مقاله

مطالعهٔ تطبیقی روش‌های افزایش برد سیگنال اکوستیکی زیر آب مبتنی بر افزایش توان

فرشید نصرفرد جهرمی*
کارشناسی ارشد مهندسی برق
دانشگاه شیراز
f.nasrfard@gmail.com

عبدالخالق محمدیان دهزیری
کارشناسی ارشد مهندسی برق
دانشگاه صنعتی مالک اشتر
mhmdian1@yahoo.com

حسین خسروانیان
کارشناسی ارشد الکترواکوستیک
پژوهشگر دانشگاه صنعتی مالک اشتر
hoseinkhosravanian@chmail.ir

رضا مردانی
دکترای فیزیک
استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر
mardani_r@birjand.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۲۴

چکیده

در محیط زیر آب مناسب‌ترین ابزار انتقال اطلاعات، امواج اکوستیکی است. مسافتی که سیگنال‌های اکوستیکی درون آب طی می‌کنند به دو عامل فرکانس و توان بستگی دارد، به‌گونه‌ای‌که هرچه فرکانس کمتر و توان بیشتر باشد، سیگنال مسافت بیشتری طی خواهد کرد. در این مقاله، نخست روش‌های متنوع افزایش برد سیگنال اکوستیکی زیر آب، مبتنی بر افزایش توان تقویت‌کننده‌های صوتی، با ذکر معایب و مزایای هر یک بررسی می‌شود. سپس با توجه به اینکه تقویت‌کننده‌های صوتی جهت ارسال سیگنال اکوستیکی بایستی به مبدل[1] متصل شوند و لذا تطبیق امپدانس مناسب به‌خصوص به‌صورت پهن‌باند بین تقویت‌کننده و مبدل از اهمیت قابل توجهی برخودار است، روش‌های گوناگون تطبیق امپدانس به اجمال مورد بحث قرار می‌گیرد و در پایان تمامی روش‌های مطرح‌شده جمع‌بندی می‌شوند.

واژگان کلیدی: امواج اکوستیکی، تقویت‌کنندهٔ توان صوتی، مبدل پهن‌باند، مدار تطبیق امپدانس، ضریب کیفیت

۱. مقدمه

اکوستیک را دانش تولید، ارسال و دریافت انرژی ارتعاشی تعریف کرده‌اند. همان‌گونه که در جو بهترین ابزار انتقال اطلاعات امواج الکترومغاطیس است، در زیر آب نیز مناسب‌ترین ابزار امواج اکوستیکی است، لذا برای فعالیت در حوزهٔ سازه‌ها و شناورهای سطحی و زیرسطحی، با توجه به عملکرد بسیاری از حسگرها و تجهیزات اندازه‌گیری و ارتباطی با امواج اکوستیکی، ضروری است در این زمینه فعالیت‌های مناسبی انجام شود. امروزه کاربردهای فراوانی برای امواج اکوستیکی در زیر آب به‌وجود آمده است. برخی از این کاربردها عبارت‌اند از [۱]:

۱. در صنایع دفاعی و نظامی اژدرهایی تولید می‌شوند که با استفاده از خاصیت اکوستیک، در بستر اقیانوس بدون

هیچ صدایی می‌توانند به اهداف از پیش تعیین‌شده اصابت کنند.

۲. تحریک مین‌های دریایی توسط صدای کشتی‌ها و انفجار آنها به‌هنگام عبور کشتی، بدون برخورد کشتی با مین

۳. تأمین ارتباط زیر آب از سوی موج‌های اکوستیکی

۴. استفاده از ژرف‌یاب‌های اکوستیکی برای تعیین محل تجمع انواع آبزیان و ماهی‌ها

سیگنال‌های اکوستیکی درون آب تا کیلومترها سیر می‌کنند و انتقال (ارسال و دریافت) اطلاعات را ممکن می‌سازند. مسافتی که سیگنال‌های اکوستیکی درون آب می‌پیمایند به دو عامل فرکانس و توان بستگی دارد، به‌گونه‌ای‌که هرچه فرکانس کمتر و توان بیشتر باشد، سیگنال مسافت بیشتری را طی خواهد کرد [۲-۳].

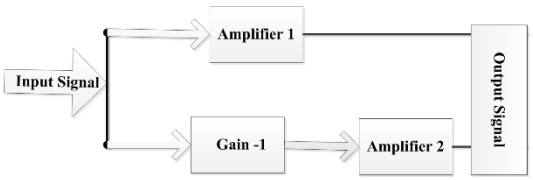
همان‌طور که می‌دانیم پس از اینکه سیگنال تقویت شد، ارسال سیگنال اکوستیکی در زیر آب توسط مبدل صورت می‌پذیرد؛ لذا چون تطبیق امپدانس مناسب بین تقویت‌کننده و مبدل منجر به انتقال حداکثر توان از یک طبقه به طبقه‌ای دیگر می‌شود، این موضوع نیز اهمیت خاصی پیدا می‌کند. در این مقاله ابتدا روش‌های افزایش برد سیگنال اکوستیکی زیر آب مبتنی بر افزایش توان سیگنال با ذکر معایب و مزایا بررسی و پس از آن دربارهٔ روش‌های متنوع تطبیق امپدانس بحث می‌شود. در پایان تمامی روش‌های مطرح‌شده جمع‌بندی می‌گردند.

۲. افزایش برد سیگنال آکوستیکی زیر آب

ساختار مبدل‌های پیزوالکتریک[۲] به‌گونه‌ای است که اگر ولتاژ اعمالی به آنها افزایش یابد، سیگنال اکوستیکی را می‌توان به مسافت‌های دورتری ارسال کرد. در این مقاله، با استفاده از افزایش ولتاژ سیگنال اکوستیکی ورودی مبدل برد آن افزایش می‌یابد. بر همین اساس، دربارهٔ بسیاری از راهکارهای موجود بحث و معایب و مزایای هر یک تشریح می‌شود.

۲-۱. استفاده از دو تقویت‌کننده به‌صورت جداگانه و جمع خروجی آنها

در این طرح، تقویت سیگنال توسط دو تقویت‌کننده صورت می‌گیرد. بدین صورت که ورودی یکی از تقویت‌کننده‌ها خود سیگنال و ورودی دیگری معکوس سیگنال است؛ یعنی ابتدا ورودی یکی از تقویت‌کننده‌ها به یک مدار با گین ۱- داده می‌شود، سپس خروجی این دو تقویت‌کننده با هم جمع و به بار داده می‌شوند. در شکل ۱ بلوک‌دیاگرام این روش نمایش داده شده است.



شکل ۱. بلوک‌دیاگرام استفاده از دو تقویت‌کننده به‌صورت جداگانه و جمع خروجی آنها

مهمترین معایب این روش عبارت‌اند از:

۱. هیچ‌گاه خروجی دو تقویت‌کننده، حتی اگر هر دو ساخت یک شرکت باشند، دقیقاً مشابه نیستند و لذا خروجی آنها نیز دقیقاً مشابه نخواهد بود.

۲. حتی اگر خروجی هر دو تقویت‌کننده دقیقاً مشابه باشند، باز هم مداری که گین ۱- را به سیگنال ورودی می‌دهد باعث ایجاد اختلاف فاز به سیگنال ورودی می‌شود، لذا در بهترین حالت ممکن نیز سیگنال‌های خروجی دو تقویت‌کننده دقیقاً معکوس یکدیگر نیستند.

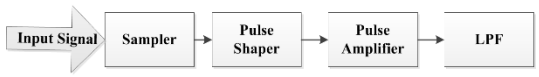
۲-۲. روش نمونه‌گیری و تقویت پالس

این روش در حقیقت روشی ابتکاری است. بلوک‌دیاگرام آن نیز به‌صورت شکل ۲ است. در ادامه مراحل انجام این روش تشریح شده است.

۲-۲-۱. نمونه‌گیری

مرحلهٔ نخست، نمونه‌گیری از سیگنال مورد نظر است. نرخ نمونه‌گیری باید حداقل دو برابر بزرگترین فرکانس موجود

در سیگنال باشد. به‌عنوان مثال اگر بزرگترین فرکانس موجود در سیگنال، ۵ کیلوهرتز است، نرخ نمونه‌گیری باید حداقل ۱۰ کیلوهرتز باشد. پس از انجام این مرحله، سیگنال ورودی به تعدادی پالس تبدیل می‌شود. برای این کار می‌توان از مدارهای مجتمع که برای همین منظور ساخته شده‌اند استفاده کرد.



شکل ۲. بلوک‌دیاگرام روش نمونه‌گیری و تقویت پالس

۲-۲-۲. تنظیم پهنای پالس[۳]

اساساً هرچه عرض پالس‌ها کمتر و پالس‌ها باریکتر باشند، بهتر است. این کار را می‌توان با استفاده از روش مدوله‌سازی پهنای پالس[۴] و نیز با استفاده از نرم‌افزار آرایهٔ دریچه‌ای برنامه‌پذیر میدانی یا اف. پی. جی. اِی.[۵] انجام داد. داد. ضرورت و اهمیت این مرحله در گام بعد تشریح می‌شود.

۲-۲-۳. تقویت پالس[۶]

در این مرحله لازم است تا دامنهٔ پالس‌های تولیدشده تقویت شوند. برای این کار مدارهای آماده‌ای به‌صورت تجاری وجود دارند که بنا به محدودهٔ فرکانسی مورد نظر می‌توان آنها را انتخاب کرد. در جدول ۱ چند نمونه از آنها معرفی شده است. تمامی موارد معرفی‌شده در این جدول ساخت شرکت ام. آی. تی. ایی. کیو.[۷] هستند [۴]. البته برای انجام این مرحله می‌توان از یک ماسفت[۸] نیز استفاده کرد. در شکل ۳ نمایی از مدار سادهٔ آن نمایش داده شده است. در این شکل لازم است تا VCC را به‌همان اندازه که می‌خواهیم سیگنال تقویت شود قرار دهیم (مثلاً ۴۰۰ ولت). در این‌صورت همان‌طور که از بلوک‌دیاگرام نیز مشخص است، گیت این ماسفت توسط پالس‌های سیگنال اولیه آتش می‌شود. حال المان‌های متصل به این ماسفت باید به‌گونه‌ای تنظیم شود که به ازای بزرگترین پالس، مقدار ۴۰۰ ولت در خروجی ظاهر شود. اما مشکل این است که باید این مدار به‌گونه‌ای عمل کند که برای سایر پالس‌ها نیز خروجی، خطی و متناسب با دامنهٔ پالس باشد؛ یعنی مثلاً به ازای یک پالس ۲۰۰ ولت، دامنهٔ خروجی نیز ۲۰۰ ولت شود که در عمل به‌دلیل ماهیت غیرخطی ماسفت این‌گونه نیست. به‌همین دلیل لازم است اطلاعات به‌جای دامنهٔ پالس‌ها، در عرض پالس‌ها ریخته شود که این عمل از طریق تقویت‌کردن پالس توسط مدوله‌سازی پهنای پالس، که در مرحلهٔ دوم بیان شد، انجام می‌شود.

جدول ۱. چند نمونه از تقویت‌کننده‌های پالس ساخت شرکت ام. آی. تی. ایی. کیو.

مدل	باند پایین فرکانسی (مگاهرتز)	باند بالای فرکانسی (مگاهرتز)
AU-1442	0.001	400
AU-1447	0.001	400
AU-1291	0.001	500
AU-1310	0.001	500
AU-1332	0.001	500
AU-1414	0.001	500
AM-1309	0.001	1000
AM-1431	0.001	1000
AM-1300	0.001	1000

شکل ۳. مدار ساده یک ماسفت جهت انجام گام سوم

۲-۲-٤. بازیابی سیگنال اصلی تقویت‌شده از پالس‌های تقویت‌شده

در این مرحله به یک فیلتر پایین‌گذر[۹]، که در حقیقت نوعی مدار مدوله‌ساز پهنای پالس می‌باشد، نیاز است. این مرحله سخت‌ترین گام این روش است. عیب اصلی این روش طراحی سخت آن است؛ بدین معنا که طراحی یک مدار که از لحاظ عملی نیز امکان‌پذیر و قابل ساخت باشد کار پیچیده‌ای است و همین پیچیدگی، این روش را بیشتر به یک روش نظریه تبدیل می‌کند.

۲-۳. ترانسفورماتور

ترانسفورماتور وسیله‌ای است که انرژی الکتریکی را به‌وسیلهٔ دو یا چند سیم‌پیچ و از طریق القای الکتریکی از یک مدار به مداری دیگر منتقل می‌کند. بدین صورت که جریان جاری در مدار اول (اولیهٔ ترانسفورماتور) موجب ایجاد یک میدان مغناطیسی در اطراف سیم‌پیچ اول می‌شود. این میدان مغناطیسی به‌نوبهٔ خود سبب ایجاد ولتاژ در مدار دوم می‌شود که با افزودن یک بار به مدار دوم این ولتاژ می‌تواند به ایجاد یک جریان ثانویه بیانجامد. همان‌طور که از توضیحات پیشین نیز مشخص است، ترانسفورماتور برای یک فرکانس و نه یک باند فرکانسی بهینه کار می‌کند. حال فرض کنید هدف تقویت یک موج سینوسی با محدودهٔ فرکانسی ۹۵ تا ۱۰۵ کیلوهرتز است. در این‌صورت اگر طراحی برای فرکانس حامل ۱۰۰ کیلوهرتز صورت پذیرد، چون نسبت باند فرکانسی (۵ کیلوهرتز) به فرکانس حامل زیاد نیست، این مسئله مشکل زیادی ایجاد نخواهد کرد؛ اما اگر فرض کنید که هدف تقویت یک موج سینوسی با محدودهٔ فرکانسی ۱ تا ۵ کیلوهرتز باشد، در این‌صورت اگر طراحی برای فرکانس ۳ کیلوهرتز (فرکانس حامل) صورت پذیرد، چون نسبت باند فرکانسی (۲ کیلوهرتز) به فرکانس حامل که ۳ کیلوهرتز می‌باشد زیاد است، این مسئله مشکل ایجاد خواهد کرد. لذا استفاده از ترانسفورماتور معمولی برای تقویت یک سیگنال در باند صوتی (۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز) مناسب نیست؛ زیرا ترانسفورماتور برای یک فرکانس و نه یک باند فرکانسی بهینه کار می‌کند و اگر آنرا برای فرکانس‌های پایین تنظیم کنیم، در فرکانس‌های بالا خوب عمل نمی‌کنند. علاوه بر این، به‌طور کلی وقتی مثلاً ولتاژ یک سیگنال به‌طور مستقیم توسط یک ترانسفورماتور از یک ولت به ۴۰۰ ولت می‌رسد، جریان به ۱/۴۰۰ کاهش می‌یابد و این موضوع خود می‌تواند به‌خصوص در جایی‌که به جریان نیاز است مشکل ایجاد کند [۵-۹].

۲-٤. مدارهای شامل تقویت‌کننده

این روش استفاده از مدارها، که در آنها از تقویت‌کننده‌هایی که به‌صورت مدارهای مجتمع هستند را پیشنهاد می‌کند. تعداد این مدارها بسیار زیاد است، لذا ذکر تمامی آنها در این مجال ممکن نیست. علاقمندان به مرجع [۱۰] ارجاع داده می‌شوند. شرکت‌های معدودی در زمینهٔ تولید مدارهای مجتمع ولتاژ بالا فعالیت می‌کنند که شرکت اپکس میکروتکنولوژی[۱۰] و شرکت نشنال سمی‌کانداکتور[۱۱] از معروفترین و معتبرترین مجموعه‌های فعال در این حوزه‌اند.

۲-۵. تقویت‌کنندهٔ لامپی

تقویت‌کنندهٔ لامپی نوعی تقویت‌کنندهٔ الکترونیکی است که در ساخت آن از لامپ خلأ استفاده می‌شود و برای افزایش دامنهٔ سیگنال به‌کار می‌رود. لامپ‌های خلأ به دو دستهٔ کلی تقسیم می‌شوند: دیود[۱۲] و ترایود. امروزه ترایود[۱۳] جایگاه خود را در تقویت‌کننده‌های توان بالای فرکانس رادیویی در فرستنده‌های رادیویی و ایستگاه‌های فرکانس رادیویی صنعتی حفظ کرده است. از جمله مهمترین معایب این روش می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

۱. معمولاً برای ولتاژهای مورد نیاز جهت ارسال سیگنال مورد استفاده قرار نمی‌گیرند.
۲. تهیهٔ آنها نسبتاً مشکل است.
۳. بیشتر در کاربرهای فرکانس بالا نظیر فرکانس رادیویی استفاده می‌شوند.

٦-٢. ترانسفورماتور فلای‌بک[14]

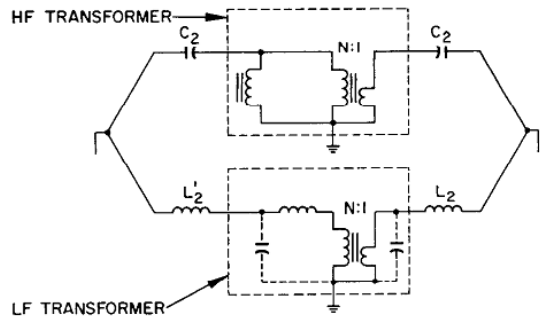
در ابتدا کاربرد اولیهٔ ترانسفورماتورهای فلای‌بک برای ایجاد سیگنال دندان اره‌ای ولتاژ بالا با فرکانس تقریباً بالا بود، اما امروزه در منابع تغذیهٔ سوئیچ مد برای ولتاژهای کم (۳ ولت) و زیاد (بالای ۱۰ کیلوولت) استفاده می‌شود. این ترانسفورماتور برای کنترل حرکت افقی تابش الکترون در یک لامپ اشعهٔ کاتدی است. یکی از معایب این‌گونه از تراسفورماتورها این است که مقدار قابل توجهی انرژی در مدار مغناطیسی آن موجود است. در عمل ولتاژهای بسیار بالا به آسانی می‌توانند به‌وسیلهٔ تعداد کمی دور به‌وسیله مدارهای این تراتسفورمر تولید شوند.

۳. طراحی مدار تطبیق امپدانس به‌صورت پهن‌باند

مدار تطبیق امپدانس از این منظر دارای اهمیت است که با استفاده از آن می‌توان حداکثر توان را از یک طبقه به طبقهٔ دیگر منتقل کرد. در صورتی‌که تطبیق امپدانس به‌صورت پهن‌باند صورت پذیرد، در یک بازهٔ فرکانسی و نه فقط در یک فرکانس خاص امکان انتقال حداکثری توان میسر خواهد شد. از این‌رو در این مقاله به این روش‌ها پرداخته شده است [۱۱-۱۶]. لازم به‌ذکر است که هر کدام از روش‌های پیشنهادی دارای معایب و مزایای خاص خود می‌باشند. پنج روش کلی در این مقاله پیشنهاد شده است که در ادامه تشریح خواهند شد.

۳-۱. استفاده از دو ترانسفورماتور

در این روش از دو ترانسفورماتور استفاده می‌شود. در حقیقت مشکل طراحی مدار تطبیق امپدانس برای یک مبدل پهن‌باند این است که اگر مدار تطبیق برای فرکانس‌های پایین طراحی شود، در فرکانس‌های بالا به‌خوبی جواب نمی‌دهد و بالعکس. به‌همین منظور استفاده از دو ترانسفورماتور موازی، یکی برای فرکانس‌های بالا و دیگری برای فرکانس‌های پایین پیشنهاد شده است. این مدار در شکل ۴ نمایش داده شده است [۱۴]. اساس این روش بدین صورت است که ترانسفورماتور بالایی مؤلفه‌های فرکانس بالا و ترانسفورماتور پایینی مؤلفه‌های فرکانس پایین را عبور می‌دهند. این روش هرچند که در نگاه نخست جالب به‌نظر می‌رسد، اما در عمل و از منظر طراحی به بررسی بیشتری نیاز دارد.



شکل ٤. استفاده از دو ترانسفورماتور برای تطبیق امپدانس پهن‌باند

۳-۲. استفاده از ترانسفورماتور صوتی

اصولی کلی ترانسفورماتور صوتی بسیار مشابه ترانسفورماتور قدرت است، با این تفاوت که فرکانس کاری این‌گونه ترانسفورماتورها به‌جای ۵۰ یا ۶۰ هرتز یک بازهٔ وسیع فرکانسی (۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز) است و البته اندازهٔ آنها نیز بسیار کوچکتر است. متأسفانه دربارهٔ طراحی و ساخت این نوع از ترانسفورماتورها مراجع اندکی در دست است.

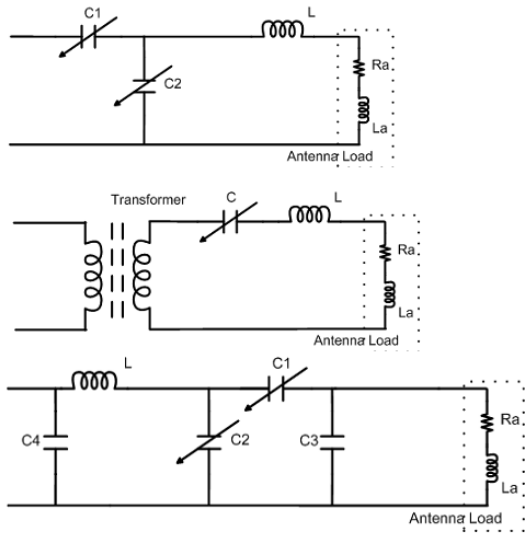
۳-۳. مدارهای دارای المان‌های متغیر با زمان

این مدارها حاوی المان‌های متغیر با زمان می‌باشند. مشکل اصلی در این مدارها مربوط به کنترل المان‌های متغیر با زمان است. در شکل ۵ چند نمونه از این مدارها نمایش داده شده است [۱۵].

٤-۳. طراحی مدار تطبیق امپدانس به‌کمک محاسبات

از جمله محاسن این روش می‌توان به سادگی و داشتن قدرت انتخاب برای تعیین ضریب کیفیت[15] مدار اشاره کرد. ضریب کیفیت از این حیث دارای اهمیت است که با پهنای باند نسبت عکس دارد و لذا با تعیین بهینهٔ آن می‌توان به

پهنای بیشتری دست یافت. طراحی مدار تطبیق امپدانس با استفاده از این روش به‌صورت خلاصه به‌صورت زیر است [۱۶].



شکل ۵. سه مدارتطبیق امپدانس حاوی المان‌های متغیر با زمان

۱-٤-۳. محاسبهٔ C_P و R_p

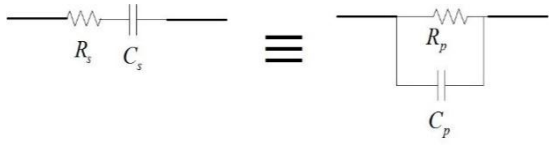
معمولاً در فرکانس رزونانس می‌توان مبدل را به‌صورت یک مقاومت و یک خازن موازی مدل کرد. برای این کار می‌توان از روابط ۱ و ۲ استفاده نمود.

$$R_p = R_s + \frac{X_s^2}{R_s} \quad (۱)$$

$$X_p = \frac{R_s R_p}{X_s} \quad (۲)$$

با استفاده از مقدار X_P محاسبه‌شده، مقدار C_P از رابطهٔ ۳ محاسبه می‌شود.

$$C_p = \frac{1}{2\pi f_r X_p} \quad (۳)$$



شکل ٦. مدل‌سازی مبدل در فرکانس رزونانس به‌صورت المان‌های موازی

۲-٤-۳. محاسبهٔ ضریب کیفیت و تشخیص اینکه آیا لازم است که خازن اضافه شود یا خیر؟

با علم به اینکه در فرکانس رزونانس مقدار X_c با X_L برابر است می‌توان مقدار ضریب کیفیت را محاسبه کرد.

$$Q = \frac{R_p}{X_L} \quad (۴)$$

اگر مقدار Q به‌دست آمده از رابطهٔ بالا از مقدار مورد نظر کمتر باشد، باید یک خازن موازی به مدار افزود. برای این کار به قرار زیر عمل می‌کنیم:

$$X_L = \frac{R_p}{Q} \quad (۵)$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f_r} \quad (۶)$$

لازم به‌ذکر است که در روابط ۵ و ۶ مقدار Q را همان مقدار ضریب کیفیت ایده‌آل و موردنظر قرار می‌دهیم. مقدار کلی C مدار نیز از رابطهٔ ۷ محاسبه می‌شود.

$$C = \frac{1}{2\pi f_r X_L} \quad (۷)$$

نهایتاً مقدار خازنی که باید به مدار اضافه شود، از رابطهٔ ۸ محاسبه می‌شود.

$$Added\ Capacitor = C - C_p \quad (۸)$$

۳-٤-۳. تعیین تعداد دور مورد نظر ترانسفورماتور

تعداد دور مورد نظر ترانسفورماتور از رابطهٔ ۹ قابل محاسبه است.

$$N_R = \sqrt{\frac{R_p}{R_{primary}}} \quad (۹)$$

لازم به‌ذکر است که در این رابطه منظوراز R_P مقدار مقاومت به‌دست آمده در گام اول و منظور از $R_{primary}$ مقدار مقاومت خروجی تقویت‌کننده است که قرار است برای آن تطبیق امپدانس صورت پذیرد.

٤-٤-۳. انتخاب نوع سیم‌پیچ ترانسفورماتور

انتخاب نوع سیم‌پیچ ترانسفورماتور به نسبت دور به‌دست آمده در مرحلهٔ قبل بستگی دارد. به‌طور کلی سه نوع

سیم‌پیچ وجود دارد: سیم‌پیچ کوک اسلاگی[16]، سیم‌پیچ مغزی فرومغناطیس[17] و سیم‌پیچ چنبره‌ای[18].
معمولاً از سیم‌پیچ کوک اسلاگی برای حداکثر نسبت ۲۲ به ۱ استفاده می‌شود. برای نسبت دورهای بالاتر می‌توان از سیم‌پیچ چنبره‌ای استفاده کرد. سیم‌پیچ مغزی فرومغناطیس نیز بین دو مورد قبلی است.

۵-۳. طراحی مدار تطبیق امپدانس به‌کمک چارت اسمیت

این چارت نمایشی کاملاً گرافیکی دارد. امروزه فواید و کاربردهای چارت اسمیت پس از گذشت سال‌ها به‌طور فزاینده‌ای رشد کرده است و به‌طور چشمگیری با هدف حل مسائل استفاده می‌شود. استفاده از این نمودار به‌صورت دستی برای بحث تطبیق امپدانس قدری مشکل است. لذا نرم‌افزارهای متعددی در این زمینه وجود دارد. چند مورد از این بسته‌های نرم‌افزاری مشهورتر عبارت است از بستهٔ نرم‌افزاری میکرواسمیت[19]، لین‌اسمیت[20]، کوئیک‌اسمیت[21]، سوپراسمیت[22] و سیم‌اسمیت[23].

٤. جمع‌بندی

در این بخش تمامی روش‌های بیان‌شده در این مقاله جمع‌بندی شده است. بر همین اساس روش‌های مذکور برای افزایش برد سیگنال آکوستیکی زیر آب و سپس روش‌های طراحی مدار تطبیق امپدانس به‌صورت پهن‌باند با ذکر مزایا و معایب هر کدام در قالب دو جدول جداگانه بیان می‌شود.

جدول ۲. مقایسهٔ روش‌های ذکرشده برای افزایش برد سیگنال اکوستیکی زیر آب

نام روش	مزایا	معایب
روش استفاده از دو تقویت‌کننده به‌صورت جداگانه و سپس جمع خروجی آنها	طراحی بسیار ساده	خروجی دو تقویت‌کننده دقیقاً مانند هم نیستند. سیگنال‌های خروجی دو تقویت‌کننده دقیقاً معکوس یکدیگر نیستند.
روش نمونه‌گیری و تقویت پالس	امکان تولید ولتاژ بسیار بالا	طراحی پیچیدهٔ گام چهارم
ترانسفورماتور	طراحی نسبتاً ساده	ترانسفورماتور برای یک فرکانس و نه یک باند فرکانسی بهینه کار می‌کند. ممکن است نتواند جریان مورد نظر را تأمین کند.
تقویت‌کنندهٔ لامپی	نیازی به طراحی نیست	معمولاً برای ولتاژهای مورد نیاز در این مقاله استفاده نمی‌شوند. تا حدودی تهیهٔ آنها مشکل است. کاربرد اصلی در فرکانس بالا نظیر تقویت‌کننده‌های توان بالای فرکانس رادیویی
ترانسفورماتور فلای‌بک	امکان تولید ولتاژ بسیار بالا	مقدار قابل توجهی انرژی در مدار مغناطیسی آن موجود است. ممکن است نتواند جریان مورد نظر را تأمین کند.
استفاده از مدارهای شامل تقویت‌کننده‌هایی که به‌صورت مدارهای مجتمع وجود دارند	طراحی ساده، اعوجاج کم ولتاژ خروجی، امکان ارتقا برای ولتاژ بالا	-

جدول ۳. مقایسه روش های طراحی مدار تطبیق امپدانس به صورت پهن باند

نام روش	مزایا	معایب
استفاده از دو ترانسفورماتور	طراحی ساده	در عمل و از منظر طراحی به بررسی بیشتر نیاز دارد
استفاده از ترانسفورماتور صوتی	امکان تطبیق امپدانس به‌صورت باندپهن و در محدودهٔ فرکانس صوتی	دربارهٔ این نوع ترانسفورماتور و نیز طراحی و ساخت آن مراجع اندکی وجود دارد
استفاده از مدارهایی با المان‌های متغیر با زمان	امکان تطبیق امپدانس به‌صورت پهن‌باند	کنترل المان‌های متغیر با زمان
طراحی مدار تطبیق امپدانس به‌کمک‌محاسبات	طراحی ساده	ممکن است که تطبیق امپدانس در فرکانس‌های دور از فرکانس رزونانس خیلی مناسب نباشد
طراحی مدار تطبیق امپدانس به‌کمک چارت اسمیت	طراحی نسبتاً ساده	کاربرد اصلی در فرکانس‌های بالا

۵. مآخذ

[1] Sound & Acoustics Weblog, http://acoustic-physics2010.persianblog.ir (Accessed March 3, 2015)

[2] Chitre, M., S. Shahabudeen, M. Stojanovic. "Underwater acoustic communications and networking: Recent advances and future challenges." *Marine technology society journal*, vol. 42, 2008, pp .103-116.

[3] Stojanovic, M. "Recent advances in high-speed underwater acoustic communications." *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 21, 1996, pp. 125-136.

[4] MITEQ. Pulse Amplifiers, http://www.miteq.com (accessed March 4, 2015)

[5] Allan, D. "IEE Power Division: Chairman's address. Power transformers-the second century." *Power Engineering Journal*, vol. 5, 1991, pp. 5-14.

[6] Del Vecchio, R. M., B. Poulin, P. T. Feghali, D. M. Shah, R. Ahuja, *Transformer design principles: with applications to core-form power transformers*, CRC press, 2010.

[7] Landman, R. J., STANDARD HANDBOOK FOR ELECTRICAL ENGINEERS.

[8] McLyman, C. W. T., *Transformer and inductor design handbook*, vol. 121, CRC press, 2004.

[9] Winders, J. *Power transformers: principles and applications*, CRC Press, 2002.

[10] Power Operational Amplifiers, http://www.apexanalog.com (accessed March 3, 2015)

[11] Fano, R. M. "Theoretical limitations on the broadband matching of arbitrary impedances." *Journal of the Franklin Institute*, vol. 249, 1950, pp. 57-83.

[12] Huang, H., D. Paramo. "Broadband electrical impedance matching for piezoelectric ultrasound transducers." *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 58, 2011.

[13] Lopez, A. R. "Review of narrowband impedance-matching limitations." *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 46, 2004, pp. 88-90.

[14] O'Meara, T. "Very-Wide-Band Impedance-Matching Network." *Component Parts, IRE Transactions on*, vol. 9, 1962, pp. 38-44.

[15] Shin, K. R., Y. W. Kang, M. Piller, A. E. Fathy. "Broadband Antenn Matching Network and Design and Application for RF Plasma Ion Source." *Oak Ridge National Laboratory (ORNL)*, Spallation Neutron Source2011.

[16] Notes On The Design Of Matching Systems For Piezo Elements, Air mar Technology Corporation.

پی‌نوشت

1. Transducer
2. Piezoelectric transducers
3. Pulse Shaping
4. Pulse-width modulation (PWM) or pulse-duration modulation (PDM)
5. field-programmable gate array (FPGA)
6. Pulse Amplifying
7. MITEQ, http://www.miteq.com (accessed March 3, 2015)

۸ ماسفت (MOSFET) یا ترانزیستور اثر میدانی نیمه‌رسانا - اکسید - فلز (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor) معروف‌ترین ترانزیستور اثر میدان در مدارهای آنالوگ و دیجیتال است. این نوع از ترانزیستور اثر میدان نخستین‌بار در سال ۱۹۲۵ م معرفی شد. در آن هنگام، ساخت و به‌کارگیری این ترانزیستورها، به‌سبب نبود علم و ابزار و امکان با دشواری همراه بود و از همین‌رو، برای پنج دهه فراموش شدند و از میدان پیشرفت‌های الکترونیک برکنار ماندند. در آغاز دههٔ ۱۹۷۰ م، بار دیگر نگاه‌ها به ماسفت‌ها افتاد و برای ساختن مدارهای مجتمع به‌کار گرفته شدند [ویراستار].

9 .Low Pass Filter (LPF)
10. APEX MICROTECHNOLOGY, https://www.apexanalog.com (accessed March 3, 2015)
11. National Semiconductor Corporation, http://www.ti.com (accessed March 3, 2015)
12. diode
13. triode
14. Flyback Transformer
15. Quality Factor
16. Slug Tuned
17. Pot Core
18. Toroid
19. Microsmith
20. LinSmith
21. QuickSmith
22. SuperSmith
23. Simsmith