اندازه‌گیری پیچش استاتیکی و دینامیکی محورها- کاربرد ویژه در پایش ارتعاشات پیچشی

محمد سماواتیان[۱]، مجید رجبی[۲]، سید مهدی دربندی[۳]، مهدی بهزاد[۴*]، مهدی الوندی[۵]

[۱] کارشناسی ارشد، سازه کشتی، دانشگاه صنعتی شریف؛ m.samavatian87@gmail.com
[۲] استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران؛ majid_rajabi_iust@yahoo.com
[۳] دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف؛ s.m.darbandi@gmail.com
[۴] استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف؛ m_behzad@sharif.edu
[۵] دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف؛ alvandi1365@yahoo.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۴/۱۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۳۱

کلمات کلیدی:
اندازه‌گیری ارتعاشات پیچشی
نسبت سیگنال به نویز
انتقال سیگنال
الکترولیز

چکیده

یکی از روش‌های مرسوم اندازه‌گیری پیچش در محورها، استفاده از کرنش‌سنج‌هایی متصل بر روی محور مورد نظر با جهت گیری معین می‌باشد. مهمترین معضل استفاده از این روش به منظور پایش برخط و دائمی ارتعاشات پیچشی و یا اندازه‌گیری لحظه‌ای تغییرات گشتاور در مجموعه‌ی دوار، فرایند انتقال سیگنال‌های (تغییرات ولتاژ) به وجود آمده در اثر پیچش می‌باشد.در این مقاله، یک روش ساده، عملی و قابل اجرا، مبتنی بر استفاده از سیالی با قابلیت هادی جریان الکتریکی، محصور شده مابین یک روتور متصل به محور دوار و یک استاتور خارجی، به منظور اصلاح فرایند انتقال سیگنال‌های (تغییرات ولتاژ) ایجادی در کرنش‌سنج، ارائه می‌گردد.در این روش، نیازی به اتصال منبع تغذیه بر روی محور دوار به منظور تامین جریان مورد نیاز تجهیزات اندازه‌گیری نبوده و ولتاژ تغذیه و سیگنال اندازه‌گیری شده از طریق سیال هادی منتقل می‌گردند. سادگی در طراحی، عدم نیاز به اتصال منبع تغذیه بر روی محور، عدم حساسیت به ارتعاشات خمشی و بالا بودن نسبت سیگنال به نویز، این روش اصلاحی را برای اندازه گیری ارتعاشات پیچشی کاندید می نماید.کارایی روش پیشنهاد شده در دو حالت ایستا (بارگذاری استاتیکی) و دینامیک (ارتعاشات آزاد)، بر روی یک چیدمان آزمایشگاهی مورد ارزیابی واقع شده است. همچنین، عملکرد تجهیز در شرایط دوار نیز بررسی گردیده است.

Introducing a Novel Method for Measurement of Stationary and Dynamic Torsion in Shafts – With Application to Monitoring of Torsional Vibration

Mohammad Samavatian[1], Majid Rajabi[2], Seied Mehdi Darbandi[3], Mehdi Behzad[4*], Mehdi Alvandi

[1] *Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, m.samavatian87@gmail.com*
[2] *School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, majid_rajabi_iust@yahoo.com*
[3] *Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, s.m.darbandi@gmail.com*
[4] *Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, m_behzad@sharif.edu*
[5] *Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, alvandi1365@yahoo.com*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 9 Jul. 2015
Accepted: 21 Aug. 2016

Keywords:
Measurement torsional vibration
Signal to noise ratio
Signal transmission
Electrolysis

ABSTRACT

Strain gage mounted on the surface of the shafts with specified directions are one of the common methods for measurement of the torsion in shafts. The most critical problem in utilization of this method, particularly in the online monitoring of torsional vibration and instantaneous torque in rotary systems, is due to its signal transfer process. In this paper, a simple, practical and feasible method is introduced based on the usage of an unionized fluid medium with adequate electrical conductivity, encapsulated in a cylindrical connector aligned along the shaft, with a rotating chamber (rotor part) and a stationary one (stator part). In this method, there is no need for installation of the power supply on the shaft and both of the supply voltage and the generated electrical signals are transferred via the unionized fluid. Simplicity in design and high signal to noise ratio, may candidate this method for torsional vibration measurement. The efficiency of the measurement system is examined on a test setup, for static and dynamic (transient) torsions. Moreover, the applicability of the device is observed on a rotating shaft.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.7.2]

۱- مقدمه

وقوع پیچش علی الخصوص به صورت ارتعاشات در محورهای دوار، به عنوان یکی از عوامل واماندگی در روتور، جعبه دنده و غیره شناخته می‌شود. ارتعاشات پیچشی در اثر تغییر در سرعت دوران و یا تغییر در بار (گشتاور) مورد تحمل توسط محور به دلایل گوناگونی همچون نوسانات فشار گاز احتراق یافته‌ی درون سیلندر، نوسانات فشار گاز بر روی پره‌های کمپرسور، عدم یکنواختی ورودی هوای کمپرسور، خرابی جعبه دنده‌ها، وجود درایورهای فرکانس متغییر و غیره ایجاد می‌گردد[۱]. اندازه گیری ارتعاشات پیچشی بر خلاف سایر مولفه‌های ارتعاشی همچون خمشی و محوری، نیازمند ملاحظات، تمهیدات و تجهیزات پیچیده تری می‌باشد. در این بین، استفاده از کرنش‌سنج متصل بر روی محور، برای اندازه گیری کرنش برشی و همچنین، ارتباط آن با گشتاور وارده، به عنوان روشی ارزان، قابل اتکا و اطمینان مطرح می‌باشد. اما، آنچه استفاده از این روش را با محدودیت مواجه می‌سازد، نحوه‌ی انتقال سیگنال‌های الکتریکی به وجود آمده در کرنش‌سنج به خصوص در تجهیزات دوار می‌باشد. مطالعات مختلف انجام شده در زمینه‌ی اندازه‌گیری پیچش در محورها (خواه از نوع دینامیکی و خواه از نوع استاتیکی) با استفاده از کرنش‌سنج، نشانگر استفاده از سه طرح کلی تماسی، نیمه تماسی و غیر تماسی به منظور انتقال سیگنال‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد.

عمده فعالیت‌های مرتبط با روش‌های تماسی، مبتنی بر استفاده از زغال یا جاروبک می‌باشد. به عنوان مثال، موفتاه و هریس [۲]، توان ورودی یک سیستم دوار را با اندازه‌گیری گشتاور پیچشی توسط کرنش‌سنج و اندازه‌گیری دور توسط تاکومتر استخراج نمودند به طوری که برای انتقال سیگنال ارتعاشات پیچشی از محور به استاتور، از رینگ لغزشی[۱] که مبتنی بر انتقال جریان الکتریسیته از طریق زغال است، استفاده نمودند. این روش، یک روش کاملا اقتصادی برای کاربردهای صنعتی و در سرعت‌های متوسط (حداکثر ۶۰۰۰ دور بر دقیقه[۳]) محسوب می‌گردد. اما در سرعت‌های بالاتر، به شدت نسبت سیگنال به نویز کاهش می‌یابد که در نتیجه‌ی خوردگی زغال و تغییرات مقاومت آن‌ها در حین انتقال اطلاعات، می‌باشد[۴]. سایش رینگ‌ها و غبارهای تولیدی توسط زغال‌ها می‌توانند به سرعت جلوی انتقال سیگنال را بگیرند و این مستلزم این است که به صورت منظم و همیشگی، رینگ‌ها و زغال‌ها را تمیز نمود[۳]. همچنین گرمای به وجود آمده در محل سایش و اتصال رینگ لغزشی و زغال‌ها، تاثیر قابل توجهی در مقادیر اندازه‌گیری شده دارند.

در روش نیمه تماسی، از کانکتورهایی حاوی سیالی رسانا از جنس فلزات مایع همچون جیوه و برم مابین محور و استاتور تعبیه شده به موازات محور دوار استفاده می‌گردد[۵]. فلز مایع و رسانا، به سادگی و با نسبت بسیار بالای سیگنال به نویز، سیگنال‌های الکتریکی را از کرنش‌سنج به پردازنده‌ی بیرونی انتقال می‌دهد. مهمترین محدودیت ناشی از سمی بودن، چگالی بالا، و دمای جوش پایین آنها می‌باشد. در بین فلزات رسانا، تنها جیوه و برم در دمای اتاق در فاز مایع هستند. جیوه با توجه به محدودیت‌های زیادی که دارد از جمله هزینه بسیار بالای آن و همچنین سمی بودن، عملا امکان استفاده از آن وجود ندارد. همچنین برم نیز به دلیل سمی بودن و پایین بودن دمای جوش آن (۵۸ درجه سانتیگراد)، برای کاربردهای صنعتی مناسب نمی‌باشد.

در روش‌های غیر تماسی، زابلر و همکاران [۶]، سیستم اندازه‌گیری گشتاور پیچشی را برای ستون فرمان اتومبیل طراحی و ساختند. در این سیستم، برای اندازه‌گیری گشتاور پیچشی از کرنش‌سنج استفاده شده است. همچنین برای انتقال سیگنال از روتور به استاتور و انتقال توان الکتریکی از استاتور به روتور، از روش القای ولتاژ در دو سیم‌پیچ جفت شده استفاده کردند. دافمن و موروسلاو [۷]، به اندازه‌گیری ارتعاشات پیچشی روتور توربین با وجود ترک در ریشه‌ی پره‌های توربین پرداختند. در این مقاله، جهت پایش ارتعاشات پیچشی توربین از مبدل‌های مغناطیسی مرتبط با نوک دنده چرخ‌دنده‌ها استفاده شده است. لینگ و همکاران [۸]، ارتعاشات پیچشی توربو- ژنراتور که به دلیل ضربات الکتریکی شبکه توزیع برق ایجاد می‌شود را توسط ارتعاش‌سنج پیچشی لیزری اندازه‌گیری کرده‌اند. همچنین نشان داده شده است که این روش، در عین آسانی اجرا، قابلیت کالیبره شدن در همان محل اندازه‌گیری را نیز دارد. از دیگر تکنیک‌های مورد استفاده در این حوزه، روش ترانسفورمر دوار[۲][۳]، سیستم اندازه‌گیری از راه دور[۳][۹، ۱۰]، پیچش‌سنج[۴][۹]، سنسورهای مجاورتی[۵][۱۱]، ارتعاش‌سنج لیزری [۱۲، ۱۳]، اندازه‌گیری ارتعاشات پیچشی القایی[۶][۷، ۱۴]و اندازه‌گیری جریان و ولتاژ موتورهای دوار [۱] را می‌توان نام برد. در این بین، استفاده از روش ترانسفورمرهای دوار، تا محدوده‌ی سرعت‌های بالاتری در قیاس با رینگ‌های لغزشی، امکان پذیر است و در عین حال، بسیار دقیق‌تر نیز می‌باشد. مشکل اساسی این سیستم‌ها، ظرفیت تحمل بسیار پایین آنها در مقابله با بارگذاری‌های خمشی و محوری می‌باشد. به علاوه، این سیستم‌ها نیازمند تامین جریان متناوب می‌باشند[۳].

سایر روش‌های غیر تماسی دیگر همچون استفاده از لیزر یا سیستم‌های تلمتری، از ضروریت استفاده از تجهیزات جانبی زیاد و نسبتا گران قیمت رنج می‌برند. همچنین، حساسیت و تاثیرپذیری از

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.7.2]

سایر مولفه‌های ارتعاشی (ارتعاشات خمشی و محوری) نیز بعضی از روش‌های فوق الذکر را همچون اندازه‌گیری جریان و ولتاژ موتور یا روش ارتعاشات پیچشی القایی، با محدودیت روبرو می‌سازد.

لذا در این پژوهش، یک روش ابتکاری مبتنی بر استفاده از یک سیال واسط یونیزه شده (الکترولیت) برای انتقال سیگنال‌های الکتریکی به وجود آمده بر روی کرنش‌سنج متصل بر روی محور دوار، به منظور استخراج رفتار ارتعاشی پیچشی محور دوار معرفی می‌گردد تا علاوه بر عدم نیاز به وجود منبع تغذیه بر روی سیستم دوار، از ایجاد نویز ناشی از مصرف ماده‌ی واسط انتقال سیگنال، جلوگیری شود. برای بررسی کارایی روش طراحی شده، یک سیستم آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده است و با انجام مجموعه‌ای از تست‌های استاتیکی و دینامیکی، عملکرد سیستم طراحی شده مورد سنجش واقع شده است. سیستم پیشنهادی علاوه بر بررسی نحوه‌ی تغییرات کرنش برشی، می‌تواند به عنوان سیستم اندازه گیری و پایش گشتاور وارده بر محور استفاده گردد.

۲- بررسی قابلیت انتقال سیگنال الکتریکی توسط سیال یونیزه شده ی دوار

۲-۱- یونیزاسیون سیال واسط

همانطوری که بیان گردید، ایده اصلی انتقال سیگنال‌های الکتریکی ایجاد شده بر روی مدار کرنش‌سنج، استفاده از یک سیال واسط یونیزه شده می‌باشد که درون یک محفظه‌ی استوانه‌ای قرار می‌گیرد. سیال یونیزه شده، به دلیل وجود فراوان یون‌های الکتریکی آزاد، قابلیت انتقال سیگنال الکتریکی را خواهند داشت. ماهیت سیال گونه‌ی ماده‌ی واسط، موجبات عدم بروز تنش برشی و در نتیجه، عدم بروز سایش می‌گردد. همچنین، قیمت بسیار پایین سیالات الکترولیت، رسانایی قابل توجه و بی‌خطری بسیاری از آنها برای سلامتی کاربران و تجهیزات، بر مزیت‌های آنها می‌افزاید.

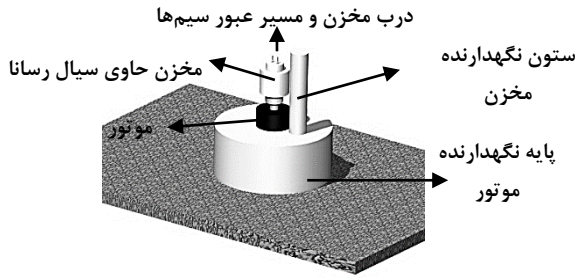
در پژوهش حاضر، از اسید سولفوریک به دلیل قابلیت هدایت الکتریکی بسیار بالا [۱۵]و از طرفی، امکان رقیق سازی آن برای افزایش ایمنی مصرف، استفاده می‌گردد. واکنش الکترولیز صورت گرفته شده در آند و کاتد و محصولات یونی ایجادی در مواجه با آب، مطابق جدول ۱ می‌باشد.

۲-۲ - امکان سنجی انتقال سیگنال‌های الکتریکی در حالت دوار

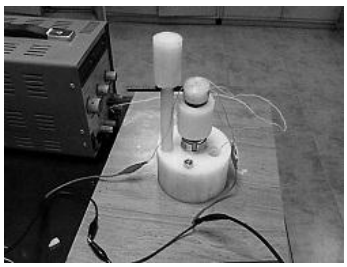
ابتدا سیستمی جهت بررسی نحوه و کیفیت انتقال سیگنال‌های الکتریکی از محیط سیال یونیزه شده در حالت دوار، طراحی و ساخته شده است. در این تجهیز آزمایشگاهی، سیال درون یک محفظه استوانه ای قرار می‌گیرد. محفظه[۷] مذکور، دارای دو رویه‌ی درونی و بیرونی می‌باشد که رویه‌ی درونی از جنس PTFE با پایداری حرارتی تا دمای۲۶۰°C و دمای ذوب ۳۴۰°C می‌باشد و همراه با محور دوار می‌چرخد. رویه بیرونی از جنس تفلون[۸] انتخاب گردیده است. انتخاب تفلون، به سبب عدم واکنش با سیال الکترولیت صورت گرفته شده است. رویه بیرونی، ثابت گردیده و نقش یک استاتور را ایفا می‌نماید. هر دو رویه و در حقیقت کانکتور[۹]، به صورت هم‌مرکز[۱۰] با محور دوار طراحی می‌گردند. محور دوار به یک موتور الکتریکی ۲۰ وات متصل می‌باشد. محفظه فوق‌الذکر، دارای دو شیار آب‌بند شده به منظور عبور سیم‌های عبور جریان الکتریکی ورودی و خروجی می‌باشد. شیارها به گونه ای تعبیه شده اند تا سیم‌های انتقال دهنده ی سیگنال الکتریکی و دریافت کننده ی آن، به صورت معلق و روبروی هم در سیال قرار گیرند. به منظور جلوگیری از واکنش شیمیایی سیم‌ها با محلول الکترولیت، از یک روکش گرافیتی استفاده می‌شود. شکل ۱، تصویری شماتیک را از چیدمان نمایش می‌دهد. مجموعه آزمایشی نهایی، در شکل ۲ ملاحظه می‌گردد.

جدول ۱ - واکنش الکترولیز اسید سولفوریک

مشخصات واکنش	فرمول شیمیایی
الکترولیت	$H2SO4(aq)$
محصول کاتد منفی	$H2$
واکنش در الکترود منفی	$2H+(aq) + 2e- => H2(g)$
محصول آند مثبت	$O2(g)$
واکنش در الکترود مثبت	$4OH-(aq) => 2H2O(l) + O2(g) + 4e-$



شکل ۱ - طرح شماتیک بررسی قابلیت عبور سیگنال الکتریکی از سیال در حالت دوار



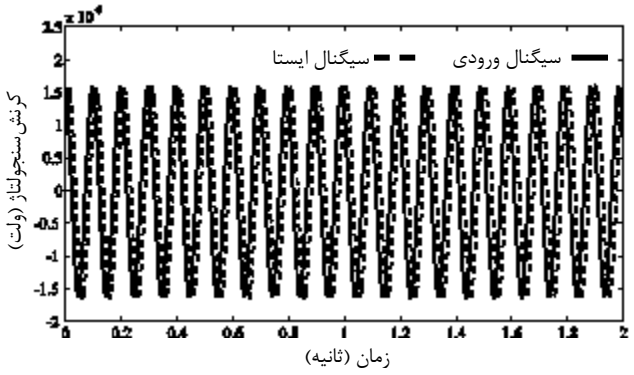
شکل ۲ - مجموعه ی کانکتور حاوی سیال و سیم‌های انتقال جریان

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

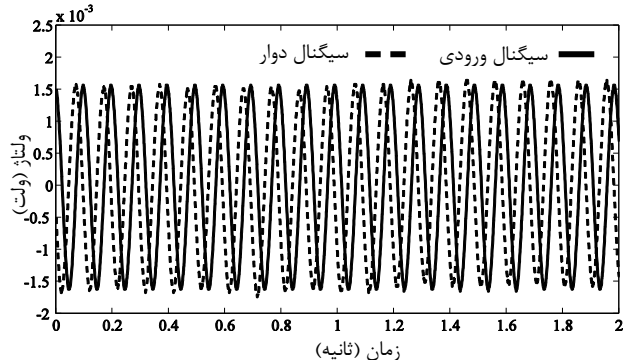
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.7.2]

برای تولید سیگنال مرجع (ورودی) با ولتاژ پایین و کیفیت بالا (بدون نویز)، از دستگاه مولد سیگنال[11] ساخت شرکت الکترونیک افزار آزما استفاده شده است. یک دستگاه منبع تغذیه، برای تامین توان مورد نیاز موتور و برای نمایش سیگنال عبوری از سیال، از دستگاه اسیلوسکوپ[12] استفاده شده است. برای ذخیره و نمایش سیگنال عبوری، از دستگاه پرتابل داده‌برداری[13] ساخت شرکت ادونتک[14] استفاده شده است. پردازش سیگنال و استخراج پاسخ فرکانسی[15] نیز در نرم افزار متلب انجام گرفته شده است. سیال مورد استفاده، اسید سولفوریک رقیق شده می‌باشد. اندازه‌گیری‌ها در دو حالت ایستا و دوار انجام شده است. سیگنال ورودی، موجی سینوسی با فرکانس ۱۰.۲۵ هرتز و ولتاژ حدود ۱.۵ میلی ولت می‌باشد.

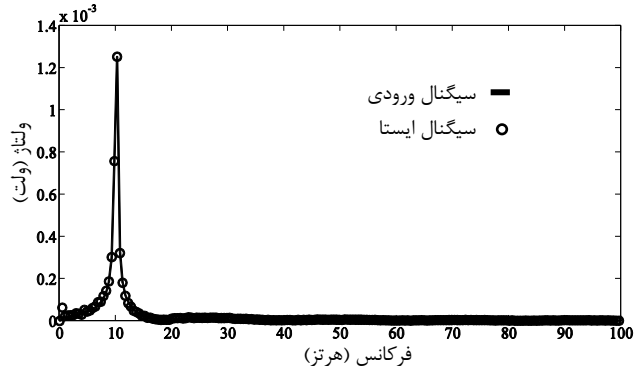
پاسخ زمانی سیگنال ورودی و سیگنال مورد اندازه گیری، در دو حالت سیال ساکن و دوار، به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود. اختلاف فاز مشاهده شده در این سیگنال‌ها، به دلیل اختلاف در شروع زمان اندازه‌گیری سیگنال آنالوگ ولتاژ است. همچنین، پاسخ‌های فرکانسی مورد نظر نیز به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نمایش داده شده‌اند. همانگونه که ملاحظه می‌شود، تبعیت قابل قبولی مابین سیگنال‌های الکتریکی ورودی و خروجی وجود دارد. به علاوه، با توجه به امکان اتلاف انرژی سیگنال، مقادیر جذر میانگین مربع‌های[16] سیگنال‌های مذکور که نشان‌دهنده انرژی سیگنال می‌باشد، محاسبه گردیده و در جدول ۲ آورده شده‌اند. اتلاف بسیار ناچیز در فرایند عبور سیگنال‌ها نیز جالب توجه بوده و نوید بخش قابلیت اجرایی سازی ایده مورد نظر در این پژوهش می‌باشد. همچنین مقدار SNR (نسبت سیگنال به نویز) برای نمودار شکل ۴ برابر 39.1812 dB بدست آمد که نشان دهنده نویز پایین ترانسفورمر دوار با دامنه 1.5 mV با سیال الکترولیت می‌باشد (قدرت حدود ۱۰۰ برابری RMS سیگنال نسبت به RMS نویز سیگنال در دامنه ولتاژ 1.5 mV).



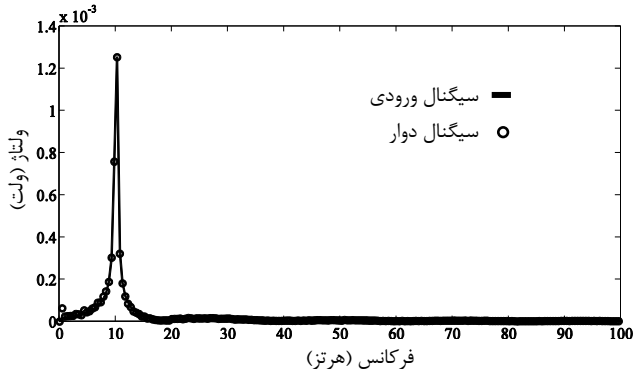
شکل ۳- تابعیت زمانی سیگنال ورودی و خروجی - حالت ایستا



شکل ۴ - تابعیت زمانی سیگنال ورودی و خروجی حالت دوار



شکل ۵ - طیف فرکانسی سیگنال خروجی از سیال و سیگنال اصلی تولید شده از دستگاه مولد سیگنال – حالت ایستا



شکل ۶ - طیف فرکانسی سیگنال خروجی از سیال و سیگنال اصلی تولید شده از دستگاه مولد سیگنال – حالت دوار

جدول ۲ - مقادیر rms و فرکانس سیگنال اصلی سیگنال‌های ورودی به سیال و خروجی از سیال در دو حالت ساکن و دوار

	سیگنال اصلی	سیگنال حالت ایستا	جذر میانگین مربع‌ها سیگنال حالت دوار
جذر میانگین مربع‌ها	۰/۰۰۱۱۱۰۴	۰/۰۰۱۱۱۵۴	۰/۰۰۱۱۱۵۶
درصد خطا جذر میانگین مربع‌ها (٪)	----	۰/۴۴۵	۰/۱۰۷

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.7.2]

۳- پیکربندی مجموعه کرنش‌سنج،کانکتور انتقال‌دهنده سیگنال و سیستم داده برداری[۱۷]

۳-۱- انتخاب نوع کرنش‌سنج و نحوه ی آرایش بر روی محور

کرنش‌سنج انتخابی، نیازمند حساسیت بالا، پایداری مدار الکترونیکی، رفتار خطی و پسماند کم می‌باشد. همچنین، حساسیت پایین به دما، اندازه فیزیکی و جرم کوچک از جمله ضروریات می‌باشد. بدین منظور، کرنش‌سنج مورد استفاده از نوع متال فویل[۱۸] و ماده‌ی تشکیل دهنده‌ی آن نیز از نوع پلیمید[۱۹] (به دلیل بیشترین مقدار حساسیت ممکن به کرنش اعمالی) انتخاب گردید. نحوه‌ی استقرار کرنش‌سنج بر روی محور نیز به منظور اندازه‌گیری کرنش‌های اصلی و ارتباط آنها با کرنش پیچشی، به صورت ۱ جفت دوتایی به صورت پشت و رو و با زوایای ۴۵ درجه نسبت به امتداد محور و بر اساس مدار پل وتسون[۲۰] طراحی گردیده است.این چیدمان به پل کامل[۲۱] شهرت دارد. شکل ۷ شماتیکی از نحوه چیدمان را نمایش می‌دهد. این نوع چیدمان، موجب حذف اثر تغییر شکل‌های خمشی و محوری و نیز تاثیر تغییرات دمای محیط بر روی ولتاژ خروجی کرنش‌سنج می‌گردد. نحوه‌ی اتصال کرنش‌سنج بر روی محور نیز با استفاده از چسب استاندارد مخصوص اتصال کرنش‌سنج بر روی فلز صورت می‌پذیرد. برای کاربردهای صنعتی، اتصالات دائمی ضرورت می‌یابد.

۳-۲- گشتاور اعمالی، کرنش برشی و ولتاژ ایجادی

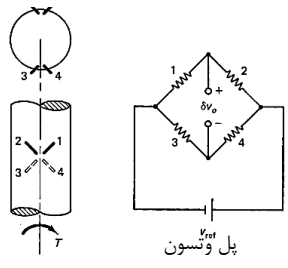
برای یک پل وتسون کامل، نسبت تغییرات ولتاژ دو سر مدار به ولتاژ مرجع (مطابق شکل ۷)، بر اساس رابطه (۱) توصیف می‌گردد [۱۶]

$$\frac{\delta v_0}{v_{ref}} = \frac{(R_2\delta R_1 - R_1\delta R_2)}{(R_1+R_2)^2} - \frac{(R_4\delta R_3 - R_3\delta R_4)}{(R_3+R_4)^2}. \qquad (۱)$$

برای حالت مورد استفاده در این پژوهش که تمامی مقاومت‌ها یکسان می‌باشد، این رابطه به صورت رابطه (۲) ساده می‌گردد

$$\frac{\delta v_0}{v_{ref}} = k\frac{\delta R}{4R}, \qquad (۲)$$

در رابطه ۲، k مبین ثابت پل می‌باشد که برای پل وتسون مورد استفاده، برابر با ۴ می‌باشد. از طرفی، مابین تغییرات مقاومت الکتریکی بوجود آمده با کرنش اصلی اعمالی به هر المان کرنش‌سنج، رابطه ی (۳) برقرار است [۱۶, ۱۷]



شکل۷ - تصویر شماتیک چیدمان کرنش‌سنج بر روی محور به صورت پل کامل

$$\frac{\delta v_0}{v_{ref}} = \frac{k}{4}S_s\varepsilon, \qquad (۳)$$

در رابطه (۳)، نسبت تناسب $S_s = \alpha_R(1-2\nu)+(1+2\nu)$ با در نظر گرفتن $\alpha_R = \frac{d\rho/\rho}{dV/V}$ به عنوان یک ثابت ماده و ν به عنوان ثابت پواسون استخراج می‌گردد. لذا، با ترکیب روابط (۲) و (۳)، نسبت تغییرات ولتاژ کرنش‌سنج به کرنش ایجادی در آن به صورت رابطه ۴ خلاصه می‌گردد.

$$\frac{\delta V_0}{V_{ref}} = (\frac{k}{4}S_s)\varepsilon, \qquad (۴)$$

از طرفی، برای گشتاور و کرنش برشی بیشینه اعمالی بر سطح محور، روابط (۵) و (۶) استخراج می‌گردد.

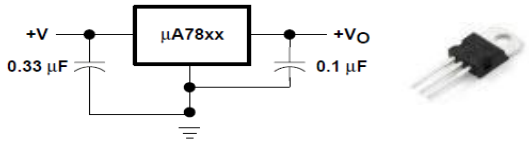
$$T = \frac{8G(1+\nu)J}{kS_s r}\frac{\delta v_0}{v_{ref}}, \qquad (۵)$$

$$\gamma_{max} = \frac{16G(1+\nu)^2}{EkS_s}\frac{\delta v_0}{v_{ref}}. \qquad (۶)$$

۳-۳- مدار الکترونیکی کرنش‌سنج : ولتاژ تغذیه ی مرجع، یکنواخت کننده[۲۲] و تقویت کننده[۲۳]

به منظور تامین تحریک پل وتسون معمولا از یک ولتاژ ثابت استفاده می‌شود.استانداردی برای سطح ولتاژی مورد استفاده در کاربردهای مختلف وجود ندارد، ولی ولتاژ تحریک معمولا بین ۳ تا ۱۰ ولت رایج است[۱۸].ولتاژ زیاد هم باعث ایجاد گرمای زیاد در مدار می‌شود و مناسب نیست. در پژوهش حاضر، ولتاژ مرجع به میزان ۵ ولت انتخاب گردیده است.

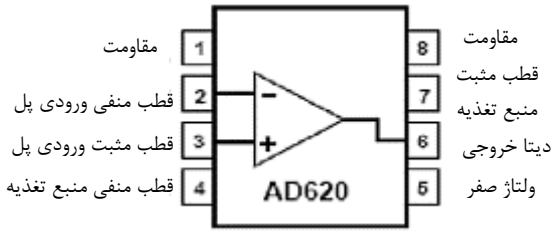
با توجه به وجود نویزهای محیطی، استفاده از یک یکنواخت‌کننده برای تنظیم ولتاژ تغذیه و پایداری آن ضروری می‌باشد.لذا از یک یکنواخت کننده ولتاژ[۲۴] مطابق شکل ۸ استفاده شده است [۱۹] خروجی ولتاژ کرنش‌سنج‌ها خیلی کم و گاها کمتر از 10 mV/V (۱۰ میلی ولت به ازای ۱ ولت تحریک پل) می‌باشد.بنابراین استفاده از یک آمپلی‌فایر برای تقویت نمودن سیگنال‌های خروجی در مدار کرنش‌سنج ضروری می‌باشد[۱۸].بدین منظور، از یک تقویت کننده ی کم نویز[۲۵] استفاده گردید.این قطعه دارای دقت بالا و بهره ی قابل تنظیم است. این IC دارای ۸ پایه است و توان مصرفی آن نیز پایین است.مشخصات پایه‌های IC در شکل ۹ نشان داده شده است[۲۰].



شکل ۸ - یکنواخت کننده ولتاژ LM7805[۱۸]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.7.2]



شکل ۹ - نمای شماتیک پایه‌های AD620[۱۹]

۳-۴- کانکتور انتقال سیگنال الکتریکی

کانکتور انتقال سیگنال، شامل یک رویه خارجی از جنس تفلون و یک رویه داخلی از جنس PTFE می‌باشد.مجموعه این محفظه، دارای ۴ بخش مجزا می‌باشد که توسط آب بندها و واشرهایی مناسب، از یکدیگر جدا می‌گردند.این محفظه‌ها، برای انتقال سیگنال‌های ولتاژ مرجع، ولتاژ خروجی کرنش‌سنج، ولتاژ مثبت و منفی IC استفاده می‌گردد.هر یک از این محفظه‌ها، از محلول الکترولیت شامل اسید سولفوریک رقیق شده اشباع شده است. رویه داخلی، به منظور جلوگیری از تماس مستقیم سیال الکترولیت با محور دوار می‌باشد تا از بروز نویز اضافی ممانعت گردد.ارتباط سیم‌ها با محلول الکترولیت، به واسطه ی ورقه‌های مسی تعبیه شده بر روی رویه‌های داخلی و خارجی انجام می‌گیرد.شکل ۱۰ رویه داخلی قرار گرفته شده بر روی محور دوار مورد تست را به همراه ورقه‌های مسی اتصال دهنده نشان می‌دهد.به همین ترتیب، شکل ۱۱نیز رویه خارجی را نمایش می‌دهد.

۳-۵ - آب بندی کانکتور

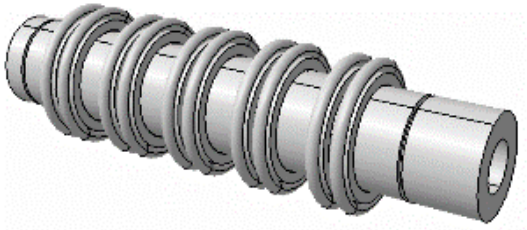
برای آب بندی مکانیکی مجموعه کانکتور، از کاسه‌نمد نوع کلیپر استفاده شده است[۲۱]. جنس این نوع آب‌بندها، موجبات بروز اصطکاک پایین و تحمل حرارتی بالا را فراهم می‌کند. نحوه ی قرارگیری این نوع آب‌بند بر روی محور به صورت شماتیک در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مجموعه واقعی رویه خارجی کانکتور در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



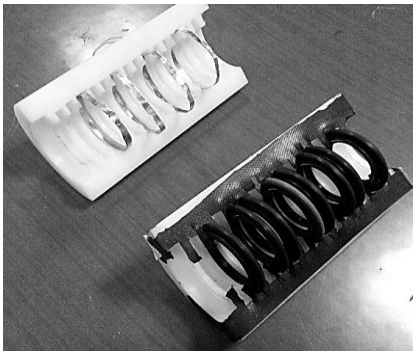
شکل ۱۰- رویه ی داخلی مجهز به ورقه‌های مسی



شکل ۱۱ - رویه ی خارجی مجهز شده به ورقه‌های مسی



شکل ۱۲ - تصویر شماتیک نحوه ی قرار گیری آب بندهامابین محفظه‌های تفکیک شده ی بر روی محور دوار



شکل ۱۳ - نحوه ی قرار گیری آب بندها بر روی محور دوار

۳-۶- سیستم داده برداری

شکل ۱۴، تصویر شماتیک مجموعه ی کرنش‌سنج، کانکتور و سیستم داده برداری را نمایش می‌دهد. ابتدا تحریک ولتاژ از طریق محفظه انتقال سیگنال به روی شافت و پس از یکنواخت شدن توسط رگولاتر به دو سر پل انتقال می‌یابد. اختلاف ولتاژ دو سر پل که در نتیجه ی بروز پیچش در محور دوار ایجاد می‌گردد، از تقویت کننده عبور داده شده و توسط محفظه انتقال سیگنال به کارت داده‌برداری و مبدل سیگنال آنالوگ به دیجیتال آزمایش قبلی با نرخ داده برداری ۲۰ کیلو هرتز انتقال می‌یابد. سپس، سیگنال دیجیتال ایجادی، در نرم‌افزار لب ویو مورد پردازش قرار می‌گیرد. نمایی از برنامه ی پردازشی نوشته شده به منظور آنالیز فرکانسی با نرم‌افزارلب ویو، در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

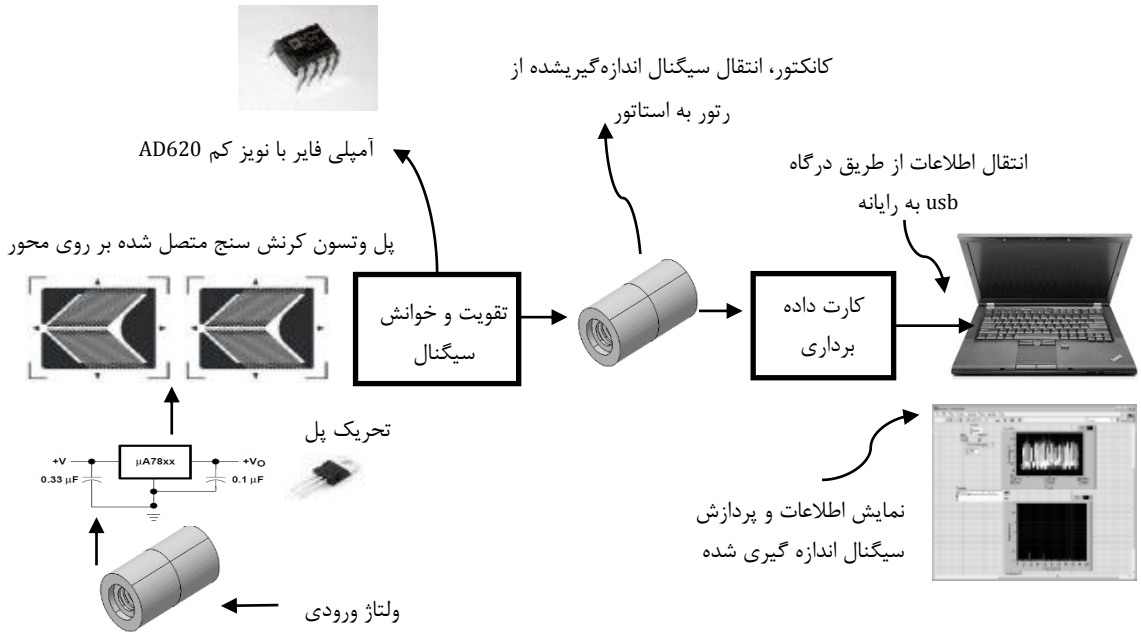
۴- بررسی عملکرد مجموعه ی اندازه گیری

۴-۱- عملکرد استاتیکی و کالیبراسیون

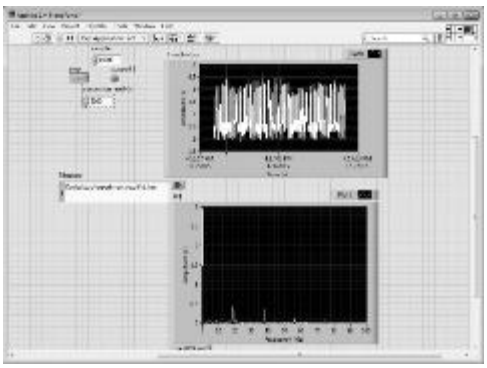
به منظور کالیبراسیون استاتیکی مجموعه ی اندازه گیری پیچشی، از یک سیستم مکانیکی شامل دو دیسک و یک عدد میله واسط استفاده می‌گردد که توسط یک موتور الکتریکی قادر به چرخش می‌باشد. شکل ۱۶ نحوه چیدمان مجموعه را نشان می‌دهد. همانطوری که دیده می‌شود، مجموعه کانکتور توسط دو عدد فنر از دو طرف بر روی قاب تثبیت گردیده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

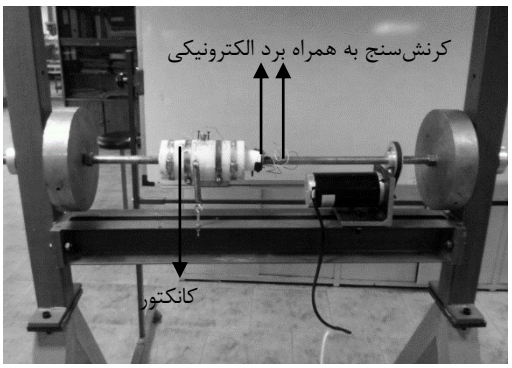
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.7.2]



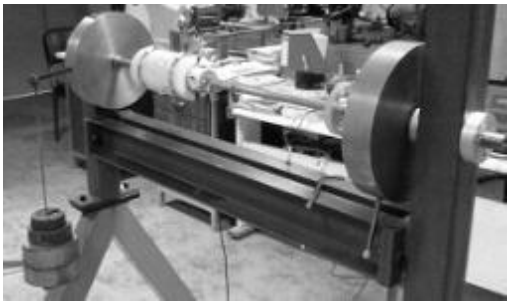
شکل ۱۴ - مجموعه ی کرنش‌سنج، یکنواخت کننده، تقویت کننده، کانکتور، تبدیل آنالوگ به دیجیتال و پردازنده



شکل ۱۵ - نرم‌افزار پردازش سیگنال دیجیتال داده‌برداری LABVIEW

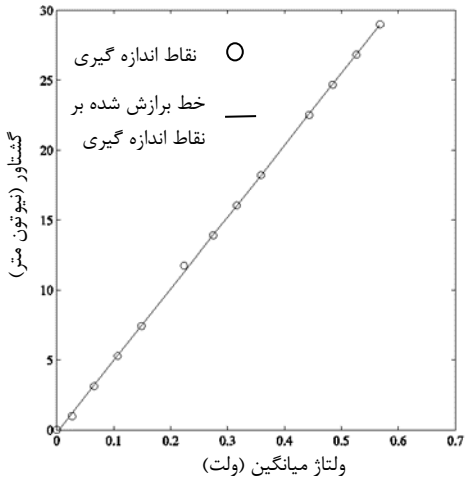


شکل ۱۶ - چیدمان کانکتور بر روی سیستم کالیبراسیون استاتیکی- دینامیکی



شکل ۱۷ - بارگذاری استاتیکی به منظور کالیبراسیون استاتیکی

به منظور کالیبراسیون استاتیکی، یکی از دو دیسک را ثابت کرده و مقادیر مختلفی از گشتاور پیچشی را با قرار دادن وزنه‌هایی بر روی بازوی گشتاور تعبیه شده بر روی دیسک غیر ثابت، مطابق شکل ۱۷ بر مجموعه اعمال می‌گردد. شکل ۱۸ نمودار تغییرات ولتاژ کرنش‌سنج و گشتاور اعمالی را نمایش می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، رفتار کرنش‌سنج و فرایند انتقال سیگنال الکتریکی، یک رفتار خطی با ثابت کالیبراسیون ۵۱/۳۱۰۷می‌باشد که نشان دهنده عملکرد قابل قبول مجموعه ی اندازه گیری پیچش در حالت استاتیکی می‌باشد.



شکل ۱۸ - نمودار ولتاژ ایجادی – گشتاور اعمالی

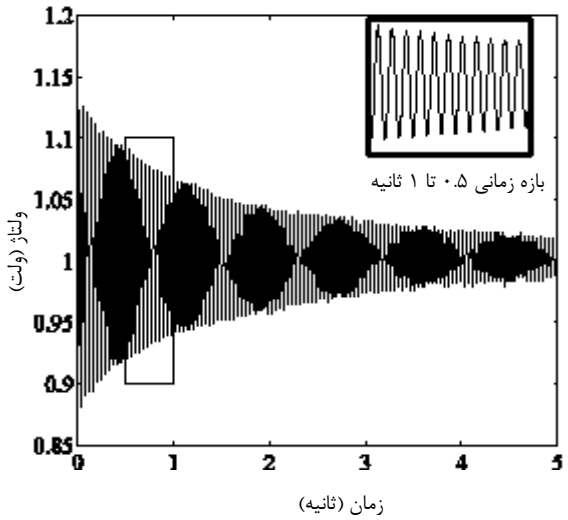
۴-۲- عملکرد دینامیکی و گذرا

به منظور بررسی قابلیت‌های مجموعه اندازه گیری در حالت دینامیک (غیر ایستا)، ارتعاشات گذرای مجموعه دیسک و محور

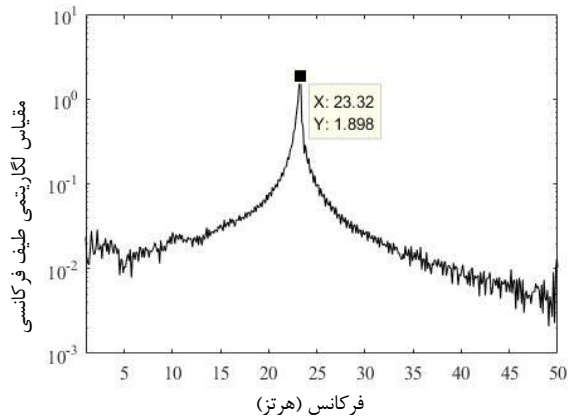
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.7.2]

اندازه‌گیری می‌شود. تحریک ارتعاشات گذرا، توسط ضربه چکش به صورت مماسی بر دیسک اعمال می‌گردد. با توجه به ماهیت پیچشی مجموعه، انتظار ظهور فرکانس طبیعی پیچشی مجموعه در طیف فرکانسی اندازه گیری شده توسط سیستم اندازه گیری طراحی شده وجود دارد. شکل ۱۹، پاسخ زمانی سیگنال الکتریکی گذرا و شکل ۲۰، طیف فرکانسی استخراجی را نمایش می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، پاسخ زمانی گذرای ثبت شده، دارای یک مولفه فرکانسی غالب در فرکانس ۲۳/۳۲ هرتز می‌باشد. برای مجموعه دیسک از جنس فولاد سخت[۲۶]، قطر ۲۵۰ میلیمتر و طول ۵۰ میلیمتر و محور از جنس فولاد ساختمانی، قطر ۲۰ میلیمتر و طول ۸۳۸ میلیمتر، می‌توان نشان داد که فرکانس طبیعی پیچشی اول، برابر با ۲۳/۱۰ هرتز استخراج می‌گردد. لذا، مولفه فرکانسی غالب اندازه گیری شده، در تطابق قابل قبولی با فرکانس اول نوسانات پیچشی بوده و در نتیجه، سیستم اندازه گیری در حالت دینامیکی نیز عملکرد قابل قبول را ارائه می‌نماید.



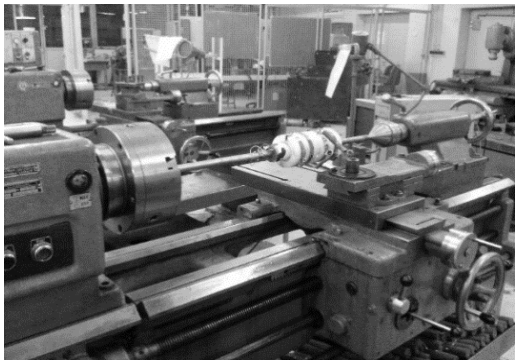
شکل ۱۹ - تغییرات زمانی گشتاور پیچشی وارد بر محور در حالت ارتعاشات گذرای مجموعه



شکل ۲۰ - طیف فرکانسی گشتاور پیچشی وارده بر محور در حالت ارتعاشات گذرای مجموعه

۴-۳- عملکرد دینامیکی و پایا

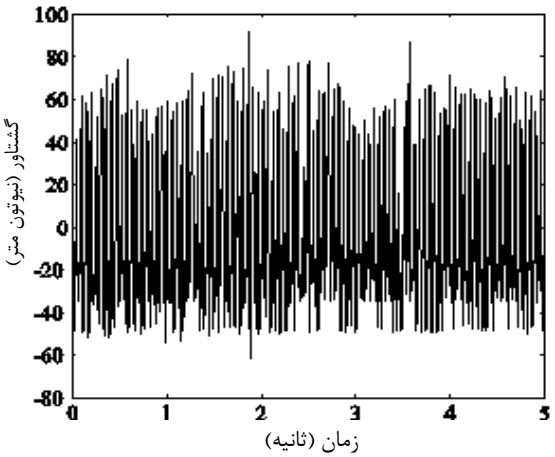
سیستم اندازه گیری طراحی شده بر مجموعه ی دیسک و محور، طبیعتا در حالت دوار با دور ثابت، به خوبی فرکانس دوران موتور را رصد می‌نماید که نمودارهای استخراجی در اینجا نمایش داده نشده است. اما با توجه به لزوم تست عملکرد مجموعه در دورهای مختلف، استفاده از یک موتور دور متغیر ضروری به نظر می‌رسد. برای این هدف، مجموعه سیستم اندازه گیری، بر روی یک سیستم واقعی شامل محور تعبیه شده بر روی یک دستگاه ماشین تراش صنعتی، مطابق شکل ۲۱ نصب گردیده است. فرایند اندازه گیری در دورهای250, 355, 500, 1120 rpm , انجام می‌پذیرد. شکل‌های۲۲ و ۲۳، به ترتیب طیف‌های زمانی و فرکانسی اندازه گیری شده در دور انتخابی 1120 rpm را نشان می‌دهد. همانطوری که ملاحظه می‌گردد، هارمونیک‌های سرعت دورانی مجموعه به خوبی قابل شناسایی می‌باشند. فرکانس های 1x, 2x, 3x به خوبی در سیگنال قابل مشاهده است و در دورهای پایین تر (شکل ۲۴) نیز این فرکانس‌ها به عنوان غالب ترین فرکانس ها مطرح بودند. با توجه به منبع [۲۲, ۲۳] ظاهر شدن هر سه این فرکانس‌ها نشان دهنده عیب انحراف در اتصال چرخ دنده‌ها می‌باشد که این عیب ها به وضوح در سیگنال ارتعاشات پیچشی نشان داده شده است. لذا، عملکرد سیستم اندازه گیری طراحی شده، در حالت دوار نیز مورد تایید واقع می‌گیرد.



شکل ۲۱ - نصب سیستم اندازه گیری بر محور تعبیه شده بر روی دستگاه ماشین تراش TN40

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

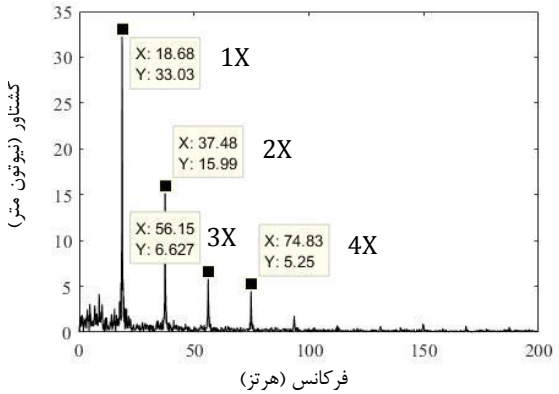
[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.7.2]



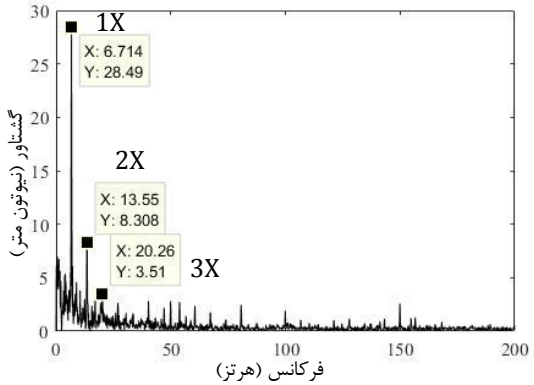
شکل ۲۲ - تغییرات زمانی گشتاور پیچشی اندازه گیری شده در سرعت 1120 RPM

۵- جمع بندی

در پژوهش ارائه شده، روشی ساده، عملی و قابل اطمینان به منظور انتقال سیگنال‌های اندازه‌گیری شده و همچنین، تحریک مدار پل وتسون کرنش‌سنج تعبیه شده بر روی محوری دوار، مبتنی بر استفاده از سیال یونیزه شده معرفی گردید. برای اثبات کارایی روش ارائه شده، مجموعه ای از سیستم اندازه‌گیری پیچش شامل کرنش‌سنج، مدار الکترونیکی تغذیه، مدار الکترونیکی انتقال سیگنال، کانکتور شامل رویه‌های ایستا و دوار و محفظه تعبیه شده برای قرارگیری سیال حامل سیگنال الکتریکی، سیستم تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال و پردازشگرهای سیگنال طراحی و ساخته شد. عملکرد مجموعه، با انجام تست‌های استاتیکی، دینامیکی گذرا و دینامیکی پایا بر روی محوری دوار صورت پذیرفت. نتایج حاصله، نشان دهنده عملکرد موفق مجموعه کانکتور ابداعی به منظور انتقال سیگنال دارد. سادگی در طراحی، عدم نیاز به اتصال منبع تغذیه بر روی محور، عدم حساسیت به ارتعاشات خمشی و بالا بودن نسبت سیگنال به نویز، این روش اصلاحی را برای اندازه گیری ارتعاشات پیچشی کاندید می نماید.



شکل ۲۳ - طیف فرکانسی گشتاور پیچشی اندازه گیری شده در سرعت 1120 RPM.



شکل ۲۴ - طیف فرکانسی گشتاور پیچشی اندازه گیری شده در سرعت 355 RPM.

کلید واژگان

1- Slip Ring
2- Rotating Transformer
3- Telemetry
4- Torsion Graph
5- Rotary Shaft Encoder
6- Inductive Torque Measurement
7- Chamber
8- Teflon
9- Connector
10- Concentric
11- Signal generator type JFG-3MD
12- Oscilloscope type GDS-840c
13- Data acquisition card type USB 4711-A
14- Advantech
15- Frequency Spectrum
16- RMS-(Root Mean Square)
17- Data Acquisition System
18- Metal Foil
19- Polyimide
20- Wheatstone Bridge
21.Full Bridge
22- Regulator
23.Amplifier
24. Voltage regulator LM7805
25. Low noise amplifier AD 620
26- CK45

فهرست علائم

v	ولتاژ (v)	E	مدول الاستیسیته (pa)
ν	ثابت پواسون	G	مدول برشی (pa)
γ	کرنش برشی	J	ممان اینرسی پیچشی (m^4)
α_R	ثابت ماده	k	ثابت پل وتسون
R	مقاومت (Ω)	r	شعاع محور (m)
		T	گشتاور (N.m)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.7.2]

۶- مراجع

1- T. Feese and R. Maxfield), *Torsional Vibration Problem With Motor/id Fan System Due To PWM Variable Frequency Driver*, in *37th Turbomachinery Symposium*, Texas A&M Universitypp. 45-56.

2- M. H. Muftah and S. M. Haris, (2011), *A strain gauge based system for measuring dynamic loading on a rotating shaft*, International Journal of Mechanics, vol. 5, pp. 19-26.

3- J. G. Webster, (1999), *The Measurement, Instrumentation, and Sensors*, Handbook, CRC Press.

4- E. Hong. D. Aand A. Krishnamurthy, (2007), *Opto-electronics based wireless slip ring system*, Journal of Engineering computing and architecture, vol. 2,

5- Mercotac, (2014), *Brushless slipring*, Available: www.mercotac.com.

6- E. Zabler. A. Dukart. F. Heintzand R. Krott, (1994), *A non-contact strain-gage torque sensor for automotive servo-driven steering systems*, Journal of Sensors and Actuators , vol. 41, pp. 39-46, 4/1/.

7- L. S. Dorfman and M. Trubelja, (1999), *Torsional monitoring of turbine-generators for incipient failure detection*, 6th EPRI Steam Turbine/Generator, t. Louis, Mo, USApp. 1–6.

8- T. Feese and C. Hill, (2009), *Prevention of Torsional Vibration Problems in Reciprocating Machinery*, *Thirty-Eight Turbomachinery Symposiumpp*, p. 213-238.

9- W. F. Eckert and B. C. Howes, (2001), *A Case Study Of A Flow-Induced Torsional Resonance*, *19th Proceedings on Machinery Vibration*, Edmonton AB.

10- R. Randall and D. Luo, (1990), *Hilbert transform techniques for torsional vibration analysis*, Australian Vibration and Noise Conference : Vibration and Noise-measurement Prediction and Control; Preprints of Papers,p. 122.

11- X. Ling. L. Shudongand C. Wei, (2012), *Measurement and analysis of torsional vibration signal for rotating shaft system*, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), 9th International Conference ,p. 1851-1854.

12- T. Feese and D. Smith, (2009), *Critical Equipment Measured in the Field*, journal of Polytec InFocus.

13- Fraunhofer Institute, (2007), A Contactless Torque Sensor for Online Monitoring of Torsional Oscillations.

14- The Dow Chemical Company, (2011), *FILMTEC Membranes Addendum: Conductivity of Solution*, report number: 609-02127-804

15- C. W. De Silva, (2005), *Vibration and shock handbook*, CRC Press.

16- P. W. Bridgman, (1931), *Dimensional analysis*, Yale University Press.

17- Natinal instrument company, (2014), *Measuring Strain with Strain Gages*, Available: http://www.ni.com/white-paper/3642/en/

18- Fairchild Semiconductor company, *LM7805 Data Sheet*, (2008)

19- Analog company, (2014), *Product Details AD620*, Available: http://www.analog.com/en/specialty-amplifiers/instrumentation-amplifiers/ad620/products/product.html

20- Parker company, *Rotary Seals catalogue*, (2006).

21- C. M. Harris and A. G. Piersol, (2002), *Harris' Shock and Vibration Handbook*, McGraw-Hill.

22- N. F. Rieger, (2014), *Rotordynamics 2: Problems in Turbomachinery*, Springer Vienna.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1395.12.23.7.2]