار قدرت آنها است؛ در صورت نشت این فرکانس به خروجی یا بدنه دستگاه و انتشار آن در محیط، می تواند منبع پر قدرتی برای ایجاد نویز در وسایل الکترونیکی اطراف خود (مانند رادیو های AM و دستگاه های صوتی دیگر) باشد. برای جلوگیری از این عیب باید بخش های فرکانس بالا را کاملاً از خارج ایزوله نمود و آنها را با محفظه های فلزی پوشاند.

#### ۷-۳-۲-کاربردها

تقویت کننده های سوئیچینگ امروزه به طور گسترده ای در وسایل قابل حمل و در خودروها بعنوان پخش های پر قدرت بکار می روند. این نوع تقویت کننده ها میتوانند کاربرد زیادی بعنوان مدولاتور [۱] در فرستنده ها نیز داشته باشند که در مباحث مخابراتی بررسی می شود. کاربرد این تقویت کننده ها در سالن های نمایش در قدرت های بسیار بالا نیز مدتی است که مورد توجه قرار گرفته است و برای برطرف کردن معایب آن ها تلاش هایی در حال انجام است. امروزه بعضی شرکت ها انواع اصلاح شده این نوع تقویت کننده را با نامهای جدید همانند تقویت کننده های کلاس T، کلاس I و... عرضه کرده اند که همگی بر پایه تقویت در کلاس D ساخته شده اند.

شرکت های معتبر سازنده مدار های مجتمع مانند Sanyo, National Semiconductor و... اقدام به ساخت تقویت کننده های سوئیچینگ در توان های مختلف به صورت تراشه کرده اند [۵] که بازده آنها عموماً بالای ۹۰٪ است و به علت حجم و مصرف کمی که دارند می توانند زمینه های جدیدی در طراحی الکترونیکی ایجاد کنند.

## ۸-مراجع

- [۱] ه. ا. کروس، چ. و. بوستین و ف. ه. راب، *مدارهای مخابراتی*، دانشگاه امام رضا، مشهد، ۱۳۷۴.
- [۲] س. ا. معتمدی، *تکنیک پالس*، موسسه علمی فرهنگی نص، تهران، ۱۳۸۱.
- [3] W. Marshall, Introduction to Electroacoustics and Audio Amplifier Design, Second Edition - Revised Printing, Kendall/Hunt, 2001.
- [4] Chiew Tiam Boon, Switch Mode Multilevel (Class D) Power Amplifier, [http://www.iweil.com/audio/class\\_d.pdf](http://www.iweil.com/audio/class_d.pdf) , October 2001
- [5] National Semiconductor, LM4651 Datasheet, National Semiconductor Publications, June 2004