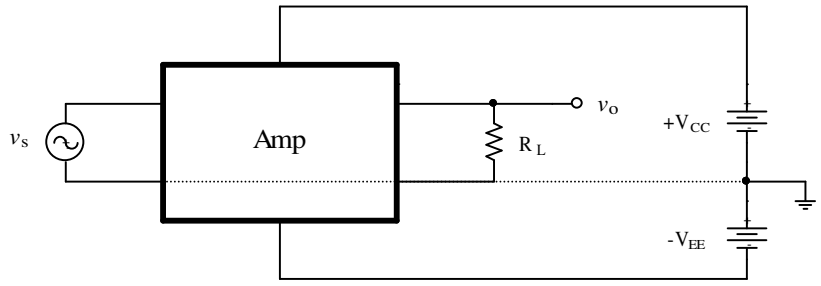
۲-٤ بایاسینگ و نقطه کار تقویت کننده ها

همان طور که ذکر شد، برای این که یک تقویت کننده فعال شود، نیاز به یک منبع انرژی دارد. این منبع انرژی، در تقویت کننده های الکترونیکی، یک منبع ولتاژ ثابت (مثلاً یک باطری) است. در شکل ۲-۱۵ یک تقویت کننده DC با منابع سیگنال و تغذیه مربوطه نمایش داده شده است.



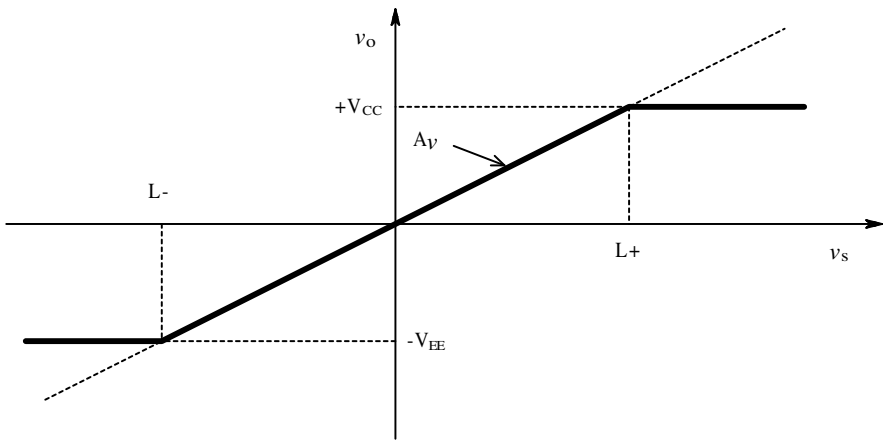
شکل ۲-۱۵ نحوه اعمال منبع تغذیه به یک تقویت کننده DC

منبع سیگنال (v_s) در ورودی تقویت کننده و بار (R_L) در خروجی آن قرار می گیرد. در حالت کلی می تواند هیچ کدام از سرهای منبع سیگنال به زمین[1] (نقطه ای از مدار که ولتاژ آن صفر در نظر گرفته می شود و ولتاژ سایر گره های مدار نسبت به آن سنجیده می شود) وصل نشوند. در این حالت گویند منبع سیگنال شناور[2] است. ولی در اکثر مدارها یک سر منبع سیگنال به زمین وصل است. همچنین در حالت کلی می تواند هیچ کدام از سرهای بار به زمین وصل نشوند. در این حالت گویند بار شناور است. ولی در اکثر مدارها یک سر بار به زمین وصل است. در این شکل علاوه بر آن منابع تغذیه نیز نمایش داده شده اند. در اکثر مواقع ـ بخصوص در مدارهای مفصل ـ برای این که شکل شلوغ نشود، از نمایش منابع تغذیه صرفنظر می کنند.

GND: Ground [1]
Float [2]

در صورتی که بخواهیم تقویت کننده در ناحیه خطی خود کار کند، ولتاژ منبع سیگنال هم مقادیر مثبت داشته باشد و هم منفی، علاوه بر آنها منبع سیگنال یا بار شناور نباشند، باید از دو منبع تغذیه مثبت ($+V_{CC}$) و منفی ($-V_{EE}$) استفاده کرد (چرا؟). مقدار این ولتاژها با توجه به محدوده‌ی ولتاژ ورودی و بهره مدار (یا شرایط دیگر) تعیین می شود که بعداً به آن اشاره خواهیم کرد. برای مثال اگر فرض کنیم $v_s = -1.2 \cdots +0.8V$ و $A_v = 10$ باشد، باید $V_{CC} > 8V$ و $V_{EE} > 12V$ انتخاب شوند (چرا؟).

در شکل ۲-۱۶ مشخصه انتقالی[1] یک تقویت کننده ولتاژ ایده‌آل ($v_o - v_s$) نشان داده شده است.



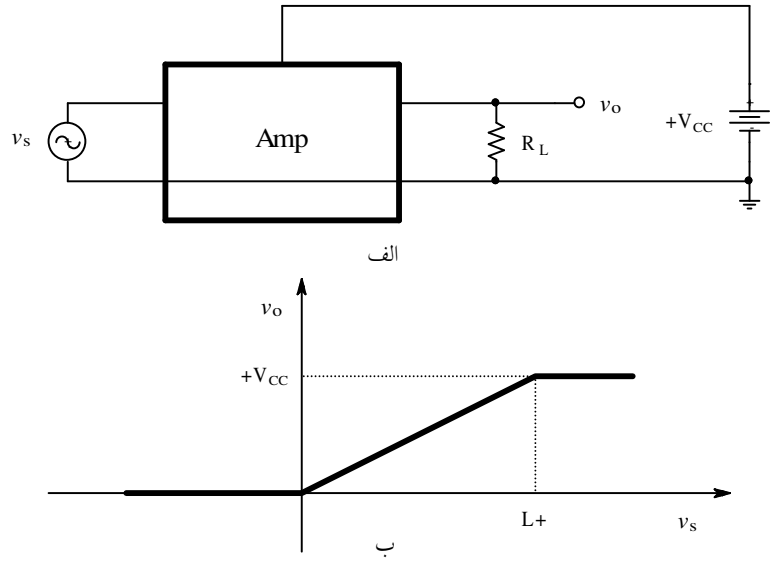
شکل ۲-۱۶ مشخصه انتقالی یک تقویت کننده ولتاژ ایده‌آل

مشخصه خط چین، معادل است با مشخصه یک منبع ولتاژ وابسته به ولتاژ ایده‌آل. ولی همانطور که ذکر شد، ولتاژ خروجی یک تقویت کننده ولتاژ ایده‌آل (در صورتی که فاقد ترانسفورماتور باشد) محدود به ولتاژ منابع تغذیه است. لذا مشخصه یک تقویت کننده ایده‌آل به صورت مشخصه خط پر در شکل ۲-۱۶ می باشد. بنابراین فقط در ناحیه $v_s = L- \cdots L+$ ($L- = -V_{EE}/A_v, L+ = +V_{CC}/A_v$)

[1] Transfer Characteristic

به عبارت دیگر $v_o = -V_{EE} \cdots +V_{CC}$ می توان یک تقویت کننده را با یک منبع وابسته مـدل کـرد. در خارج از این محدوده، v_o ثابت بوده با افزایش دامنه ورودی، دامنه خروجی ثابت می ماند. بـه همـین دلیل گویند تقویت کننده اشباع[1] شده است. در این حالت تقویت کننده تبدیل به یک سیستم غیر خطی شده است.

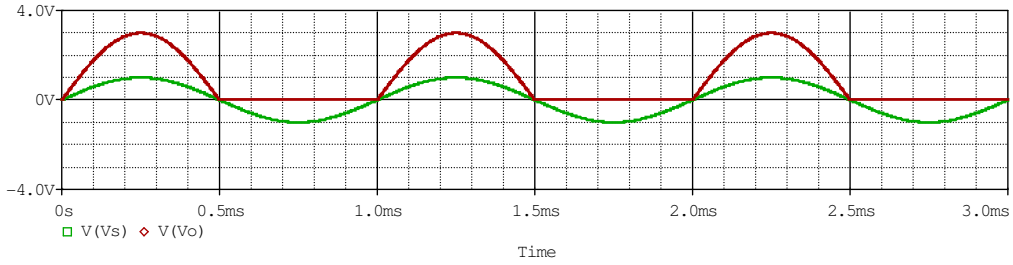
حال میخواهیم بررسی کنیم که اگر منبع سیگنال دارای مولفه DC نبود، آیا باز لازم است کـه از دو منبع تغذیه استفاده شود؟ فرض کنیم میخواهیم یک تقویت کننده صوتی، مثلاً مانند مثال ۲–۱ را داشـته باشیم. در این صورت طیف فرکانسی سیگنال مثلاً دارای مولفه های $f_s = 50Hz \cdots 8kHz$ است. اگـر بخواهیم برای این تقویت کننده مانند شکل ۲–۱۷ الف فقط از یک منبع تغذیه استفاده کنیم، فقط نصف سیگنال تقویت خواهد شد (چرا؟). شکل ۲–۱۷ ب مشخصه انتقالی تقویت کننده را نمایش می دهد.



شکل ۲–۱۷ الف مدار و ب مشخصه یک تقویت کننده با یک منبع تغذیه

[1] Saturate

در شکل ۲–۱۸ سیگنال ورودی و سیگنال خروجی چنین مداری با بهره $A_v = 3$، برای یک ولتاژ ورودی سینوسی با دامنه $v_s = 1V$ و فرکانس $f_s = 1kHz$ نمایش داده شده است.



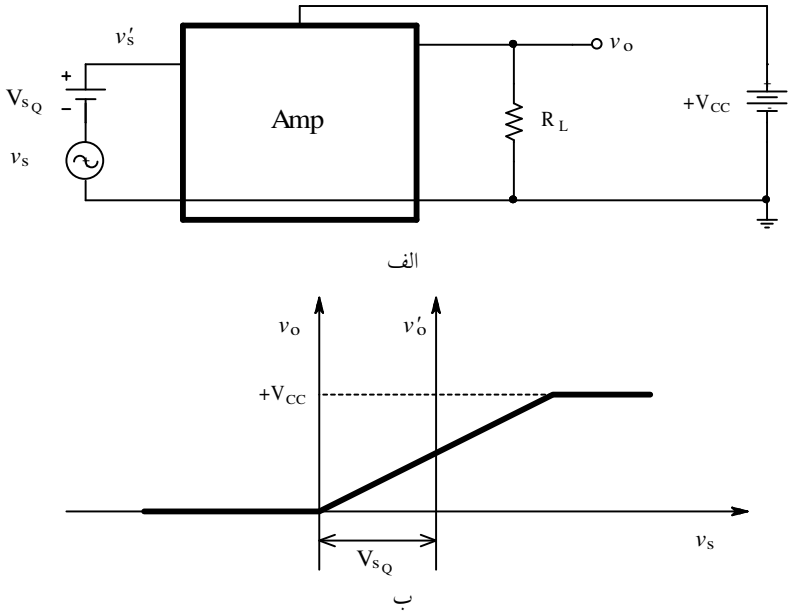
شکل ۲–۱۸ سیگنال ورودی (سبز) و سیگنال خروجی (قرمز) تقویت کننده شکل ۲–۱۷

چگونه می شود این اشکال را بر طرف کرد؟ با توجه به شکل ۲–۱۷ ب، اگر چنان که یک انتقال[1] محور انجام شود، به طوری که مثلاً محور v_o جدید (v'_o) در وسط ناحیه خطی قرار گیرد سیگنال خروجی فرم کامل خود را حفظ خواهد کرد. این انتقال محور در عمل بکمک جمع کردن یک ولتاژ ثابت (V_{S_Q}) با سیگنال منبع حاصل میشود. (شکل ۲–۱۹). نمودارهای زمانی سیگنالهای منبع (v_s)، ورودی تقویت کننده ($v'_s = v_i$) و خروجی تقویت کننده (v_o) در شکل ۲–۲۰ نمایش داده شده اند. چنان که در این شکل مشاهده می شود، سیگنال خروجی به طور کامل (بدون بریدگی) در خروجی ظاهر می شود. البته این سیگنال دارای یک مولفه DC است، که در اغلب مواقع می تواند مشکل زا باشد (چرا؟ آیا می توانید یک مثال بیاورید؟).

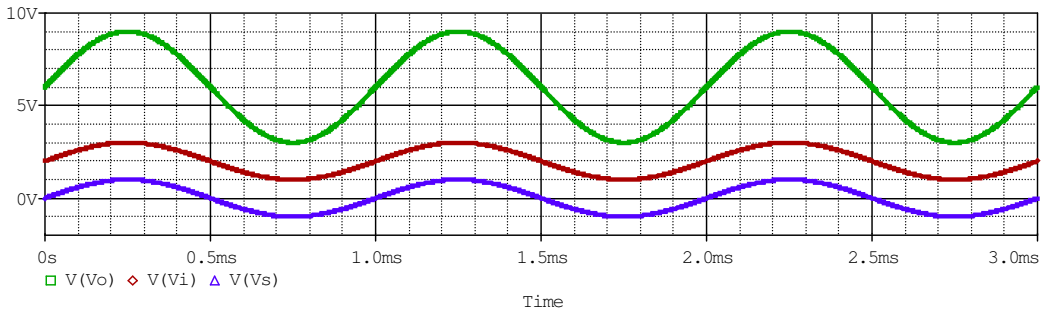
برای بر طرف کردن این مشکل نیز می توان از انتقال محور v_s استفاده کرد (v'_s). این امر – یعنی حذف مولفه‌ی DC – می تواند توسط کم کردن یک ولتاژ ثابت (V_{L_Q}) از سیگنال خروجی تقویت کننده، محقق شود (شکل ۲–۲۱). نمودارهای زمانی سیگنالهای منبع (v_s)، ورودی تقویت کننده

[1] Shift

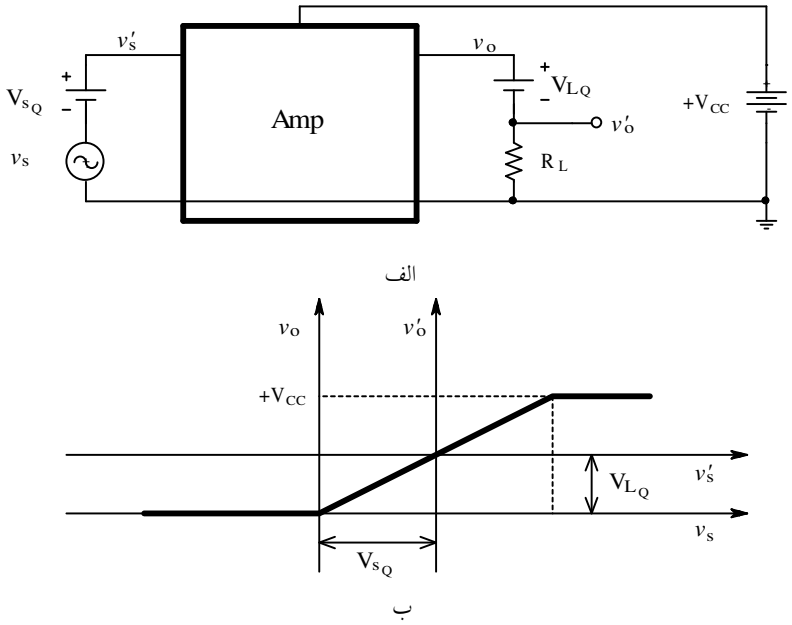
($v'_s = v_i$)، خروجی تقویت کننده (v_o) و بار ($v'_o = v_L$) در شکل ۲-۲۰ نمایش داده شده اند. چنـان که در این شکل مشاهده می شود، سیگنال خروجی به طور کامل (بدون بریدگی) و بدون مولفـه DC در خروجی ظاهر می شود.



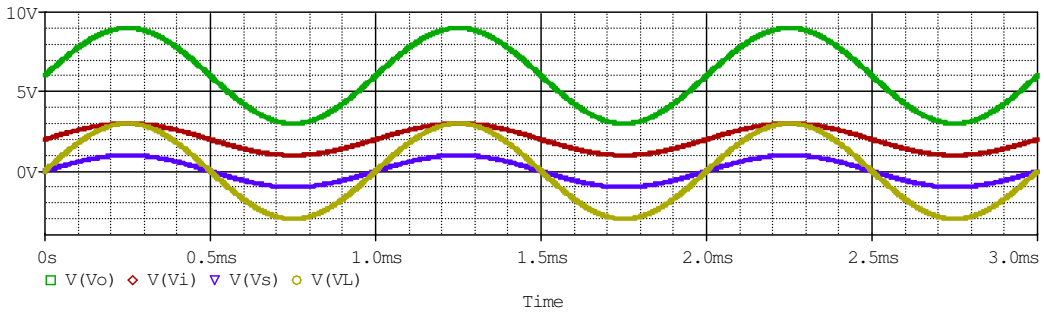
شکل ۲-۱۹ الف مدار و ب مشخصه یک تقویت کننده با انتقال سیگنال ورودی



شکل ۲-۲۰ نمودارهای زمانی ولتاژهای منبع سیگنال (آبی)، ورودی تقویت کننده (قرمز) و خروجی (سبز)



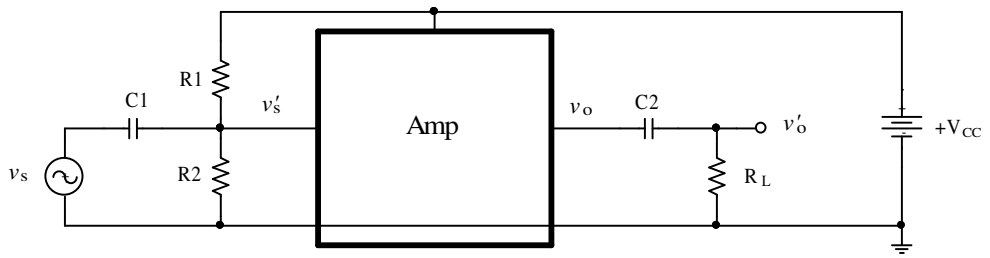
شکل ۲-۲۱ الف مدار و ب مشخصه یک تقویت کننده با انتقال سیگنالهای ورودی و خروجی



شکل ۲-۲۲ نمودارهای زمانی ولتاژهای منبع سیگنال (آبی)، ورودی تقویت کننده (قرمز)، خروجی تقویت کننده (سبز) و بار (زرد)

با اضافه کردن دو منبع ولتاژ DC توانستیم محورهای ولتاژ ورودی و خروجی تقویت کننده را طوری تغییر دهیم که سیگنال منتقل شده بر روی بار فرم مطلوب را داشته باشد. به این عمل بایاس[1] کردن تقویت کننده گویند. اثر V_{S_Q} را اضافه کردن ولتاژ آفست[2] ورودی، و اثر V_{L_Q} را حذف آفست خروجی گویند. مبداء جدید محورها (v'_o - v'_s) نقطه کار[3] نامیده می شود.

در عمل نمی توان از منابع ولتاژ DC برای بایاس کردن استفاده کرد. زیرا اولاً نقض غرض است و به جای حذف یک باتری، دو - یا حتی در صورت وجود چند طبقه تقویت کننده به تعداد بیشتر - باتری نیاز است. ثانیاً باتری ها دارای ولتاژ معینی هستند و احتمال این که ولتاژ های V_{S_Q} و V_{L_Q} به اندازه‌ی ولتاژ باتری باشد، خیلی کم است. ثالثاً ولتاژ باتری مقداری ثابت نیست و به مرور زمان کم می شود. شکل ۲-۲۳ نحوه عملی اضافه کردن ولتاژ آفست ورودی و حذف آفست خروجی را نمایش می دهد.



شکل ۲-۲۳ نحوه عملی اضافه کردن ولتاژ آفست ورودی و حذف آفست خروجی

برای تولید V_{S_Q} می توان از منبع تغذیه اصلی (V_{CC}) به کمک مقسم ولتاژ $R1$، $R2$ طبق رابطه (۲-۳۳) به مقدار مطلوب رسید.

---

[1] Bias, Biasing
[2] Operating Point, Quiescent Point
[3] Offset

$$V_I = V_{S_Q} = V_{C1} = V_{CC} \times \frac{R2}{R1 + R2}$$

$$v_I = v'_S = v_s + V_{S_Q} = v_s + V_I = v_s + V_{CC} \times \frac{R2}{R1 + R2} \qquad (۳۳-۲)$$

در صورتی که بهره ولتاژ تقویت کننده A_v فرض شود، ولتاژ خروجی تقویت کننده، بجای $A_v \times v_s$:

$$v_O = V_{L_Q} + v_o = V_{C2} + v_o = A_v(v_s + V_I) \qquad (۳۴-۲)$$

خواهد بود. برای حذف آفست خروجی (V_{L_Q}) کافی است یک خازن ($C2$) بین خروجی تقویت کننده و بار قرار دهیم. در این صورت:

$$v'_o = V_{L_Q} + v_O = v_{RL} = A_v\, v_s \qquad (۳۵-۲)$$

به خازن های $C1$ و $C2$ خازن های کوپلاژ[1] (تزویج) گویند. همان طور که ذکر شد، تقویت کننده هایی که فرم مدار شکل ۲-۲۳ را دارند، تقویت کننده AC نامیده می شوند. زیرا به علت وجود خازنها، مولفه های فرکانسی سیگنال منبع از یک فرکانس به پایین کم تر تقویت می شوند. به طوری که مولفه های حدود $f_s \approx 0Hz$ به شدت تضعیف می شوند ($V_{o_p} \approx 0V$). فرکانس حد این مدار (f_l) توسط RC های مدار مشخص می شود. برای مثال در مدار شکل ۲-۲۳ دو مدار بالا گذر با فرکانس های حد:

$$f_1 = 1/2\pi R_i C1, \qquad R_i = R1 \| R2 \| R_{i_a}$$

$$f_2 = 1/2\pi (R_{o_a} + R_L) C2$$

[1] Coupling

موثر هستند. در این روابط R_{i_a} و R_{o_a} به ترتیب مقاومت ورودی و مقاومت خروجی تقویت کننده هستند. در مدار های واقعی اکثراً $f_1 << f_2$ یا $f_1 >> f_2$ است. در این صورت[1]:

$$f_l \approx \min(f_1, f_2) \qquad (۳۶-۲)$$

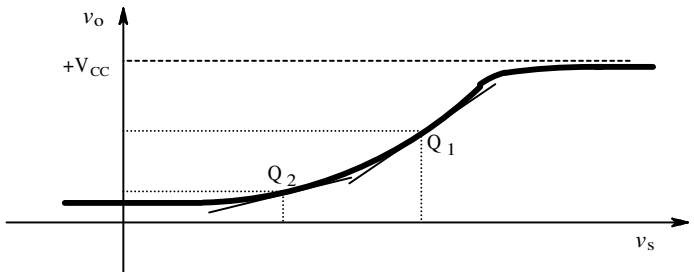
۲-۵ علایم کوچک و علایم بزرگ

همانطور که میدانیم تقویت کننده ها توسط عناصر الکترونیکی نظیر ترانزیستورها، فت ها، لامپ های الکترونی، ... ساخته می شوند. این عناصر ذاتاً غیر خطی هستند. حتی اگر المانهای مذکور خطی شده هم باشند، اگر دامنه ورودی از حدی بیشتر شود، تقویت کننده اشباع میشود. بنابراین باز سیستم غیر خطی خواهد بود. برای مثال در شکل ۲-۱۱ تقویت کننده برای سیگنال نمودار سبز در ناحیه خطی است ولی برای سیگنالی که نمودار قرمز را تولید می کند غیر خطی شده است. همچنین در شکل ۲-۱۶ تا زمانی که سیگنال ورودی در بازه $L- < v_s < L+$ قرار داشته باشد، سیستم در ناحیه خطی و در خارج از این گستره، غیر خطی خواهد بود.

شکل ۲-۲٤ مثالی از مشخصه انتقالی یک تقویت کننده غیر خطی را نمایش می دهد. چنان که مشاهده می شود، این تقویت کننده در هیچ بازه ای خطی نیست. از طرف دیگر - همان طور که از دروس ریاضی می دانیم - می توان هر منحنی را حول یک نقطه از آن با مماس بر آن تقریب خطی زد. بنابراین چنان که در یک تقویت کننده غیر خطی حول نقطه کار تغییر ولتاژ ورودی به اندازه‌ی ***کافی*** کوچک باشد، می توان تقویت کننده را خطی در نظر گرفت. از آنجایی که تغییر ولتاژ حول نقطه کار

[1] ر. ک. فصل ۱-٤-٤ (مثال ۱-۱۳ و جدول ۱-۲)

یعنی سیگنال، کوچک است؛ به آن علایم کوچک[1] گویند. این که سیگنال به اندازه کافی کوچک باشد، یعنی چه، بر میگردد به این که میزان خطای مجاز چقدر است.



شکل ۲-۲٤ مشخصه انتقالی یک تقویت کننده غیر خطی

مثال ۲-٦ مشخصه انتقالی یک تقویت کننده طبق رابطه $v_O = v_S^2$ توصیف می شود. بهره مدار را در نقطه کار $V_Q = V_S = 2V$ بدست آورید. در صورتی که حداکثر خطای مجاز $\left|E_{r_{\max}}\right| = 10\%$ باشد، حداکثر دامنه ولتاژ ورودی ($V_P = V_s = 2V$) را بدست آورید.

حل: بنا به تعریف: $v_S(t) = V_S + v_s(t)$ و $v_O(t) = V_O + v_o(t)$. بنابراین:

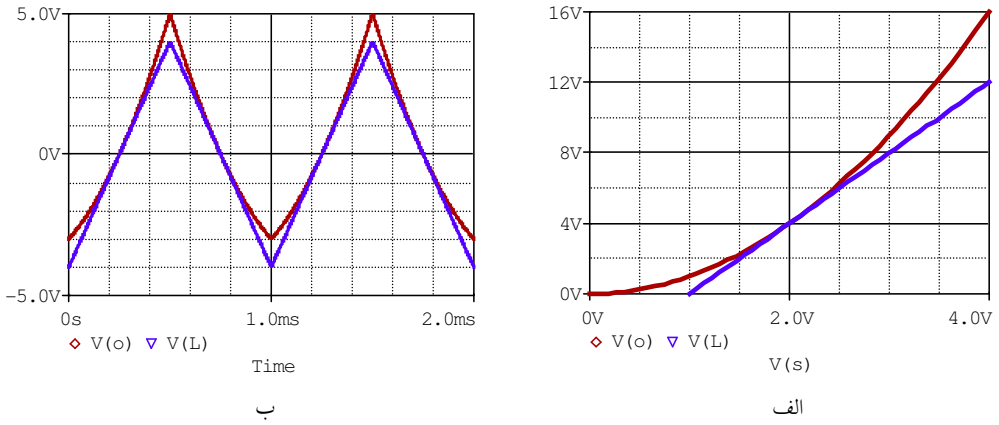
$$v_O(t) = (V_S + v_s(t))^2 = V_S^2 + 2V_S\, v_s + v_s^2 \qquad (۳۷-۲)$$

در این رابطه $V_O = V_S^2 = 4V$ مولفه DC خروجی (آفست خروجی) و $v_o(t) = 2V_S\, v_s + v_s^2$ مولفه AC خروجی (سیگنال خروجی) است.

در شکل ۲-۲۵ الف مشخصه انتقالی این تقویت کننده برای بازه $0 \leqslant v_S \leqslant 4V$ ، $0 \leqslant v_O \leqslant 16V$ با رنگ قرمز نمایش داده شده است. در این شکل مماس بر منحنی در نقطه کار $(V_S, V_O) = (2V, 4V)$ با رنگ آبی رسم شده است. شکل ۲-۲۵ ب نمودار قرمز، سیگنال خروجی ($v_o(t)$) را برای یک

[1] Small Signal

سیگنال ورودی ($v_S(t)$) مثلثی متقارن با دامنه $V_S = 1V$، نشان می دهد. چنان که مشاهده می شود – به علت غیر خطی بودن تقویت کننده – سیگنال خروجی غیر مثلثی است. نمودار آبی در این شکل، نمودار ایده‌آل سیگنال خروجی را نشان می دهد. اختلاف بین این دو نمودار، خطای غیر خطی بودن تقویت کننده است. طبیعی است که هرقدر دامنه سیگنال خروجی کوچک تر باشد، این اختلاف به عبارت دیگر خطای سیستم کم تر است.



شکل ۲–۲۵ الف مشخصه انتقالی و ب نمودار زمانی یک سیگنال ورودی مثلثی قرمز: نمودارهای واقعی، آبی: نمودار خطی

برای محاسبه بهره – طبق تعریف – باید ($A_v = \frac{v_o}{v_s}$) را حساب کنیم. از (۲–۳۷):

$$A_v = \frac{v_o}{v_s} = \frac{\partial\, v_O}{\partial\, v_S}\bigg|_{V_S=2V,\, v_s=0} = \left(2V_S + 2v_s\right)\Big|_{V_S=2V,\, v_s=0} = 4$$

بنابراین بهره خطی شده این تقویت کننده در نقطه کار (شیب منحنی) برابر ٤ است.

برای بدست آوردن حداکثر دامنه مجاز سیگنال ورودی، باید میزان خطای ناشی از غیر خطی بودن سیستم را بدست آوریم. طبق تعریف:

$$E_{abs} = \Delta v_O = \Delta v_o = v_o - v'_o \qquad E_{rel} = \frac{E_{abs}}{v'_o} \tag{۳۸-۲}$$

که در این روابط v'_o مقدار ایده‌آل (مقدار محاسبه شده با فرض خطی بودن سیستم)، v_o مقدار واقعی (مقدار بدست آمده به دلیل غیر خطی بودن سیستم)، E_{abs} خطای مطلق و E_{rel} خطای نسبی است.

از رابطه (۲-۳۷) سیگنال خروجی واقعی:

$$v_o = 2V_S\, v_s + v_s^2 \tag{۳۹-۲}$$

و از همان رابطه، با توجه به این که در حالت ایده‌آل مولفه های غیر خطی در سیستم نباید باشد:

$$v'_o = 2V_S\, v_s \tag{۴۰-۲}$$

بنابراین با توجه به تعاریف، با جایگزینی (۲-۳۹) و (۲-۴۰) در (۲-۳۸):

$$E_{rel} = \frac{v_o - v'_o}{v'_o} = \frac{v_s}{2V_S}, \qquad \left|E_{r_{\max}}\right| = E_{rel}(\max) = \frac{V_s}{2V_S} = \frac{V_P}{2V_Q}$$

در نتیجه:

$$V_P = \left|E_{r_{\max}}\right| \times 2V_Q = 0.1 \times 2 \times 2V = 400mV \quad \Rightarrow \quad V_{o_P} = A_v V_{s_P} = 4 \times 0.4V = 1.6V$$

بنابراین می توان در این مسئله برای سیگنالهایی که دامنه آنها از ۴۰۰ میلی ولت کم تر است، سیستم را خطی فرض کرد.

یاد آوری: برای مشخص کردن کمیات الکتریکی معمولاً از دو (یا بیشتر) حرف استفاده می‌شود. حرف اول مبین کمیت فیزیکی (مثلاً ولتاژ) است. حروف بعدی که به صورت اندیس برای حرف اول نوشته می‌شود، عنصر مربوطه را مشخص می کند. مثلاً: V_D یعنی افت ولتاژ دو سر دیود، I_D: جریان گذرنده از دیود، V_{AK}: ولتاژ بین آند و کاتد، R_L: مقاومت بار، V_{REF}: ولتاژ مرجع، ... .

برای یک کمیت الکتریکی چهار مقدار قابل تعریف است:

۱. **مقدار لحظه ای:** مقدار واقعی که متغیر در هر لحظه دارد. برای نمایش این مقدار از حرف اصلی کوچک و اندیس بزرگ استفاده می کنند. مثلاً: v_D (مقادیر متغیر را با حروف کوچک و مقادیر کل را با حروف بزرگ نمایش می‌دهند).

۲. **مقدار متوسط:** بنا به تعریف، مقدار متوسط یک کمیت، مؤلفه DC آن است. برای نمایش این مقدار، از حرف اصلی و اندیس بزرگ استفاده میکنند. مثلاً: V_D (مقادیر ثابت را با حروف بزرگ و مقادیر کل را با حروف بزرگ نمایش می‌دهند).

۳. **مقدار سیگنال:** مؤلفه AC یک کمیت، بنا به تعریف جزء متغیر آن است. برای نمایش این مقدار از حرف اصلی و اندیس کوچک استفاده می کنند. مثلاً: v_d (مقادیر متغیر را با حروف کوچک و مقادیر جزء را با حروف کوچک نمایش می‌دهند).

٤. **مقدار دامنه:** دامنه سیگنال، بنا به تعریف حداکثر مقدار تغییرات یک کمیت نسبت به مقدار متوسط آن است. برای نمایش این مقدار از حرف اصلی بزرگ و اندیس کوچک استفاده می کنند. مثلاً: V_d (مقادیر ثابت را با حروف بزرگ و مقادیر جزء را با حروف کوچک نمایش می‌دهند).

شکل ۲-۲٦ به عنوان یک مثال، تعاریف ذکر شده را برای ولتاژ دو سر یک دیود بیان می‌دارد.

همان طور که ملاحظه می‌شود همواره:

$$v_D = V_D + v_d \qquad (٤١-٢)$$

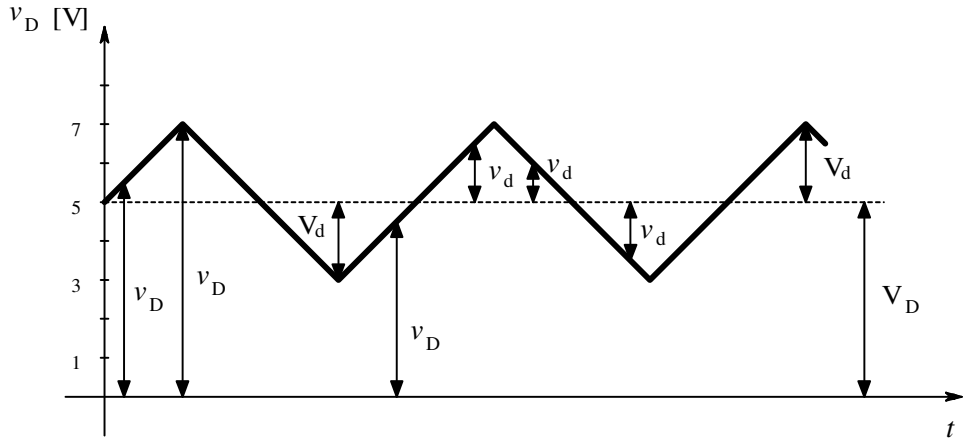
یعنی این که در حالت کلی یک کمیت الکتریکی از یک مؤلفه DC (نقطه کار، بایاس) و یک مؤلفه AC (سیگنال) تشکیل شده است. در مثال فوق سیگنال یک موج مثلثی متقارن با دامنه دو ولت است که در ۵ ولت بایاس شده است. بنابراین:

$v_D = 3 \cdots 7V$ مقدار لحظه ای ولتاژ (متغیر با زمان)

$v_d = -2 \cdots 2V$ مؤلفه AC، سیگنال، (متغیر با زمان)

$V_D = 5V$ مؤلفه DC، ولتاژ نقطه کار، مقدار متوسط، (ثابت نسبت به زمان)

$V_d = 2V$ دامنه سیگنال (ثابت نسبت به زمان)



شکل ۲-۲۶ بیان مولفه های مختلف یک کمیت الکتریکی

تذکر ۱: در مسئله فوق مشخصه تقویت کننده باید به صورت $v_O = Kv_S^2$ بیان شود. که در این مسئله $K = 1/V$ است (اندازه K یک و واحدش یک بر ولت است). برای سادگی در نگارش از نوشتن این ضریب خود داری شده است ولی بایست هموار به این مطلب در ذهن خود توجه کنیم.

تذکر ۲: همان طور که ذکر شد کمیات متغیر با زمان را با حروف کوچک نمایش می دهند. بنابراین مثلاً رابطه (۲-۳۷) را می توانستیم به صورت:

$$v_O(t) = (V_S + v_s(t))^2 = V_S^2 + 2V_S\, v_s(t) + v_s^2(t) \qquad (۲-۳۷ \text{ الف})$$

یا

$$v_O = (V_S + v_s)^2 = V_S^2 + 2V_S\, v_s + v_s^2 \qquad (۲-۳۷ \text{ ب})$$

بنویسیم. نحوه نگارش (۲-۳۷ الف) جهت تایید متغیر بودن $v_O(t)$ و $v_s(t)$ نسبت زمان است. نحوه نگارش (۲-۳۷ ب) جهت سادگی نگارش است. نحوه نگارش (۲-۳۷) تلفیق این دو است.

تذکر ۳: در صورتی که در شکل ۲-۱۶، $+V_{CC} = +12V$ ، $-V_{EE} = -12V$ و $A_v = 4$ باشد؛ برای این تقویت کننده سیگنال های با دامنه $V_s \leqslant 3V$ علایم کوچک و برای تقویت کننده‌ی مثال ۲-۶ برای خطاهای $E_{rel} \leqslant 1\%$ سیگنال های با دامنه $V_s \geqslant 40mV$ علایم بزرگ حساب می شود (چرا؟).

تذکر ٤: برای تقویت کننده هایی با مشخصه شکل ۲-۱۶ (تقویت کننده های خطی) بهره مدار در محدوده قبل از اشباع، مقداری ثابت است. یکی از مزایای تقویت کننده های غیر خطی، نظیر تقویت کننده مثال ۲-۶، در این است که مقدار بهره را می توان با تغییر نقطه کار تغییر داد. برای مثال بهره به ازای نقطه کار $V_S = 2V$ برابر $A_v = 4$ و ازای نقطه کار $V_S = 4V$ برابر $A_v = 8$ خواهد بود (چرا؟). به این نوع تقویت کننده ها تقویت کننده های قابل کنترل[1] گویند.

[1] GCA: Gain Controlled Amplifier

تذکر ۵: پارامترهای سیستم (تقویت کننده) های غیر خطی معمولاً به دو گونه تعریف می شوند: مقادیر استاتیکی[1] یا DC و دینامیکی[2] یا AC. مقادیر استاتیکی نسبت دو مقدار در نقطه کار و مقادیر دینامیکی نسبت تغییرات دو مقدار حول نقطه کار است. مقادیر استاتیکی را با حروف بزرگ و مقادیر دینامیکی را با حروف کوچک نمایش میدهند. برای مثال:

مقاومت استاتیکی دیود:
$$R_D \equiv \left.\frac{V_D}{I_D}\right|_{I_D=I_Q}$$

مقاومت دینامیکی دیود:
$$r_d \equiv \left.\frac{\partial\, v_D}{\partial\, i_D}\right|_{I_D=I_Q} = \left.\frac{v_d}{i_d}\right|_{I_D=I_Q}$$

ترا رسانایی دینامیکی ترانزیستور:
$$g_m \equiv \left.\frac{\partial\, i_C}{\partial\, v_{BE}}\right|_{I_C=I_Q} = \left.\frac{i_c}{v_{be}}\right|_{I_C=I_Q}$$

مقاومت خروجی استاتیکی تقویت کننده:
$$R_O \equiv \left.\frac{V_O}{I_O}\right|_{V_O=V_Q}$$

مقاومت خروجی دینامیکی تقویت کننده:
$$r_o \equiv \left.\frac{\partial\, v_O}{\partial\, i_O}\right|_{V_O=V_Q} = \left.\frac{v_o}{i_o}\right|_{V_O=V_Q}$$

بهره دینامیکی تقویت کننده:
$$A_v \equiv \left.\frac{\partial\, v_O}{\partial\, v_I}\right|_{V_O=V_Q} = \left.\frac{v_o}{v_i}\right|_{V_O=V_Q}$$

برای سیستم های خطی مقادیر دینامیکی برابر مقادیر استاتیکی هستند (چرا؟). در بررسی مدارهای الکترونیکی اصولاً مقادیر دینامیکی تعریف و محاسبه می شوند (چرا؟). در سیستم های غیر خطی هم مقادیر دینامیکی و هم مقادیر استاتیکی تابعی از نقطه کار هستند.

---

[1] ایستا، Static

[2] پویا، نموی، Dynamic