فصل دوم

تقویت کننده‌ها

۲-۱ مقدمه

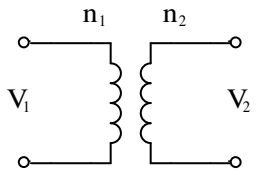
تقویت کننده چیست؟ چه نیازی به تقویت کننده داریم؟ تفاوت بین یک تقویت کننده ویک ترانسفورماتور چیست؟ تقویت کننده چه مشخصاتی دارد؟ ... . در این بخش سعی می‌کنیم تا حدودی جوابی برای این سوالات بیابیم.

مثال ۲-۱ فرض کنید می‌خواهیم یک گیرنده رادیویی بسازیم. آنتن ـ به عنوان یک مبدل انرژی الکترومغناطیسی به انرژی الکتریکی ـ امواج رادیویی را گرفته، تبدیل به یک ولتاژ الکتریکی می‌کند (نیروی محرکه). پس می‌توانیم خروجی آنتن را به عنوان منبع سیگنال در نظر بگیریم. پس از تغییرات لازم بر روی این سیگنال، آن را به یک بلندگو ـ به عنوان یک مبدل انرژی الکتریکی به انرژی صوتی

(مکانیکی) ـ اعمال می کنیم تا صدا را بشنویم. اگر فرض کنیم نیروی محرکه آنتن (پس از تبدیل‌های لازم برای سیگنال‌های صوتی) $v_s = 1\mathrm{mV_p}$ باشد و برای شنیدن صدا با کیفیت مطلوب لازم باشد که به بلندگو ولتاژ $v_o = 1\mathrm{V_p}$ را اعمال کنیم، باید ولتاژ آنتن ۱۰۰۰ برابر شود. اما چگونه میتوان ولتاژ را ۱۰۰۰ برابر کرد؟ شاید اولین راه حلی که بنظر برسد، استفاده از یک ترانسفورماتور باشد.

می‌دانیم که در یک ترانسفورماتور ایده‌آل:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{n_2}{n_1} = N \qquad (۱-۲)$$



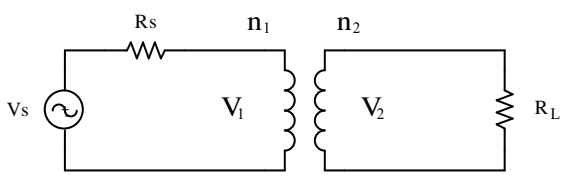
شکل ۲-۱ یک ترانسفورماتور ایده‌آل

که در این رابطه: V_1 ولتاژ و n_1 تعداد دور اولیه، V_2 ولتاژ و n_2 تعداد دور ثانویه و N نسبت دورهای ثانویه به اولیه ترانسفورماتور می‌باشد.

بنابراین ظاهراً اگر نسبت دورها را $N = 1000$ بگیریم، منبع سیگنال را به اولیه ترانسفورماتور (V_1) و بلندگو را به ثانویه آن (V_2) اعمال کنیم، خواسته مسئله ارضا شده است. ولی این راه حل به جواب نمی‌رسد! چرا؟ چون:

۱- ترانسفورماتور ایده‌آل نیست. تعداد دورهای اولیه از حدی نمی‌تواند کمتر باشد (مثلاً ۱۰۰ دور) بنابراین تعداد دورهای ثانویه بسیار زیاد خواهد بود (۱۰۰,۰۰۰ دور!) این امر باعث بزرگ شدن جثه ترانسفورماتور، بزرگ شدن مقاومت داخلی و اثر خازنی، به‌عبارت دیگر تلفات آن خواهد شد.

۲- منبع سیگنال، یک منبع ولتاژ ایده‌آل نیست! بلکه دارای یک مقاومت داخلی می‌باشد. بنابراین مدار معادل مسئله، (با فرض ایده‌آل بودن ترانسفورماتور) بصورت مدار شکل ۲-۲ خواهد بود.



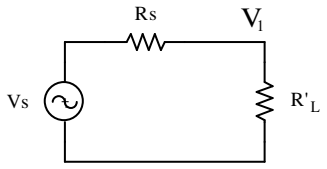
با توجه به روابط ترانسفورماتور ایده‌آل:

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{V_2}{V_1}=\frac{n_2}{n_1}=N \qquad (۲-۱ \text{ الف})$$

مقاومت بار از دید سر اولیه ترانسفورماتور برابر خواهد بود با:

$$R_L^{'}=\frac{V_1}{I_1}=\frac{V_2/N}{I_2.N}=\frac{R_L}{N^2} \qquad (۲-۲)$$

در نتیجه مدار معادل شکل ۲-۲ به صورت شکل ۲-۳ خواهد بود. با فرض ایده‌آل بودن ترانسفورماتور و:



شکل ۲-۳ نحوه محاسبه ولتاژ اولیه

$$V_s=1mV,\quad R_s=240\Omega,\quad R_L=8\Omega,\quad N=1000$$

از (۲-۲):

$$R_L^{'}=8\mu\Omega$$

و از رابطه تقسیم ولتاژ:

$$V_1=\frac{R_L^{'}}{R_s+R_L^{'}}V_s\approx 33pV$$

و از (۲-۱):

$$V_2=N.V_1\approx 33nV$$

بنابراین نتیجه می‌گیریم که در این مورد ترانسفورماتور نه فقط به حل مسئله کمک نکرده است، بلکه مضرهم بوده است! زیرا اگر بلندگو را مستقیماً (بدون ترانسفورماتور) به منبع وصل می‌کردیم، ولتاژ دو سر آن بجای 33nV، حدوداً 32μV می‌شد (چرا؟).

علت مناسب نبودن استفاده از ترانسفورماتور در مسئله فوق، بکمک روابط مداری مشخص شد؛ ولی دلیل فیزیکی آن چیست؟ اصل بقای انرژی! حداکثر توانی که منبع سیگنال در مثال بالا می‌تواند به یک بار (در بهترین شرایط) منتقل کند، حدود 520pW خواهد بود (چرا؟). در صورتیکه توانی که بلندگو نیاز دارد حدوداً 15.6mW است (چرا؟). بنابرین نیاز به یک تقویت توان به میزان سی میلیون برابر

داریم! در صورتیکه ضریب تقویت توان یک ترانسفورماتور ایده‌آل $A_p = 1$، و واقعی $A_p = 0.3 \cdots 0.98$ می‌باشد.

مثال ۲-۲ میخواهیم بکمک یک دیود و یک ولت‌متر با محدوده اندازه‌گیری ۰ تا ۱۰ ولت یک حرارت‌سنج برای محدوده ۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد درست کنیم. پیشنهادی برای این منظور ارایه دهید.

حل: با توجه به خاصیت دیود[1] اگر آنرا با یک جریان ثابت بایاس کنیم، به ازای هر درجه سانتیگراد، ولتاژ دو سر آن دو میلی ولت کم می‌شود. بنابراین تغییرات ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد معادل تغییرات ۲۰۰ میلی ولت خواهد بود. بنابراین باید این ولتاژ ۵۰ برابر شود تا بتوانیم بکمک ولت‌متر آن را اندازه بگیریم. در این جا مطمئناً از ترانسفورماتور نمی توانیم استفاده کنیم (چرا؟). در این‌جا نیز نیاز به یک تقویت کننده داریم! (حل مسئله موکول می‌شود به فصل ۷).

۲-۲ انواع تقویت کننده‌ها

در مثال‌های فوق دیدیم که در بعضی مواقع نیاز است توان یک منبع سیگنال چند برابر شود. برای این منظور سیستم‌هایی میسازند که به آنها تقویت کننده[2] گویند. بنا به تعریف یک تقویت کننده سیستمی است که توان به عبارت دیگر انرژی را تقویت، یعنی چند برابر، می کند. آیا این تعریف با اصل بقای انرژی در تضاد نیست؟

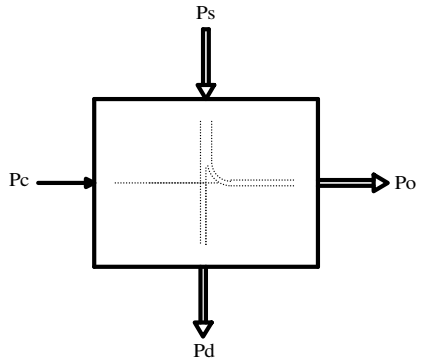
[1] رک فصل ٤ یا فصل ١-٦ اصول مهندسی برق

[2] Amplifier

فرض کنید سوار اتوموبیل هستید و رانندگی می‌کنید. توان پاهای شما که بر روی پدال‌های گاز و ترمز فشار می‌آورد سرعت (توان) اتومبیل را کنترل می کند. با فرض اینکه توان پای شما که به پدال اعمال می‌شود ۵ وات و توان اتومبیل شما ۵۰ کیلووات باشد، توان پای شما ۱۰ هزار برابر موثر شده است! و اگر به عنوان خلبان ایرباس دست شما با توان یک وات، توان هواپیما را یک مگا وات تغییر دهد، یک ضریب تقویت یک میلیون برابر خواهیم داشت! آیا این مثال‌ها اصل بقای انرژی را نقض نمی‌کنند؟ مسلماً خیر! ما در زندگی روزمره خود با هزاران مثال ازین قبل مواجه می‌شویم. بنابراین یک اتومبیل یا یک هواپیما را می توان به عنوان یک تقویت‌کننده در نظر گرفت. آیا یک دوچرخه یک تقویت کننده است؟ یک جک دستی یا یک جک روغنی چطور؟

اتوموبیل، هواپیما، ... را می‌توان به عنوان تقویت کننده‌های مکانیکی در نظر گرفت. انواع تقویت کننده‌های دیگر از قبیل مغناطیسی، نوری، الکترونیکی و غیره وجود دارد که طبیعتاً ما خود را به بررسی تقویت کننده‌های الکترونیکی محدود می کنیم.

شکل ۲-٤ کلیات یک تقویت کننده را به طور نمادین نمایش می‌دهد. یک تقویت کننده عملاً یک کنترل کننده است؛ که توسط توان اعمال شده، Pc (مثلاً توان منتقل شده از پا به پدال) توان یک منبع انرژی، Ps (مثلاً بنزین) را به خروجی، Po (چرخ‌ها) منتقل می کند. در این مثال موتور نقش تقویت کننده را ایفا می‌کند. (جعبه دنده (گیربکس) چه نقشی دارد؟). طبیعتاً هر سیستم واقعی تلفاتی نیز در بر دارد؛ Pd، که به صورت غیر مفید (اکثراً به صورت حرارت) از سیستم خارج می‌شود. بنابراین مجموعه انرژی‌های وارد شده به سیستم با مجموعه انرژی‌های خارج شده از آن برابر است؛ اصل بقای انرژی!



شکل ۲-٤ کلیات یک تقویت کننده

$$P_s + P_c = P_o + P_d \qquad (۳-۲)$$

در این رابطه حرف P مبین توان[۱] و اندیس‌های s منبع[۲]، c کنترل[۳]، o خروجی[۴] و d تلفات[۵] هستند. در الکترونیک گاهی اوقات از نمادهای دیگر استفاده می‌شود، که در جای خود به آن اشاره می‌کنیم.

بنا به تعریف؛ بهره توان[۶] و راندمان[۷] یک تقویت کننده به ترتیب از روابط (۲-٤) و (۲-۵) بدست می‌آیند.

$$A_P = \frac{P_o}{P_c} \qquad (٤-۲)$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_c + P_s} \approx \frac{P_o}{P_s} \qquad (۵-۲)$$

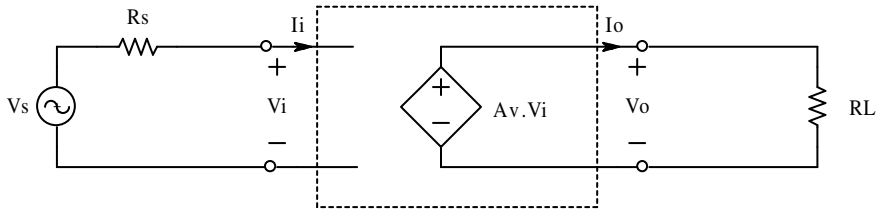
تا کنون بطور کلی تقویت کننده‌ها را بررسی کردیم. از این پس مطالب را در مورد تقویت کننده‌های الکترونیکی محدود می‌کنیم. همانطور که می‌دانیم توان الکتریکی از منابع ولتاژ یا جریان بدست می‌آید. چون توان خروجی یک تقویت کننده از توان ورودیش باید بیشتر باشد، لذا تقویت کننده‌ها را فقط به کمک عناصر فعال می‌توان ساخت. و از آنجایی که باید بتوان توان خروجی را کنترل کرد لذا این منابع باید کنترل شونده[۸]. باشند.

---

[1] Power
[2] Supply
[3] Control
[4] Output
[5] Dissipation
[6] ضریب تقویت توان، Power Gain
[7] Efficiency
[8] ر. ک. فصل ۱-۲ Controlled Sources, Dependent Sources

با توضیحات بالا به این نتیجه می‌رسیم که چهار نوع تقویت کننده الکترونیکی وجود دارد؛ به عبارت دیگر چهار مدل می‌توان برای یک تقویت کننده الکترونیکی در نظر گرفت (چهار نوع منبع وابسته وجود دارد):

- **تقویت کننده ولتاژ**[1]: سیگنال‌های ورودی و خروجی این تقویت کننده هر دو کمیت ولتاژ را دارند. در حالت ایده‌آل این تقویت کننده را می‌توان بکمک یک منبع ولتاژ وابسته به ولتاژ[2] مدل کرد. بلوک دیاگرام شکل ۲-٤، برای این تقویت کننده به صورت مدار شکل ۲-۵ در میآید.



شکل ۲-۵ یک تقویت کننده ولتاژ ایده‌آل

توجه شود که چون ماهیت سیگنال ورودی ولتاژ است، از مدار معادل تونن برای نمایش منبع استفاده شده است. در این شکل Ps و Pd نمایش داده نشده‌اند زیرا در وهله اول رفتار تقویت کننده نسبت به سیگنال مهم است. در مدارهای الکترونیکی، منبع توان معمولاً با P_{CC} نشان داده میشود. از آنجایی که انرژی الکتریکی اصولاً توسط منابع ولتاژ تامین می‌گردد، هرجا که نیاز باشد، منبع تغذیه را با V_{CC}، V_{DD}، V_{Supp}، V_{Batt}، و غیره نمایش می‌دهند. به جای Pc از P_i، P_{in} به عبارت دیگر برای تقویت کننده ولتاژ، چون ماهیت سیگنال ورودی کمیت ولتاژ را دارا است، از v_i استفاده می‌شود. ولتاژ منبع سیگنال را هم با v_s نمایش می‌دهند.

[1] Voltage Amplifier
[2] VCVS: Voltage Controlled Voltage Source

بنا به تعریف بهره ولتاژ[1] تقویت کننده عبارت است از:

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \qquad (۶-۲)$$

در قبال آن بهره ولتاژ مدار عبارت است از:

$$A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} \qquad (۷-۲)$$

که برای تقویت کننده ایده‌آل $v_i = v_s$ (چرا؟) و در نتیجه:

$$A_{v_s} = A_{v_o} \qquad (۸-۲)$$

مقاومت ورودی تقویت کننده:

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} \to \infty \qquad (۹-۲)$$

و مقاومت خروجی آن:

$$R_o = \frac{v_o}{i_o} \to 0 \qquad (۱۰-۲)$$

بنابراین برای یک تقویت کننده ولتاژ ایده‌آل، بهره جریان:

$$A_{i_s} = \frac{i_o}{i_s} \to \infty \qquad (۱۱-۲)$$

و بهره توان:

$$A_{p_s} = \frac{p_o}{p_s} \to \infty \qquad (۱۲-۲)$$

خواهد بود (چرا؟).

بنابراین راه حل مثال ۲-۱ این خواهد بود که از مدار شکل ۲-۵ استفاده کنیم که در آن:

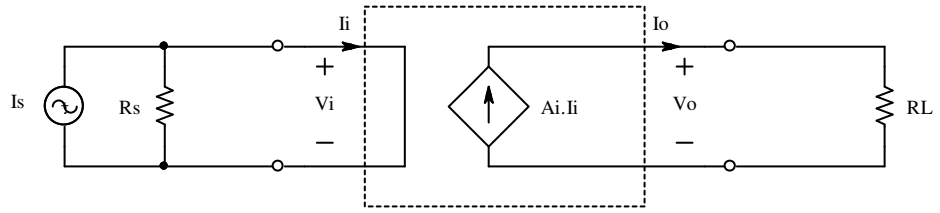
[1] Voltage Gain

$$A_v = 1000, \quad V_s = 1mV_p, \quad R_s = 240\Omega, \quad R_L = 8\Omega$$

می‌باشند. در این صورت ولتاژ دوسر بلندگو: $V_o = A_{v_s} \times V_s = 1V$ بوده خواسته مسئله برآورده شده است.

توجه شود که چون منبع اصلی انرژی از یک منبع ولتاژ (مثلاً باتری) تامین میشود؛ درصورتیکه در خروجی تقویت کننده ترانسفورماتوری وجود نداشته باشد، تغییرات ولتاژ خروجی از ولتاژ منبع تغذیه کمتر خواهد بود (چرا؟). بنابرین برای راه اندازی این مدار به یک منبع ولتاژ با نیروی محرکه حداقل ۲ ولت نیاز داریم (مثلاً دو عدد باتری قلمی، معادل ۳ ولت).

- **تقویت کننده جریان**[1]: سیگنال‌های ورودی و خروجی این تقویت کننده هر دو کمیت جریان را دارند. در حالت ایده‌آل این تقویت کننده را می‌توان بکمک یک منبع جریان وابسته به جریان [2] مدل کرد. برای این تقویت کننده، منبع سیگنال توسط مدار معادل نورتن مدل می‌شود. سایر مشخصات مشابه مشخصات تقویت کننده ولتاژ بدست می‌آیند.



شکل ۲-۶ یک تقویت کننده جریان ایده‌آل

بنا به تعریف بهره جریان[3] تقویت کننده عبارت است از:

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} \qquad (۱۳-۲)$$

در قبال آن بهره جریان مدار عبارت است از:

---

[1] Current Amplifier
[2] CCCS: Current Controlled Current Source
[3] Current Gain

$$A_{i_s} = \frac{i_o}{i_s} \qquad (۱۴-۲)$$

که برای تقویت کننده ایده‌آل $i_i = i_s$ (چرا؟) و در نتیجه:

$$A_{i_s} = A_i \qquad (۱۵-۲)$$

مقاومت ورودی تقویت کننده:

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} \to 0 \qquad (۱۶-۲)$$

و مقاومت خروجی آن:

$$R_o = \frac{v_o}{i_o} \to \infty \qquad (۱۷-۲)$$

بنابراین برای یک تقویت کننده جریان ایده‌آل، بهره ولتاژ:

$$A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} \to \infty \qquad (۱۸-۲)$$

و بهره توان:

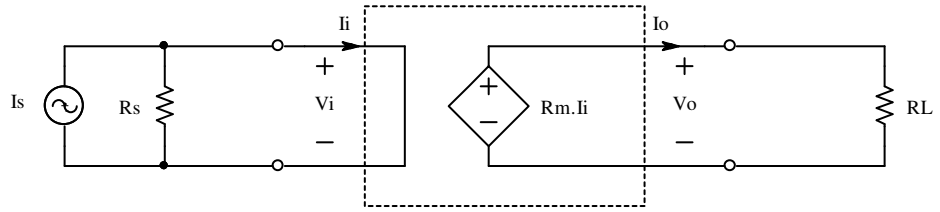
$$A_{p_s} = \frac{p_o}{p_s} \to \infty \qquad (۱۹-۲)$$

خواهد بود (چرا؟).

- **تقویت کننده مقاومت انتقالی**[1]: سیگنال ورودی این تقویت کننده کمیت جریان و سیگنال خروجی آن کمیت ولتاژ را دارد. در حالت ایده‌آل این تقویت کننده را می‌توان بکمک یک منبع

[1] تقویت کننده ترامقاومتی، Transresistance Amplifier

ولتاژ وابسته به جریان [1] مدل کرد. برای این تقویت کننده، منبع سیگنال توسط مدار معادل نورتن مدل می‌شود. سایر مشخصات مشابه مشخصات تقویت کننده ولتاژ بدست می‌آیند.



شکل ۲-۷ یک تقویت کننده ترامقاومتی ایده‌آل

بنا به تعریف بهره مقاومت انتقالی یا مقاومت تقابلی [2] تقویت کننده عبارت است از:

$$R_m = \frac{v_o}{i_i} \qquad (۲۰-۲)$$

در قبال آن بهره مدار عبارت است از:

$$R_{m_s} = \frac{v_o}{i_s} \qquad (۲۱-۲)$$

که برای تقویت کننده ایده‌آل $i_i = i_s$ (چرا؟) و در نتیجه:

$$R_{m_s} = R_m \qquad (۲۲-۲)$$

مقاومت ورودی تقویت کننده:

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} \to 0 \qquad (۲۳-۲)$$

و مقاومت خروجی آن:

$$R_o = \frac{v_o}{i_o} \to 0 \qquad (۲٤-۲)$$

بنابراین برای این تقویت کننده در حالت ایده‌آل، بهره ولتاژ:

---

[1] CCVS: Current Controlled Voltage Source

[2] Transresistance Gain, Mutual-Resistance Gain

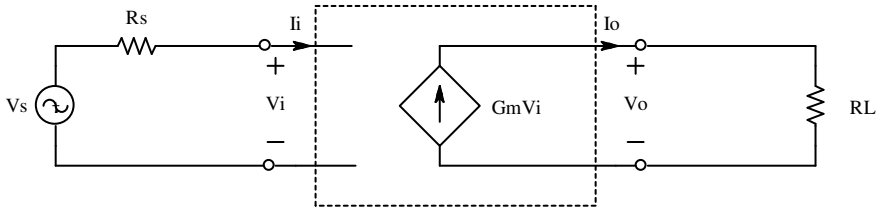
$$A_{v_s} = \frac{v_o}{v_s} \rightarrow \infty \qquad (۲۵-۲)$$

و بهره توان:

$$A_{p_s} = \frac{p_o}{p_s} \rightarrow \infty \qquad (۲۶-۲)$$

خواهد بود (چرا؟).

- **تقویت کننده هدایت انتقالی**[1]: سیگنال ورودی این تقویت کننده کمیت ولتاژ و سیگنال خروجی آن کمیت جریان را دارد. در حالت ایده‌آل این تقویت کننده را می‌توان بکمک یک منبع جریان وابسته به ولتاژ[2] مدل کرد. برای این تقویت کننده، منبع سیگنال توسط مدار معادل تونن مدل می‌شود. سایر مشخصات مشابه مشخصات تقویت کننده ولتاژ بدست می‌آیند.



شکل ۲-۸ یک تقویت کننده ترارسانایی ایده‌آل

بنا به تعریف بهره هدایت انتقالی یا هدایت تقابلی[3] تقویت کننده عبارت است از:

$$G_m = \frac{i_o}{v_i} \qquad (۲۷-۲)$$

در قبال آن بهره مدار عبارت است از:

[1] تقویت کننده ترا رسانایی Trans-Conductance Amplifier

[2] VCCS: Voltage Controlled Current Source

[3] Trans-Conductance Gain, Mutual-Conductance Gain

$$G_{m_s} = \frac{i_o}{v_s} \qquad (۲۸-۲)$$

که برای تقویت کننده ایده‌آل $v_i = v_s$ (چرا؟) و در نتیجه:

$$G_{m_s} = G_m \qquad (۲۹-۲)$$

مقاومت ورودی تقویت کننده:

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} \to \infty \qquad (۳۰-۲)$$

و مقاومت خروجی آن:

$$R_o = \frac{v_o}{i_o} \to \infty \qquad (۳۱-۲)$$

بنابراین برای این تقویت کننده در حالت ایده‌آل، بهره جریان:

$$A_{i_s} = \frac{i_o}{i_s} \to \infty \qquad (۳۱-۲)$$

و بهره توان:

$$A_{p_s} = \frac{p_o}{p_s} \to \infty \qquad (۳۲-۲)$$

خواهد بود (چرا؟).

۲-۳ مشخصات تقویت کننده‌های واقعی

همان طور که می‌دانیم، در دنیای واقعی صفر و بینهایت وجود ندارد! بنابرین مقاومت‌های ورودی و خروجی تقویت کننده‌ها مقادیری محدود می‌باشند. از طرف دیگر پارامترهای تقویت کننده‌ها (بهره، مقاومت‌های ورودی و خروجی) مقادیر ثابتی نیستند؛ بلکه تابعی از فرکانس، دما، ولتاژ منبع تغذیه، نقطه کار (سیستم غیر خطی)، ... .

- **وابستگی فرکانسی:** در عمل به علت وجود اثر خازنی (و سلفی) در المان‌ها و مدار، با افزایش فرکانس سیگنال، دامنه و فاز تغییر می‌کند[1]. بنابراین در محاسبات بجای اعداد حقیقی[2] با اعداد مختلط[3] سر و کار داریم. به همین دلیل باید بجای مفهوم مقاومت، از کلمه امپدانس[4] استفاده شود. شکل ۲-۹ مثالی از وابستگی مشخصات یک تقویت کننده به فرکانس را نمایش می‌دهد. شکل بالایی پاسخ بهره به فرکانس است. همانطور که ملاحظه می‌شود، برای فرکانس‌های پایین بهره کم است (برای فرکانس صفر بهره نیز صفر است). با افزایش فرکانس، بهره نیز بتدریج افزایش می‌یابد (در ۰,۱ هرتز حدوداً ۷، در ۰,۳ هرتز حدوداً ۱۸، در یک هرتز ۵۲، در ۳ هرتز ۸۲، در ۱۰ هرتز ۹۰ و در فرکانس‌های بالاتر، بهره تقریباً به مقدار ۹۱ ثابت می‌ماند). بهره تا فرکانس حدود ۱۰۰ کیلو هرتز تقریباً ثابت است و پس از آن افت می‌کند (در ۳۰۰ کیلو هرتز ۹۰، در یک مگاهرتز ۷۸، ...). طبیعتاً پاسخ فرکانسی تمام تقویت کننده‌ها باهم یکسان نیست. ولی در تمام تقویت کننده‌ها (و کلیه سیستم‌های واقعی) این امر مشترک است که: اگر فرکانس محرک از حدی بیشتر شود، کار آیی سیستم – در این مورد بهره تقویت کننده – کاهش می‌یابد

---

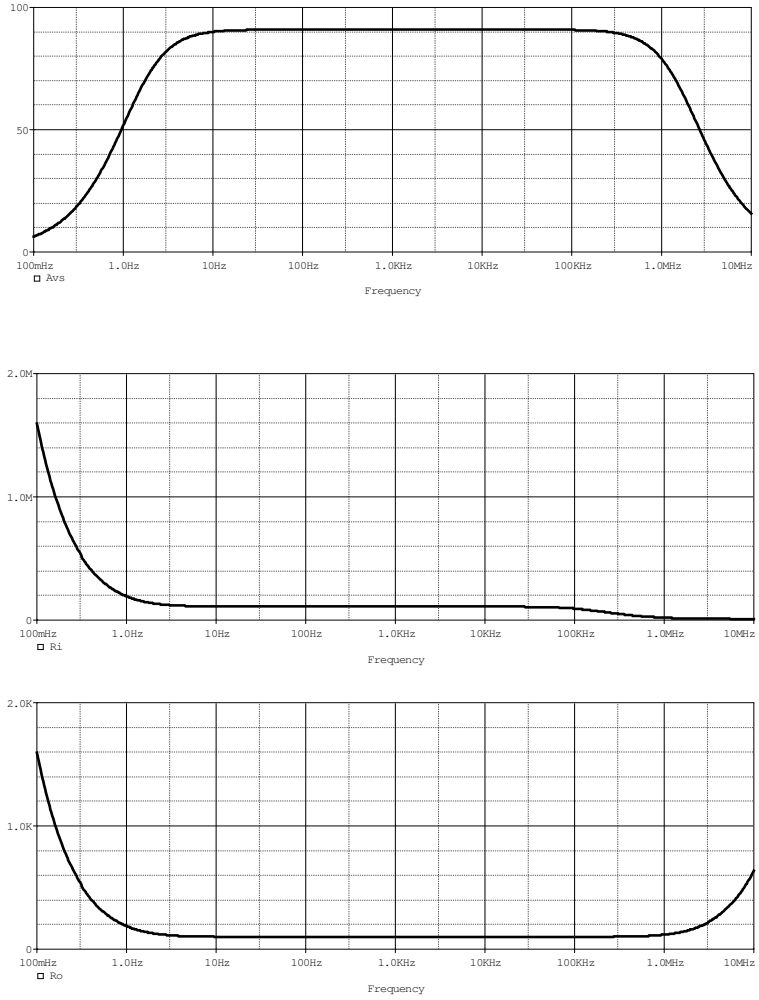
[1] رک فصل ۱-٤-۲

[2] Real Numbers

[3] Complex Numbers

[4] Impedance

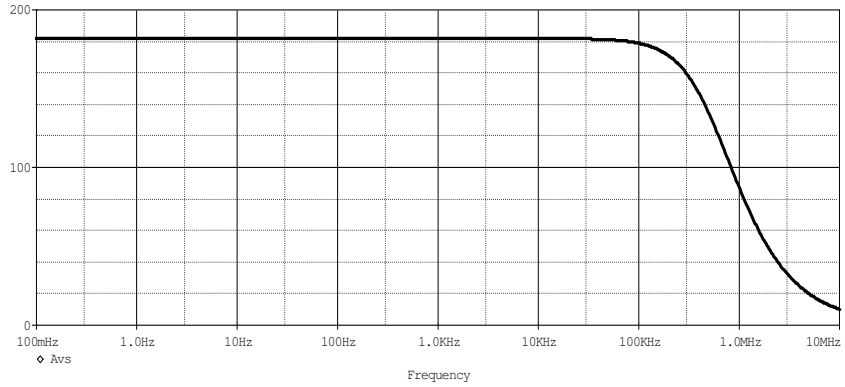
(چرا؟). در مورد فرکانس پایین، مطلب به نحوی دیگر است. به تقویت کننده‌هایی که، مانند مثال شکل ۲-۹ مشخصات آنها از یک فرکانسی به بالا تقریباً ثابت می‌ماند، اصطلاحاً تقویت کننده‌های *AC*[1] گفته می‌شود. در مقابل، تقویت کننده‌هایی وجود دارند که مشخصات آنها از فرکانس صفر به بالا مقداری تقریباً ثابت است. شکل ۲-۱۰ مثالی را برای این منظور نمایش می‌دهد. این نوع تقویت کننده‌ها اصطلاحاً تقویت کننده‌های *DC*[2] نامیده می‌شوند.



شکل ۲-۹ مثالی برای پاسخ فرکانسی تقویت کننده‌های **AC**
بالا: بهره ولتاژ، وسط: امپدانس ورودی و پایین: امپدانس خروجی

[1] AC-Coupled Amplifier
[2] DC-Coupled Amplifier

معمولاً به فرکانسی که به ازای آن بهره تقویت کننده بـه ۰,۷ مقـدار ثابـت خـود مـی‌رسـد، فرکانس حد[1] گفته می‌شود. یک تقویت کننده AC دارای دو فرکانس حد اسـت؛ فرکـانس حـد پایین[2]، f_l و فرکانس حد بالا[3]، f_h. در مثـال شـکل ۲-۹ فرکـانس‌هـای حـد تقویـت کننـده: $f_l \approx 1.5Hz$ و $f_h \approx 1.8MHz$ می‌باشد. تقویت کننـده DC دارای فقـط فرکـانس حـد بـالایی است (فرکانس حد پایین $f_l = 0$). در تقویت کننده مثال شکل ۲-۱۰، $f_h \approx 550kHz$.



نمودار میانی شکل ۲-۹ وابستگی امپدانس ورودی تقویـت کننـده بـه فرکـانس سـیگنال را نمایش میدهد. امپدانس ورودی برای فرکانس ۰,۱ هرتز حدود ۱,٦ مگا اهم، بـرای یـک هرتـز ۲۰۰ کیلو اهم و برای فرکانس‌های حدود ۵ هرتز تا حدود ۳۰ کیلو هرتز مقدار تقریباً ثابت ۱۱۰ کیلو اهم می باشد. پس از آن امپدانس ورودی کاهش می‌یابد تا به حدود ۱۰ کیلواهم می‌رسد.

نمودار پایینی شکل ۲-۹ وابستگی امپدانس خروجی تقویت کننـده بـه فرکـانس سـیگنال را نمایش میدهد. امپدانس خروجی برای فرکانس ۰,۱ هرتز حدود ۱,٦ کیلواهم، برای یـک هرتـز

[1] ر. ک. به پیوست ۲-۱
[2] Lower Frequency
[3] Higher Frequency

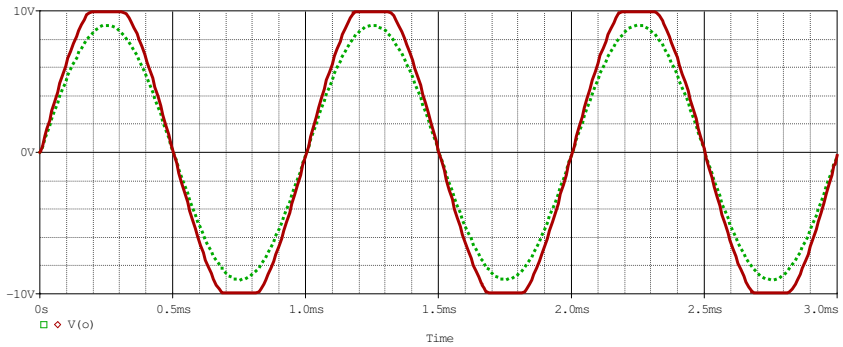
۱۹۰ اهم وبرای فرکانس‌های حدود ۱۰ هرتز تا حدود ۳۰۰ کیلوهرتز مقدار تقریباً ثابت ۱۰۰ اهم می باشد. پس از آن امپدانس خروجی مجدداً افزایش می‌یابد تا در ده مگاهرتز به حدود ٦۰۰ اهم می‌رسد.

فرکانس‌هایی را که به ازای آنها مشخصات تقویت کننده تقریباً ثابت است، فرکانس‌های میانی گوییم. برای مثالِ شکل ۲-۹ محدوده‌ی ۱۰ هرتز تا ۱۰۰ کیلو هرتز، و برای مثالِ شکل ۲-۱۰ محدوده‌ی از صفر تا ۱۰۰ کیلوهرتز، فرکانس‌های میانی محسوب می‌شوند. بنابراین در فرکانس های میانی اثرات خازنی (و سلفی) عناصر و مدار مؤثر نبوده، بجای امپدانس‌ها می‌توان مقاومت‌ها را در نظر گرفت.

- **وابستگی به ولتاژ منبع تغذیه:** در حالت کلی مشخصات تقویت کننده تابع نقطه کار است و این خود تابع ولتاژ تغذیه. در طراحی مدار با کیفیت بالا سعی می‌شود که این وابستگی به حداقل برسد. در فصل پنجم و دروس الکترونیک با روش‌های کاهش این وابستگی آشنا خواهید شد. محدودیتی که قابل برطرف کردن نیست، وابستگی حداکثر دامنه ولتاژ خروجی به ولتاژ منبع تغذیه، می‌باشد. در تقویت کننده‌هایی که در خروجی ترانسفورماتور ندارند، $\mathrm{Vo_P} < \frac{1}{2}\mathrm{V_{Supp}}$ خواهد بود. برای مثال در شکل ۲-۱۱ ولتاژ منبع تغذیه تقویت کننده ٢٤ ولت ($\pm V_{CC} < \pm 12V$) و بهره آن ۱۰۰ است.

همانطور که ملاحظه می‌شود، به ازای ولتاژ ورودی با دامنه ۹۰ میلی ولت، ولتاژ خروجی ۹ ولت است ($V_{oP} = A_{v_s} \times V_{iP} = 100 \times 90mV = 9V$). در صورتی که به ازای دامنه ورودی

۱۱۰ میلی ولت، خروجی بجای داشتن دامنه ۱۱ ولت، به ۱۰ ولت محدود (بریده) می‌شود. در این صورت تقویت کننده از حالت خطی خارج شده، گویند تقویت کننده اشباع[1] شده است.

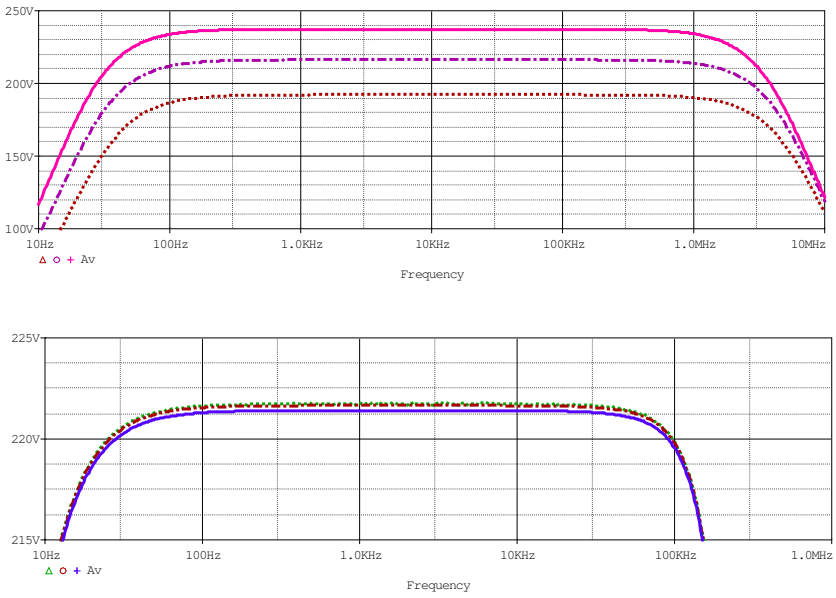


شکل ۲-۱۱ ولتاژ خروجی یک تقویت کننده با بهره ۱۰۰ ومنبع تغذیه ۱۲± ولت به ازای:
۹۰ میلی ولت، نمودار نقطه چین (سبز) و ۱۱۰ میلی ولت، نمودار پر (قرمز)، دامنه ورودی

- **وابستگی به دما:** با تغییر دما، به خاطر شرایط محیط - یا ایجاد حرارت خود المان‌های مدار، به واسطه تلفات سیستم - مشخصات تقویت کننده تغییر می‌کند. در طراحی‌های اصولی سعی می شود این وابستگی به حداقل برسد. شکل ۲-۱۲ مثالی از اثر دما بر روی بهره دو نوع تقویت کننده را نمایش می‌دهد. شکل بالا تغییر بهره یک تقویت کننده ساده و شکل پایین تغییر بهره یک تقویت کننده با کیفیت خوب را بر اثر تغییر دما نمایش میدهد. نمودارهای نقطه چین مربوط به پاسخ فرکانسی تقویت کننده‌ها به ازای $T = -25°C$، خط نقطه به ازای $T = +25°C$، و خط پر به ازای $T = +75°C$ می‌باشند. تقویت کننده‌هایی نیز ساخته شده است که تغییر دما برای آنها به حدی کم است که تغییرات آنها در نمودارها نامحسوس است. این تغییرات را معمولاً با مقادیر عددی نمایش می‌دهند، مثلاً $2\,ppm/°C$[2]. بنابراین با بهره حدود ۲۲۰ در ۲۵ درجه سانتی‌گراد بهره با تغییر دما از ۲۵- درجه تا ۷۵+ درجه، تغییرات بهره

[1] Saturation
[2] ppm: Parts Per Million

$\Delta A_V \approx \pm 0.02$ خواهد بود (مقایسه با $\Delta A_V \approx \pm 0.2$ برای تقویت کننده مثال شکل ۲-۱۲ پایینی و حتی $\Delta A_V \approx \pm 20$ برای تقویت کننده مثال شکل ۲-۱۲ بالایی).



شکل ۲-۱۲ اثر دما بر روی بهره تقویت کننده. شکل بالا: یک تقویت کننده ساده، شکل پایین: یک تقویت کننده با کیفیت خوب. نمودارهای نقطه چین: T=-25°C، خط نقطه: T=+25°C، خط پر:T=+75°C .