فصل دوم : نویز الکتریکی

۲-۱- مقدمه

نویز همواره در سیستم‌های مخابراتی وجود دارد. بعنوان نمونه می‌توان به برفک موجود در تلویزیون یا خش خش صدا در یک سیستم رادیویی اشاره نمود. در شرایط عادی بعلت اینکه سطح سیگنال پیام خیلی بزرگتر از سطح نویز است، نویز اثری بر روی سیستم نمی‌گذارد. همانطور که در فصل اول دیدید, در اکثر سیستمهای مخابراتی و معمولا در طبقات ابتدایی, یک تقویت کننده بکار برده می‌شود تا دامنه سیگنال پیام حاصل از منبع را در قسمت فرستنده یا سیگنال ارسال شده از فرستنده به گیرنده را تقویت نماید. حال فرض کنید سیگنال موجود ترکیبی از سیگنال پیام و سیگنال نویزی باشد. در اینحالت اگر نسبت دامنه سیگنال پیام به سیگنال نویز کوچکتر از یک باشد, یا بعبارت دیگر دامنه سیگنال نویز از سیگنال پیام بیشتر باشد, در صورت تقویت سیگنال, تاثیر پذیری نویز در سیستم بیشتر خواهد شد. در صورت تقویت اینگونه از سیگنال‌ها (سیگنالی که نسبت سیگنال به نویز پایینی دارد) ممکن است سیگنال پیام محو شود. بهمین منظور و برای کاهش نویز در سیستمهای مخابراتی باید درک صحیحی از نویز و مفاهیم مربوط به آن داشته باشیم.

طبق تعریف نویز هر نوع آشفتگی الکتریکی است که با سیگنال مخابره شونده، تداخل می‌کند. نویز یا اغتشاش می‌تواند به معنای آلودگی صوتی و یا سیگنالی ناخواسته باشد که شکل سیگنال‌ها را تغییر می‌دهد و باعث بروز اختلال می‌شود. نویزها از لحاظ نوع منبع به دو دسته داخلی که عموما ساخته دست بشر است و خارجی که برگرفته از طبیعت پیرامون است, تقسیم بندی می‌گردند. در این فصل هدف ما بررسی نویزهای داخلی است که عموما شامل نویز حرارتی, نویز ترقه‌ای, نویز جانسون و نویز سوسویی می‌باشد.

* **نکته:** هر جسمی که درجه حرارتش بالاتر از صفر درجه کلوین (۲۷۳- درجه سانتیگراد) باشد، ممکن است به صورت منبع نویز عمل کند.

در طراحی سیستم های مخابراتی، یکی از هدفها بالا نگه داشتن هرچه بیشتر نسبت توان متوسط سیگنال به توان متوسط نویز است, بنحوی که نویز نتواند بر روی عملکرد سیستم تاثیر گذارد. روش‌هایی که برای کاهش نویز در یک سیستم به کار می‌رود عبارتند از:

۱- به کار بردن فرستنده های قوی و آنتن‌های با بهره بالا (جهت افزایش توان سیگنال ارسالی به گیرنده).
۲- طراحی تقویت کننده و مخلوط کننده با نویز کم. (به هنگام پردازش حداقل نویز به سیگنال اضافه شود.)
۳- استفاده از روش‌های مدولاسیون و کد گذاری برای جدا سازی آسان سیگنال از نویز.
۴- کاهش نویز در منبع مولد آن (ساخت بشر) با استفاده از فیلتر کردن و طراحی مناسب.

تعیین دقیق مشخصات نویز الکتریکی تا حد ممکن امری مطلوب است؛ ولی یکی از مشخصه‌های اغلب نویزها طبیعت غیر جبری آن است. طبیعت غیر جبری به معنی این است که با توجه به ماهیت تصادفی بودن نویز بدست آوردن یک رابطه جبری ریاضی که سیگنال نویز از آن پیروی نماید, بسیار دشوار و در بعضی از موارد غیر ممکن است. از اینرو برای بدست آوردن مقادیر کمی نویز می‌توان دستگاههای اندازه‌گیری را به منبع نویز متصل نمود و مقدار متوسط یا مقدار ماکزیمم آنرا اندازه گرفت.

۲-۲- نویز حرارتی

نویز حرارتی از حرکت تصادفی حاملهای باردار (الکترون‌ها یا پروتون‌ها) در یک محیط رسانا (مقاومت با هادی) که دمای آن بالاتر از صفر مطلق (۲۷۳- درجه سانتیگراد) است، ناشی می‌شود. با افزایش دما، سرعت الکترون‌ها افزایش

www.noandishaan.com

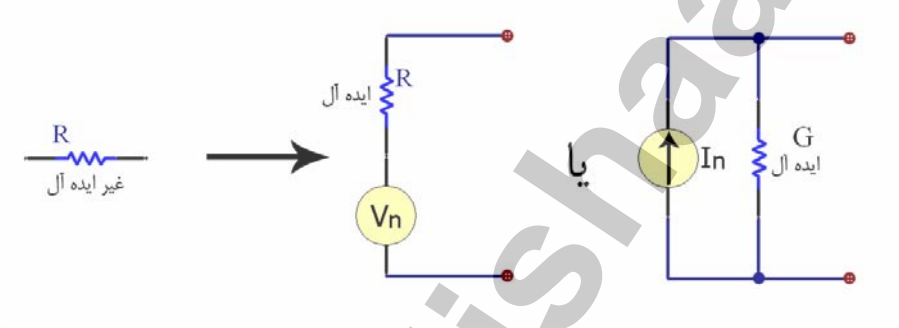
پیدا می‌کند به نحوی که چگالی توان نویز الکتریکی حاصل با مقاومت رسانا و دمای آن متناسب است. این نویز را نویز سفید هم می‌گوییم ، زیرا به طور نظری و تجربی نشان داده شده است که طیف آن تا فرکانسهای $۱۰^{۱۳}$ هرتز یکنواخت است. طبق تعریف نویز سفید نویزی است که همه فرکانس‌ها را در بر می‌گیرد. در صورتیکه نویز سفید را از یک فیلتر عبور دهیم, نویز رنگی بدست می‌آید.

مقاومت فلزی را می‌توان یک منبع نویز حرارتی دانست و آنرا با یکی از دو مدل میانگین مجذور ولتاژ نویز (V_n^2) و یا میانگین مجذور جریان نویز (I_n^2) نشان داد که از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$V_n^2 = 4kTRB \qquad (۱-۲)$$

$$I_n^2 = 4kTGB \qquad (۲-۲)$$

که در روابط فوق k ثابت بولتزمان ($۱,۳۸\times۱۰^{-۲۳}$ J/K) , R مقاومت, $G=1/R$ رسانایی, T دمای مطلق بر حسب کلوین و B پهنای باندی که نویز در آن مشاهده می شود بر حسب هرتز است. در شکل زیر دو مدل بکار رفته برای نمایش نویز یک مقاومت نشان داده شده است.



توان نویز تولیدی توسط یک مقاومت رابطه مستقیمی با پهنای باند و دما دارد. بعبارت دیگر با افزایش دما یا پهنای باند مدار, توان نویز ایجاد شده در مقاومت افزایش می‌یابد. از اینرو برای کارکرد بهتر مدارات مخابراتی همواره سعی بر این است که تا حد ممکن پهنای باند مدار را کاهش دهند تا توان نویز حرارتی سیستم کاهش یابد و نسبت سیگنال به نویز خروجی در حد مطلوب باشد. اما کاهش پهنای باند بمعنی کاهش حجم اطلاعات ارسالی است, از اینرو باید مصالحه‌ای بین نویز سیستم و حجم اطلاعات ارسالی صورت پذیرد.

* **نکته:** با توجه به رابطه توان نویز تولیدی توسط یک مقاومت ($P_n = V_n^2 / R = RI_n^2$) و جایگزاری روابط ۱ و ۲ در آن, توان نویز حرارتی مستقل از مقدار مقاومت است. بنابراین, توان نویز ایجاد شده توسط یک مقاومت ۱ اهم و ۱۰۰ کیلو اهم در دما و پهنای باند یکسان با هم برابر است.

مثال۱: میانگین مجذور ولتاژ نویز تولید شده در یک مقاومت ۴۵۰ کیلو اهم در پهنای باند 1 MHz و در دمای 20°C (دمای اتاق) را محاسبه کنید.

حل)

$$T = 273 + 20 = 293^{\circ} K, R = 450\times10^{3}\,\Omega, B = 10^{6}\,Hz$$

$$V_n^2 = 4kTRB = 4\times1.38\times10^{-23}\times293\times450\times10^{3}\times10^{6} = 7.28\times10^{-9}\,v^2 = 7.28\,nv^2$$

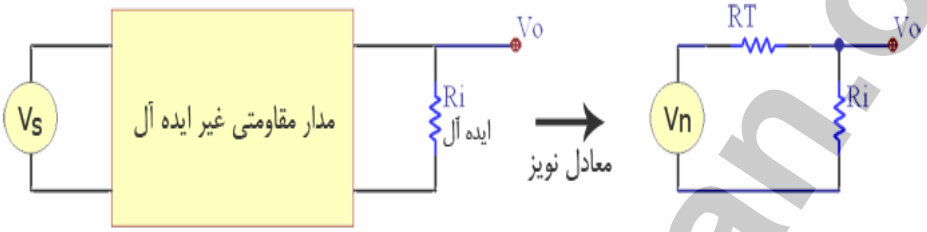
برای محاسبه متوسط ولتاژ نویز تولیدی توسط این مقاومت کافی است از رابطه فوق جذر بگیریم. از اینرو

$$V_n = 85.31\,\mu v = 0.085\,mv$$

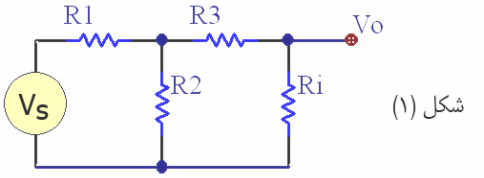
www.noandishaan.com

حال فرض کنید مقاومت ورودی یک ولت متر الکتریکی با پهنای باند 1 MHz (0~1 MHz) برابر با ۴۵۰ کیلو اهم باشد. با توجه به اینکه میزان ولتاژ متوسط نویز تولید شده توسط این مقاومت در دمای اتاق در حدود ۰,۰۸۵ میلی ولت است, این ولت متر نمی‌تواند ولتازهای کمتر از یک میلی ولت را با دقت بالا اندازه گیری کند.

* **نکته:** در مدارهایی که بیش از یک مقاومت دارند, با فرض غیر ایده‌ال بودن تمام المانهای مقاومتی می‌توان با به دست آوردن مدار معادل تونن و نورتن معادل کل شبکه, مقدار مقاومتها را به یک مقاومت رساند و رابطه (۲-۱) و (۲-۲) را به مقاومت معادل اعمال نمود و میانگین مجذور ولتاژ نویز معادل شبکه را به دست آورد. مدار معادل تونن چنین مداری یک منبع ولتاژ نویزی با مقدار V_n سری شده با یک مقاومت ایده‌آل R_T است.



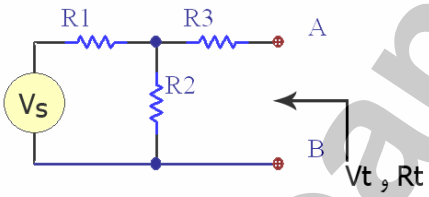
مثال ۲: در شبکه شکل ۱ ولتاژ ورودی مدار برابر با V_S ولت می‌باشد. با فرض اینکه پهنای باند کاری مدار برابر با B مگا هرتز باشد, مقدار نسبت سیگنال به نویز خروجی شبکه را محاسبه کنید. در این شبکه R_i مقاومت ایده‌آل است.



شکل (۱)

حل)

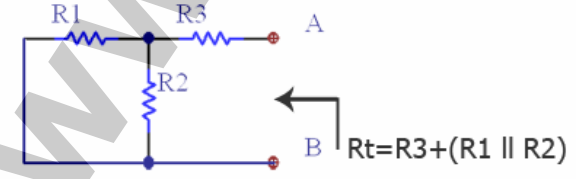
مرحله ۱: *بدست آوردن سیگنال خروجی بدون در نظر گرفتن اثر نویز*، در اینحالت تمام مقاومت ها ایده‌آل فرض شده واثر منابع نویز حذف شده وفقط اثر سیگنال منابع ورودی در نظر گرفته می‌شود. پس هدف به دست آوردن مدار معادل تونن شکل زیر است:



برای به دست آوردن ولتاژ تونن شبکه معادل, بایستی V_{AB} شبکه محاسبه شود. با توجه به این که دو سر B و A اتصال باز است هیچ جریانی از مقاومت R_3 عبور نمی‌کند و ولتاژ دو سر B و A برابر با ولتاژ R_2 است. با استفاده از رابطه تقسیم ولتاژ

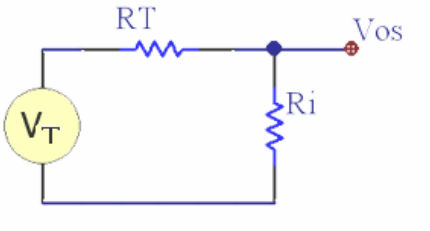
$$V_{AB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_s$$

با صفر کردن منابع مستقل می‌توان مقدار مقاومت معادل شبکه را بدست آورد. از اینرو



در نتیجه مدار معادل شبکه شکل (۱) به صورت زیراست:

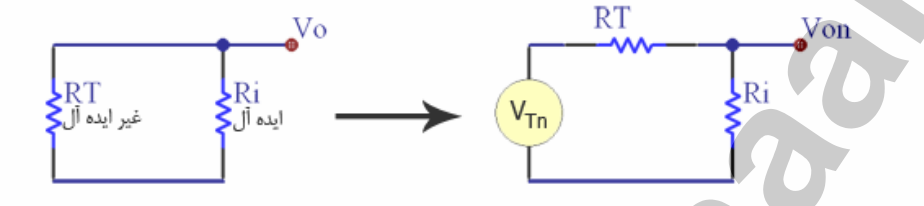
www.noandishaan.com



ینابراین سیگنال خروجی حاصل از منبع ورودی برابر است با

$$V_{os} = \frac{R_i}{R_i + R_T} V_T = \frac{R_i}{R_i + R_T} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_s$$

مرحله ۲: *به دست آوردن نویز خروجی با حذف منابع مستقل*: در این مرحله تمام منابع مستقل مدار را صفر کرده و فقط اثر نویز را در نظر می‌گیریم. با توجه به اینکه مقاومتهای R_1, R_2 و R_3 همگی غیر ایده‌ال می‌باشند, در نتیجه می‌توان معادل آنها را بدست آورد. در اینحالت برای محاسبه ولتاژ نویز خروجی بایستی مقدار V_{on} شبکه زیر محاسبه شود:



از اینرو سیگنال نویز خروجی برابر است با

$$V_{Tn} = \sqrt{4kTR_T B}$$

$$V_{on} = \frac{R_i}{R_i + R_T} V_{Tn} = \frac{R_i \sqrt{4kTR_T B}}{R_i + R_T}$$

در نهایت با محاسبه نسبت سیگنال به نویز خروجی داریم:

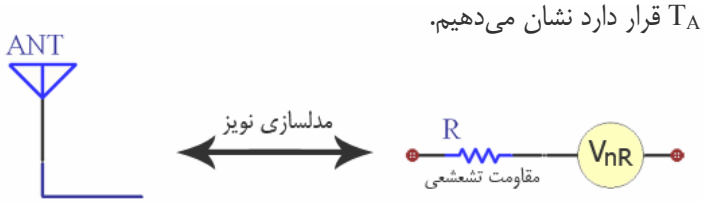
$$\frac{V_{os}}{V_{on}} = \frac{\frac{R_i R_2}{(R_1 + R_2)(R_i + R_T)} V_s}{\frac{R_i \sqrt{4kTR_T B}}{R_i + R_T}} = \frac{R_2}{(R_1 + R_2)\sqrt{4kTR_T B}} V_s$$

۲-۳- نویز آنتن گیرنده

مقاومت خروجی یک آنتن در حدود 70~300Ω می‌باشد. بخش اعظم این مقاومت, مربوط به مقاومت تشعشعی آنتن است که نشان دهنده توان انتشار یافته توسط آنتن است. مقاومتی که بر اثر هادیهای داخل آنتن ایجاد می‌گردد, مقاومت اهمی نام دارد که از اثر آن در مقابل مقاومت تشعشی آنتن می‌توان صرفنظر نمود. نویز موجود بر روی پایه‌های آنتن گیرنده دو منبع دارد:

۱. نویز حرارتی تولید شده توسط مقاومت اهمی (معمولاً ناچیز)
۲. نویزی که از منابع خارجی گرفته می‌شود (هر جسمی که دمای آن بالاتر از صفر مطلق باشد, نویز تشعشع می‌کند).

نویز دریافت شده توسط آنتن را به صورت نویز حرارتی یک مقاومت فرضی مساوی با مقاومت تشعشعی آنتن ، که در درجه حرارت T_A قرار دارد نشان می‌دهیم.



www.noandishaan.com

مثال۳: ولتاژ نویزrms یک آنتن۲۰۰ اهمی ، اندازه‌گیری شده در پهنای باند $B=10^4Hz$، مقدار$0.1\mu V$ است. درچه دمایی این نویز تولید می‌گردد.

حل) با استفاده از رابطه (۲-۱) داریم:

$$V_n^2=(10^{-7})^2=4kTRB=4\times1.38\times10^{-23}\times T\times200\times10^4\rightarrow T=\frac{10^{-14}}{11.04\times10^{-17}}=90.5K$$

بنابراین نویز موجود بر روی پایانه‌های آنتن معادل نویز حرارتی یک مقاومت ۲۰۰ اهمی در دمای ۹۰٫۶ درجه کلوین است. در ادامه نشان خواهیم داد که بخشهای دیگر یک سیستم گیرنده را می‌توان ساده نمود و فقط با یک دمای نویز معادل نشان داد.

۲-٤- نویز در دیود وترانزیستورهای دو قطبی

با توجه به اینکه مقاومتها و آنتن‌ها المانهای دو پایه می‌باشند, توصیف مشخصه نویز آنها بر حسب یک دمای نویز یا یک مقاومت نویز معادل کار ساده‌ای است. برای ترانزیستورها و دیگر مدارهای چند پایه وضعیت کمی دشوارتر است, زیرا نویز داخلی آنها به دما, نقطه کار و مقاومت‌های متصل شده به ورودی وخروجی‌شان بستگی دارد.

۲-٤-۱- نویز دیود

نویز تولید شده در دیودهای پیوندی و گرمایونی نویز ترقه‌ای نامیده می‌شود. علت بوجود آمدن این نویز جریان ایجاد شده به وسیله حامل‌های کاتد است . نویز ترقه‌ای یک دیود را می‌توان با یک منبع جریان که مقدار میانگین مجذور آن

$$I^2=2qI_{DC}B \qquad (۳-۲)$$

است, نشان داد. در معادله فوق $q=1.6\times10^{-19}C$,I_{DC} جریان DC گذرنده از دیود بر حسب آمپر و B پهنای باندی که نویز در آن قرار گرفته است بر حسب هرتز است.

مثال٤: جریان rms نویزی یک دیود با جریان گذرنده DC, ۱۰ میلی آمپر در پهنای باند ۱۰ مگاهرتز چقدر است.

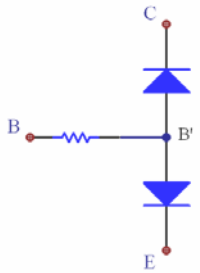
حل) با توجه به رابطه (۲-۳) داریم:

$$I^2=2\times1.6\times10^{-19}\times10\times10^{-3}\times10\times10^6=3.2\times10^{-14}\,A^2=0.178\,\mu A$$

* **نکته:** این مدل برای دیودهایی که در ناحیه شکست معکوس یا ناحیه بهمنی کار می‌کنند معتبر نیست.

۲-٤-۲- نویز ترانزیستورهای دو قطبی

با توجه به مدل ساده شده یک ترانزیستور که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است, یک ترانزیستور را می‌توان با استفاده از دو دیود و یک مقاومت در بیس نشان داد. از اینرو در ترانزیستورهای دو قطبی عموما دو منبع نویز وجود دارد:



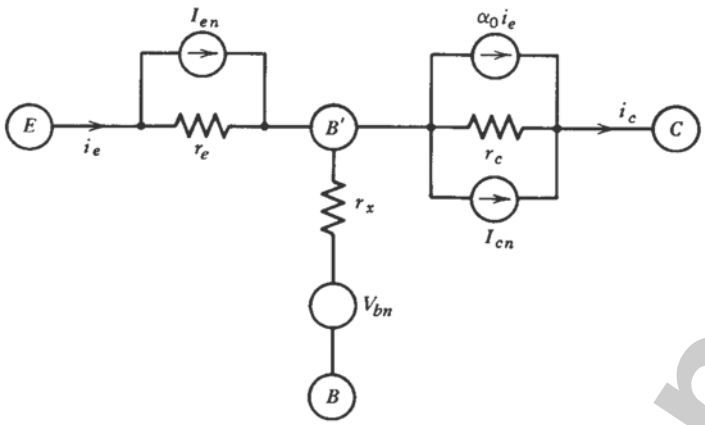
شکل۲-۲: مدل ساده شده یک ترانزیستور دو قطبی

۱) نویز حرارتی مقاومت اهمی بیس

۲) نویز ترقه‌ای در دیود اتصال

www.noandishaan.com

با جایگزاری مدل نویز حرارتی برای مقاومت بیس و مدل نویز ترقه‌ای برای دو دیود موجود در پیوندهای بیس امیتر و بیس کلکتور, شکل ۲-۳ بدست می‌آید:



شکل۲-۳: مدل نویزی برای آرایش بیس مشترک

که منابع نویز آن بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$I_{en}^2 = 2qI_eB$$
$$V_{bn}^2 = 4kTr_xB \qquad (۴-۲)$$
$$I_{cn}^2 = 2qB[I_{CO} + I_C(1-\alpha_0)]$$

در رابطه فوق I_{CO} جریان اشباع معکوس کلکتور, I_C جریان کلکتور و α_0 گین جریان اتصال کوتاه بیس مشترک در فرکانسهای پایین است. در شکل فوق براحتی میتوان منابع جریان موازی شده با مقاومتها را به منابع ولتاژ سری شده با مقاومت (تبدیل نورتن به تونن) نمود و آرایش جدیدی را بدست آورد.

۲-۵- تعریف اصطلاحات نویز

اصطلاحات مختلفی برای معرفی و مقایسه مقدار نسبی نویز تولید شده در سیستمهای الکتریکی استفاده می‌شود. تعاریف و مباحث, زیربنایی است برای فهم لغات و اصطلاحاتی که در برگه‌های اطلاعات سازندگان قطعات مختلف الکتریکی بکار برده می‌شود و از آنها می‌توان برای محاسبه اثر نویز کلی یک سیستم استفاده نمود.

۲-۵-۱- نسبت سیگنال به نویز Signal Noise Ratio (SNR)

در یک پهنای باند معین, نسبت سیگنال به نویز برابر با نسبت توان سیگنال به توان نویز در پایانه مشخص می‌باشد.

$$SNR = \frac{P_S}{P_N} = \frac{V_s^2}{V_n^2} \qquad (۵-۲)$$

که V_S و V_n مقادیر rms ولتاژ سیگنال و ولتاژ نویز می‌باشد. اما در سیستم‌ها معمولاً SNR بر حسب dB (دسی‌بل) نمایش داده می‌شود.

$$SNR(dB) = 10\log_{10}\frac{P_S}{P_N} = 20\log_{10}\frac{V_s}{V_n} \qquad (۶-۲)$$

بعنوان نمونه, هنگامیکه در یک سیستم مخابراتی نسبت سیگنال خروجی به نویز خروجی برابر با ۱۰- دسی بل است, در اینحالت نسبت توان سیگنال به توان نویز خروجی برابر با ۰,۱ و نسبت دامنه سیگنال به نویز خروجی تقریبا برابر با ۰,۳۲ می‌باشد.

www.noandishaan.com

* **نکته:** هر چقدر مقدار SNR بزرگتر باشد, تخریب سیگنال اصلی در برابر نویز کمتر خواهد بود (بعبارت دیگر تأثیر پذیری نویز بر روی سیگنال اصلی کاهش می‌یابد).

بسته به نوع کاربرد, مقدار نسبت سیگنال به نویز متفاوت می‌باشد. بعنوان نمونه نسبت سیگنال به نویز بعضی از مقادیر تعیین شده بصورت زیر می باشد:

نسبت سیگنال به نویز ۱۰ دسی‌بل در ورودی آشکارساز گیرنده AM

نسبت سیگنال به نویز ۱۲ دسی‌بل در ورودی آشکارساز گیرنده FM

نسبت سیگنال به نویز ۴۰ دسی‌بل در ورودی آشکارساز گیرنده تلویزیون.

* **نکته:** با گذشتن سیگنال از چند طبقه پشت سر هم مقدار SNR کلی سیستم مرتبا کاهش می‌یابد. (چون هر طبقه یک مقدار سیگنال نویز به سیستم اضافه می‌کند). بعبارت دیگر در اینحالت داریم:

SNR > SNR1 > SNR2 > SNR3

در اغلب سیستم‌ها نویز خروجی تقویت شده بر اثر دو عامل مهم ایجاد می‌گردد:

۱) نویز همراه با سیگنال ورودی

۲) نویز تولیده شده دو طبقه ابتدایی (مانند طبقه مخلوط کننده و تقویت‌کننده RF در گیرنده‌های رادیویی)

۲-۵-۲- توان نویز قابل دسترس (Available Noise Power)

طبق تعریف, توان قابل دسترس یک منبع (P_a) ماکزیمم توانی است که می‌توان از آن منبع گرفت. با فرض اینکه امپدانس داخلی منبع $Z_S = R + jX$ باشد, ماکزیمم توان به بار $Z_L = R - jX$ که مزدوج مختلط امپدانس داخلی منبع است, داده می‌شود. اگر ولتاژ مدار باز منبع V باشد, در اینصورت بر اساس تئوری انتقال توان ماکزیمم داریم:

$$P_a = \frac{V_R^2}{R} = \frac{V^2/4}{R} = \frac{V^2}{4R} \qquad (۷-۲)$$

در صورتیکه R یک مقاومت غیر ایده‌ال باشد, یا بعبارت بهتر مولد نویز حرارتی باشد, با جایگزاری رابطه (۲-۱) در رابطه فوق بجای V^2 داریم:

$$P_a = \frac{4kTRB}{4R} = kTB \qquad (۸-۲)$$

رابطه فوق نشان می‌دهد که توان قابل دسترس یک منبع نویز حرارتی مستقل از مقدار مقاومت است و فقط وابسته به دما و پهنای باند سیستم است. بعنوان نمونه در پنهای باند 1Hz توان قابل دسترس نویز عبارت است از:

$$P_{a(1Hz)} = kT \rightarrow P_{a(1Hz)} \propto T \qquad (۹-۲)$$

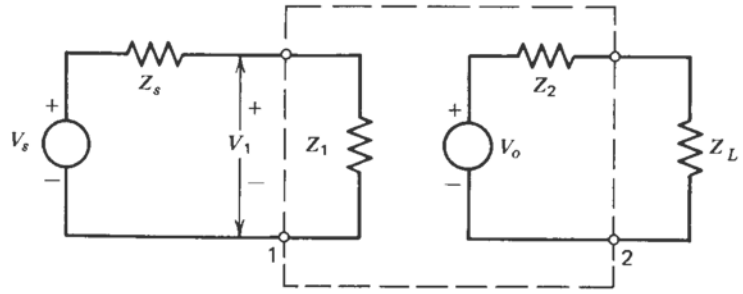
چون P_a مستقل از R است, توان نویز قابل دسترس تمام مقاومتهای محدود و غیر صفر با هم برابرند.

۲-۵-۳- گین توان قابل دسترس یک شبکه دو قطبی (Available Power Gain)

برای نمایش یک تقویت کننده که در ناحیه خطی عمل می‌کند می‌توان از مدل دو قطبی استفاده نمود (توضیحات بیشتر در مورد این شبکه‌ها در فصل چهار آورده شده است). با استفاده از مدل امپدانسی یک شبکه دوقطبی بدون بررسی

www.noandishaan.com

رفتار جریانها و ولتاژهای داخلی شبکه, تحلیل شبکه به کمک جریان و ولتاژ پایانه های ورودی و خروجی شبکه صورت می‌گیرد. مدل امپدانسی یک شبکه دو قطبی بصورت شکل ۲-۴ است:



شکل ۲-۴: مدل امپدانسی یک شبکه دو قطبی

در شکل فوق, منبع دارای ولتاژ اتصال باز V, و امپدانس داخلی Z_s است. امپدانس داخلی شبکه دو قطبی برابر با Z_1, امپدانس خروجی Z_2 و ولتاژ اتصال باز خروجی V_0 می باشد. بار خروجی شبکه برابر با Z_L است. گین ولتاژ اتصال باز یک شبکه دو قطبی را با H(f) نشان می‌دهند که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$H(f)=\frac{V_o}{V_1} \qquad (۱۰-۲)$$

توان قابل دسترس منبع بصورت زیر بیان می‌شود:

$$P_{as}=\frac{|V_s|^2}{4R_s} \qquad (۱۱-۲)$$

بطور مشابه توان سیگنال قابل دسترس در پایانه خروجی برابر است با

$$P_{ao}=\frac{|V_o|^2}{4R_2} \qquad (۱۲-۲)$$

که در روابط فوق R_s و R_2 قسمتهای حقیقی امپدانس‌های متناظرشان می‌باشند. در حالت کلی بهره توان قابل دسترس یک شبکه که آنرا با G_a نشان می‌دهند برابر با نسبت توان سیگنال قابل دسترس در خروجی به توان سیگنال قابل دسترس در ورودی است. از اینرو با استفاده از روابط فوق خواهیم داشت:

$$G_a=\frac{P_{ao}}{P_{as}}=\frac{|V_o|^2 R_s}{|V_s|^2 R_2} \qquad (۱۳-۲)$$

رابطه فوق یک رابطه مناسب و عملی نمی‌باشد, چون در اکثر کاربردها بسته به شرایط طراحی شرط تطبیق امپدانسی بوجود نمی‌آید, و این در حالی است که در رابطه فوق اثر عدم تطبیق امپدانسها در پایانه‌های ورودی و خروجی در نظر گرفته نشده است. درحالت کلی و با در نظر گرفتن شرایط عدم تطبیق امپدانسی روابط زیر بدست می‌آید:

$$V_1=\frac{Z_1 V_s}{Z_1+Z_S} \qquad (۱۴-۲)$$

و

$$\frac{V_0}{V_s}=\frac{V_0 Z_1}{V_1(Z_1+Z_s)} \qquad (۱۵-۲)$$

با جایگزاری روابط (۲-۱۰) , (۲-۱۴) و (۲-۱۵) در (۲-۱۳) بهره توان قابل دسترس در یک فرکانس معین مانند f از رابطه زیر بدست خواهد آمد:

$$G_a=\left|\frac{H(f)Z_1}{Z_1+Z_s}\right|^2 \frac{R_s}{R_2} \qquad (۱۶-۲)$$

www.noandishaan.com

* **نکته:** گین قابل دسترس چندین شبکه متوالی پشت سر هم برابر با حاصلضرب مقادیر G_a تک تک شبکه‌ها در یکدیگر است.

۲-۵-٤- دمای نویز (Noise Temperature)

دمای نویز در هر شبکه به این صورت تعریف می‌شود: دمای نویز معادل یک منبع نویز با توان قابل دسترس P_a درفاصله فرکانس Δf برابر است با :

$$T_e = \frac{P_a}{k\,\Delta f} \qquad (۱۷-۲)$$

درصورتیکه طیف فرکانسی نویز (انرژی نویز بر حسب فرکانس) هموار نباشد, یا بعبارت دیگر با تغییر فرکانس, انرژی سیگنال نویز تغییر یابد, مقادیر دمای نویز شبکه و توان قابل دسترس پارامترهای وابسته به فرکانس خواهند بود.

دمای موثر نویز ورودی شبکه. اگر یک منبع نویز حرارتی با دمای T به یک شبکه بدون نویز با پهنای باند Δf و گین قابل دسترس $G_a(f)$ متصل شده باشد, توان نویز قابل دسترس منبع برابر است با:

$$P_{ns} = kT\Delta f \quad watts \qquad (۱۸-۲)$$

و توان نویز قابل دسترس خروجی شبکه برابر است با

$$P_{no} = G_a(f)k\,T\,\Delta f \qquad (۱۹-۲)$$

در صورتیکه شبکه نویزی باشد, که آنرا با P_{ne} نشان می‌دهند, باعث افزایش توان نویز سیستم می‌گردد و با توان خروجی جمع می‌شود. همانند حالت قبل با در نظر گرفتن منبع نویز ورودی, در یک شبکه نویزی توان نویز خروجی برابر است با:

$$P_{no} = G_a(f)kT\Delta f + P_{ne} \qquad (۲۰-۲)$$

همانطور که در شکل ۴-۵ نشان داده شده است, یک شبکه نویزی را می‌توان با یک شبکه بدون نویز با همان G_a و در نظر گرفتن P_{ne} بصورت یک منبع نویز اضافی در ورودی سیستم مدلسازی نمود. دمای T_e در منبع نویز اضافی طوری تنظیم می‌گردد تا بتواند توان نویز P_{ne} را در خروجی ایجاد نماید. در اینحالت

$$T_e = \frac{P_{ne}}{G_a(f)\,k\,\Delta f} \qquad (۲۱-۲)$$

مقدار T_e را دمای موثر نویز ورودی شبکه می‌نامند. همانطور که در ادامه نشان خواهیم داد, چنین روشی برای نمایش یک شبکه نویزی جهت تعیین نسبت سیگنال به نویز کلی و مخصوصا در تقویت کننده‌های متوالی سیستم بسیار کارآمد می‌باشد.

مثال ۵ : مقاومت متصل شده به ورودی یک شبکه نویزی با بهره توان ۳ دسی بل برابر با ۱ کیلو اهم است. با فرض اینکه پهنای باند سیستم ۱ مگا هرتز و دمای محیط ۱۷ درجه سانتیگراد باشد, توان نویز خروجی $۱,۳۸\times۱۰^{-۱۴}$ ژول می‌گردد. مطلوبست تعیین دمای موثر نویز ورودی شبکه بر حسب کلوین.

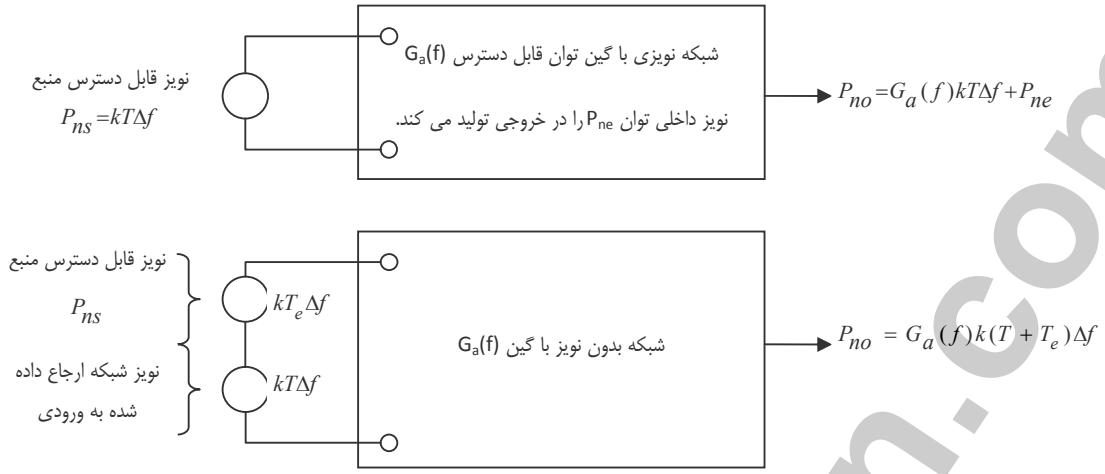
حل) با محاسبه گین توان برحسب اعداد حقیقی و استفاده از رابطه زیر داریم:

$$P_{no} = G_a k(T + T_e)\Delta f \;\rightarrow\; T_e = \frac{P_{no}}{G_a k\Delta f} - T = \frac{1.38\times10^{-14}}{2\times1.38\times10^{-23}\times10^{6}} - 290 = 210^{\circ}K$$

۲-۵-۵- عدد نویز (The Noise Figure)

تا اینجا باید توانسته باشید روشهای مختلفی که برای بیان نویز تجهیزات یا سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرند را توصیف نمایید. خوشبختانه, در اکثر سیستمهای نویزی برای توصیف و مقایسه نویز از یک پارامتر موسوم به عدد نویز استفاده می‌شود.

www.noandishaan.com



شکل۲-۵: یک شبکه نویزی با توان نویزورودی و مدل معادل آن

ضریب نویز (Noise Factor)

برای بیان تغییرات نسبت سیگنال به نویز ورودی به نسبت سیگنال به نویز خروجی از پارامتری موسوم به ضریب نویز استفاده می‌گردد. شکل ۶ یک شبکه نویزی با توان سیگنال و نویز ورودی P_{si} و P_{ni} و توانهای سیگنال و نویز خروجی را با P_{so} و P_{no} نمایش می‌دهد. عدد نویز بر روی یک پهنای باند مشخص بصورت زیر بیان می گردد:

$$NF=\frac{Input\ SNR}{Output\ SNR}=\frac{P_{si}/P_{ni}}{P_{so}/P_{no}}=\frac{P_{si}}{P_{so}}\times\frac{P_{no}}{P_{ni}}=\frac{P_{no}}{G_aP_{ni}} \qquad (۲۲-۲)$$

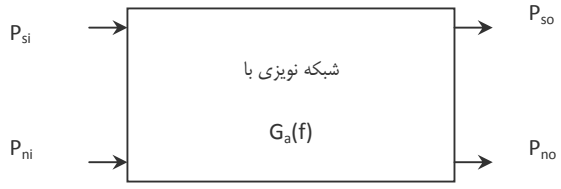
با جایگزاری رابطه $P_{no}=G_aP_{ni}+P_{ne}$ در (۲-۲۲) داریم:

$$NF=1+\frac{P_{ne}}{G_aP_{ni}}=1+\frac{T_e}{T} \qquad (۲۳-۲)$$

در (۲-۲۳) در صورتیکه $T=T_0=290^\circ k$ باشد, عدد نویز استاندارد می‌گردد. رابطه فوق را بصورت زیر نیز می‌توان بازنویسی نمود:

$$T_e=T_0(NF-1) \qquad (۲۴-۲)$$

بر این اساس, دمای استاندارد منبع را می‌توان بر حسب دمای نویز معادل شبکه و یا بالعکس بیان نمود.



شکل۶: توان سیگنال و نویز در ورودی و خروجی یک شبکه دو قطبی

در بسیاری از مواقع, عدد نویز بر حسب دسی‌بل بیان می‌گردد. بدین منظور

$$NF_{dB}=10\log_{10}NF \qquad (۲۵-۲)$$

www.noandishaan.com

برای یک شبکه بدون نویز, با توجه به اینکه توان نویز شبکه برابر با صفر است, نسبت سیگنال به نویز خروجی و ورودی با هم برابر می‌باشد. از اینرو, در اینحالت عدد نویز برابر با یک و یا صفر دسی‌بل است. در مدارهای عملی با توجه به نوع قطعات بکاررفته و محیطی که در آن آزمایش صورت می‌گیرد, عدد نویز همواره بزرگتر از یک است.

مثال ٦: در یک شبکه دو قطبی, توان سیگنال نویز ورودی شبکه $۶,۹\times۱۰^{-۱۶}$ ژول و دمای موثر ورودی شبکه نویزی ۶۰۰ درجه کلوین است. با فرض اینکه پهنای باند کاری شبکه ۱۰۰ کیلو هرتز باشد, مطلوبست محاسبه دمای محیط و عدد نویز شبکه بر حسب دسی‌بل.

حل) برای محاسبه دمای محیط داریم:

$$P_{ni} = kTB \rightarrow 6.9\times10^{-16} = 1.38\times10^{-23}\times T\times10^{5} \rightarrow T = 500\ ^{\circ}K$$

و برای محاسبه عدد نویز با استفاده از (۲-۲۳) داریم:

$$NF = 1+\frac{T_e}{T} = 1+\frac{600}{500} = 2.2 \quad \rightarrow \quad NF_{dB} = 10\log_{10} 2.2 = 3.42\ dB$$

عدد نویز متوسط

در رابطه (۲-۲۲), فرض بر این است که انرژی نویز در پهنای باند مشخص, بدون تغییرات است. یا بعبارت بهتر طیف فرکانسی نویز هموار است. در صورتیکه طیف فرکانسی نویز هموار نباشد, بهره توان تابعی از فرکانس خواهد بود و آنرا با $G_a(f)$ نشان می‌دهند, در اینحالت برای اندازه‌گیری نویز از پارامتری موسوم به عدد نویز متوسط $(\overline{NF})$ استفاده می‌شود که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\overline{NF} = \frac{P_{no}}{kT_0\int_0^{\infty} G_a(f)\ df} = \frac{P_{no}}{kT_0 G_{\max} B} \qquad (۲۶-۲)$$

که در رابطه فوق P_{no} کل توان نویز تحویل داده شده به پایانه خروجی در پهنای باند نویزی B, و $G_{\max}$ ماکزیمم مقدار قدر مطلق تابع $G_a(f)$ است.

۲-٦- عدد نویز معادل شبکه‌های متوالی

هدف اصلی در محاسبه کارایی نویز تقویت کننده‌های چند طبقه بدست آوردن عدد نویز معادل سیستم است. در حالت کلی عدد نویز کل در پهنای باندی که پهنای باند کل سیستم است محاسبه می‌شود، نه در پهنای باند هر شبکه. برای مثال در یک گیرنده رادیویی طبقه تقویت RF پهنای باند بزرگی دارد ولی پهنای باند طبقات IF کوچک است و این طبقات مقدار نویزی که به آشکارساز می‌رسد را تعیین می‌کنند.

همانطور که قبلا به آن اشاره شد, برای یک شبکه یک طبقه نویزی در صورتیکه دمای منبع نویز ورودی برابر با T_0 داریم:

$$P_{no} = G_a\, k\,(T_0 + T_e)\,\Delta f \qquad (۲۷-۲)$$

در شکل ۲-۷ دو شبکه متوالی با گین‌های قابل دسترس متناظرشان, دماهای نویز موثر و اعداد نویز را نشان می‌دهد. یک منبع نویز با دمای استاندارد بعنوان ورودی سیستم قرار داده شده است. پهنای باند کوچک Δf بعنوان پهنای باند کل سیستم در نظر گرفته شده است. با استفاده از رابطه فوق توان نویز قابل دسترس خروجی شبکه را بصورت زیر می‌توان بدست آورد:

$$P_{no} = G_{a2}P_{no1} + P_{ne2} \qquad (۲۸-۲)$$

که در رابطه فوق P_{no1} توان نویز قابل دسترس خروجی شبکه ۱ و P_{ne2} توان نویز تولیدی شبکه ۲ است که برابرند با:

$$P_{no1} = G_{a1}P_{ni} + P_{ne1} = G_{a1}\,k\,(T_0 + T_{e1})\,\Delta f \qquad (۲۹-۲)$$

www.noandishaan.com

$$P_{ne2} = G_{a2}\, k\, T_{e2}\, \Delta f \qquad (۳۰-۲)$$

با جایگزاری (۲-۲۹) و (۲-۳۰) در (۲-۲۸) داریم:

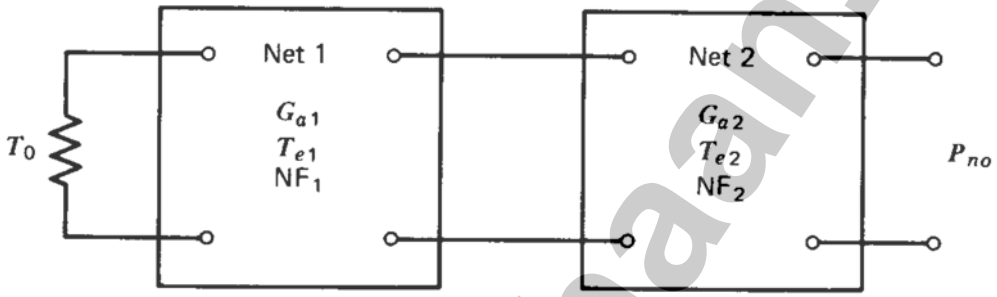
$$P_{no} = G_{a1} G_{a2}\, k\, (T_0 + T_{e1})\, \Delta f + G_{a2}\, k\, T_{e2}\, \Delta f \qquad (۳۱-۲)$$

از اینرو با بازنویسی رابطه فوق می‌توان نویز خروجی دو شبکه متوالی نویزی را از رابطه زیر بدست آورد:

$$P_{no} = G_{a1} G_{a2}\, k\, (T_0 + T_{e1} + {T_{e2}}/{G_{a1}}) \qquad (۳۲-۲)$$

مقایسه رابطه فوق با رابطه (۲-۱۸) منجر به توصیف دمای موثر ورودی دو شبکه متوالی می گردد که در آن

$$T_{e1,2} = T_{e1} + {T_{e2}}/{G_{a1}} \qquad (۳۳-۲)$$



شکل ۷: دو شبکه متوالی

در حالت کلی برای n شبکه متوالی دمای موثر معادل از رابطه زیر بدست خواهد آمد:

$$T_{e1,n} = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_{a1}} + \frac{T_{e3}}{G_{a1}G_{a2}} + \cdots + \frac{T_{en}}{G_{a1}G_{a2}\cdots G_{a(n-1)}} \qquad (۳۴-۲)$$

با جایگزاری رابطه $T_{en} = T_0 (NF_n - 1)$ در رابطه فوق می‌توان عدد نویز معادل شبکه را بر حسب عدد نویز تک‌تک شبکه‌ها بدست آورد. بر این اساس

$$NF_{1,n} = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_{a1}} + \frac{NF_2 - 1}{G_{a1}G_{a2}} + \cdots + \frac{NF_n - 1}{G_{a1}G_{a2}\cdots G_{a(n-1)}} \qquad (۳۵-۲)$$

براحتی از رابطه فوق می‌توان دریافت که عدد نویز طبقه اول یک سیستم بیشترین تاثیر را بر روی عدد نویز معادل سیستم دارد, مگر آنکه G_{a1} کوچک باشد یا NF_2 بزرگ باشد. از اینرو در طراحی یک سیستم باید تلاش نمود با انتخاب ترانزیستورهای نویز پایین و انتخاب نقطه کارهای مناسب, نویز تولیدی طبقه اول یا دوم را مینیمم کرد.

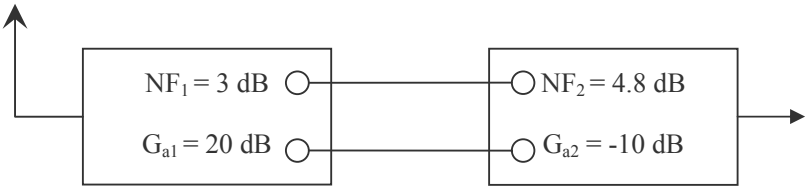
مثال: شکل زیر را در نظر بگیرید. با در نظر گرفتن اینکه پهنای باند مدار 3×10^5 هرتز و شرایط آزمایشگاهی باشد, مطلوبست تعیین مقادیر زیر:

الف) دمای نویز موثر ورودی هر طبقه

ب) محاسبه عدد نویز کلی سیستم

ج) محاسبه سیستم معادل آن

د) محاسبه توان خروجی سیستم



www.noandishaan.com

حل) در ابتدا برای انجام محاسبات بایستی مقادیر دسی بل به حقیقی برگردانده شوند. از اینرو

$$NF_1 = 2 \quad , \quad G_{a1} = 100 \quad , \quad NF_2 = 3 \quad , \quad G_{a2} = 0.1$$

الف) باتوجه به رابطه (۲-۲۴) داریم:

$$T_{e1} = T_0(NF_1 - 1) = 290(2-1) = 290^\circ K \quad , \quad T_{e2} = T_0(NF_2 - 1) = 290(3-1) = 580^\circ K$$

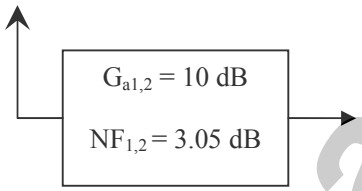
ب) با استفاده از رابطه (۲-۳۵) داریم:

$$NF_{1,2} = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_{a1}} = 2 + \frac{3-1}{100} = 2.02 \qquad or \qquad NF_{1,2(dB)} = 10\log 2.02 = 3.05\,dB$$

ج) با توجه به متوالی بودن شبکه‌ها بهره توان کل معادل با حاصلضرب بهره‌های توان است. بنابراین

$$G_{a1,2} = G_{a1}.G_{a2} = 100 \times 0.01 = 10$$

بنابراین سیستم معادل بصورت شکل زیر در می‌آید.



د) برای محاسبه توان خروجی با استفاده از سیستم معادل ان داریم:

$$P_{no} = G_{a1,2}P_{ni} + P_{ne1,2} = G_{a1,2}\ k\ (T_0 + T_{e1,2})\ B$$

با جایگزاری $T_{e1,2} = T_0(NF_{1,2} - 1)$ در رابطه فوق

$$P_{no} = G_{a1,2}\,k\,T_0\,NF_{1,2}\,B = 10 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 290 \times 2.02 \times 3 \times 10^5 = 2.42 \times 10^{-14}\ J$$

www.noandishaan.com