

طراحی و ساخت دستگاه تطبیق امپدانس پهن باند برای

سامانه‌های سوناری

محمدحسین قزل‌ایاغ^۱، محمدرضا پالوج^۲، امیرکبیری^۳

۱- دانشیار دانشگاه جامع امام‌حسین (علیه‌السلام)

۲- دانشجوی دکترا، مربی سازمانی گروه برق، دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام‌حسین (علیه‌السلام)

۳- مربی، دانشگاه جامع امام‌حسین (علیه‌السلام)

چکیده:

سامانه‌های اولتراسونیک از مبدل‌های کوارتز و سرامیکی برای تولید توان صوتی استفاده می‌کنند. محدودیت اصلی در تولید این توان، ناکافی بودن توان الکتریکی ورودی به دلیل ضریب توان کم و امپدانس بالای مبدل است. در این کار یک روش قاعده‌مند برای طراحی شبکه‌های تطبیق امپدانس الکتریکی باند پهن با ارائه یک روش تلفیقی جدید، با کمک ترکیبی از روش موسوم به محاسبه مستقیم فرکانس واقعی (RFDT) و روش CAD برای مبدل‌های اولتراسوند پیزوالکتریک استفاده شده است. فرآیند طراحی و ساخت شامل پنج مرحله کلی است: (۱) تعیین مدار معادل مبدل پیزوالکتریک بر اساس میزان ادمیتانس اندازه‌گیری شده در بازه فرکانسی مطلوب و تحت شرایط کاری واقعی با کابل ۱۰۰ متری و عمق مناسب در یک استخر بدون انعکاس مناسب (۲) طراحی مجموعه‌ای از شبکه‌های تطبیق امپدانس، با استفاده از نمودار اسمیت کامپیوتری با نرم افزار ADS و SMITHCHART.V.4 (۳) استخراج و اجرای مدل شبیه‌سازی مبدل با تطبیق برای ارزیابی بهره و توان بازگشتی و پهنای باند شبکه‌های تطبیق امپدانس طراحی شده و بررسی اثربخشی رویکرد ارائه‌شده از طریق طراحی، اجرا و مشخصه‌سازی شبکه‌های تطبیق امپدانس برای مبدل انتشار صوتی پهن‌باند (۴) طراحی مدارات جانبی برای هوشمندسازی و انتخاب IMN مناسب (۵) ساخت EIMN هوشمند مورد نظر و آزمایش نهایی. نتایج حاصله از این تحقیق، در بهترین حالت تطبیق و شرایط ایده‌آل، در شبیه‌سازی با ADS، ۸۵ دسی‌بل بهبود برای S_{11} و ۲۶ دسی‌بل بهبود برای S_{21} ارائه می‌نماید. در شرایط کاری و با استفاده از المان‌های اندازه واقعی فیلترها، ۵۸ دسی‌بل بهبود در S_{11} و ۲۶ دسی‌بل بهبود در S_{21} در حالت واقعی بدست آمد.

کلیدواژه:

شبکه تطبیق امپدانس، مدار معادل پیزوالکتریک، مبدل‌های پیزوالکتریک، سونار، آکوستیک

Design and Manufacture of Broadband Impedance Matching Device for Sonar Systems

Mohammad hosein Ghezelayagh¹, Mohammadreza Palooj², Amir Kabiri³

^{1,2,3}Imam Hossein University, Tehran, Iran

Abstract

Ultrasonic systems use quartz and ceramic transducers to generate sound power. The main limitation in the production of this power is the insufficiency of the input electrical power due to the low power factor and high impedance of the converter. An impedance matching circuit between the power source and the converter improves power transfer. In this work, a systematic method has been used to design broadband electrical impedance matching networks using a method close to the theory of the real frequency direct calculation (RFDT) technique and CAD for piezoelectric ultrasound transducers. The design and construction process includes five general steps: 1) Determining the equivalent circuit of the piezoelectric transducer based on the amount of admittance measured in the frequency range by an impedance analyzer under real working conditions with a 100-meter cable and

a suitable depth in a swimming pool without proper reflection 2) Designing a set from the impedance matching networks using the computerized Smith chart with ADS and SMITChart.V.4 software 3) extracting and implementing the simulation model of the converter with matching to evaluate the gain and return power and the bandwidth of the designed impedance matching networks and to check the effectiveness of the approach presented through the design, implementation, and characterization of impedance matching networks for the proposed broadband audio propagation converter. 4) Design peripheral circuits for intelligent operation, including frequency meter, maximum voltage measurement by ADC, control system using STM32 and other peripheral circuits. 5) Construction of desired intelligent EIMN and finally final test. In this work, in the best matching mode, in the simulation mode in ADS, 85 dB improvement was achieved in S_{11} and 26 dB improvement in S_{21} . With the actual element sizes of the filters, 58 dB improvement was obtained in S_{11} and 26 dB improvement in S_{21} . The selection speed of the desired matching circuit is also very high.

Keywords:

underwater piezoelectric transducer; broadband matching circuit; real frequency technique; EIMN;

انتقال حداکثر توان در سامانه‌های انتقال، چه آنکه هدف، صرفاً انتقال انرژی باشد یا اینکه انتقال یک سیگنال حاوی اطلاعات، از مهمترین مباحث آن است. مدار تطبیق می‌تواند باعث کاهش اتلاف انرژی تقویت کننده توان، افزایش پهنای باند سامانه و بهبود اعوجاج شکل موج منتقل شده شود. هر خط انتقال الکتریکی که شامل انتقال توان یا سیگنال الکتریکی باشد؛ نیاز به تطبیق پارامترهای الکتریکی بین طبقات مختلف مثل راه‌انداز^۱، منبع، کابل، بخش الکترونیکی فرستنده و گیرنده و المان ورودی-خروجی فرستنده و گیرنده مثل آنتن یا مبدل^۲ سیگنال، دارد؛ چرا که انتقال حداکثر توان و حفظ سیگنال انتقالی به لحاظ دامنه و شکل موج، در بین طبقات یک نیاز اساسی می‌باشد. در طراحی مدار یا شبکه تطبیق امپدانس الکتریکی^۳ (EIMN) برای حسگرهای پیزوالکتریک^۴، عملگرها^۵ و مبدل‌ها نیاز به بررسی دقیق فرکانس‌های کار، امپدانس فرستنده و گیرنده، منبع تغذیه یا امپدانس راه‌انداز و امپدانس الکترونیک گیرنده و نیز تحلیل پارامترهای موثر بر آن‌ها دارد. دستگاه‌های ساخته شده از مواد پیزوالکتریک، در گروه مواد هوشمند^۶ قرار می‌گیرند و ماده اصلی ساخت مبدل‌ها، حسگرها، عملگرها و ساختارهای هوشمند را شامل می‌شوند. برخی دستگاه‌ها با کاربردهایی مانند سونار^۷ دریایی، بعنوان مثال ارتباطات زیرسطحی یا شناسایی اهداف زیر یا روی سطح توسط زیردریایی‌ها، ماهی‌یاب‌ها و فاصله یابی در زیر آب، همچنین سلامت ساختاری^۸ (مثلاً استحکام ساختار بدنه شناورها، هواپیما یا پل‌ها و مانند آن)، نظارت بر وضعیت عملکرد، ارزیابی بدون تخریب^۹ و تصویربرداری پزشکی، تمیز کردن اولتراسونیک، جوشکاری

و نظایر آن با توجه به اهمیت وظایفی که به عهده دارند، طراحی می‌شوند [۱-۳].

در صورت عدم تطبیق امپدانس، سیگنال از بار به داخل کابل منعکس می‌شود. نتیجه می‌تواند تداخل داده‌ها، امواج ایستا (SW)، تلفات و اعوجاج باشد. همچنین در سامانه سونار، توان غیرفعال بالایی ایجاد می‌کند که ناشی از ویژگی‌های خازنی داخلی است. بنابراین بازده تقویت کننده توان بسیار کاهش می‌یابد. تطبیق امپدانس خروجی فرستنده، انتقال توان را به حداکثر می‌رساند و منجر به نرخ سیگنال به نویز (SNR) بهتر، تفکیک پذیری فضایی (فاصله) و نرخ کنتراست به نویز (CNR) بهتر می‌شود [۲-۵].

در تطبیق امپدانس، حداکثر انتقال نیرو در مبدل‌های آلتراسونیک، زمانی که امپدانس‌های ورودی و خروجی یک شبکه EIM (Z_{in} و Z_{out}) به ترتیب فقط با مزدوج مختلط امپدانس الکتریکی منبع تحریک (Z_s) و یک مبدل آلتراسونیک پیزوالکتریک (Z_t) در فرکانس تشدید معادل باشند، بدست می‌آید. در شکل (۱) مشخص شده است که امپدانس الکتریکی از اجزای مقاومتی و راکتیو تشکیل شده است. این روابط به صورت معادلات (۱) و (۲) بیان می‌شوند:

$$Z_s(\omega) = R_s(\omega) + jX_s(\omega) \quad (1)$$

$$Z_t(\omega) = R_t(\omega) + jX_t(\omega) \quad (2)$$

در روابط فوق، Z نشان دهنده واحد موهومی است و ω فرکانس کار تناوبی است.

¹ driver

² transducer

³ electric impedance matching network

⁴ piezoelectric sensor

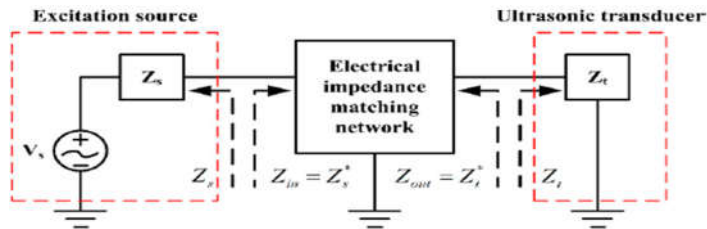
⁵ actuator

⁶ Smart materials

⁷ sonar

⁸ structural health monitoring (SHM)

⁹ nondestructive evaluation (NDE)



شکل (۱) پیگر بندی ساده یک مبدل آتراسونیک با مدار تطبیق [۲]

در روابط فوق Z_s^* و Z_t^* به ترتیب مزدوج مختلط Z_s و Z_t هستند. انتخاب مناسب پارامترهای مبدل مانند هندسه، طراحی الکتروود و خصوصیات مواد در مرحله طراحی، محل و نحوه نصب، خود منجر به تطبیق امپدانس الکتریکی بسیار بهینه شده با بازده‌های انتقال قدرت زیاد می‌شود [۹-۱]. تاریخچه مختصری از کارهای انجام شده قبلی در جدول (۱) گزارش شده است.

با این حال، همانطور که برای یک شبکه تطبیق امپدانس الکتریکی بهینه، می‌توان امپدانس الکتریکی ورودی و خروجی شبکه EIM را به صورت معادلات (۳) و (۴) نشان داد:

$$Z_{in}(\omega) = Z_s^*(\omega) = R_s(\omega) - jX_s(\omega) \quad (3)$$

$$Z_{out}(\omega) = Z_t^*(\omega) = R_t(\omega) - jX_t(\omega) \quad (4)$$

جدول (۱) مشاهده کارهای انجام شده و اهم دستاوردها

نویسنده اصلی و سال	منبع	اهم کار
ویوک ۲۰۱۹	[۱]	بررسی مدارات تطبیق سوناری- بررسی مدارات معادل پیزو الکتریک- تحلیل چندین نمونه از کارهای انجام شده
جی آر نولد ۲۰۱۴	[۲]	بررسی تطبیق امپدانس و تغییرات امپدانس و رزونانس تحت بار- بهبود K_{eff} - استفاده از مدل میسون و فیزیک
یانگ وانگ ۲۰۱۵	[۳]	استفاده از تکنیک RFDT- افزایش نسبی پهنای باند - ۱۰dB بهبود در توان ارسالی
یان یانگ ۲۰۱۷	[۴]	بررسی کلی بهبودهای بهره الکتروصوتی، K_{eff} ، چگالی طیف توان در دونوع مدار تطبیق سلف سری- خازن موازی و بالعکس- هرکدام برخی مولفه ها را تقویت و برخی را تضعیف می‌کنند.
جین یانگ ۲۰۱۶	[۵]	بهبود توان راکتیو بوسیله دو سلف موازی که یکی از آنها تحت شرایطی وصل می‌شود-بهبود در دو سطح کلی انجام می‌شود-رفتار مبدل خازنی است-نسبتا کم هزینه
پیزن فنگ ۲۰۱۷	[۶]	استفاده از مدل BVD- استفاده از ترانس و سلف و خازن جهت تطبیق، بهبود ۵ dB در توان ارسالی
علی بخش ۲۰۲۰	[۱۵]	استفاده از فیلترهایی با الگوریتم ژنتیک سریع که در مقایسه با نوع معمولی سریع تر هستند. مبنای کار افزایش سرعت تطبیق است.
ولیم بادجت ۲۰۱۵	[۱۶]	استفاده از سروو موتور برای تغییرات سلف‌ها و خازن‌های مدار تطبیق برای تغییرات آنتن و کنترل آن‌ها با میکروکنترلر- به دلیل فرایند مکانیکی سرعت و دقت تطبیق در مقایسه سیستم الکتریکی کم است.
کار ما ۲۰۲۲	-	استفاده از مدار معادل بوسیله آنالایزر (بسیار دقیق)، تحت بار، تحت شرایط کار واقعی- dB (۸-۲۶) در توان ارسالی- تا ۵۸ dB در توان بازگشتی- تطبیق هوشمند با تغییرات فرکانس در+ کمتر از میلی ثانیه

یک تکنیک تلفیقی جدید است که به روش تئوری موسوم به محاسبه مستقیم فرکانس واقعی (RFDT) و روش CAD [۱،۴] نزدیک است. همچنین مشابهت‌هایی با روش الگوریتم ژنتیک سریع [۸] دارد. شکل (۲) الگوریتم اجرای این کار ارائه شده است.

۲- شبکه تطبیق امپدانس پهن باند هوشمند

در تطبیق امپدانس، یک روش که غالباً برای کار در فرکانس‌های غیرتشدید استفاده می‌شود، از یک تک‌سلف یا سلف سری، خازنی موازی یا بالعکس استفاده می‌شود [۴،۵]. روش دیگر که برای جاهایی که دقت بیشتر در تطبیق امپدانس لازم است یا تغییرات شدید در امپدانس داریم مثلاً در نقاط تشدید، از شبکه‌های تطبیق استفاده می‌شود که به نحوی کنترل می‌شوند [۶-۸]. روش مورد نظر و انتخابی این کار برای اجرای تطبیق امپدانس،

برای اینکه مدار معادل سوناری انتخاب شده، به واقعیت نزدیک‌تر و دقیق‌تر باشد، باید اثرات کابل و بار و مباحث فیزیکی از جمله محل و نحوه نصب، در مدار معادل لحاظ شود. در چنین شرایطی بهترین روش استفاده از امپدانس آنالایزر است. برای این کار، مبدل در محل مناسب خود بطور صحیح نصب شده و در عمق کاری مناسب موردنظر کاربران، با جنس و طول کابل واقعی، در یک استخر مناسب بدون انعکاس استاندارد، قرار می‌گیرد و امپدانس آن محاسبه می‌شود [۱۲-۱۰].

۲-۲- استخراج مدار تطبیق امپدانس

برای استخراج سریع، ساده و دقیق‌تر مدار تطبیق، می‌توان از نمودار اسمیت و نرم افزارهای متعدد در دسترس آن استفاده کرد. از جمله این نرم‌افزارها، می‌توان به SMITHCHART V.4 و نیز بخشی از نرم افزار ADS استفاده نمود. در هر یک از این روش‌ها، ابتدا نقطه امپدانس منبع و همچنین امپدانس بار، روی صفحه نمودار اسمیت پیدا و در نظر گرفته می‌شود. روی نمودار اسمیت باید بر روی خطوط مشخص شده امپدانس و ادmittانس از بار به سمت منبع حرکت کرده و مدار تطبیق را استخراج نمود. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، اگر المان سری اضافه شود، روی دواير I ثابت و اگر المان موازی اضافه شود، روی دواير g ثابت حرکت خواهد کرد. وقتی روی خطوط I ثابت از بار به سمت منبع برویم، سلف سری بصورت ساعتگرد و خازن سری بصورت پادساعتگرد حرکت می‌کند و اگر روی دواير g ثابت حرکت کنیم، سلف موازی بصورت پادساعتگرد و خازن موازی بصورت ساعتگرد حرکت می‌کند [۱۲-۱۵].



شکل (۲) نمای بلوکی شبکه تطبیق امپدانس ساخته شده

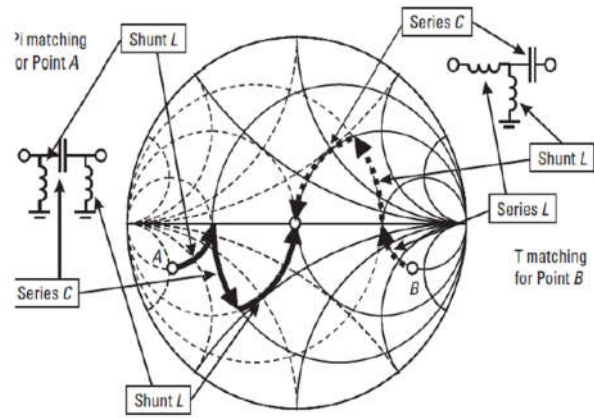
در این روش از یک میکروکنترلر ARM برای کنترل مجموعه شبکه تطبیق که شامل تعدادی مدار تطبیق مجزا می‌باشد، استفاده شد. اجزای اصلی این دستگاه شامل مدارات تطبیق، میکروکنترلر، پیش‌مدار فرکانس‌متر، پیش‌مدار ولت‌متر، مجموعه سویچ‌ها و LCD می‌باشد. در این روش انتخابی، انتظار می‌رود که سرعت اجرای تطبیق بالاتر از روش الگوریتم ژنتیکی سریع باشد همچنین از نظر تعداد المان‌های مدار تطبیق تفاوتی با روش الگوریتم ژنتیکی سریع نداشته یا کمتر است. همچنین به دلیل انتخاب فیلترهای جداگانه برای هر فرکانس، دقت و بهبود بیشتری نیز در مقایسه با سایر روش‌ها بدست خواهد آمد.

۲-۱- مدار معادل مبدل سوناری

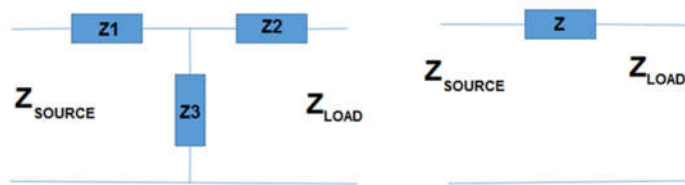
بطور طبیعی برای یک طراحی الکتریکی، اجزای مختلف مدار باید بصورت الکتریکی باشد؛ در صورت وجود یک عنصر غیر الکتریکی، مانند مواد هوشمند از قبیل پیزوالکتریک‌ها، باید مدار معادل آن را در طراحی لحاظ نمود. این یک ضرورت برای اجرای تطبیق امپدانس الکتریکی می‌باشد [۹].

پس از پایان این مرحله با توجه به میزان حرکت روی دواير، اندازه سلف یا خازن‌های مدار تطبیق و توپولوژی آن بدست می‌آید و بدین صورت مدار تطبیق در امپدانس موردنظر استخراج می‌شود.

برای این کار تعداد بیست و دو فیلتر، بررسی شده و بازده فیلتر برای شبکه تطبیق امپدانس طراحی شده، انتخاب شد که بصورت شکل T در سمت چپ شکل (۴) می‌باشد. همچنین، برای بهبود در نقاط نول چهار فیلتر تک المان سری مانند سمت راست شکل (۴) نیز استخراج شد.



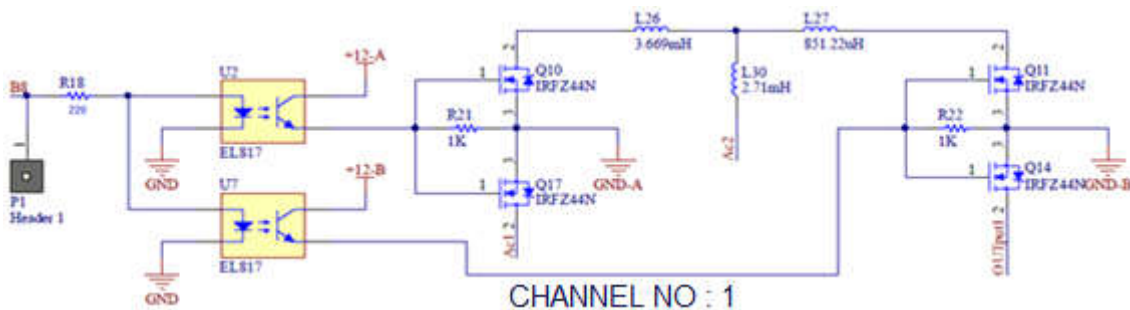
شکل (۳) حرکت و استخراج مدار تطبیق از نمودار اسمیت



شکل (۴) مدار تطبیق امپدانس تک و سه المان T

۲-۳- مدار و دستگاه تطبیق امپدانس هوشمند

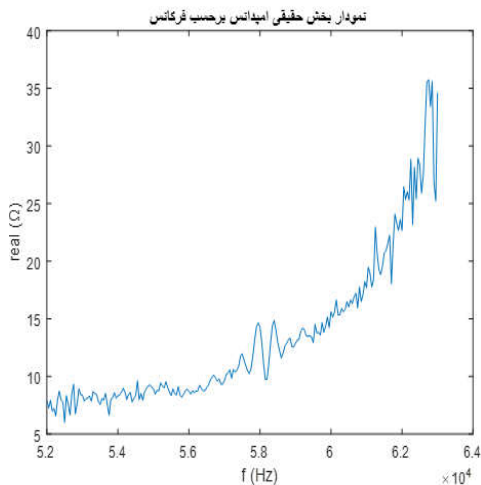
مدارات تطبیق امپدانس که به صورت T طراحی شده‌اند، همانطور که در شکل (۵) مدار کانال شماره ۱ مشاهده می‌شود، هر مدار، دارای دو سویچ AC در دوطرف خود می‌باشد که مدار تطبیق امپدانس بوسیله آن‌ها، در سمت خروجی به مبدل سوناری وصل شده و در سمت ورودی، به خروجی فرستنده یا تقویت‌کننده توان متصل می‌گردند. این سویچ‌ها، بوسیله یک ولتاژ ۱۲ ولت مستقیم که از طریق دو اوپتوکوپلر^{۱۰} مجزا کنترل می‌شوند و با خروجی میکروکنترلر، کنترل می‌گردند.



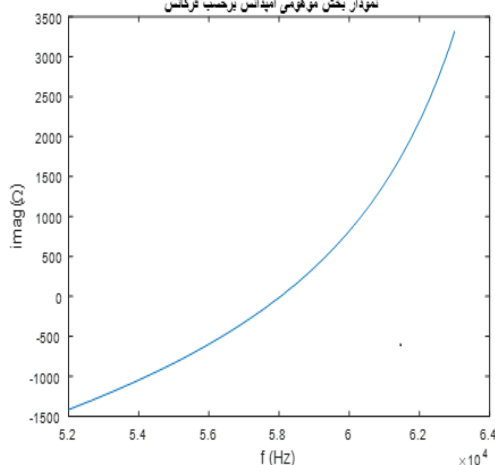
شکل (۵) مدار یک فیلتر تطبیق با فرمان از میکروکنترلر

¹⁰ optocoupler

یعنی در یک استخراج بدون انعکاس با کابل مناسب، استخراج شد. این نمودار، نشان می‌دهد که در مدارات تطبیق نیز، هم مدارات سلفی و هم مدارات خازنی، وجود خواهد داشت.



شکل (۶) مقدار بخش حقیقی امپدانس مشخصه مبدل سوناری نمودار بخش حقیقی امپدانس بر حسب فرکانس



شکل (۷) مقدار بخش موهومی امپدانس مشخصه مبدل سوناری

۲-۴-۱- نمودار توان ارسالی و بازگشتی فرستنده

مورد نظر بدون تطبیق

با توجه به پهنای باند مورد نظر برای انجام تطبیق امپدانس، (۵۵ تا ۶۰ کیلوهرتز)، می‌توان، به فاصله دلخواه فرکانسی، امپدانس مشخصه را تحلیل نموده و معیارهای توان برگشتی و توان ارسالی به بار را قبل از انجام تطبیق، مورد بررسی قرار داد. در ابتدا ۲۲ مدار تطبیق، در شبیه‌ساز و پس از بررسی بیشتر و لحاظ نمودن هزینه-فایده، تعداد ۱۱ مدار تطبیق با فاصله ۵۰۰ هرتز طراحی شده است؛ رفتار مدار سوناری را بدون تطبیق امپدانس در

در نهایت مدار کامل شبکه تطبیق امپدانس هوشمند، شامل مدارت تطبیق امپدانس، سویچ‌های AC، مدار فرکانس متر، مدار ولت‌متر، منابع تغذیه داخلی، LED های نشانگر فیلتر فعال، صفحه نمایش (LCD) و مدارات جانبی آن و نیز میکروکنترلر و مدارات جانبی آن، طراحی و ساخته می‌شود.

۲-۳-۱- اثرات المان‌های مدار تطبیق (فیلترها) و شبکه تطبیق

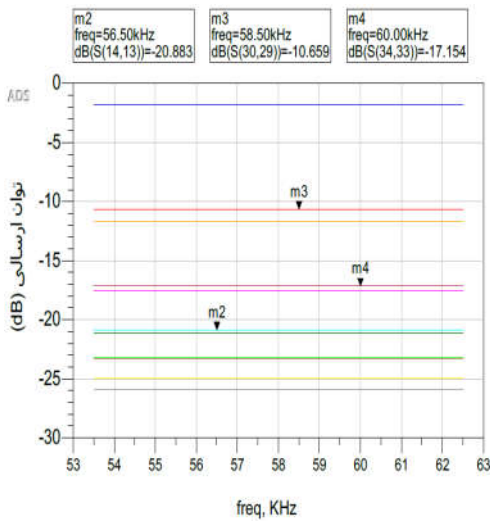
برای انتخاب یک مدار تطبیق با ولتاژ و جریان بالاتر، فقط نیاز به خریدن سلف‌ها و خازن‌های با تحمل توان بالاتر و در نتیجه گران‌قیمت‌تر می‌باشد و مساله فنی دیگری وجود ندارد. المان‌های مدارهای تطبیق، سلف و خازن هستند؛ هرچه مقادیر واقعی سلف و خازن مورد استفاده، با مقادیر بدست آمده در شبیه‌سازی، نزدیکتر باشد؛ مقادیر المان‌های بهبود نظیر S_{11} ، S_{21} به مقدار ایده‌آل نزدیکتر و بهتر است و هر مقدار که از آن منحرف شود، این بهبودها، نیز کاهش می‌یابند.

در شبکه تطبیق امپدانس هوشمند، مسافت‌های سویچ، که بیشترین تعداد المان‌های شبکه تطبیق را تشکیل می‌دهد؛ دو مولفه مقاومت درین-سورس حالت روشن و سرعت قطع و وصل آن‌ها از مهم‌ترین پارامترهای این کار هستند. در مجموع می‌توان گفت مهم‌ترین عامل برای افزایش کیفیت و سرعت این کار، هزینه آن است و نه آنکه روش یا مبانی علمی آن باشد.

۲-۴-۲- استخراج امپدانس مشخصه مبدل مورد نظر

با توجه به اینکه با تغییر فرکانس، امپدانس مبدل سونار نیز تغییر می‌کند، امپدانس مشخصه مبدل سونار بصورت یک نمودار، بوسیله متلب در شکل (۶)، بخش حقیقی امپدانس و شکل (۷)، بخش موهومی آن در بازه مورد نظر، نمایش داده شده است. این مقادیر بصورت عددی توسط امپدانس‌آنالایزر استخراج شدند. همچنین برای دقت بالای کار، امپدانس آنها، در شرایط مشابه کاری،

شکل (۸) نمودار توان برگشتی بدون تطبیق سامانه سوناری



شکل (۹) نمودار توان ارسالی بدون تطبیق سامانه سوناری

۲-۴-۲- استخراج مدار تطبیق و اندازه المان‌های

تطبیق

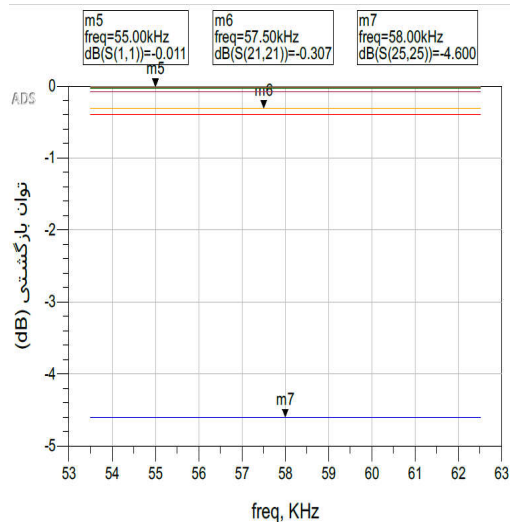
از طریق نمودار اسمیت نرم افزار smithchart v.4 با تفکیک بسیار بالا، المان‌های مدار تطبیق، استخراج شد. مدار تطبیق ایجاد شده بصورت شکل (۴)، مدل T، می‌باشند. تعداد ۱۱ مدار تطبیق، انتخاب شد. اندازه المان‌های مدار تطبیق استخراج شده، مطابق جدول (۲) می‌باشد. در جدول (۲) و (۳) سلف‌ها برحسب میلی‌هانری و خازن‌ها برحسب نانوفاراد هستند.

جدول (۲) مقادیر اندازه المان‌های مدار تطبیق ایده‌آل

57.5Khz	57 KHz	56.5Khz	56Khz	55.5Khz	55 KHz	فرکانس فیلتر
L1=0.3818	L1=0.893	L1=0.3026	L1=3.1	L1=1.435	L1=3.699	اندازه
L2=0.293	L2=0.5155	L2=1.1752	L2=0.405	L2=1.4771	L2=0.8512	المان‌های
L3=0.3777	L3=0.7055	L3=0.23715	L3=2.215	L3=0.992	L3=2.71	تطبیق
	60 KHz	59.5Khz	59 KHz	58.5Khz	58 KHz	فرکانس فیلتر
	C1=20.515	C1=13.974	C1=15.5	C1=40.83	-	اندازه
	C2=3.57	C2=5.6	C2=10	C2=22.4	L2=0.10452	المان‌های
	C3=15.7	C3=13.331	C3=15	C3=34.98	C3=86.97	تطبیق

بهبود قابل قبول، در شبکه تطبیق هوشمند طراحی شده، در نقاط میانی فیلترها ایجاد کنند. در این بخش، طبق جدول (۳) تعداد معقولی تک المان حسب هزینه-فایده انتخاب شده‌است.

نرم افزار ADS، از نظر پارامترهای تطبیق بررسی شده- است. برای این کار امیدانس‌های هر فرکانس را در ADS قرار داده و نمودار S_{11} و S_{21} آن را در بازه فرکانسی مشاهده و بررسی می‌کنیم. نقطه توان برگشتی و توان ارسالی مورد نظر در شکل‌های (۸) و (۹) قابل مشاهده- است. در شکل (۸) به ترتیب توان برگشتی با فاصله ۵۰۰ هرتز در بازه کاری هستند. همچنین در شکل (۹) به همان ترتیب توان ارسالی در همان بازه هستند که هر کدام با رنگ خاصی مشخص شده‌است و بعضی از نقاط متفاوت تر از بقیه، روی فرکانس مورد نظر علامت‌گذاری شده و مقدار آنها نمایش داده شده‌است.



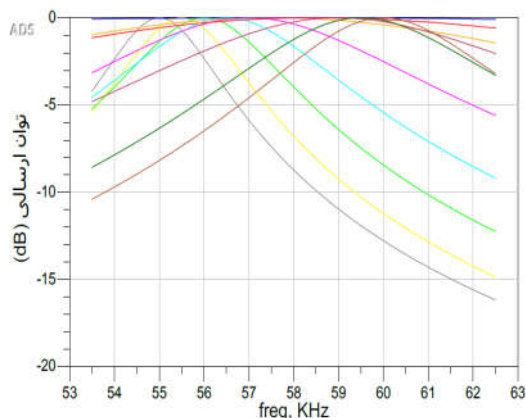
فیلترها یا مدارات تطبیق مشخص شده، برای فرکانس‌های مشخصی با فاصله ۵۰۰ هرتز طراحی شده‌اند؛ برای بهبود در نقاط فرکانسی بین این فرکانس‌های تطبیق شده، می‌توان از تک‌سلف یا تک‌خازن‌هایی استفاده کرد، که یک

جدول (۳) مقادیر تک المان برای تطبیق و بهبود نقاط میانی

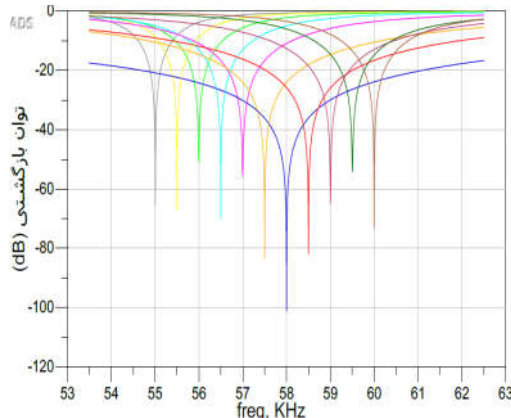
بازه فرکانسی	(55-56.25)Khz	(56.25-57.25)khz	(57.25-58)khz	(58.25-58.75)khz	(58.75-59.25)khz	(59.25-60)khz
اندازه سلف یا خازن	L=2	L=1.1	L=0.5	C=17	C=7.5	C=4.6

۲-۴-۳- نمودار توان ارسالی و بازگشتی فرستنده مورد نظر با اجرای تطبیق

مدار تطبیق استخراج شده، با نرم افزار نمودار اسمیت، در نرم افزار ADS برای همه فرکانسها، پیاده سازی می شود. سپس مولفه های تطبیق شامل توان بازگشتی (S₁₁) و توان ارسالی (S₂₁) در حالت تطبیق ایده آل در نرم افزار، در نمودارهایی که در شکل های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است، بدست می آید. مشاهده می شود که تطبیق کامل صورت گرفته است و در بهترین حالت، ۲۶ دسی بل تطبیق در توان ارسالی و ۸۵ دسی بل بهبود در توان بازگشتی وجود دارد.



شکل (۱۰) نمودار توان ارسالی با تطبیق سامانه سوناری

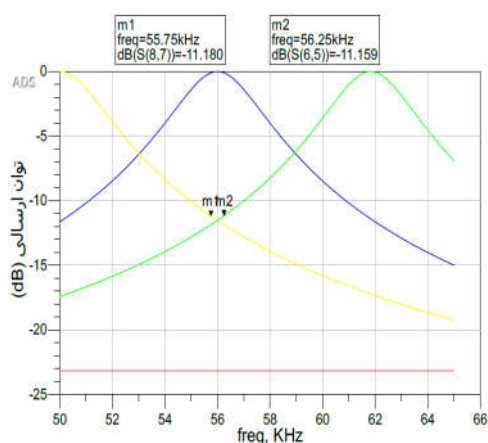


شکل (۱۱) نمودار توان بازگشتی با تطبیق سامانه سوناری

۲-۴-۴- نمودار توان ارسالی و توان بازگشتی

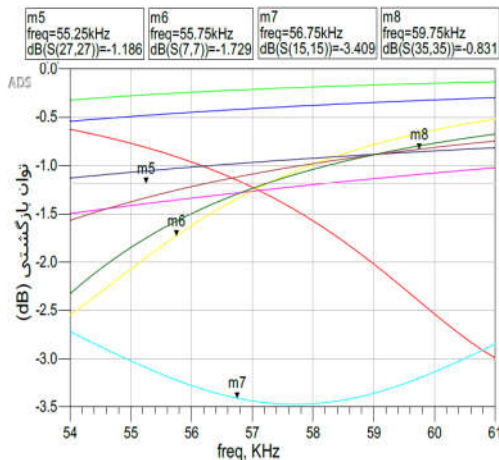
فرستنده، با تطبیق در نقاط بدون فیلتر

برای بررسی تطبیق در بدترین حالت، فیلترها را انتخاب کرده و به فاصله ۲۵۰ هرتز قبل و بعد از آن را بعنوان نقطه میانی انتخاب نموده و امپدانس آن ها را ثبت کرده و پارامترهای تطبیق آن را بررسی می کنیم. به عنوان نمونه در حول فرکانس ۵۶ کیلوهرتز نمودار توان ارسالی و توان بازگشتی بررسی شد. در شکل (۱۲) بهبود حاصل شده در بدترین حالت، روی این نقاط برای توان ارسالی مشاهده می شود. ملاحظه می گردد که حدود ۱۱،۱۵ دسی بل بهبود در توان ارسالی (S₂₁) بدست می آید که قابل قبول است. همچنین در شکل (۱۳) نیز توان بازگشتی نمایش داده شده است که حدود ۰،۳ دسی بل بهبود نیز در توان بازگشتی (S₁₁) مشاهده می شود.



شکل (۱۲) بهبودهای توان ارسالی به فاصله ۲۵۰ هرتز قبل و بعد از مدار تطبیق ۵۶ کیلوهرتز

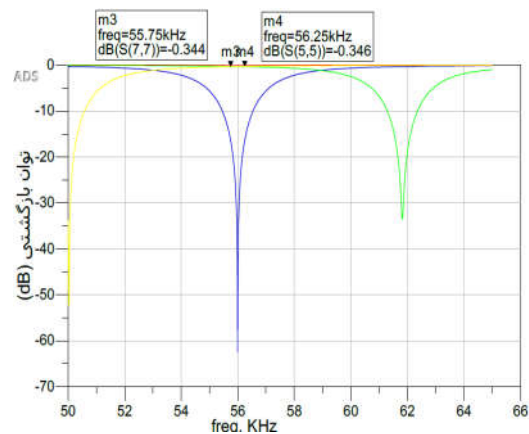
شکل (۱۴) بهبود توان ارسالی با تک المان تطبیق سری



شکل (۱۵) بهبود توان بازگشتی با تک المان تطبیق سری

۲-۴-۶- اندازه‌های واقعی المان‌های تطبیق

در عمل، دستیابی به المان‌های مدارات تطبیق، با اندازه‌های شبیه‌سازی، امکان‌پذیر نیست. برای رسیدن به نزدیک‌ترین مقدار به آن‌ها، می‌توان با توجه به درصد خطای ساخت المان‌ها با اندازه‌گیری توسط LCR متر دقیق، در بین تعداد زیادی المان، اندازه دلخواه را پیدا کرد. همچنین، می‌توان با سیم‌پیچی دستی سلف‌های بشکه‌ای، مقدار مطلوب را ساخت. سوم آنکه، می‌توان با سری یا موازی کردن المان‌ها، اندازه‌های دلخواه را ایجاد کرد. در نهایت، مقادیر المان‌های تطبیق، طبق جدول (۴) در حالت واقعی بدست آمد.

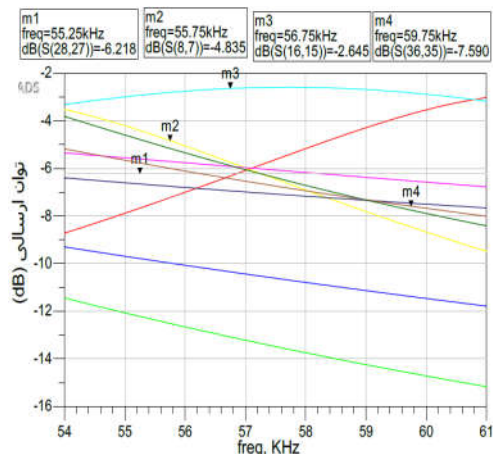


شکل (۱۳) بهبودهای توان بازگشتی در ۲۵۰ هرتز قبل و بعد از فیلتر ۵۶ کیلوهرتز

۲-۴-۵- نمودار توان ارسالی و توان بازگشتی با

اجرای تطبیق تک المان

اگر بهبودهای بدست آمده در نقاط میان فیلترها، کافی نباشد، می‌توان تعداد محدودی المان‌های تکی مطابق جدول (۳) برای دستیابی به بهبودهای قابل قبول در این فرکانس‌ها، استفاده کرد. از نمودار شکل (۱۴) مشاهده می‌شود که بهبود خوبی در توان‌های ارسالی، تا ۱۸ دسی‌بل بهبود و از نمودار شکل (۱۵) مشاهده می‌شود که بهبود تا ۳٫۵ دسی‌بل در توان بازگشتی خواهیم داشت. اندازه این پارامترها می‌تواند با افزایش تعداد فیلترها، بهتر شود.



جدول (۴) مقادیر واقعی المان‌های تطبیق

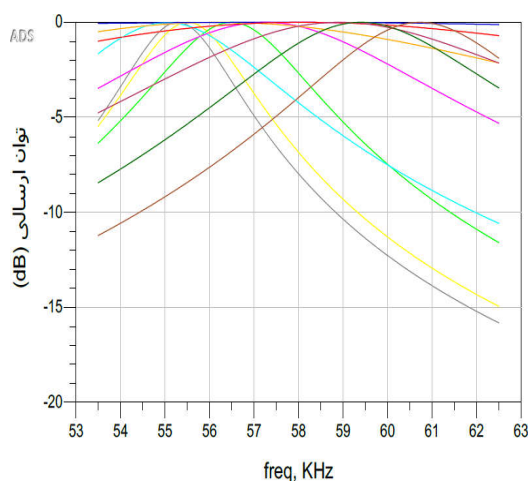
فرکانس فیلتر		اندازه		المان‌های تطبیق	
57.5Khz	57 Khz	56.5Khz	56Khz	55.5Khz	55 Khz
L1=0.3865	L1=0.894	L1=0.3064	L1=3.093	L1=1.463	L1=3.674
L2=0.3006	L2=0.5135	L2=1.199	L2=0.3963	L2=1.473	L2=0.850
L3=0.386	L3=0.700	L3=0.2681	L3=2.201	L3=0.988	L3=2.687
فرکانس فیلتر		اندازه		المان‌های تطبیق	
	60 Khz	59.5Khz	59 Khz	58.5Khz	58 Khz
	C1=20.59	C1=14	C1=15.54	C1=40.75	-
	C2=3.523	C2=5.6	C2=10.01	C2=22.6	L2=0.1061
	C3=15.665	C3=13.04	C3=15.01	C3=34.90	C3=86.75

شکل (۱۷) بهبودهای توان بازگشتی، با المان‌های با اندازه واقعی

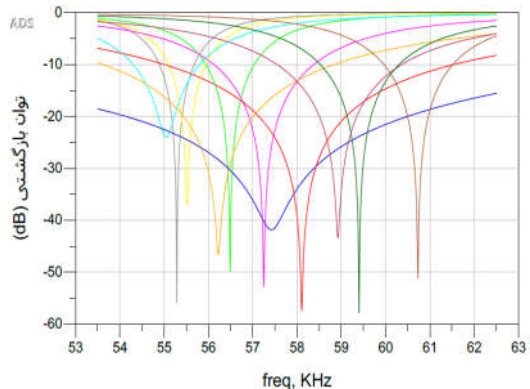
۲-۴-۷- نمودار توان ارسالی و توان بازگشتی

فرستنده با تطبیق المان‌ها با اندازه واقعی

طبق نمودار شکل (۱۶) توان ارسالی فرستنده، با ایجاد تطبیق با اندازه‌های واقعی، اندازه‌ای بسیار نزدیک به ایده‌آل، یعنی همان ۲۶ دسی‌بل دارد؛ اما طبق نمودار شکل (۱۷) توان بازگشتی به بهبود ۵۸ دسی‌بل، یعنی حدود ۲۷ دسی‌بل کمتر از اندازه ایده‌آل دارد.



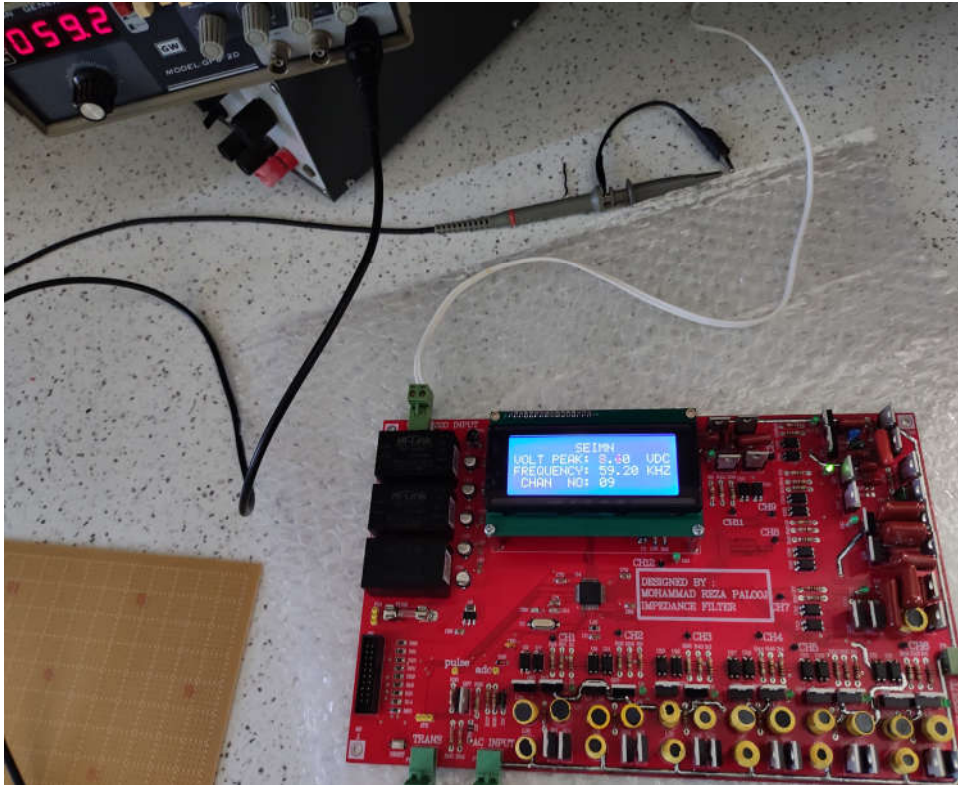
شکل (۱۶) بهبودهای توان ارسالی، با المان‌های با اندازه واقعی



۲-۴-۸- عملکرد شبکه تطبیق امپدانس و الگوریتم

کار آن

هر شبکه تطبیق امپدانس هوشمند برای عملکرد خود، نیاز به یک مبنای عملکرد دارد. شبکه تطبیق هوشمند ساخته شده در این کار، بر مبنای فرکانس و ولتاژ، کار می‌کند. از آنجا که، برای هر فرکانسی در پهنای باند کاری این دستگاه، یک مدار تطبیق، با فاصله هر ۵۰۰ هرتز طراحی شده است؛ لذا هر فرکانس، که دارای مدار طراحی متناظر باشد می‌تواند به سرعت اندازه‌گیری و با بهترین فیلتر ممکن، تطبیق شود. در فرکانس‌های میان دو فیلتر نیز، می‌توان ولتاژ پایانه فرستنده را در حالت تطبیق و تحت بار با دو فیلتر طراحی شده برای فرکانس قبل و بعد از آن مقایسه کرد و هرکدام بیشتر بود به عنوان فیلتر مورد نظر برای آن فرکانس انتخاب نمود. ناگفته نماند که برای انتخاب فیلتر در بین دو فرکانس، بهتر است توان ارسالی اندازه‌گیری شده و هرکدام بزرگ‌تر بود انتخاب شود؛ اما در اینجا به دلیل اینکه تفاوت بسیار ناچیز است و عدم اعوجاج مهم‌تر است؛ از ولتاژ استفاده شده است. شکل (۱۸) یک نمونه از این عملکرد را در فرکانس ۵۹,۲۰ کیلوهرتز و انتخاب کانال ۹ نشان می‌دهد.



شکل (۱۸) فرکانس کار بین دو فیلتر طراحی شده

با توجه به شرح فوق الگوریتم پیاده‌سازی طراحی شده بصورت کلی به شکل (۱۹) است:



شکل (۱۹) فرکانس کار بین دو فیلتر طراحی شده

۳- بحث و نتیجه‌گیری

- ۱- مدارات تطبیق، طراحی شده از طریق نرم افزار smithchart.v4 و پیاده‌سازی و شبیه‌سازی آن‌ها در ADS در بهترین حالت خود، در پارامترهای تطبیق، به ۸۵ دسی‌بل بهبود در

در نهایت، این الگوریتم به زبان برنامه‌نویسی C نوشته‌شد و به میکروکنترلر ARM دستگاه ساخته شده کمپایل شد. این دستگاه با سرعت بسیار بالا، عملکرد خود را به دقت انجام می‌دهد.

راداری را دارد.

منابع:

- [۱] Vivek T. Rathod , “A Review of Electric Impedance Matching Techniques for Piezoelectric Sensors, Actuators and Transducers” mdp.electronics, 2019
- [۲] J. Arnold, S. Gonçalves, L. Bravo Roger, S. Mühlen, “Electrical Impedance of Piezoelectric Ceramics under Acoustic Loads” TOEE, uploaded by Francisco J. Arnold on 04 March 2017.
- [۳] Y. Wang, D. Sun, J. Yong “Design of Broadband Matching Circuit for Underwater Acoustic Communication Transducer” ISRME 2015
- [۴] Y. Yang, X. Wei , L. Zhang , W. Yao, “The Effect of Electrical Impedance Matching on the Electromechanical Characteristics of Sandwiched Piezoelectric Ultrasonic Transducers” MDPI, December 2017
- [۵] F. Peisen, C. Bingyan, Z. Changping, Zhou Yan, Z. Ruigen, X. Xiaohui , G. Yulin, “Characteristics of electrical matching for power piezoelectric transducer” IEEE 2017
- [۶] J-y. Kiml, S. M.Thajeell, S. Choil, D. Kiml, S. Lee, H. Lee, W. Moon , “Design of Adaptive Matching Circuit for Sonar System” (ITEC) Pohang Univ 2016
- [۷] Mohammad Alibakhshikenari1*, Bal S. Virdee2, Pancham Shukla2, Chan H. See3,4, Raed A. Abd-Alhameed5, Francisco Falcone6 & Ernesto Limiti1 “Improved adaptive impedance matching for RF front-end systems of wireless transceivers” nature research 2020.
- [۸] William bodgett "3.5 to 30 MHZ automatic antenna impedance matching system" senior project "electrical engineering department california" august 2012
- [۹] Haiying Huang, , and Daniel Paramo “Broadband Electrical Impedance Matching for Piezoelectric Ultrasound Transducers” IEEE 2011.
- [۱۰] S. Lin , J. Xu, “Effect of the Matching Circuit on the Electromechanical Characteristics of Sandwiched Piezoelectric Transducers” MDPI, January 2017

S_{11} و S_{21} دسی بل بهبود در دست یافتند.

۲- مدارات تطبیق، در بدترین وضعیت تطبیق، در نقاط حداقلی بهبود در فرکانس بین دو مدار تطبیق، به 0.5 دسی بل بهبود در S_{11} و 12 دسی بل بهبود در S_{21} دست یافتند.

۳- برای رسیدن به بهبود بهتر در نقاط میانی دو مدار تطبیق، از المان‌های تکی سلف یا خازن سری استفاده شد که در این حالت به 3.5 دسی بل بهبود در S_{11} و 18 دسی بل بهبود در S_{21} دست یافتند.

۴- در حالت واقعی، امکان دستیابی به این مقدار بهبود، بخصوص در S_{11} ممکن نیست. با اندازه‌های واقعی المان‌های تطبیق، که ساخته یا ترکیب شدند، به 58 دسی بل بهبود در S_{11} و بسیار نزدیک به 26 دسی بل بهبود در S_{21} دست یافتند.

۵- دقت تطبیق، در روش این کار از بهترین انواع تطبیق هاست. سرعت این کار نیز به دلیل استفاده میکروکنترلر و نیز سویچ ماسفتی، بالا است. برای ارتقا سرعت می‌توان از ماسفت‌ها و میکروکنترلر سریع‌تر استفاده کرد.

۶- فرایند تطبیق امپدانس با توجه به استفاده از میکروکنترلر و پارامترهای مشخص شده و در نتیجه انتخاب برتر توسط میکرو، بصورت خودکار انجام می‌شود. لذا به نوعی هوشمند است.

۷- برای افزایش جریان و ولتاژ کاری، فقط نیاز به تغییرات بسیار جزئی و خرید المان‌های با تحمل توان بیشتر است و تکنولوژی جدیدی نیاز ندارد.

۸- این کار قابلیت تعمیم به سامانه‌های تطبیق فرستنده، در سایر کاربردهای پهن‌باند مانند سایر کاربردهای سوناری و آنتن‌های مخابراتی و

- [١١] C. Covaci, A. Gontean, “SPICE Model of a Piezoelectric Transducer” IEEE 2018
- [١٢] V. Matko, M, Milanovič, “Detection Principles of Temperature Compensated Oscillators with Reactance Influence on Piezoelectric Resonator” MDPI 2020
- [١٣] Y. CHEN, S. WANG, H. ZHOU, Q. XU, Q. WANG, J. ZHU, “A systematic analysis of the radial resonance frequency spectra of the PZT-based ($Zr/Ti = 52/48$) piezoceramic thin disks” Journal of Advanced Ceramics 2020
- [١٤] A. Bybi, H. Drissi, M. Garoum, A. Hladky, “One-Dimensional Electromechanical Equivalent Circuit for Piezoelectric Array Elements” Springer Nature Switzerland AG 2019
- [١٥] M. J. Hagmann, “Analysis and equivalent circuit for accurate wideband calculations of the impedance for a piezoelectric transducer having loss” AIP Advances, 2019
- [١٦] R. Queirós, P. S. Girão, A. C. Serra, “Single-Mode Piezoelectric Ultrasonic Transducer Equivalent Circuit Parameter Calculations and Optimization Using Experimental Data” 2004 , uploaded by Ricardo Queirós on 21 April 2015