



توسعه الگوی بهینه صافی و انتگرالگیر مدار آشکارساز یکپارچه کوبش در سامانه مدیریت موتور خودرو

امیرحسین مشرفی^۱، مجید شالچیان^{۲*}، محمد مومنی موحد^۳

^۱ دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، ah.moshrefi@aut.ac.ir

^۲ دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، shalchian@aut.ac.ir

^۳ دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، m_momeni@aut.ac.ir

* نویسنده مسئول، شماره تماس: ۰۲۱-۶۴۵۴۳۳۳۳

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۰ فروردین ۱۳۹۴

پذیرش: ۲۵ شهریور ۱۳۹۴

کلیدواژه‌ها:

شبیه‌سازی مدار یکپارچه کوبش

تشخیص کوبش

زینه بندی کوبش

سامانه مدیریت موتور خودرو

چکیده

در این مقاله دو قسمت اصلی مدار مجتمع آشکارساز علامت کوبش یعنی صافی و انتگرالگیر، شبیه‌سازی شده‌اند. هدف از شبیه‌سازی اجزای کلیدی مدار آشکارساز کوبش، ارائه یک ابزار نرم‌افزاری برای کاهش تعداد آزمون‌ها در فرایند زینه‌بندی متغیرهای وابسته به کوبش در رایانه موتور است. در روش متداول چنانچه برای زینه‌بندی متغیرهای کوبش در بسامد مرکزی از صافی و به ازای شرایط کاری خاص موتور، داده‌هایی از مدار یکپارچه ذخیره شده باشد، برای زینه‌بندی به ازای سایر بسامدهای مرکزی از صافی در همان شرایط کاری موتور و یا با تغییر شرایط کاری نیازمند داده‌های جدید هستیم که در این صورت باید دوباره تجهیزات آزمون را مهیا نمود و آزمون را تکرار کرد. با توجه به اینکه متغیرهای زیادی مانند زاویه شروع و پایان پنجره کوبش، ثابت زمانی مدار انتگرالگیر، بهره علامت ورودی، بسامد مرکزی صافی و شرایط کاری مختلف موتور در تعیین زینه‌بندی صحیح، مؤثر هستند، این روش نیازمند آزمون‌های متعدد و بکارگیری تجهیزات مختلف برای آزمون‌ها و نیز صرف وقت و انرژی زیاد است. راهکار پیشنهادی در این مقاله برای سهولت و افزایش دقت در زینه‌بندی متغیرهای مربوط به کوبش در رایانه موتور، شبیه‌سازی مدار یکپارچه کوبش به صورت نرم‌افزاری است. با استفاده از این الگو می‌توان آزمون‌های سخت‌افزاری را با شبیه‌سازی رفتار مدار در پاسخ به ورودی‌های مختلف جایگزین نمود. در این مقاله صافی بکار رفته در مدار یکپارچه کوبش بر اساس تحلیل پاسخ بسامدی شبیه‌سازی شده است و سپس با استفاده از روش وراثت متغیرهای صافی حاصل، بهینه‌سازی شده است. همینطور واحد انتگرالگیر نیز با روش مبتنی بر روش وراثت شبیه‌سازی و بهینه‌سازی شده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی الگوی جعبه‌های صافی و انتگرالگیر به ازای دور و بار مختلف موتور و در بسامدهای مرکزی مختلف، با داده‌های آزمون موتور نشان می‌دهد که الگو از دقت مناسبی برخوردار است و بیشترین درصد خطای حاصل از شبیه‌سازی ۴٫۷۸٪ است.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱- مقدمه

مقدار شدت کوبش صحیح برای انواع موتورها و شرایط کاری آنها، متفاوت است. لذا روش تشخیص کوبش متداول ارائه شده در بالا، نیازمند زینه بندی متناسب با هر موتور است.

در این میان برای انجام زینه بندی، بایستی شرایطی که منجر به وقوع کوبش می گردد را در دور و بار مختلف موتور و نیز با تغییر سایر متغیرهایی همچون پنجره کوبش و نیز متغیرهای مدار یکپارچه کوبش به طور جداگانه ایجاد نمود و در این شرایط داده های ورودی و خروجی مدار یکپارچه کوبش موجود در رایانه موتور را ذخیره کرد و سپس بوسیله رایانه این داده ها را وارد و تحلیل نمود که این امر نیازمند آزمون های متعدد، بکارگیری تجهیزات مختلف برای ثبت آزمون ها و نیز صرف وقت و انرژی زیاد است.

اما در صورتیکه رفتار مدار یکپارچه کوبش شبیه سازی شود، می تواند موجب سهولت و افزایش دقت زینه بندی گردد.

هم چنین در صورت دسترسی به متغیرهای داخلی مدار یکپارچه کوبش می توان وضعیتی که منجر به تشخیص کوبش دقیق تر با بیشینه همبستگی متقابل^۵ با داده های حسگر فشار استوانه می گردد را به ازای شرایط کاری مختلف موتور بدست آورد.

گانگ وو [۸] بر مبنای روش برآوردیابی، آستانه کوبش را در شرایط کاری مختلف موتور به صورت بلادرنگ^۶ پیش بینی نموده است که در روش مذکور، شدت کوبش را به کمک روش معرفی شده تعیین کرده است. نیلسون و همکاران [۹] بر مبنای روش شدت کوبش معرفی شده، راهکاری برای تشخیص بهتر کوبش های سبک ارائه کرده اند. پیتون و همکاران [۱۰، ۱۱] نیز به کمک شدت کوبش حاصل از این روش، به ارائه الگویی برای پایش کوبش پرداخته اند.

اما تاکنون مقاله ای به شبیه سازی اجزای روش مذکور در مدار آشکارساز یکپارچه علامت کوبش نپرداخته است.

در این مقاله ضمن ارائه روشی، صافی مدار یکپارچه کوبش طراحی و شبیه سازی شده است. سپس به کمک روش وراثت، صافی حاصل بهینه سازی شده است. در ادامه انتگرالگیر مدار کوبش بر مبنای محاسبه تابع تبدیل سامانه، شبیه سازی شده است. در پایان رفتار صافی و انتگرالگیر به ازای دور و بار مختلف موتور و بسامدهای مرکزی مختلف ارزیابی شده است.

۲- صافی و انواع آن

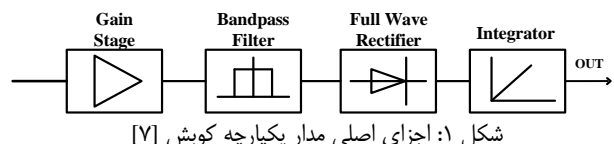
به طور کلی هرگونه عملیات برای محدود کردن یک علامت را تصفیه کردن آن می نامند. صافی ها برای عبور دادن بدون موج^۷ علامت ورودی در بسامد مورد نظر، بایستی دارای پاسخ بسامدی

پدیده اشتعال خود به خودی بخشی از گازهای نسوخته قبل از رسیدن موج اشتعال ناشی از فرمان جرکه، به علت افزایش دما و فشار محلی، کوبش^۱ نامیده می شود [۱]. حرکت موج احتراق ناشی از جرکه، باعث گسترش ناحیه گازهای سوخته و افزایش دما و فشار در اتاق می شود که سبب ایجاد پدیده خود اشتعالی در مخلوط باقیمانده محترق نشده و تولید امواج فشاری می گردد [۲، ۳].

در اثر برخورد این امواج فشاری ناشی از خوداشتعالی با جداره های اتاق احتراق، ارتعاشاتی ناخواسته در بدنه استوانه^۲ رخ می دهد [۴]. این ارتعاشات ناخواسته بوجود آمده در اثر کوبش باعث ایجاد تغییراتی در رفتار موتور می شود که مهمترین آنها شامل نوسانات در منحنی فشار درون استوانه، افزایش ارتعاشات بدنه موتور و صدای ناشی از وقوع خود اشتعالی است [۵].

برای تشخیص کوبش می توان از حسگرهای مربوط به ثبت این اطلاعات استفاده کرد. مناسب ترین حسگر برای تعیین وقوع پدیده کوبش، حسگر فشار استوانه است. اما این حسگر به دلیل قیمت گران و پیچیدگی نصب در موتورهای امروزی استفاده نمی شود. در این میان حسگر لرزشی کوبش^۳ به دلیل قیمت ارزان و سادگی نصب و دقتی به مراتب بالاتر از سایر حسگرهای موجود، به عنوان رایج ترین حسگر در خودروهای امروزی برای تشخیص وقوع کوبش بکار می رود [۶].

این حسگر پیزوالکتریک^۴ روی بدنه موتور نصب می شود و می تواند به طور همزمان ارتعاش همه استوانه ها را اندازه بگیرد. ارتعاشات ثبت شده توسط این حسگر به علامت برقی تبدیل می شود و علامت حاصل به مدار یکپارچه آشکارساز علامت کوبش ارسال می گردد. مدار یکپارچه مذکور شامل چهار قسمت اصلی است. در بخش اول علامت حاصل از حسگر کوبش تقویت می گردد و سپس از یک صافی میانگذر عبور داده می شود تا بسامدهای مربوط به کوبش آن جدا گردد و پس از عبور از یکسوساز تمام موج، علامت حاصل به قسمت انتگرالگیر وارد می شود تا مقدار شدت علامت های دارای بسامد کوبش تعیین گردد. در شکل ۱ ساختار کلی مدار یکپارچه آشکارساز کوبش نشان داده شده است [۷].



¹ Knock

² Cylinder

³ Knock Sensor

⁴ Piezoelectric

⁵ Cross correlation

⁶ Real time

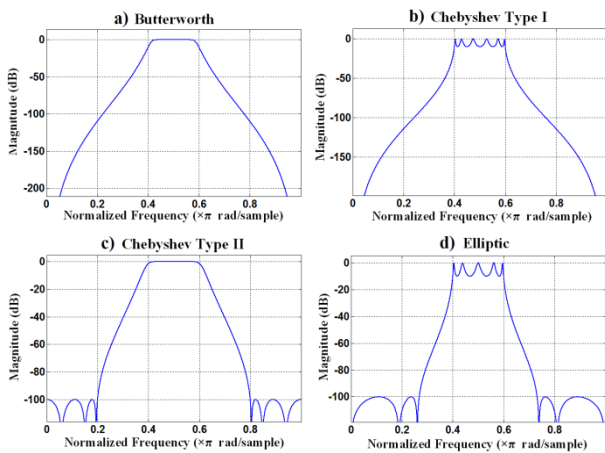
⁷ Ripple

۲-۲- صافی IIR

IIR به معنی صافی با پاسخ ضربه نامحدود است. بدین معنی که اگر به ورودی این نوع صافی، تابع ضربه اعمال شود، خروجی هیچگاه مستهلک نمی شود.

مقدار فعلی این صافی‌ها را می‌توان برحسب مقادیر خروجی زمان های قبلی و مقادیر ورودی قبل، بدست آورد. این صافی‌ها از لحاظ پیاده‌سازی پیچیده‌تر هستند اما پاسخ سریع‌تری دارند. انواع این صافی شامل صافی‌های باترورث، چیبشف نوع ۱، چیبشف نوع ۲ و بیضوی است [۱۲ و ۱۳].

در شکل ۳ خلاصه ای از پاسخ بسامدی مربوط به این ۴ صافی، نشان داده شده است.



شکل ۳: پاسخ بسامدی صافی‌های (a) باترورث (b) چیبشف نوع ۱ (c) چیبشف نوع ۲ (d) بیضوی

۳- شرح شبیه‌سازی صافی

برای شبیه‌سازی دقیق صافی بکار رفته در مدار یکپارچه آشکارساز کوبش، بهترین روش بدست آوردن پاسخ بسامدی صافی است (روش‌هایی همچون تعیین تابع تبدیل سامانه برای طراحی صافی بدلیل پیچیدگی و اطلاعات ناکافی از مشخصات صافی، در مراتب بعدی قرار دارند). برای تعیین این پاسخ بسامدی معمولاً دو روش بکار گرفته می‌شود. در روش اول علامت^۳ نوفه سفیدی^۴ (که متشکل از چند علامت با بسامدهای مختلف و به صورت کاملاً تصادفی است) را به صافی اعمال می‌کنیم و خروجی آن برابر پاسخ بسامدی صافی است.

با توجه به تجهیزات موجود (که نیازمند حافظه دار بودن دستگاه تولیدکننده علامت، برای ایجاد بسامدهای مختلف است) نمی‌توان از این روش استفاده کرد. در روش دوم علامت‌های سینوسی با بسامدهای مختلف و با دامنه ثابتی را به عنوان ورودی به صافی

یک و در سایر بسامدها دارای پاسخی برابر صفر باشند. محدوده بسامدی دارای مقدار یک را باند عبور و محدوده با پاسخ بسامدی صفر را باند قطع صافی می‌نامند. به لحاظ نواحی کاری، صافی‌ها به چهار دسته بالاگذر، پایین گذر، میان گذر و میان نگذر تقسیم می‌شوند.

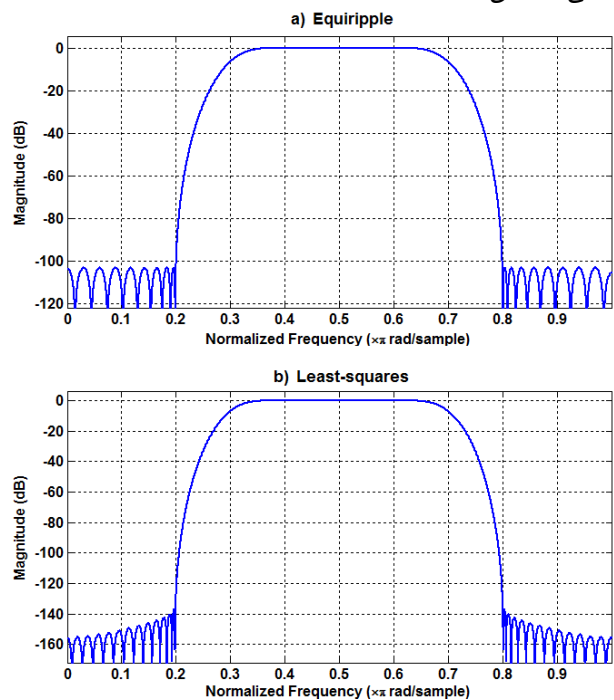
صافی‌ها از نظر پیاده‌سازی نیز به دو دسته صافی‌های FIR^۱ و صافی‌های IIR^۲ تقسیم می‌شوند که در ادامه بطور مختصر این صافی‌ها معرفی می‌گردد.

۲-۱- صافی FIR

FIR به معنی صافی با پاسخ ضربه محدود است. بدین معنی که اگر به ورودی این صافی‌ها تابع ضربه (تابعی با مقدار بی‌نهایت در نقطه صفر و نیز مقدار صفر در سایر نقاط) اعمال شود، خروجی فقط برای مدت زمانی محدود، مقادیر غیر صفر دارد.

مقدار فعلی این صافی‌ها را می‌توان بر حسب مقادیر ورودی زمان های قبلی بدست آورد. این صافی‌ها از لحاظ پیاده‌سازی ساده‌تر هستند اما سرعت پاسخ آنها کند است. انواع این صافی عبارت است از صافی Equiripple و صافی Least-squares [۱۲ و ۱۳].

در شکل ۲ خلاصه ای از پاسخ بسامدی مربوط به این دسته از صافی‌ها، نشان داده شده است.

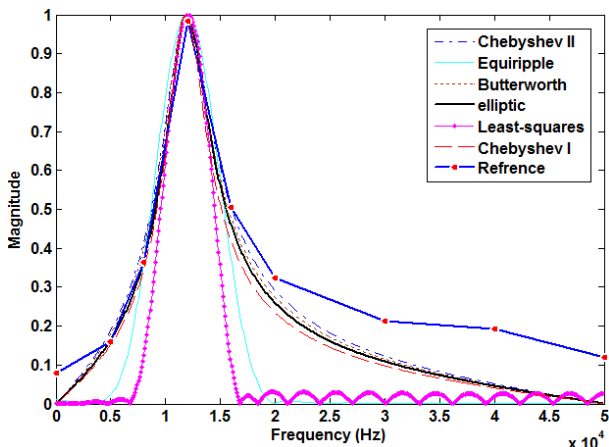


شکل ۲: پاسخ بسامدی صافی‌های (a) Equiripple (b) Least-squares

³ Signal
⁴ White Noise

¹ Finite Impulse Response
² Infinite Impulse Response

با توجه به پاسخ بسامدی بدست آمده در شکل ۵ و نیز با در نظر گرفتن اینکه صافی‌های معرفی شده در بخش ۲، تضعیف نسبتاً متقارن با شیب یکنواخت در باند قطع خود دارند، هیچکدام نمی‌توانند سبب ایجاد چنین پاسخی گردند زیرا تضعیف در سمت راست باند پاسخ بسامدی صافی بدست آمده، یکنواخت نیست (که علت آن اهمیت بسامدهای بالاتر در وقوع پدیده کوبش است). در شکل ۶ این موضوع با مقایسه صافی‌های معرفی شده نسبت به پاسخ بسامدی بدست آمده، نشان داده شده است.



شکل ۶: مقایسه پاسخ بسامدی صافی‌های معرفی شده با پاسخ بسامدی صافی مدار یکپارچه کوبش

شبهه‌ترین صافی‌های IIR به پاسخ بسامدی مرجع، صافی‌هایی با کمترین مرتبه بودند ($n = 1 \text{ or } 2$) و در درجات پایین، موج انواع صافی‌های IIR، محسوس نیست، لذا بین پاسخ بسامدی صافی‌های مذکور، تفاوت محسوس نیست.

همانگونه که ملاحظه می‌گردد، صافی‌های معرفی شده (که شبهه‌ترین صافی به صافی بدست آمده هستند) بدلیل داشتن شیب یکنواخت در باند قطع خود، نمی‌توانند بر پاسخ بسامدی مورد نظر ما منطبق گردند.

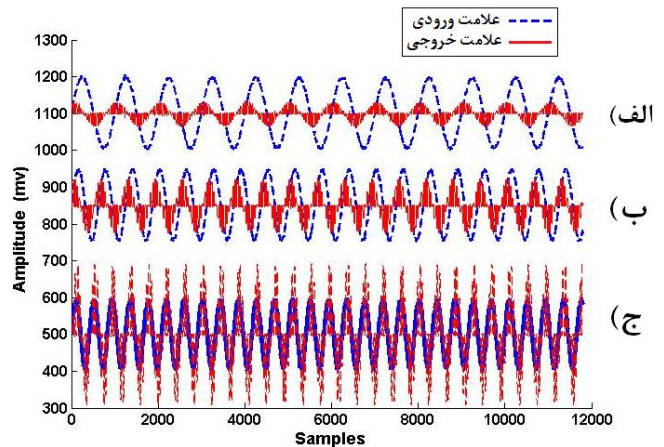
۴- روشی برای شبیه‌سازی صافی مدار یکپارچه کوبش

پاسخ بسامدی صافی بدست آمده از ترکیب چند صافی مجزا تشکیل گردیده است که نمی‌توان به طور دقیق این ترکیب را بدست آورد. اما می‌توان پاسخ بسامدی بدست آمده را در محاسبات، اعمال نمود. به کمک معادله ۱ داریم:

$$y(t) = F^{-1}\{H(\omega)X(\omega)\} \quad (1)$$

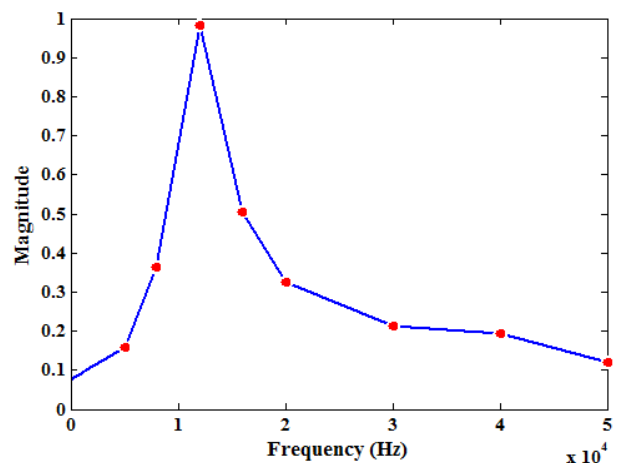
که در معادله بالا، $y(t)$ خروجی حاصل از اعمال صافی، $H(\omega)$ پاسخ بسامدی صافی و $X(\omega)$ تبدیل فوریه علامت ورودی اعمال

اعمال می‌نماید و از تقسیم دامنه طیف بسامدی خروجی به دامنه طیف بسامدی ورودی، دامنه پاسخ بسامدی در آن بسامد خاص حاصل می‌گردد. لذا از روش دوم برای تعیین پاسخ بسامدی صافی استفاده شد. در شکل ۴ علامت‌های ورودی و خروجی اعمال شده به صافی با بسامد مرکزی ۱۲ کیلوهرتز نشان داده شده است.



شکل ۴: علامت ورودی سینوسی و خروجی بدست آمده از صافی با بسامد مرکزی ۱۲ کیلوهرتز (الف) علامت سینوسی با بسامد ۵ کیلوهرتز (ب) علامت سینوسی با بسامد ۸ کیلوهرتز (ج) علامت سینوسی با بسامد ۱۲ کیلوهرتز

سپس به کمک محاسبه تبدیل فوریه علامت ورودی سینوسی و خروجی حاصل، به ازای هشت علامت سینوسی مختلف (با بسامد ۵۰، ۴۰، ۳۰، ۲۰، ۱۶، ۱۲، ۸، ۵ کیلوهرتز) در محدوده ۵۰-۰ کیلوهرتز پاسخ بسامدی در نقاط مذکور مربوط به صافی ۱۲ کیلوهرتزی مطابق شکل ۵ بدست آمد.



شکل ۵: پاسخ بسامدی تقریبی بدست آمده به ازای صافی با بسامد مرکزی ۱۲ کیلوهرتز

۶- روشی برای بهینه سازی الگوی صافی مبتنی بر روش وراثت

خطای بوجود آمده در شبیه سازی، بدلیل تعداد نقاط محدود (۸ نقطه) در محاسبه پاسخ بسامدی صافی می باشد. لذا در این بخش، روشی برای کاهش میزان خطا، معرفی می گردد.

در صورتی که تعداد نقاط افزایش یابد، دقت صافی نیز بهبود می یابد، اما به منظور بررسی نقطه به نقطه پاسخ بسامدی با دقت یک هرتز، بایستی تمامی نقاط باند بسامدی را به کمک علامت های سینوسی با بسامد متناسب تحلیل کرد که با توجه به محدودیت دقت و تفکیک پذیری^۳ تجهیزات اندازه گیری، این محاسبات همواره با خطا همراه خواهد بود ضمن آنکه خطای انسانی نیز در نمونه برداری با حجم بالا محتمل است. لذا به نظر می رسد استفاده از روش های بهینه سازی نظیر وراثت روش مؤثرتری برای کسب دقت مناسب باشد.

روش وراثت روشی برای بهینه سازی مسایل محدود و نامحدود و بر مبنای فلسفه انتخاب اصلح در طبیعت بنا گردیده است. این روش به صورت تکراری جمعیتی از راه حل ها را بهینه می کند.

برای کاهش خطای پاسخ بسامدی، وسط ۸ نقطه معلوم از پاسخ را به عنوان مجهول در نظر می گیریم و به کمک روش وراثت، خطای خروجی صافی را به ازای ۱۰,۰۰۰ داده نمونه مختلف از حسگر کوبش، بهینه می نماییم. در مرحله بعدی وسط نقاط جدید را به عنوان مجهول در نظر می گیریم و روش را تکرار می کنیم. این روند را می توان تا رسیدن به میزان خطای مناسب، پیش برد (در اینجا تا سه مرحله این روند تکرار گردیده است).

برای تعیین داده های نمونه، با توجه به اینکه نوفه زمینه موجود در علامت خروجی یک سامانه می تواند موجب تخمین اشتباه در شبیه سازی سامانه گردد.

لذا از میان داده های ضبط شده، داده هایی که در شرایط خارج از فرآیند احتراق، نوفه زمینه (سطح دامنه ولتاژ) کمتری داشتند، بعنوان داده های نمونه انتخاب شد. همچنین داده های مذکور به ازای دور ۱۶۰۰ تا ۵۵۰۰ دور در دقیقه^۴ و بار نسبی ۷۵٪ تا ۱۲۵٪ انتخاب گردید. از طرفی سعی شد داده هایی که در همه نقاط نوار بسامدی دارای مقدار هستند (که معمولاً داده های ضبط شده در شرایط وقوع کوبش دارای این ویژگی هستند)، به مقدار مناسبی در میان داده های انتخابی گنجانده شود تا نتایج بدست آمده برای کلیه نقاط طیف پاسخ بسامدی دقیق باشد. که در این راستا، بخش قابل توجهی از داده های نمونه از داده هایی که مقدار شدت کوبش آنها توسط مدار یکپارچه کوبش بیش تر از ۵۰٪ (مقدار ۲,۵) تشخیص داده شده بود، انتخاب گردید.

شده به صافی است. عملگر $F^{-1}\{\}$ نیز عبارت داخل خود را از حوزه بسامد به حوزه زمان می برد.

به کمک این روش، ابتدا علامت ورودی را به حوزه بسامد برده و با ضرب آن در پاسخ بسامدی بدست آمده در بخش قبل و نهایتاً تبدیل حاصل به حوزه زمان، می توان با دقت مناسبی به خروجی مورد انتظار دست یافت.

۵- ارزیابی روش ارائه شده در شبیه سازی صافی

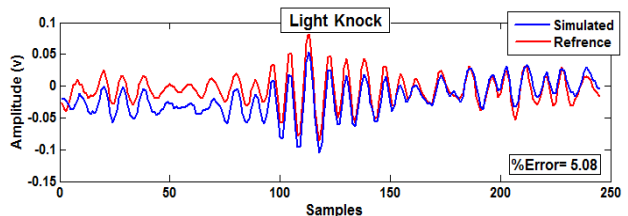
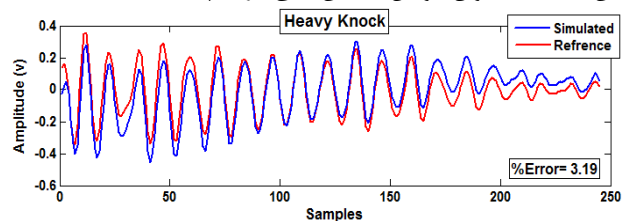
حال در این بخش به بررسی و ارزیابی پاسخ بسامدی صافی مذکور در اثر اعمال علامت کوبش می پردازیم.

معیار محاسبه خطا

برای محاسبه خطا از روش^۱ RMS و بر مبنای میانگین دامنه بردار خطا^۲ (EVM) استفاده گردید که در معادله ۲ تعریف آن نشان داده شده است.

$$EVM(\%) = \sqrt{\frac{\text{mean}[(x - y)^2]}{\text{mean}(x^2)}} \times 100 \quad (2)$$

که در آن x علامت مرجع و y علامت شبیه سازی شده است. شکل ۷ نمونه ای از این ارزیابی را برای دو حالت کوبش سنگین و سبک ضمن مقایسه با علامت خروجی مرجع و به همراه خطای هر علامت، نشان می دهد. (با توجه به اینکه حداکثر مقدار خروجی مدار یکپارچه ۵ ولت است، لذا به صورت تجربی برای کوبش های سبک، محدوده ۴۰ تا ۷۰ درصد مقدار نهایی در نظر گرفته شد و فراتر از این مقدار، به عنوان کوبش سنگین تلقی گردید).



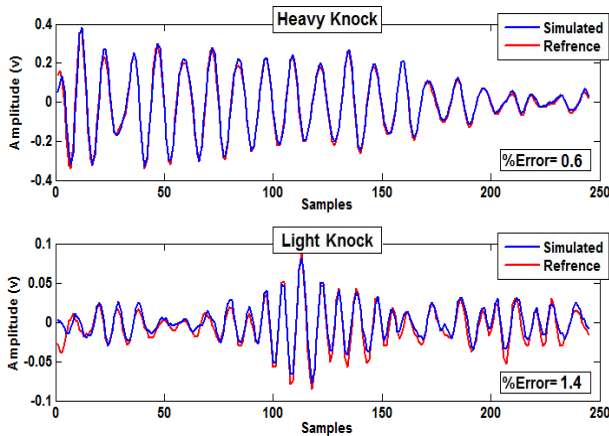
شکل ۷: ارزیابی پاسخ بسامدی صافی در اثر اعمال علامت کوبش در دو حالت کوبش سنگین و سبک به ازای دور ۳۵۰۰ (rpm) و بار نسبی ۱۲۵٪

³ Resolution

⁴ Revolution per minute: rpm = ر.د.د

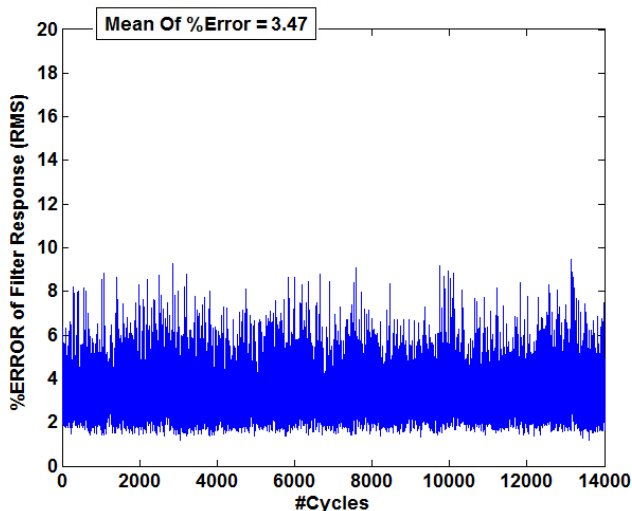
¹ Root Mean Square

² Error Vector Amplitude



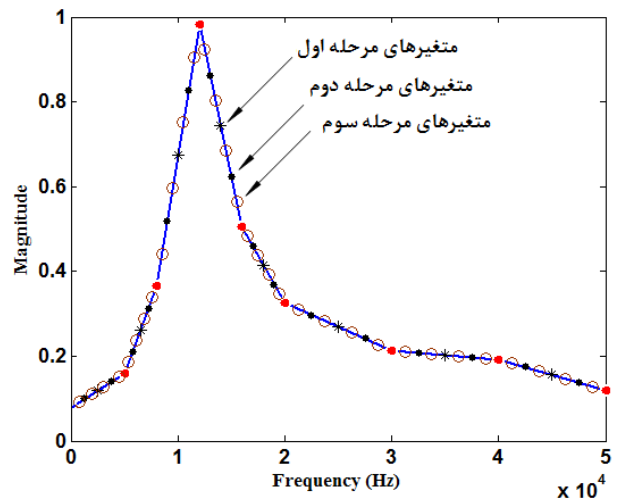
شکل ۱۰: ارزیابی پاسخ بسامدی صافی تصحیح یافته در اثر اعمال علامت کوبش در دو حالت کوبش سنگین و سبک به ازای دور ۳۵۰۰ (rpm) و بار نسبی ۱۲۵٪

حال پاسخ بسامدی شبیه‌سازی شده را برای داده‌های بیشتری از حسگر کوبش ارزیابی می‌نماییم. در شکل ۱۱ و ۱۲ به ترتیب خطای حاصل از اعمال پاسخ بسامدی اولیه و بهبود یافته آن، به ازای ۱۴,۰۰۰ داده از حسگر کوبش نشان داده شده است.



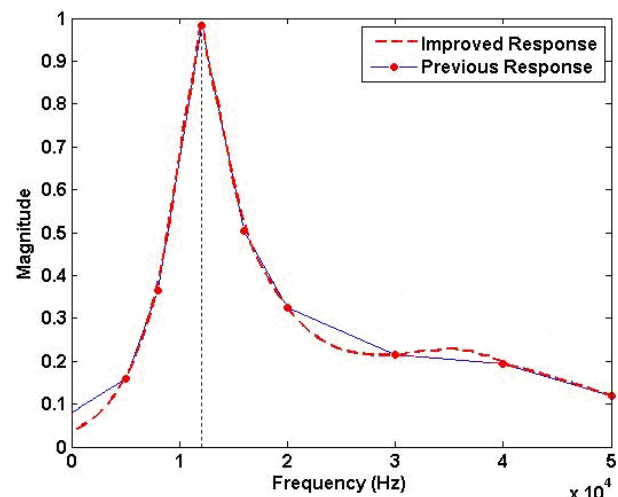
شکل ۱۱: درصد خطای خروجی الگوی اولیه صافی به ازای ۱۴,۰۰۰ داده ورودی حسگر کوبش در دور ۳۵۰۰ (rpm) و بار نسبی ۱۲۵٪

در شکل ۸ توزیع این متغیرها نشان داده شده است.



شکل ۸: کاهش خطا به کمک روش وراثت

و در نهایت پاسخ تصحیح یافته مطابق شکل ۹ بدست آمد.



شکل ۹: پاسخ بسامدی ۱۲ کیلوهرتز بهبود یافته در اثر اعمال روش کاهش خطا

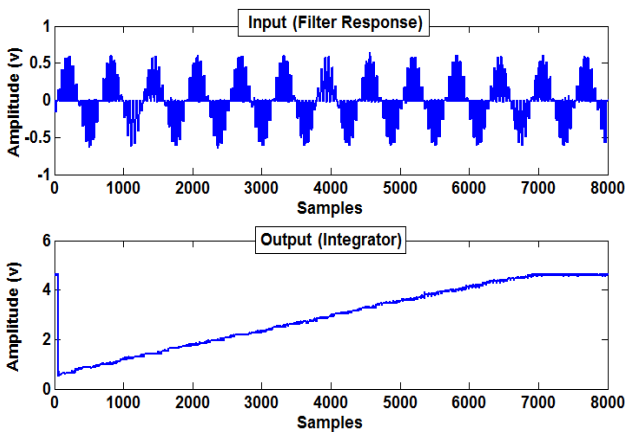
حال پاسخ بسامدی صافی تصحیح یافته را در اثر اعمال علامت کوبش بررسی می‌نماییم. شکل ۱۰ خروجی حاصل از این پاسخ را برای دو حالت کوبش سنگین و سبک قبلی، ضمن مقایسه با علامت خروجی مرجع و به همراه خطای هر علامت، نشان می‌دهد.

از طرفی به کمک معادله ۵ می‌توان ثابت زمانی یک انتگرالگیر را محاسبه نمود [۱۲].

$$V_o = V_p \cdot \frac{\Delta t_{int}}{\tau} + V_{Reset} \quad (5)$$

که V_o مقدار نهایی انتگرالگیر، V_p بیشینه دامنه علامت یک ورودی سینوسی، Δt_{int} طول بازه انتگرالگیری، τ ثابت زمانی انتگرالگیر و V_{Reset} مقدار اولیه انتگرالگیر است.

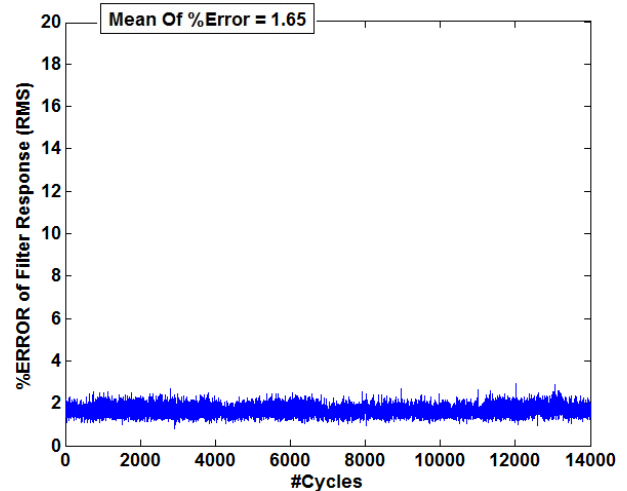
حال به کمک معادله ۵ می‌توان مقدار τ را بدست آورد که بدین منظور نمونه ای از یک علامت سینوسی ۸ کیلوهرتز به مدار یکپارچه کوبش به ازای صافی با بسامد مرکزی ۸ کیلوهرتز اعمال گردید که در شکل ۱۳ علامت خروجی صافی (ورودی اعمال شده به مدار انتگرالگیر) به همراه علامت خروجی انتگرالگیر نشان داده شده است.



شکل ۱۳: علامت خروجی صافی (ورودی اعمال شده به مدار انتگرالگیر) به همراه علامت خروجی انتگرالگیر مربوط به نمونه ای از یک علامت سینوسی

لازم به ذکر است علامت سینوسی ضبط شده توسط دستگاه‌های نمونه برداری اگر چه ممکن است بطور دقیق علامت مربوطه را ذخیره نکرده باشند، اما علامت واقعی اعمال شده، یک سینوسی تک بسامد است.

مطابق شکل ۱۳، دامنه علامت سینوسی (خروجی صافی) برابر ۰٫۶۵ ولت است. از طرفی مطابق شکل، V_{Reset} برابر ۰٫۶۵ و V_o برابر ۴٫۷ ولت است. طول بازه انتگرالگیری نیز از نمونه ۷۳ تا نمونه ۶۸۸۰ ادامه دارد که هر نمونه در یک دوره تناوب نمونه‌برداری بدست آمده است لذا زمان انتگرالگیری $(6880 - 73) \times T_s$ است. بسامد نمونه‌برداری در این آزمایش برابر ۵ مگاهرتز بوده است، لذا دوره تناوب نمونه‌برداری برابر ۲۰۰ نانوثانیه است. بدین ترتیب ثابت زمانی مدار انتگرالگیر برابر ۲۰۱٫۷ میکروثانیه بدست می‌آید.



شکل ۱۲: درصد خطای خروجی الگوی صافی بهبود یافته به ازای ۱۴,۰۰۰ داده ورودی حسگر کوبش در دور ۳۵۰۰ (rpm) و بار نسی ۱٫۲۵٪

همانگونه که در شکل بالا ملاحظه می‌گردد خطای پاسخ بسامدی صافی بهبود یافته تقریباً نصف شده است.

۷- شرح شبیه‌سازی انتگرالگیر

پاسخ بسامدی قسمت انتگرالگیر را نمی‌توان مانند قسمت صافی، به کمک ورودی سینوسی بدست آورد زیرا وجود قسمت یکسوساز در میانه مسیر، علامت وارد شده به انتگرالگیر را از حالت سینوسی خارج می‌کند و هیچگاه نمی‌توان علامت سینوسی تک بسامدی را به قسمت انتگرالگیر اعمال نمود. لذا به سراغ تعیین تابع تبدیل انتگرالگیر می‌رویم.

شکل کلی تابع تبدیل یک انتگرالگیر به صورت معادله ۳ است.

$$H(z) = \frac{b_m z^{-m} + b_{m-1} z^{-m+1} + \dots + b_0}{a_n z^{-n} + a_{n-1} z^{-n+1} + \dots + a_0} \quad (3)$$

که در معادله بالا، درجه n بزرگتر از درجه m است.

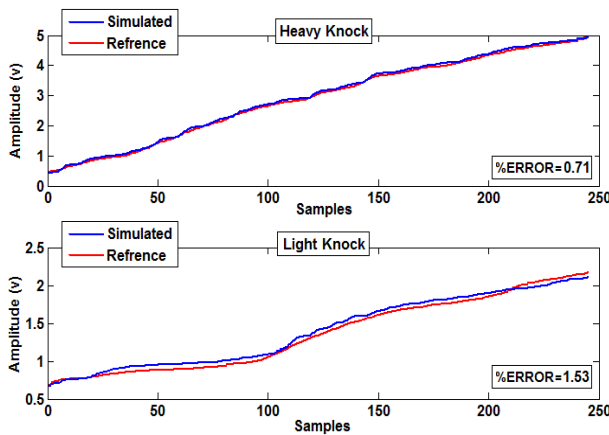
ثابت زمانی انتگرالگیر

مدت زمانی است که طول می‌کشد تا خروجی حاصل از اعمال یک ورودی پله، به ۶۳ درصد مقدار نهایی خود برسد. این کمیت از ویژگی‌های ذاتی یک مدار محسوب می‌شود. به کمک این کمیت می‌توان قطب غالب یک سامانه را بدست آورد. ارتباط بین ثابت زمانی مدار انتگرالگیر و قطب غالب آن، از معادله ۴ تعیین می‌گردد [۱۲].

$$\frac{1}{1 - \alpha} = \frac{\tau}{T_s} \quad (4)$$

که α قطب غالب، τ ثابت زمانی و T_s دوره تناوب نمونه‌برداری است.

خروجی انتگرالگیر مرجع و به همراه خطای هر علامت، نشان می‌دهد.



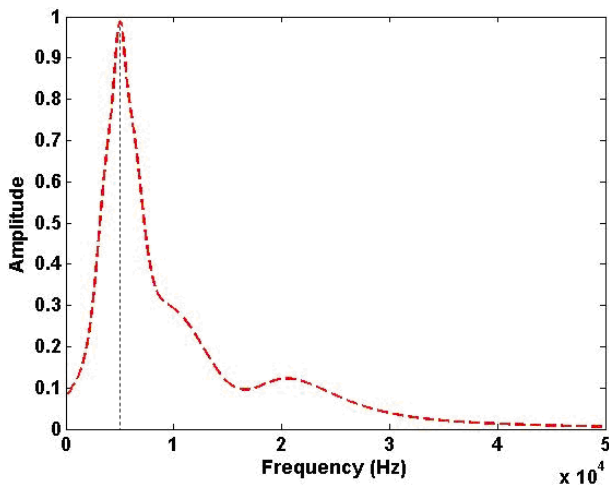
شکل ۱۴: ارزیابی قسمت انتگرالگیر شبیه سازی شده در اثر اعمال خروجی صافی مرجع در دو حالت کوبش سنگین و سبک قبل، به ازای دور ۳۵۰۰ (rpm) و بار نسبی ۱۲۵٪

لازم بذکر است که خطای بدست آمده در این حالت، بدلیل اعمال خروجی صافی مرجع، شامل جمع خطای قسمت انتگرالگیر و نیز خطای ناچیز حاصل از قسمت یکسوساز است که تحت عنوان خطای انتگرالگیر بیان شده است.

۹- ارزیابی اثر تغییرات دور و بار موتور و بسامد مرکزی صافی

در پایان به ارزیابی خطای پاسخ بسامدی صافی به ازای تغییرات دور و بار موتور و به ازای داده‌های جدید (غیر از داده‌های نمونه) می‌پردازیم.

از طرفی به کمک روش بیان شده در شبیه‌سازی صافی، صافی مدار یکپارچه با بسامد مرکزی ۵ کیلوهرتز نیز شبیه‌سازی گردید که در شکل ۱۵ این پاسخ بسامدی نشان داده شده است.



شکل ۱۵: پاسخ بسامدی ۵ کیلوهرتز بهبود یافته

سپس به کمک معادله ۴ می‌توان قطب غالب مدار انتگرالگیر را محاسبه نمود. با قرار دادن مقادیر ثابت زمانی و دوره تناوب نمونه برداری، قطب غالب برابر ۰,۹۹۹۰۱ بدست می‌آید.

در مرحله بعد، برای تعیین سایر صفرها و قطبهای مدار، از روش وراثت استفاده گردید. بدین ترتیب که با مجهول قرار دادن ضرایب آنها به ازای ۱۰,۰۰۰ داده نمونه، خطای علامت محاسبه شده با علامت خروجی انتگرالگیر مرجع را کمینه می‌نماییم.

برای تعیین درجه مدار، با توجه به اینکه شکل نهایی یک انتگرالگیر در بی نهایت، به صورت $1/(a_0 + a_1 z^{-1})$ است، لذا تنها حالتی که مخرج دارای یک درجه بالاتر نسبت به صورت است، بررسی می‌گردد. از طرفی در عمل به دلیل محدودیت‌های طراحی مدارهای مجتمع، این مدارها در درجات کوچکتر طراحی می‌شوند. لذا تنها ۶ حالت معقول از این درجات بررسی گردید که در جدول ۱ کمترین خطا در اثر اعمال درجات مختلف صورت و مخرج بعد از گذشت ۴۰ نسل از اعمال روش وراثت، نشان داده شده است.

جدول ۱: خطای بهینه به ازای درجات مختلف صورت و مخرج در اثر اعمال روش وراثت

درجه صورت (m)	درجه مخرج (n)	%خطای بهینه
۰	۱	۸,۲۵۳۱
۱	۲	۳,۱۷۰۶
۲	۳	۶,۳۰۸۹
۳	۴	۵,۸۱۳۶
۴	۵	۵,۳۹۰۱
۵	۶	۵,۲۷۵۳

همانگونه که در جدول ۱ نشان داده شده است، از میان تعداد حالت‌های مختلف صفر و قطب که منجر به پاسخ یک مدار انتگرالگیر می‌گردد، حالت دو قطب و یک صفر، خطای بسیار کمتری پیدا نمود و در سایر حالات، اختلاف خطای قابل توجهی بدست آمد. در نهایت تابع تبدیل انتگرالگیر حاصل، مطابق معادله ۶ بدست آمد.

$$H(z) = \frac{(1 + 0.2874z^{-1})}{(1 - 0.99901z^{-1})(1 + 0.1037z^{-1})} \quad (6)$$

۸- ارزیابی انتگرالگیر شبیه‌سازی شده

حال به ارزیابی قسمت انتگرالگیر می‌پردازیم. شکل ۱۴، خروجی حاصل از قسمت شبیه‌سازی شده را در اثر اعمال خروجی صافی مرجع در دو حالت کوبش سنگین و سبک قبلی، ضمن مقایسه با

خلاصه نتایج در جدول ۲ نشان داده شده است.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از همکاری شرکت ایپکو در اجرای آزمایش‌ها و به ویژه آقایان مهندس غفوری و محمودی تشکر و قدردانی می‌گردد.

جدول ۲: ارزیابی خطای اثر تغییرات دور و بار موتور و بسامد مرکزی صافی بر خروجی صافی و انتگرالگیر شبیه‌سازی شده

بسامد مرکزی (kHz)	دور و بارنسبی	%خطای صافی	%خطای انتگرالگیر	% کل خطا
۱۲	۵۵۰۰(rpm) ۱۲۵%	۳,۱۱	۱,۶۷	۴,۷۸
۱۲	۳۵۰۰(rpm) ۱۲۵%	۲,۵۶	۲,۰۸	۴,۶۴
۱۲	۲۰۰۰(rpm) ۱۲۵%	۱,۸۹	۱,۶۲	۳,۵۱
۱۲	۲۰۰۰(rpm) ۷۵%	۲,۲۰	۱,۷۷	۳,۹۷
۵	۳۵۰۰(rpm) ۱۲۵%	۲,۳۵	۱,۹۴	۴,۲۹

مراجع

- [1] J. B. Heywood, Internal combustion engine fundamentals, McGraw-Hill Book Company, New York, 1988
- [2] M. Castagno, J. P. Dumas, S. Henriot, F. A. Lafossas, New knock localization methodology for SI engines, SAE International, Paper No. 2003-01-1118, 2003
- [3] G. Derrico, T. Lucchini, S. Merola, C. Tornatore, Application of a thermodynamic model with a complex chemistry to a cycle resolved knock prediction on a spark ignition optical engine, International Journal of Automotive Technology, Vol. 13, pp.389-99, 2012
- [4] D. Kjellqvist, Concept, strategy and controller for Gasoline engine management, MS Thesis, Lulea University of Technology Sweden, 2005
- [5] Eng, J., Characterization of Pressure Waves in HCCI Combustion, SAE Technical Paper 2002-01-2859, 2002
- [6] B. Iorio, V. Giglio, G. Police, Methods of Pressure Cycle Processing for Engine Control, SAE Paper 2003 01-0352, 2003
- [7] U. Kiencke, L. Nielsen, Automotive Control Systems for engine, driveline and vehicle, Springer pub, second edition, 2005
- [8] G. Wu, A Real Time Statistical Method for Engine Knock Detection, SAE Technical Paper 2007-01-1507, 2007
- [9] Y. Nilsson, E. Frisk, L. Nielsen, Weak knock characterization and detection for knock control, Journal of Automobile Engineering, Vol. 223, pp. 107-29, 2009
- [10] J. C. Peyton Jones, J. M. Spelina, J. Frey, Likelihood based control of engine knock, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 21, pp. 2169-80, 2013
- [11] J. C. Peyton Jones, J. M. Spelina, J. Frey, Optimizing knock thresholds for improved knock control, Journal of Automobile Engineering, Vol. 15, pp. 123-32, 2014
- [12] S. Winder, Analog and digital filter design, Newnes pub, second edition, 2002
- [13] A. Oppenheim, R. Schaffer, Discrete-Time Signal Processing, Prentice Hall pub, third edition, 2009

۱۰- نتیجه گیری

ابتدا به کمک تعداد محدودی علامت سینوسی تک بسامد، شکل کلی برای شبیه‌سازی صافی بر مبنای پاسخ بسامدی تعیین گردید و سپس به کمک روش وراثت، الگوی مذکور بهبود داده شد. حداکثر خطای شبیه‌سازی بخش صافی به ازای داده‌های مختلف حدود ۳٪ بدست آمد که این مقدار خطا را می‌توان با افزایش نقاط اولیه در تعیین پاسخ بسامدی یا با افزایش متغیرهای معرفی شده در بخش روش وراثت، کاهش داد.

سپس قسمت انتگرالگیر از مدار آشکارساز کوبش بر مبنای روش تابع تبدیل، شبیه‌سازی گردید که حداکثر خطای شبیه‌سازی این بخش به ازای داده‌های مختلف در حدود ۲٪ بدست آمد.

روش شبیه‌سازی ارائه شده در این مقاله، برای استفاده در شبیه‌سازی صافی و انتگرالگیر مربوط به هر مدار یکپارچه کوبش قابل تعمیم است. به کمک این شبیه‌سازی می‌توان بدون نیاز به داده‌برداری‌های مکرر از رایانه موتور خودرو و به کارگیری تجهیزات اندازه‌گیری، تنها به صورت نرم‌افزاری، متغیرهایی همچون طول پنجره و حد مجاز کوبش را به صورت بهینه زینه‌بندی کرد.

داشتن دسترسی به متغیرهای داخلی مدار یکپارچه کوبش حایز اهمیت است، زیرا می‌توان با تغییر آنها وضعیتی که منجر به تشخیص کوبش دقیق‌تر می‌گردد را به ازای شرایط کاری مختلف موتور بدست آورد.



Development of optimized model for filter and integrator of knock detection integrated circuit in automotive engine management system

A. Moshrefi¹, M. Shalchian^{2*}, M. Momeni Movahed³

¹ Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, ah.moshrefi@aut.ac.ir

² Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, shalchian@aut.ac.ir

³ Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, m_momeni@aut.ac.ir

*Corresponding Author, Telephone Number: +98-21-64543333

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 9 April 2015

Accepted: 16 September 2015

Keywords:

Knock IC simulation

Knock detection

Knock calibration

Automotive Engine Management System

ABSTRACT

In this work two main blocks of integrated circuit for knock signal detection has been modeled. The main goal of modeling key components of knock detection IC is to provide a software tool in order to reduce the number of experiments during calibration of knock parameters in ECU. In conventional method experimental data requires for calibration of knock related parameters for each central frequency of the filter and for several operating conditions of the engine. Since there are several parameters such as beginning and end of knock window phase, time constant of Integrator circuit, input signal gain and filter central frequency, the calibration task requires lots of measurements which is time consuming and expensive. Therefore we propose a behavioral model for two main blocks of knock signal detection integrated circuit, which enable us to use simulation instead of measurement for calibration purpose. A model of knock IC filter has been developed based of frequency response analysis, and then this model has been optimized using genetic algorithm. Similar technique has been used to model the integrator block of the IC. Comparing the model simulation results with experimental data under different engine speed and load and at several central frequencies demonstrates that the model has a reasonable accuracy with maximum error of 4.78%.

© Iranian Society of Engine (ISE), all rights reserved.

