دید که هر چند منابع به‌طور همزمان روی سیستم ما عمل می‌کنند، ولی معمولاً یکی از آن‌ها بر پاسخ سیستم غلبه داشته و کنترل آن را در دست دارد. اصل تجمیع امکان شناسایی سریع آن منبع را برای ما فراهم می‌سازد، به‌شرطی‌که مدل سیستم با دقتی کافی خطی باشد.

در هر صورت، از دیدگاه تحلیل یک مدار، به‌جز در مواردی که سهم منبع خاصی روی یک پاسخ خواسته شده باشد، با لازدن آستین‌ها و به‌کارگیری مستقیم یکی از دو روش تحلیل گرهی یا تک‌حلقه‌ای تاکتیکی سر راست است. دلیل این‌است‌که به‌کارگیری روش تجمیع در مداری با 12 منبع مستقل نیاز به 12 بار ترسیم مدار اصلی دارد و آن وقت باید باز هم تحلیل گرهی یا حلقه را به‌کاربگیریم. ولی تکنیک تبدیل منابع اغلب ابزار مفیدی در تحلیل مدار است. اجرای روش تبدیل منابع به ما این اجازه را می‌دهد تا مقاومت‌ها و منابعی که در مدار اصلی سری یا موازی نیستند را یکپارچه کنیم. همچنین این روش اجازه می‌دهد تا همه یا حداقل بسیاری از منابع در مدار اصلی از یک نوع شده و به‌کارگیری تحلیل گرهی یا تک‌حلقه‌ای سرراست‌تر شود.

قضیه تونن به دلایل متعددی بسیار مهم است. هنگام کار با مدارهای الکترونیک، همواره نگران مقاومت معادل تونن در بخش‌های مختلف آن هستیم. این نگرانی خصوصاً در ورودی و خروجی طبقات مختلف اهمیت بیشتری دارد. علت این‌است‌که بهترین راه رسیدن به یک سیستم با رفتار بهینه، تطبیق مقاومت‌های آن‌ها است. ما مختصری از این خاصیت را در بحث انتقال توان حداکثر ملاحظه کردیم و دیدیم که مقاومت بار باید طوری انتخاب شود که با مقاومت معادل تونن مداری که بار به آن وصل است تطابق داشته باشد. با این وجود، در تحلیل‌های مکرر روزانه می‌بینیم که تبدیل بخشی از یک مدار به معادل تونن یا نورتن به اندازه تحلیل کامل آن کار می‌برد. بنابراین همچون روش تجمیع، روش‌های تونن و نورتن هنگامی اعمال می‌گردند که اطلاعات خاصی از بخش موردنظری از مدار لازم باشد.

۵-۷ خلاصه فصل و مرور

- اصل تجمیع بیان می‌دارد که پاسخ کل در یک مدار خطی را، از جمع پاسخ‌های جزئی حاصل از تک‌تک منابع که به تنهایی عمل می‌کنند می‌توان به‌دست‌آورد.
- روش تجمیع در مواردی به‌کارمی‌رود که هدف تعیین سهم یک منبع خاص در پاسخ باشد.
- مدلی عملی برای یک ولتاژ واقعی ترکیب سری مقاومت و یک منبع ولتاژ مستقل است. همچنین مدلی عملی برای یک منبع جریان واقعی، عبارت‌است‌از مقاومتی موازی با یک منبع جریان مستقل.
- تبدیل منابع به ما اجازه می‌دهد تا یک منبع ولتاژ واقعی را به یک منبع جریان واقعی تبدیل کنیم.
- تکرار تبدیل منابع که ضمن آن ترکیب مقاومت‌ها و منابع صورت می‌گیرد در ساده‌سازی مدار اهمیت بسزایی دارد.
- معادل تونن یک شبکه، مقاومتی سری با یک منبع ولتاژ مستقل است. مدار معادل نورتن نیز همان مقاومت ولی موازی با یک منبع جریان می‌باشد.
- روش‌های متنوعی برای به‌دست‌آوردن مقاومت معادل تونن وجود دارد که به بود یا نبود منابع وابسته، بستگی دارد.
- حداکثر توان انتقالی هنگامی رخ می‌دهد که مقاومت بار با مقاومت معادل تونن شبکه متصل به آن تطابق داشته باشد.
- وقتی که با یک شبکه مقاومتی اتصال Δ مواجه می‌شوید تبدیل آن به یک شبکه Y ساده است. این می‌تواند در ساده‌سازی شبکه قبل از تحلیل کمک کند. برعکس یک شبکه مقاومتی اتصال Y می‌تواند به شبکه اتصال Δ تبدیل شود تا در ساده‌کردن یک شبکه کمک کند.

۵-۸ خواندنی‌های کمکی

A book about battery technology, including characteristics of built-in resistance:

D. Linden, *Handbook of Batteries*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1995.

An excellent discussion of pathological cases and various circuit analysis theorems can be found in:

R. A. DeCarlo and P. M. Lin, *Linear Circuit Analysis*, 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2001.

مسائل

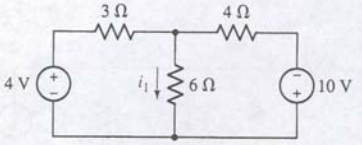
۵-۱ خطی‌بودن و تجمیع

۱. مفهوم خطی‌بودن بسیار با اهمیت است به این دلیل که سیستم‌های خطی راحت‌تر از سیستم‌های غیرخطی تحلیل می‌شوند. متأسفانه اکثر سیستم‌های واقعی طبیعتاً غیرخطی‌اند. با این وجود ممکن‌است برای یک سیستم غیرخطی مدلی خطی ایجاد کرد تا در محدوده کوچکی از متغیر کنترل معتبر باشد. به‌عنوان مثالی از این مطلب تابع نمایی ساده e^x را ملاحظه کنید. نمایش سری تیلور این تابع عبارتست‌از:

$$e^x \approx = 1 + x + \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{6} + \ldots$$

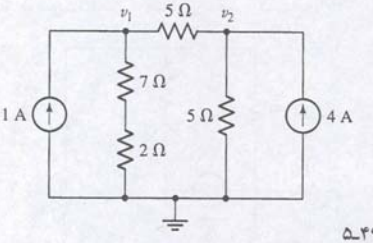
برای این تابع پس از حذف جملات x به بعد، یک مدل خطی بسازید. تابع جدید خود را در $x = 0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.10, 0.5, 1.0, 5.0$ ارزیابی کنید. برای چه مقداری از x مدل خطی تقریب خوبی را برای e^x تولید می‌کند؟

۲. در شکل ۵-۴۸، (الف) سهم منبع 4 V را در جریان i_1 مشخص کنید، (ب) سهم منبع 10 V را در i_1 معین نمایید و (ج) i_1 را تعیین کنید.



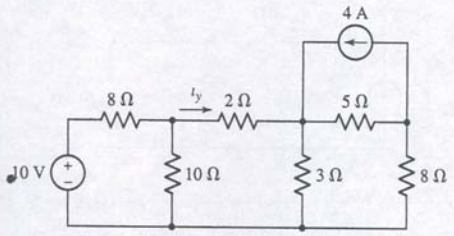
شکل ۵-۴۸

۳. با مراجعه به مدار دومنبعی شکل ۵-۴۹ سهم منبع 1 A را در v_1 به دست آورید و جریان کل درون مقاومت 7 Ω را معین سازید.



شکل ۵-۴۹

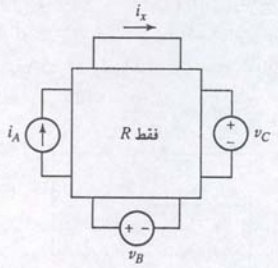
۴. اصل تجمیع را برای تعیین جریان i_y در مدار شکل ۵-۵۰ با ملاحظه تک‌تک منابع تعیین نمایید.



شکل ۵-۵۰

۵. برای مدار شکل ۵-۴۸ تنها مقادیر منبع را عوض کنید تا جریان i_1، ۱۰ برابر شود. هر دو مقدار جریان باید عوض شود و هیچ‌کدام صفر نباشد.

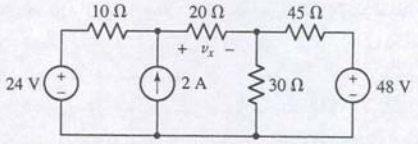
۶. وقتی در مدار شکل ۵-۵۱، منابع i_A و v_B فعالند و $v_C = 0$، $i_x = 20A$، با فعال‌بودن i_A، v_C و $v_B = 0$ آنگاه $i_x = -5A$ و بالاخره با روشن‌بودن هر سه منبع، $i_x = 12A$ است. اگر تنها منبع فعال، (الف) i_A، (ب) v_B و (ج) v_C باشد، i_x را حساب کنید. (د) اگر i_A و v_C از نظر اندازه دوبرابر شوند و v_B منفی شود، i_x را به‌دست‌آورید.



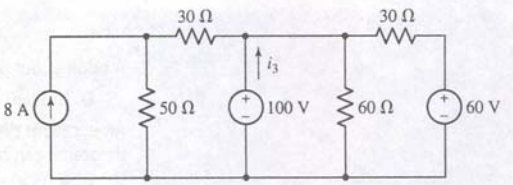
شکل ۵-۵۱

۷. با استفاده از تجمیع مقدار v_x در مدار شکل ۵-۵۲ را پیدا کنید.

۸. با به‌کارگیری تجمیع به مدار شکل ۵-۵۳، i_3 را بیابید.

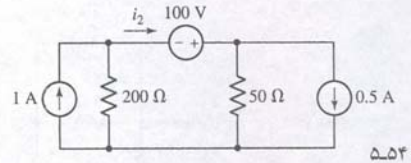


شکل ۵-۵۲



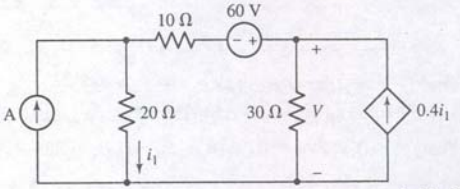
شکل ۵ـ۵۳

۹. (الف) با استفاده از قضیه تجمیع، i_2 را در مدار شکل ۵.۵۴ به‌دست‌آورید و (ب) توان جذب‌شده به‌وسیله هر یک از پنج عنصر مدار را محاسبه کنید.



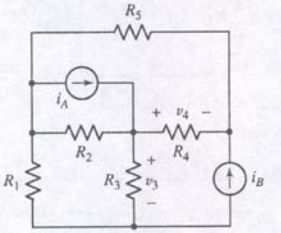
شکل ۵ـ۵۴

۱۰. تجمیع را روی مدار شکل ۵.۵۵ اعمال کرده و ولتاژ V را به‌دست‌آورید. توجه کنید که یک منبع وابسته وجود دارد.



شکل ۵ـ۵۵

۱۱. در مدار شکل ۵.۵۶: (الف) اگر $i_A = 10A$ و $i_B = 0$ باشد، آن‌گاه $v_3 = 80V$ است. اگر $i_A = 25A$ و $i_B = 0$ باشد، v_3 را پیدا کنید. (ب) اگر $i_A = 10A$ و $i_B = 25A$ باشد در این صورت $v_4 = 100V$ است ولی اگر $i_A = 25A$ و $i_B = 10A$ شود، $v_4 = -50V$ می‌گردد، اگر $i_A = 20A$ و $i_B = -10A$ باشد، v_4 را بیابید.

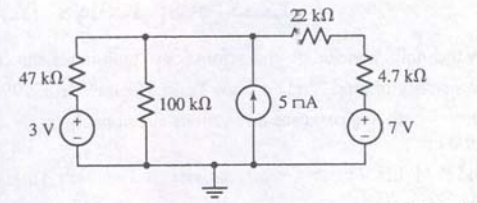


شکل ۵ـ۵۶

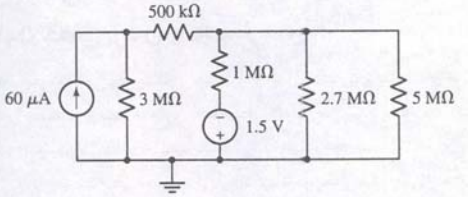
۱۲. از تجمیع برای تعیین ولتاژ دو سر منبع جریان شکل ۵.۵۷ استفاده کنید.

۱۳. از تجمیع استفاده کنید و توان تلف‌شده به‌وسیله مقاومت 500kΩ در شکل ۵.۵۸ را محاسبه نمایید.

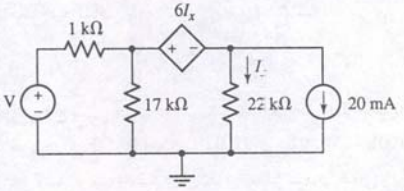
۱۴. از تجمیع برای تعیین ولتاژ دو سر مقاومت 17kΩ در شکل ۵.۵۹ استفاده نمایید. اگر میزان توان تلف‌شده مقاومت 250mW باشد حداکثر ولتاژ مثبتی که منبع 5V قبل از داغ‌شدن دارد چقدر است؟



شکل ۵ـ۵۷

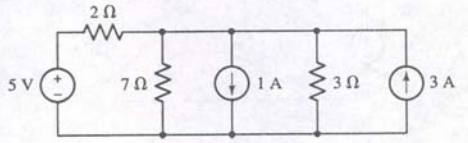


شکل ۵ـ۵۸



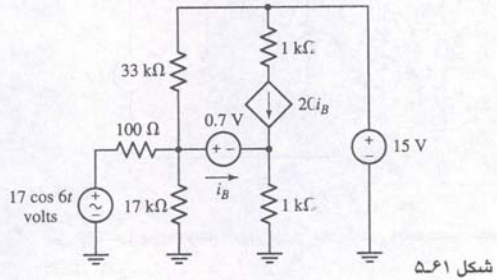
شکل ۵ـ۵۹

۱۵. کدام منبع در شکل ۵.۶۰ در توان تلف‌شده در مقاومت 2Ω سهم بیشتری دارد؟ کمترین سهم کدام است؟ مقدار توان تلف‌شده در مقاومت 2Ω را به‌دست‌آورید.



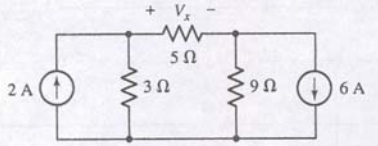
شکل ۵ـ۶۰

۱۶. از اصل تجمیع برای یافتن i_B در مدار شکل ۵.۶۱ استفاده کنید. این مدل متعلق به تقویت‌کننده ترانزیستوری دوقطبی است.



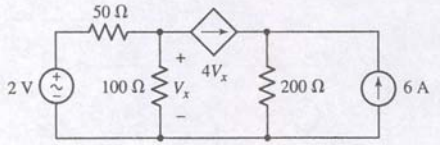
شکل ۵ـ۶۱

۱۷. برای مدار شکل ۵.۶۲: (الف) از تجمیع برای محاسبه V_x استفاده نمایید. (ب) سهم هر منبع در V_x را با استفاده از تحلیل dc sweep PSpice تحقیق کنید. یک شماتیک نام‌گذاری‌شده، خروجی probe وابسته به آن و خلاصه‌ای از نتایج را ارائه کنید.



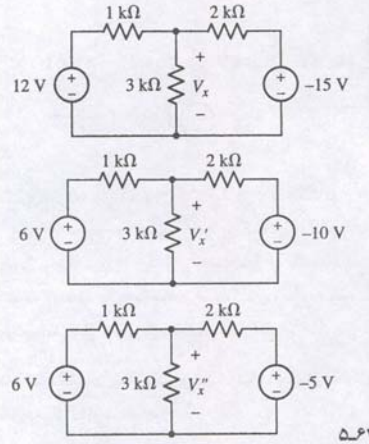
شکل ۵ـ۶۲

۱۸. برای مدار شکل ۵.۶۳: (الف) برای محاسبه v_x از تجمیع استفاده نمایید. (ب) نقش و سهم هر منبع را در v_x با تحلیل dc sweep PSpice تحقیق کنید. یک شماتیک نام‌گذاری‌شده، خروجی probe و خلاصه‌ای از نتایج را ارائه دهید.



شکل ۵ـ۶۳

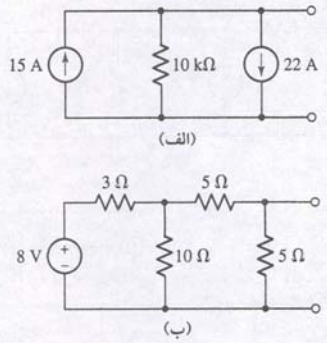
۱۹. سه مدار شکل ۵.۶۴ را ملاحظه نمایید. هر مدار را تحلیل کنید و نشان دهید که $V_x = V'_x + V''_x$ (یعنی تجمیع هنگامی ارجحیت دارد که منابع صفر شوند، ولی این اصل خیلی فراتر از آن است).



شکل ۵ـ۶۴

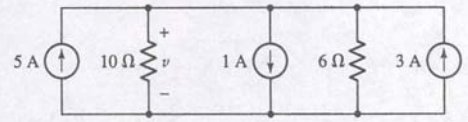
۵ـ۲ تبدیل منابع

۲۰. به کمک روش تبدیل منبع، (الف) مدار شکل ۵.۶۵ (الف) را به یک منبع ولتاژ مستقل سری با یک مقاومت تقریباً برابر و (ب) مدار شکل ۵.۶۵ (ب) را به یک منبع جریان مستقل با مقاومتی برابر و موازی با منبع تبدیل کنید. برای هر دو (الف) و (ب)، پایانه‌های سمت راست را در مدار نهایی آزاد بگذارید.



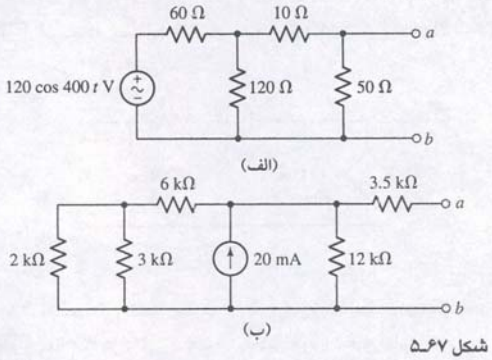
شکل ۵ـ۶۵

۲۱. (الف) از روش تبدیل منبع برای کاهش مدار شکل ۵.۶۶ به یک منبع ولتاژ واقعی سری با مقاومت Ω 10 استفاده کنید. (ب) v را محاسبه کنید. (ج) توضیح دهید که چرا مقاومت Ω 10 نباید در تبدیل منبع لحاظ شود.



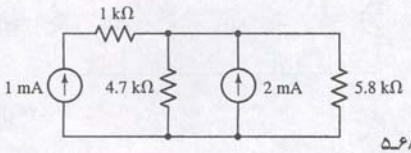
شکل ۵ـ۶۶

۲۲. از تبدیل منابع و ترکیب مقاومت‌ها برای ساده‌سازی هر دو شبکه شکل ۵.۶۷ استفاده کنید تا در سمت چپ پایانه‌های a و b فقط دو عنصر باقی بمانند.



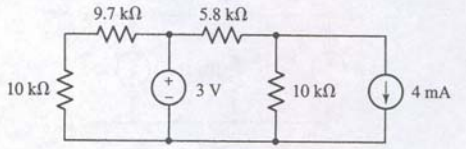
شکل ۵ـ۶۷

۲۳. با تبدیل منبع، توان تلف‌شده در مقاومت 5.8kΩ شکل ۵.۶۸ را معین نمایید.



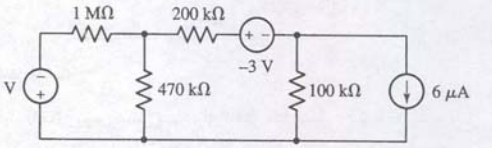
شکل ۵ـ۶۸

۲۴. با تبدیل منبع، توان تلف‌شده در مقاومت 5.8kΩ شکل ۵.۶۹ را معین نمایید.



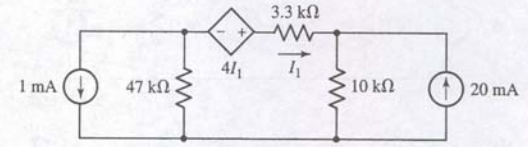
شکل ۵.۶۹

۲۵. توان تلف‌شده به‌وسیله مقاومت 1MΩ را با استفاده از تبدیل منبع در مدار شکل ۵.۷۰ به‌دست آورید.



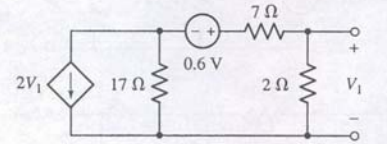
شکل ۵.۷۰

۲۶. با تبدیل منبع، مدار شکل ۵.۷۱ را ساده کنید و I_1 را مشخص نمایید.



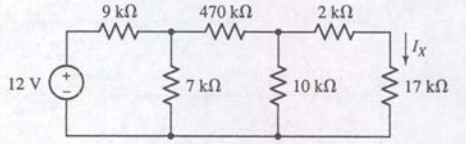
شکل ۵.۷۱

۲۷. (الف) با تبدیل منبع مدار شکل ۵.۷۲ را ساده کنید و سپس V_1 را به‌دست آورید. (ب) صحت تحلیل خود را با اجرای تحلیل PSpice مدار شکل ۵.۷۲ تحقیق نمایید.



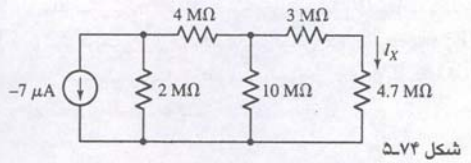
شکل ۵.۷۲

۲۸. (الف) با تکرار تبدیل منبع، I_x را در شکل ۵.۷۳ بیابید. (ب) با تحلیل PSpice در شکل ۵.۷۳، صحت تحلیل خود را تحقیق نمایید.



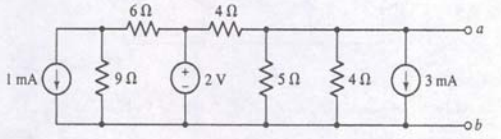
شکل ۵.۷۳

۲۹. با تکرار تبدیل منبع، جریان I_x را در مدار شکل ۵.۷۴ معین کنید.



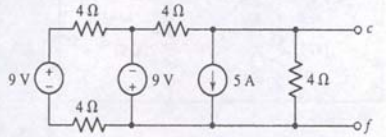
شکل ۵.۷۴

۳۰. مدار شکل ۵.۷۵ را به یک منبع موازی با یک مقاومت تبدیل نمایید.



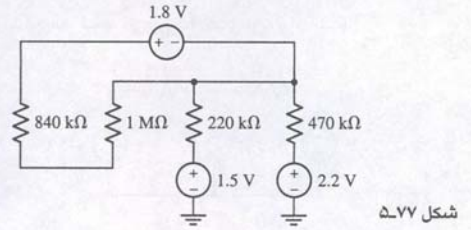
شکل ۵.۷۵

۳۱. با تبدیل منبع مدار شکل ۵.۷۶ را به یک منبع جریان موازی با یک مقاومت تبدیل نمایید.



شکل ۵.۷۶

۳۲. توان تلف‌شده به‌وسیله مقاومت 1MΩ در مدار شکل ۵.۷۷ را معین کنید.



شکل ۵.۷۷

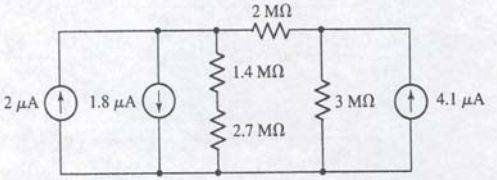
۳۳. اندازه‌گیری‌های جدول ۵.۱ روی یک باطری 1.5V آلکالاین انجام شده است. از اطلاعات موجود استفاده کرده، یک مدل منبع ولتاژ عملی دوعنصری برای باطری بسازید تا در محدودهٔ 1 الی 20mA نسبتاً دقیق باشد. توجه کنید که علاوه بر خطای اندازه‌گیری مسلم، مقاومت درونی باطری به مقدار قابل توجهی در محدوده اندازه‌گیری تغییر می‌یابد.

جدول ۵.۱ مشخصات اندازه‌گیری‌شدهٔ ولتاژ-جریان یک باطری 1.5V متصل به یک مقاومت متغیر.

جریان خروجی (mA)	ولتاژ پایانه‌ای (V)
0.0000589	1.584
0.3183	1.582
1.4398	1.567
7.010	1.563
12.58	1.558

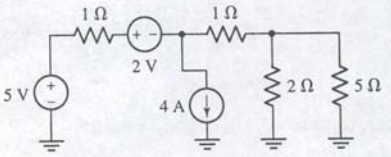
۳۴. از داده‌های جدول ۵.۱ برای ساخت یک مدل منبع جریان واقعی دوعنصری، که در محدوده 1 الی 20mA نسبتاً دقیق است، استفاده نمایید. توجه کنید که علاوه بر خطای مسلم اندازه‌گیری مقاومت داخلی باطری به میزان قابل توجهی در محدوده جریان اندازه‌گیری شده تغییر می‌کند.

۳۵. مدار شکل ۵.۷۸ را به یک منبع ولتاژ موازی با یک مقاومت تقلیل دهید.



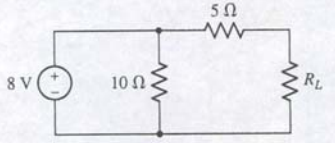
شکل ۵.۷۸

۳۶. توان جذب‌شده در مقاومت 5Ω شکل ۵.۷۹ چقدر است؟



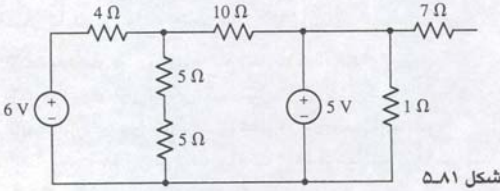
شکل ۵.۷۹

۳۷. (الف) مدار شکل ۵.۸۰ را به یک منبع جریان واقعی موازی با R_L تبدیل کنید. صحت پاسخ خود را با PSpice با مقدار 5 Ω برای R_L تحقیق کنید. برای هر مدار شماتیک مناسب را تحویل دهید و در آن ولتاژ دو سر R_L را مشخص کنید.



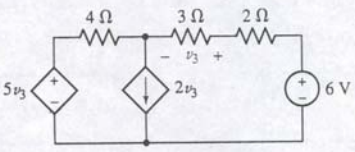
شکل ۵.۸۰

۳۸. (الف) مدار شکل ۵.۸۱ را تا حد ممکن کاهش دهید، دو منبع ولتاژ را به منابع جریان تبدیل نمایید، سپس توان تلف‌شده در مقاومت 5 Ω بالا را محاسبه کنید. (ب) صحت پاسخ خود را با شبیه‌سازی هر دو مدار به وسیله PSpice تحقیق نمایید. یک مدار با برچسب‌های مناسب را برای هر مدار تحویل دهید به نحوی که توان تلف‌شده در مقاومت موردنظر به وضوح مشخص باشد. (ج) آیا مقدار 1 Ω یا 7 Ω در پاسخ شما به هر طریقی تأثیرگذارند. توضیح دهید؟ بگویید چرا بلی و چرا خیر؟



شکل ۵.۸۱

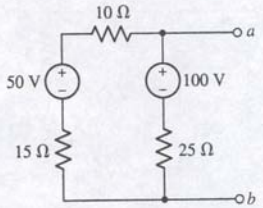
۳۹. برای مدار شکل ۵.۸۲ همه منابع را (هم وابسته و هم مستقل) به منابع جریان تبدیل کنید، منابع مستقل را ترکیب نموده و v_3 را محاسبه نمایید.



شکل ۵.۸۲

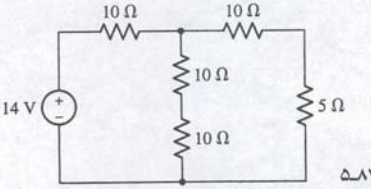
۵.۳ مدارهای معادل تونن و نورتن

۴۰. (الف) معادل تونن را در پایانه‌های a و b شکل ۵.۸۳ بیابید. به مقاومت متصل به a و b چقدر توان منتقل می‌گردد به‌شرطی‌که R_{ab} برابر (ب) 50Ω و (ج) 12.5Ω باشد.



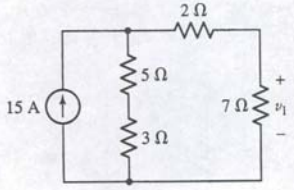
شکل ۵.۸۳

۴۱. (الف) قضیه تونن را برای ساده‌کردن شبکه متصل به مقاومت 5 Ω شکل ۵.۸۴ (الف) به کار ببرید. (ب) توان جذب‌شده به وسیله مقاومت 5 Ω را با استفاده از مدار ساده‌شده حساب کنید. (ج) صحت حل خود را با PSpice به دست آورید. شماتیک برچسب‌خورده را برای هر مدار با توان موردنظر مشخص‌شده تحویل دهید.



شکل ۵.۸۴

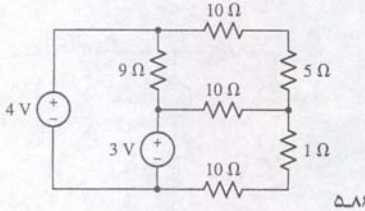
۴۲. (الف) معادل تونن شبکه متصل به مقاومت 7 Ω شکل ۵.۸۵ را به دست آورید. (ب) معادل نورتن شبکه متصل به مقاومت 7 Ω را پیدا کنید. (ج) ولتاژ v_1 را برای هر دو مدار خود محاسبه کنید. (د) مقاومت 7 Ω را با یک مقاومت 1 Ω جایگزین کرده و v_1 را دوباره برای هر مدار محاسبه نمایید.



شکل ۵.۸۵

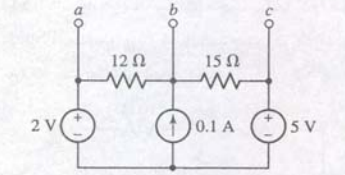
۴۳. (الف) یک لامپ تنگستن به ولتاژ تست 10 mV وصل است و جریان $400\,\mu A$ اندازه‌گیری شده است. معادله تونن لامپ چیست؟ اکنون لامپ به یک منبع تغذیه 110 V متصل است و جریان 363.6 mA اندازه‌گیری شده است. معادل تونن را بر اساس این اندازه‌گیری معین نمایید. چرا معادل تونن لامپ به شرایط تست وابسته است، و چه استدلالی اگر بخواهیم مدار حاوی لامپ را تحلیل کنیم، دارید.

۴۴. (الف) معادل‌های تونن و نورتن را برای شبکه متصل به مقاومت 1 Ω شکل ۵.۸۶ پیدا کنید. (ب) توان جذب‌شده به وسیله مقاومت 1 Ω را با استفاده از مدارهای معادل محاسبه کنید. (ج) با PSpice صحت را تحقیق نمایید. شماتیک هر سه مدار را با مشخص‌نمودن توان مورد تقاضا تحویل دهید.



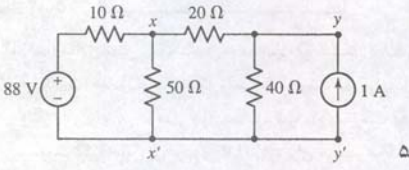
شکل ۵.۸۶

۴۵. برای شبکه شکل ۵.۸۷: (الف) پایانه c را حذف کنید و معادل تونن را از پایانه‌های a و b بیابید. (ب) پایانه a را حذف کنید و مرحله قبل را برای b و c تکرار نمایید.



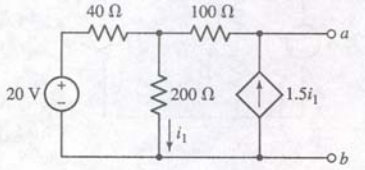
شکل ۵.۸۷

۴۶. معادل تونن شبکه شکل ۵.۸۸ را از پایانه‌های: (الف) x و x'، (ب) y و y'، به‌دست‌آورید.



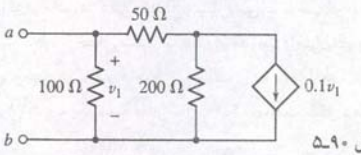
شکل ۵.۸۸

۴۷. (الف) معادل تونن شبکه شکل ۵.۸۹ را بیابید. (ب) چه توانی به مقاومت 100Ω در a و b انتقال می‌یابد؟



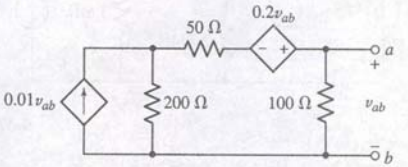
شکل ۵.۸۹

۴۸. معادل نورتن شبکه شکل ۵.۹۰ را بیابید.



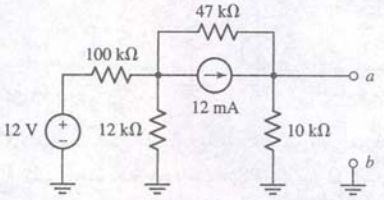
شکل ۵.۹۰

۴۹. معادل تونن شبکه دو پایانه شکل ۵.۹۱ را معین کنید.



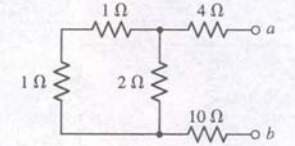
شکل ۵.۹۱

۵۰. معادل تونن شکل ۵.۹۲ را به‌دست‌آورید.



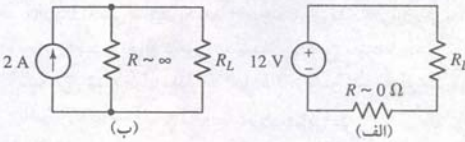
شکل ۵.۹۲

۵۱. برای شبکه شکل ۵.۹۳: (الف) معادل تونن و (ب) معادل نورتن را تعیین نمایید.



شکل ۵.۹۳

۵۲. برای مدار شکل ۵.۹۴ (الف) معادل نورتن شبکه متصل به R_L را به‌دست‌آورید. برای مدار شکل ۵.۹۴ (ب) معادل تونن شبکه متصل به R_L را تعیین کنید.



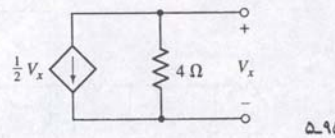
شکل ۵.۹۴

۵۳. معادل‌های تونن و نورتن شبکه شکل ۵.۹۵ را بیابید.

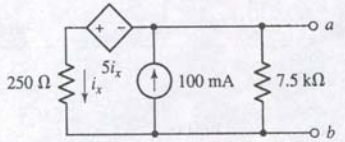
۵۴. معادل‌های تونن و نورتن شبکه شکل ۵.۹۶ را تعیین کنید.

۵۵. معادل‌های تونن و نورتن شبکه شکل ۵.۹۷ را به‌دست‌آورید.

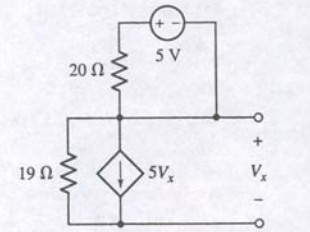
۵۶. مقاومت معادل تونن از دید مقاومت 2kΩ در مدار شکل ۵.۹۸ را پیدا کنید. از خط‌چین شکل چشم‌پوشی نمایید.



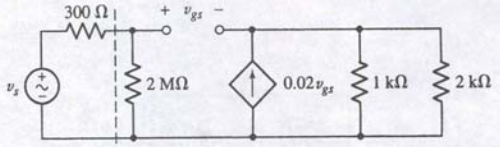
شکل ۵.۹۵



شکل ۵.۹۶



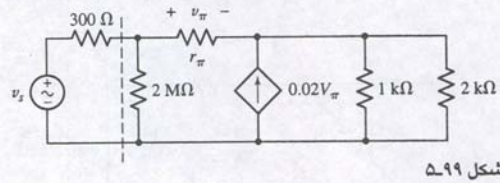
شکل ۵.۹۷



شکل ۵.۹۸

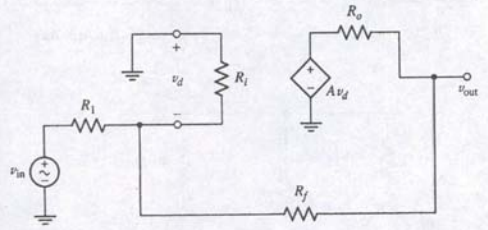
۵۷. با مراجعه به شکل ۵.۹۸، مقاومت معادل تونن مدار سمت راست خط‌چین را معین نمایید. این مدار یک تقویت‌کننده ترانزیستوری سورس مشترک است. شما مقاومت ورودی آن را محاسبه می‌نمایید.

۵۸. با توجه به شکل ۵.۹۹، مقاومت معادل تونن مدار سمت راست خط‌چین را به‌دست‌آورید. این مدار یک تقویت‌کننده ترانزیستوری امیتر مشترک است و شما مقاومت ورودی آن را محاسبه می‌کنید.



شکل ۵.۹۹

۵۹. مدار شکل ۵.۱۰۰ یک مدل نسبتاً دقیقی از یک تقویت‌کننده عملیاتی (op-amp) است. در مواردی که R_i و A خیلی بزرگ‌اند، $R_o \sim 0$ است، یک مقاومت باری (مانند بلندگو) متصل بین زمین و پایانه v_{out} ولتاژ $-R_f/R_1$- برابر بزرگتر از سیگنال v_{in} می‌بینند. مدار معادل تونن را پیدا کنید.

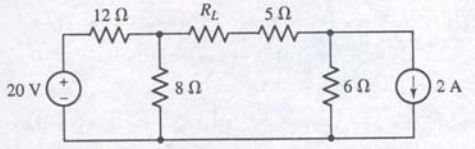


شکل ۵.۱۰۰

۵.۴ حداکثر انتقال توان

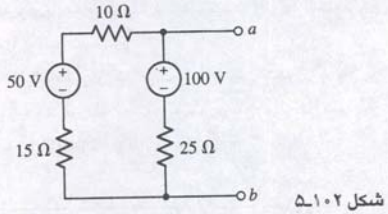
۶۰. با فرض این‌که می‌توانیم مقاومت معادل پریز برق خود را تعیین نماییم چرا سازندگان توستر، آون، مایکروویو و تلویزیون مقاومت معادل تونن هر وسیله را با آن تطبیق نمی‌دهند. آیا این کار انتقال حداکثر توان را موجب نمی‌شود.

۶۱. اگر بتوان هر مقداری برای R_L در شکل ۵.۱۰۱ انتخاب کرد، حداکثر توان مصرفی در R_L چقدر می‌باشد؟



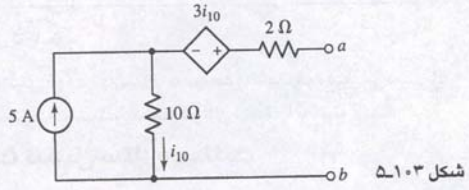
شکل ۵.۱۰۱

۶۲. (الف) معادل تونن را در پایانه‌های a و b برای شکل ۵.۱۰۲ به‌دست‌آورید. چقدر توان به مقاومت متصل به a و b منتقل می‌گردد به‌شرطی‌که R_{ab} برابر با (ب) 10Ω و (ج) 75Ω باشد؟



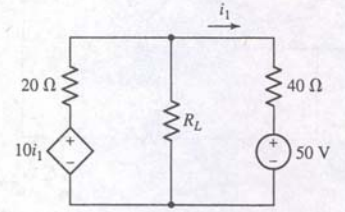
شکل ۵.۱۰۲

۶۳. (الف) معادل تونن شبکه شکل ۵.۱۰۳ را معین کنید و (ب) حداکثر توان دریافتی از آن چقدر است؟



شکل ۵.۱۰۳

۶۴. در شکل ۵.۱۰۴: (الف) مقدار R_L که حداکثر توان به آن منتقل می‌گردد چقدر است، (ب) ولتاژ دو سر R_L را محاسبه کنید (علامت + در بالا).



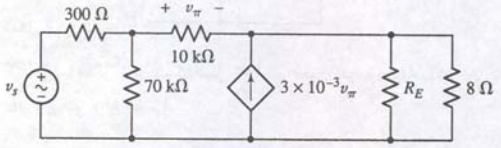
شکل ۵.۱۰۴

۶۵. یک منبع ولتاژ dc واقعی جریان 2.5A را وقتی یک لحظه اتصال کوتاه شده، فراهم ساخته و می‌تواند 80W توان را به بار 20Ω منتقل سازد. (الف) ولتاژ مدار باز را پیدا کنید. (ب) حداکثر توانی که می‌تواند به مقاومت منتخب بهینه انتقال دهد چقدر است؟ برای توان ماکزیمم، R_L چقدر باید باشد؟

۶۶. یک منبع جریان واقعی 10W توان را به مقاومت بار 250Ω و 20W توان را به یک بار 80Ω انتقال می‌دهد. یک مقاومت R_L با ولتاژ v_L و جریان i_L به آن وصل است. مقادیر R_L ، i_L و v_L را پیدا کنید اگر (الف) $v_L i_L$ حداکثر باشد، (ب) v_L حداکثر باشد و (ج) i_L حداکثر باشد.

۶۷. یک باطری می‌تواند به‌دقت به‌عنوان یک منبع ولتاژ 9V سری با مقاومت 1.2Ω در محدوده مورد نظری از جریان، مدل‌سازی شود. اگر یک مقاومت بی‌نهایت به باطری وصل شود هیچ جریانی از باطری عبور نمی‌کند. ضمناً می‌دانیم که حداکثر توان به مقاومت 1.2Ω انتقال می‌یابد، و به مقاومت‌های 1.1Ω و 1.3Ω توان منتقل‌شده کمتر است. با این وجود اگر پایانه‌های باطری را اتصال کوتاه کنیم (البته پیشنهاد نمی‌شود)، جریان بیشتری نسبت به مقاومت 1.2Ω به‌دست خواهیم آورد. آیا این در تضاد با آن‌چه برای بار مقاومت 1.2Ω دیدیم نیست (آیا توان متناسب با i^2 نمی‌باشد)؟ توضیح دهید.

۶۸. مدار شکل ۵.۱۰۵ بخشی از یک تقویت‌کننده صوتی است. اگر بخواهیم حداکثر توان را به بلندگوی 8Ω منتقل کنیم، چه مقداری از R_E مورد نیاز است؟ حل خود را با PSpice به تأیید برسانید.

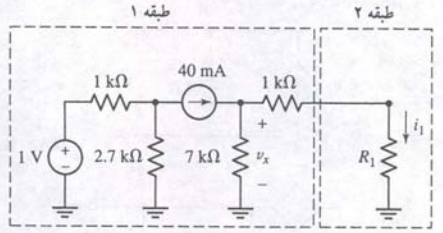


شکل ۵.۱۰۵

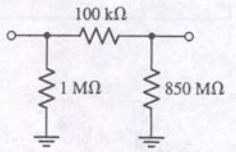
۶۹. شکل ۵.۱۰۶ مداری را که به دو بخش تفکیک شده نشان می‌دهد. R_1 را طوری انتخاب کنید که حداکثر توان از طبقه 1 به طبقه 2 منتقل گردد.

۵.۵ تبدیل ستاره ـ مثلث

۷۰. شبکه شکل ۵.۱۰۷ را به شبکه Y تبدیل نمایید.

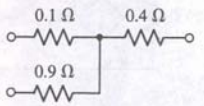


شکل ۵.۱۰۶



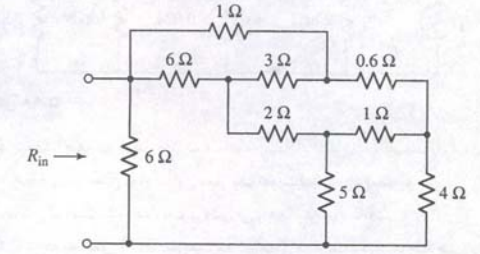
شکل ۵.۱۰۷

۷۱. شبکه شکل ۵.۱۰۸ را به شبکه Δ تبدیل کنید.



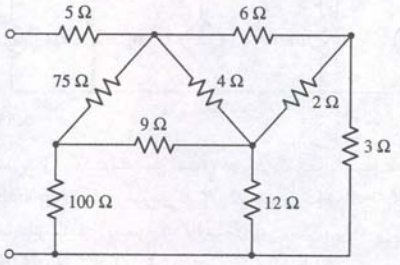
شکل ۵.۱۰۸

۷۲. R_{in} را در شبکه شکل ۵.۱۰۹ پیدا کنید.



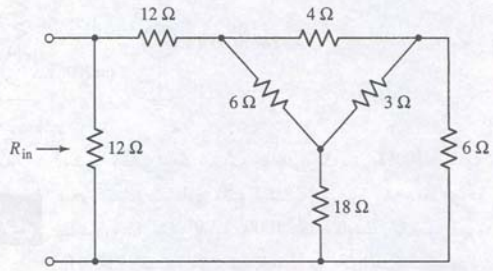
شکل ۵.۱۰۹

۷۳. از تبدیل Δ-Y و Y-Δ برای یافتن مقاومت شبکه شکل ۵.۱۱۰ استفاده نمایید.



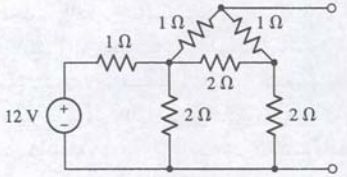
شکل ۵.۱۱۰

۷۴. R_{in} را برای مدار شکل ۵.۱۱۱ بیابید.



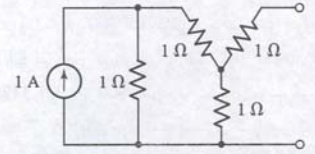
شکل ۵.۱۱۱

۷۵. معادل تونن مدار شکل ۵.۱۱۲ را به‌دست‌آورید.



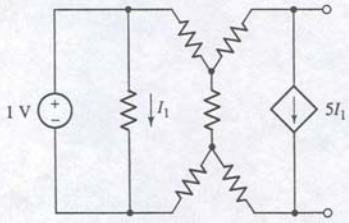
شکل ۵.۱۱۲

۷۶. معادل نورتن مدار شکل ۵.۱۱۳ را پیدا کنید.



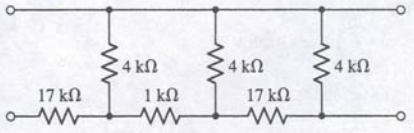
شکل ۵.۱۱۳

۷۷. اگر همه مقاومت‌ها در شکل ۵.۱۱۴ برابر 10Ω باشند، معادل تونن را برای مدار به‌دست‌آورید.



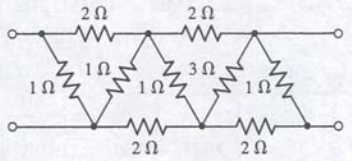
شکل ۵.۱۱۴

۷۸. (الف) شبکه شکل ۵.۱۱۵ را با سه مقاومت Y جایگزین کنید. (ب) تحلیل PSpice را برای تحقیق معادل‌بودن جواب به‌کاربرید (راهنمایی: یک مقاومت بار اضافه نمایید).



شکل ۵.۱۱۵

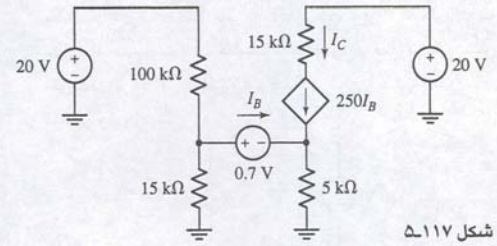
۷۹. (الف) به‌جای شبکه شکل ۵.۱۱۶ یک شبکه Δ سه مقاومتی قرار دهید. (ب) با تحلیل PSpice صحت جواب را نشان دهید. (راهنمایی: یک مقاومت بار اضافه نمایید).



شکل ۵.۱۱۶

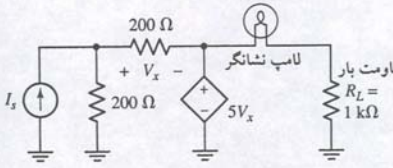
۵.۶ انتخاب روش: مقایسه انواع تکنیک‌ها

۸۰. مدار شکل ۵.۱۱۷ مدل نسبتاً دقیقی برای یک ترانزیستور دوقطبی پیوندی در ناحیه فعال مستقیم است. جریان کلکتور I_C را به‌دست‌آورید. صحت پاسخ خود را با PSpice تحقیق کنید.



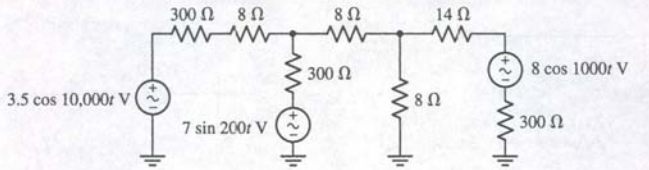
شکل ۵.۱۱۷

۸۱. مقاومت بار در شکل ۵.۱۱۸ می‌تواند به راحتی تا 1W توان را قبل از داغ‌شدن و آتش‌گرفتن تلف نماید. لامپ را می‌توان مقاومتی 10.6Ω تصور کرد، به‌شرطی‌که جریانی کمتر از 1A از آن عبور کند. برای بیش از 1A ، مقاومت آن 15Ω می‌باشد. حداکثر مقدار مجاز I_s چقدر است؟ پاسخ خود را با PSpice تست کنید.



شکل ۵.۱۱۸

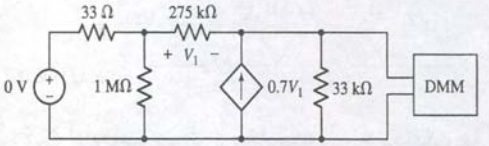
۸۲. گوش انسان می‌تواند امواج بین 20Hz تا 20kHz را بشنود. اگر هر مقاومت در شکل ۵.۱۱۹ یک بلندگوی 8Ω باشد، کدام‌یک از سیگنال ژنراتورها (که به‌عنوان یک منبع ولتاژ عملی مدل‌سازی می‌شود)



شکل ۵ـ۱۱۹

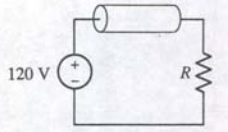
بیشترین صدا را تولید می‌کند؟ (بلندی صدا را متناسب با توان انتقالی به بلندگو تصور کنید) چون هر منبع در فرکانس متفاوتی عمل می‌کند، تجمیع توان در این‌جا قابل اعمال است.

۸۳. یک DMM طبق شکل ۵ـ۱۲۰ به مقاومتی وصل است. اگر مقاومت داخلی DMM برابر 1MΩ باشد، به هنگام اندازه‌گیری مقاومت، چه مقدار نمایش داده می‌شود؟



شکل ۵ـ۱۲۰

۸۴. یک ماده فلزی از یک شهاب‌سنگ در روستایی از ایالت ایندیانا یافت شده است. این ماده دارای مقاومت ویژه 50Ωcm بوده و در یک سیلندر جاسازی شده است. سیلندر به مدار شکل ۵ـ۱۲۱ وصل است و وابستگی‌های $T = 200P^{0.25}°C$ دارد، که توان P انتقال‌یافته به سیلندر برحسب وات است. مقاومت ماده آنقدرها به دما وابستگی نشان نمی‌دهد. اگر $R = 10\Omega$ باشد و حداکثر توان را جذب کند، دمای سیلندر چقدر است؟



شکل ۵ـ۱۲۱

۸۵. به‌عنوان بخشی از یک سیستم حفاظتی، یک سیم 100Ω نازک به پنجره با ماده غیرهادی وصل است. با این فرض که فقط دوازده باطری قابل شارژ 1.5V ، 1000 عدد مقاومت و یک بوق پیزو 2900Hz داشته باشیم که 15mA در 6V را می‌کشد، مداری طراحی کنید که بدون هر حرکت مکانیکی اجزاء در صورت شکسته‌شدن پنجره یا پاره‌شدن سیم، بوق را به‌صدا درآورد. توجه کنید که بوق به حداقل 6V dc نیاز دارد (حداکثر نیز 28V است).

۸۶. سه لامپ 45W دراصل به‌صورت یک شبکه Y با یک منبع 120V ac آرایش یافته است. وسط این اتصال با صفر آن به کارنرفته است. اگر شدت لامپ متناسب با توان کشیده‌شده به‌وسیله آن باشد، یک مدار جدید 120V ac طراحی کنید، به نحوی که سه لامپ آرایش Δ داشته و شدتی برابر با وضعیت Y داشته باشند. صحت طراحی را به‌وسیله PSpice با مقایسه توان مصرفی هر لامپ در مدار (آن‌ها را با مقاومت‌های مناسب مدل‌سازی نمایید) با توانی که هر کدام در شبکه Y مصرف می‌کردند، تحقیق کنید.

۸۷. یک LED قرمزرنگ مخصوص دارای حداکثر میزان جریان 35mA است و اگر از آن تجاوز کند، داغی و خرابی ناشی خواهد شد. مقاومت LED غیرخطی است، ولی سازنده حداقل مقاومت 47Ω و حداکثر 117Ω را برای آن اعلام کرده است. برای روشن‌کردن LED تنها باطری 9W موجود است. مداری طراحی کنید که بدون آسیب‌رساندن، حداکثر توان ممکن را به LED حمل کند. تنها از مقادیر استاندارد مقاومت استفاده نمایید.

فصل ششم

تقویت‌کننده عملیاتی

مقدمه

تاکنون به‌قدر کافی قوانین اصلی و تکنیک‌های تحلیل مدار به ما معرفی شده است تا بتوانیم آن‌ها را به چند مدار عملی جالب اِعمال کنیم. در این فصل ما بر یک وسیله الکتریکی مفید به نام تقویت‌کننده‌های عملیاتی [1] یا به‌طور خلاصه op amp توجه خواهیم کرد.

مفاهیم کلیدی

- مشخصات ایده‌آل op amp ها
- تقویت‌کننده‌های معکوس‌کننده و معکوس‌نکننده
- مدارهای تقویت‌کننده جمع و تفاضل
- طبقات op amp پی‌درپی
- استفاده از op amp در ساخت منابع ولتاژ و جریان
- مشخصات غیرایده‌آل op amp ها
- بهره ولتاژ و پسخورد
- مقایسه‌گرهای پایه مدارهای تقویت‌کننده در وسایل اندازه‌گیری

۶ـ۱ پیش‌زمینه

پیدایش تقویت‌کننده عملیاتی اولیه به دهه ۱۹۴۰ باز می‌گردد که در آن زمان مدارهای اصلی با استفاده از لامپ‌های خلاء برای انجام جمع، تفریق، تقسیم، مشتق‌گیری و انتگرال‌گیری ساخته شد و به این ترتیب انجام آن‌ها با کامپیوترهای آنالوگ اولیه امکان‌پذیر گردید. این پیدایش ساخت کامپیوترهای آنالوگ (در برابر دیجیتال) را به دنبال داشت تا معادلات دیفرانسیل پیچیده را حل کند. اولین قطعه op amp تجاری که K2-W نام داشت، در حدود سال ۱۹۵۲ به وسیله Philbrick Researches inc. از بوستون ساخته شد و تا اول دهه ۱۹۷۰ ادامه یافت (شکل ۱ـ۶(الف)). این قطعات لامپ خلاء [2] اولیه با ۳ اونس وزن (85 g) و ابعاد $1\frac{33}{64}" \times 2\frac{9}{64}" \times 4\frac{7}{64}"$ (3.8 cm × 5.4 cm × 10.4 cm)، حدود US$0.22 فروخته می‌شد برعکس op amp های مدرن مدار مجتمع (IC) مانند Fairchild KA741 وزنی کمتر از 500 mg و ابعاد 5.7 mm × 4.9 mm × 1.8 mm داشته و تقریباً به US$0.22 فروخته می‌شوند.

در مقایسه با op amp های مبتنی بر لامپ‌های خلاء، op amp های مدرن از حدود 25 ترانزیستور یا بیشتر به همراه چندین مقاومت و خازن جهت تولید مشخصه رفتاری مطلوب در یک تراشه سیلیکان ساخته شده‌اند. بنابراین آن‌ها در سطح ولتاژ تغذیه بسیار پایین‌تری (مثلاً ±18 V در برابر ±300 V مربوط به K2-W) کار می‌نمایند و قابل اطمینان‌تر و کوچکترند (شکل ۱ـ۶(ب) و (ج)). در بعضی موارد IC ممکن‌است چندین op amp داشته باشد.

(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۱ـ۶ مدار Philbrick op amp K2-W بر اساس یک جفت لامپ خلاء 12AX7A . (ب) LMV321 op amp که در انواع تلفن‌ها و بازی‌ها به کار می‌رود. (ج) LMC6035 op amp که در آن ۱۱۴ ترانزیستور فشرده‌شده و به قدری کوچک است که در بالای یک میخ قرار می‌گیرد.

1. operational amplifier 2. vacuum tube