



جمهوری اسلامی ایران
Islamic Republic of Iran
سازمان ملی استاندارد ایران



استاندارد ملی ایران
۱۹۷۰۵-۱۲

INSO
19705-12
1st.Edition

2017

Identical with
ISO16063-12:
2002

Iranian National Standardization Organization

چاپ اول

۱۳۹۵

روش‌های کالیبراسیون ترانسدیوسرهای
شوک و ارتعاش
قسمت ۱۲:
کالیبراسیون اولیه ارتعاش به روش تاثیر
متقابل

**Methods for the calibration of vibration
and shock transducers —
Part 12:
Primary vibration calibration by the
reciprocity method**

ICS: 17.160



استاندارد ملی ایران شماره ۱۲-۱۹۷۰۵ (چاپ اول): سال ۱۳۹۵

سازمان ملی استاندارد ایران

تهران، ضلع جنوب غربی میدان ونک، خیابان ولیعصر، پلاک ۲۵۹۲

صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۶۱۳۹ تهران - ایران

تلفن: ۵-۸۸۸۷۹۴۶۱

دورنگار: ۸۸۸۸۷۱۰۳ و ۸۸۸۸۷۰۸۰

کرج، شهر صنعتی، میدان استاندارد

صندوق پستی: ۳۱۵۸۵-۱۶۳ کرج - ایران

تلفن: ۸-۳۲۸۰۶۰۳۱ (۰۲۶)

دورنگار: ۳۲۸۰۸۱۱۴ (۰۲۶)

رایانامه: standard@isiri.org.ir

وبگاه: <http://www.isiri.gov.ir>

Iranian National Standardization Organization (INSO)

No.1294 Valiasr Ave., South western corner of Vanak Sq., Tehran, Iran

P. O. Box: 14155-6139, Tehran, Iran

Tel: + 98 (21) 88879461-5

Fax: + 98 (21) 88887080, 88887103

Standard Square, Karaj, Iran

P.O. Box: 31585-163, Karaj, Iran

Tel: + 98 (26) 32806031-8

Fax: + 98 (26) 32808114

Email: standard@isiri.org.ir

Website: <http://www.isiri.gov.ir>



به نام خدا

آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

سازمان ملی استاندارد ایران به موجب بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ تنها مرجع رسمی کشور است که وظیفه تعیین، تدوین و نشر استانداردهای ملی (رسمی) ایران را به عهده دارد.

تدوین استاندارد در حوزه‌های مختلف در کمیسیون‌های فنی مرکب از کارشناسان سازمان، صاحب‌نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می‌شود و کوششی همگام با مصالح ملی و با توجه به شرایط تولیدی، فناوری و تجاری است که از مشارکت آگاهانه و منصفانه صاحبان حق و نفع، شامل تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان، صادرکنندگان و واردکنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان‌های دولتی و غیردولتی حاصل می‌شود. پیش‌نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی‌نفع و اعضای کمیسیون‌های مربوط ارسال می‌شود و پس از دریافت نظرها و پیشنهادهای در کمیته ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی (رسمی) ایران چاپ و منتشر می‌شود.

پیش‌نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان‌های علاقه‌مند و ذی‌صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می‌کنند در کمیته ملی طرح، بررسی و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می‌شود. بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می‌شود که بر اساس مقررات استاندارد ملی ایران شماره ۵ تدوین و در کمیته ملی استاندارد مربوط که در سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می‌شود به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین‌المللی استاندارد (ISO)^۱، کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک (IEC)^۲ و سازمان بین‌المللی اندازه‌شناسی قانونی (OIML)^۳ است و به عنوان تنها رابط^۴ کمیسیون کدکس غذایی (CAC)^۵ در کشور فعالیت می‌کند. در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی‌های خاص کشور، از آخرین پیشرفت‌های علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین‌المللی بهره‌گیری می‌شود.

سازمان ملی استاندارد ایران می‌تواند با رعایت موازین پیش‌بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف‌کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست‌محیطی و اقتصادی، اجرای بعضی از استانداردهای ملی ایران را برای محصولات تولیدی داخل کشور و/یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری کند. سازمان می‌تواند به منظور حفظ بازارهای بین‌المللی برای محصولات کشور، اجرای استانداردهای کالاهای صادراتی و درجه‌بندی آن را اجباری کند. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده‌کنندگان از خدمات سازمان‌ها و مؤسسات فعال در زمینه مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدور گواهی سیستم‌های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست‌محیطی، آزمایشگاه‌ها و مراکز واسنجی (کالیبراسیون) وسایل سنجش، سازمان ملی استاندارد این‌گونه سازمان‌ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می‌کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهینامه تأیید صلاحیت به آن‌ها اعطا و بر عملکرد آن‌ها نظارت می‌کند. ترویج دستگاه بین‌المللی یک‌گانه، واسنجی وسایل سنجش، تعیین عیار فلزات گرانبها و انجام تحقیقات کاربردی برای ارتقای سطح استانداردهای ملی ایران از دیگر وظایف این سازمان است.

- 1- International Organization for Standardization
- 2- International Electrotechnical Commission
- 3- International Organization for Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legals)
- 4- Contact point
- 5- Codex Alimentarius Commission

کمیسیون فنی تدوین استاندارد

«روش‌های کالیبراسیون ترانسدیوسرهای شوک و ارتعاش - قسمت ۱۲: کالیبراسیون اولیه ارتعاش
به روش تاثیر متقابل»

رئیس: سمت و/یا محل اشتغال:

عضو هیأت علمی دانشگاه سمنان

رئیس:

خطیبی، محمدمهدی
(دکتری مهندسی مکانیک)

دبیر:

کارشناس مسئول اداره کل استاندارد استان سمنان

دخانیان، مطهره
(کارشناسی مهندسی مکانیک)

اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)

کارشناس مسئول اداره کل صنعت، معدن و تجارت استان
سمنان

آلبویه، حسن
(کارشناسی ارشد مهندسی صنایع)

مدیرعامل شرکت ره‌آورد سنجش سمنان

برهانی، معصومه
(کارشناسی مهندسی برق الکترونیک)

کارشناس استاندارد

بینش، علی‌آقا
(کارشناسی مهندسی مکانیک)

کارشناس اداره کل استاندارد استان سمنان

حسن‌آبادی، احسان
(کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک)

مدیر کنترل کیفیت شرکت توزین تراز آریا

حسین‌آبادی، نشمین
(کارشناسی مهندسی برق الکترونیک)

رئیس اداره اندازه‌شناسی، اوزان و مقیاس‌های اداره کل
استاندارد استان سمنان

خدامعباسی، روح‌ا...
(کارشناسی فیزیک)

مدیرعامل شرکت مهندسی بهین توزین

مجیدیان، عباسعلی
(کارشناسی مهندسی برق الکترونیک)

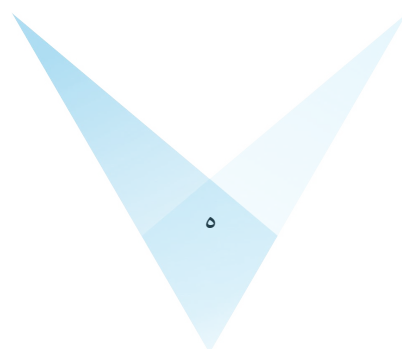
ویراستار:

رئیس اداره اندازه‌شناسی، اوزان و مقیاس‌های اداره کل
استاندارد استان سمنان

خدامعباسی، روح‌ا...
(کارشناسی فیزیک)

فهرست مندرجات

| صفحه | عنوان |
|------|--|
| و | پیش‌گفتار |
| ز | مقدمه |
| ۱ | ۱ هدف و دامنه کاربرد |
| ۱ | ۲ مراجع الزامی |
| ۲ | ۳ عدم قطعیت اندازه‌گیری |
| ۲ | ۴ نمادها |
| ۳ | ۵ الزامات دستگاه |
| ۵ | ۶ شرایط محیط |
| ۵ | ۷ دامنه‌ها و بسامدهای ترجیحی |
| ۶ | ۸ روش اجرایی |
| ۸ | ۹ محاسبه حساسیت |
| ۱۴ | پیوست الف (الزامی) محاسبه عدم قطعیت |
| ۱۸ | پیوست ب (آگاهی دهنده) کاربرد نظریه تاثیر متقابل در کالیبراسیون ترانسدیوسرهای الکترومکانیکی |
| ۲۵ | کتابنامه |



پیش‌گفتار

استاندارد «روش‌های کالیبراسیون ترانسیدیوسرهای شوک و ارتعاش - قسمت ۱۲: کالیبراسیون ارتعاش اولیه به روش تاثیر متقابل» که پیش‌نویس آن در کمیسیون‌های مربوط بر مبنای پذیرش استانداردهای بین‌المللی به عنوان استاندارد ملی ایران به روش اشاره شده در مورد الف، بند ۷، استاندارد ملی شماره ۵ تهیه و تدوین شده، در سیصد و نهمین اجلاس کمیته ملی استاندارد اوزان و مقیاس‌ها مورخ ۱۳۹۵/۱۲/۰۲ تصویب شد. اینک این استاندارد به استناد بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱، به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود.

استانداردهای ملی ایران بر اساس استاندارد ملی ایران شماره ۵ (استانداردهای ملی ایران - ساختار و شیوه نگارش) تدوین می‌شوند. برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی در زمینه صنایع، علوم و خدمات، استانداردهای ملی ایران در صورت لزوم تجدیدنظر خواهند شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح و تکمیل این استانداردها ارائه شود، در هنگام تجدیدنظر در کمیسیون‌های مربوط، مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدیدنظر استانداردهای ملی ایران استفاده کرد.

این استاندارد ملی بر مبنای پذیرش استاندارد بین‌المللی زیر به روش «معادل یکسان» تهیه و تدوین شده و شامل ترجمه‌ی تخصصی کامل متن آن به زبان فارسی می‌باشد و معادل یکسان استاندارد بین‌المللی مزبور است:

ISO 16063-12:2002, Methods for the calibration of vibration and shock transducers - Part 12: Primary vibration calibration by the reciprocity method + Cor1:2008

مقدمه:

این استاندارد یک قسمت از استانداردهای ملی ایران به شماره ۱۹۷۰۵ می باشد که به نحوه کالیبراسیون ترانسدیوسرهای شوک و ارتعاش می پردازد.

این مجموعه استانداردها شامل قسمت های زیر می باشد.

استاندارد ملی ایران به شماره ۱۶-۱۹۷۰۵، روش هایی برای کالیبراسیون ترانسدیوسرهای ارتعاش و ضربه- قسمت ۱۶: کالیبراسیون با گرانش زمین

ISO 16063 Part 1: Basic concepts

ISO 16063 Part 11: Primary vibration calibration by laser interferometry

ISO 16063 Part 13: Primary shock calibration using laser interferometry

ISO 16063 Part 15: Primary angular vibration calibration by laser interferometry

ISO 16063 Part 17: Primary calibration by centrifuge

ISO 16063 Part 21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer

ISO 16063 Part 22: Shock calibration by comparison to a reference transducer

ISO 16063 Part 31: Testing of transverse vibration sensitivity

ISO 16063 Part 32: Resonance testing- Testing the frequency and phase response of gravity

ISO 16063 Part 41: Calibration of laser vibrometers

ISO 16063 Part 42: Calibration of seismometers with high accuracy using acceleration of gravity

ISO 16063 Part 43: Calibration of accelerometers by model-based parameter identification

روش‌های کالیبراسیون ترانسدیوسرهای شوک و ارتعاش - قسمت ۱۲: کالیبراسیون اولیه ارتعاش به روش تاثیر متقابل

۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد، تعیین تجهیزات و رویه‌های به کار رفته برای کالیبراسیون اولیه شتاب‌سنج‌ها با استفاده از روش تاثیر متقابل و دستگاه یکاهای SI می‌باشد.

این استاندارد برای کالیبراسیون شتاب‌سنج‌های خطی^۱ در کل گستره بسامدی ۴۰ Hz تا ۵ kHz و دامنه وابسته به این بسامد در گستره 10 m/s^2 تا 100 m/s^2 قابل اجرا بوده و براساس استفاده از سیم‌پیچ یک لرزاننده الکتروپنوماتیکی به عنوان ترانسدیوسر دوجانبه می‌باشد.

کالیبراسیون حساسیت ترانسدیوسرها را می‌توان با استفاده از این استاندارد به دست آورد به شرطی که خصوصیات تقویت‌کننده یا شکل‌دهنده سیگنال^۲ استفاده شده به همراه ترانسدیوسر در طول کالیبراسیون به خوبی مشخص شده باشد. به منظور به دست آوردن عدم قطعیت‌های اندازه‌گیری داده شده در بند ۳، فرض شده است که ترانسدیوسر در ترکیب با تقویت‌کننده یا شکل‌دهنده سیگنال آن ترانسدیوسر کالیبره شده است (در این استاندارد این ترکیب به عنوان «شتاب‌سنج» شناخته می‌شود).

کالیبراسیون حساسیت ترانسدیوسرها را می‌توان با استفاده از این استاندارد به دست آورد به شرطی که خصوصیات تقویت‌کننده یا شکل‌دهنده سیگنال استفاده شده به همراه ترانسدیوسر در طول کالیبراسیون به خوبی مشخص شده باشد.

۲ مراجع الزامی

در مراجع زیر ضوابطی وجود دارد که در متن این استاندارد به صورت الزامی به آن‌ها ارجاع داده شده است. بدین ترتیب، آن ضوابط جزئی از این استاندارد محسوب می‌شوند.

در صورتی که به مرجعی با ذکر تاریخ انتشار ارجاع داده شده باشد، اصلاحیه‌ها و تجدیدنظرهای بعدی آن برای این استاندارد الزام‌آور نیست. در مورد مراجعی که بدون ذکر تاریخ انتشار به آن‌ها ارجاع داده شده است، همواره آخرین تجدیدنظر و اصلاحیه‌های بعدی برای این استاندارد الزام‌آور است.

استفاده از مراجع زیر برای کاربرد این استاندارد الزامی است:

2-1 ISO 266, Acoustics - Preferred frequencies

- 1 - Rectilinear accelerometers
- 2 - Signal conditioner

2-2 ISO 16063-1:1998, Methods for the calibration of vibration and shock transducers- Part 1: Basic concepts

۳ عدم قطعیت اندازه گیری

در بسامد مرجع ۱۶۰ Hz و دامنه مرجع 100 m/s^2 ، 50 m/s^2 ، 20 m/s^2 یا 10 m/s^2 ، محدوده‌های مجاز عدم قطعیت ۰٫۵٪ (از مدولها) بزرگی حساسیت مختلط و 1° از آرگومان (تغییر فاز) حساسیت مختلط می‌باشد. در کل گستره دامنه‌ها و بسامدها، محدوده عدم قطعیت برای دامنه اندازه‌گیری شده و تغییر فاز حساسیت به ترتیب، ۱٪ و 2° می‌باشد.

از تمام کاربران این استاندارد انتظار می‌رود که بیلان‌های عدم قطعیت را مطابق پیوست الف، برای مستندسازی عدم قطعیت اندازه‌گیری تهیه نمایند.

عدم قطعیت اندازه‌گیری مطابق استاندارد بین‌المللی ISO 16063-1 به صورت عدم قطعیت اندازه‌گیری گسترده بیان می‌شود (که در این استاندارد به اختصار «عدم قطعیت» گفته می‌شود).

۴ نمادها

فهرست کلی از نمادهای مورد استفاده در این استاندارد، در جدول ۱ گنجانده شده است. نمادهای خاص مورد استفاده در فرمول‌ها، پس از فرمول مربوط، تعریف می‌شوند.

جدول ۱- نمادهای عمومی

| نماد | تعریف | یکا |
|-------------|--|-----------------------------|
| f | بسامد ارتعاش | Hz |
| n | نمایه‌های جرم‌های آزمون ($n = 0$) بیانگر عدم وجود جرم آزمون است) | |
| m_n | مقدار جرم آزمون شماره n | Kg |
| u | ولتاژ مختلط | V |
| U | نسبت ولتاژ مختلط | |
| Y | ادمیتانس ^۱ الکتریکی مختلط | S |
| R | مقاومت الکتریکی | Ω |
| α | عرض از مبدا مختلط برازش کوچکترین مربعات | $\text{Kg} \cdot \Omega$ |
| β | شیب مختلط برازش کوچکترین مربعات | Ω |
| S_a | حساسیت مختلط شتاب‌سنج کالیبره شده | $\text{V}/(\text{ms}^{-2})$ |
| $ S_a $ | مدولها (بزرگی) S_a | $\text{V}/(\text{ms}^{-2})$ |
| φ_a | آرگومان (تغییر فاز) S_a | degree |

1 - Admittance

ادامه جدول ۱- نمادهای عمومی

| نماد | تعریف | یکا |
|------|---------------------------------|-----|
| Re | قسمت حقیقی یک کمیت مختلط | |
| Im | قسمت موهومی یک کمیت مختلط | |
| | دامنه یا قدر مطلق یک کمیت مختلط | |
| arg | آرگومان یک کمیت مختلط | |

۵ الزامات دستگاه

۱-۵ کلیات

محفظه ترانسدیوسر باید در کل گستره بسامدی مورد نظر ساختاری صلب داشته باشد. حساسیت به کرنش پایه و حرکات جانبی و پایداری شتابسنج (ترانسدیوسر در ترکیب با تقویت کننده یا شکل دهنده سیگنال) باید در محاسبه گستره عدم قطعیت های گسترده در تعیین دامنه و آرگومان حساسیت مختلط در نظر گرفته شود.

۲-۵ مولد و نشانگر یا شمارنده بسامد

از تجهیزاتی با خصوصیات زیر استفاده کنید:

الف- بیشینه عدم قطعیت در بسامد: $\pm 0.1\%$

ب- تغییر در بسامد: کمتر از 0.1% در کل هر دوره تناوب اندازه گیری؛

پ- تغییر در دامنه: کمتر از 0.1% در کل هر دوره تناوب اندازه گیری.

۳-۵ ترکیب لرزاننده/تقویت کننده توان

از تجهیزاتی با خصوصیات زیر برای همه شرایط اندازه گیری، استفاده کنید:

الف- بیشینه اعوجاج هارمونیک^۱ کل: 2% ؛

ب- شتاب عرضی، خمشی و نوسانی: متناسب با عدم قطعیت حساسیت اندازه گیری شده (به عنوان مثال، کمتر از 10% شتاب در امتداد مورد نظر، در کل گستره بسامدی مورد نظر)؛

پ- کمینه نسبت سیگنال به نویز در خروجی شتابسنج: 30 dB ؛

ت- تغییر در دامنه شتاب: کمتر از 0.5% در کل هر دوره تناوب اندازه گیری.

1 -Harmonic

۴-۵ بلوک لرزه‌گیر برای لرزاننده

به منظور به حداقل رساندن عدم قطعیت نتایج کالیبراسیون ناشی از عکس‌العمل سازه نگه‌دارنده بر حرکت لرزاننده، لرزاننده باید بر روی یک بلوک لرزه‌گیر صلب سنگین نصب شود. توصیه می‌شود جرم بلوک لرزه‌گیر حداقل ۲۰۰۰ برابر جرم عنصر^۱ متحرک لرزاننده باشد. نمونه‌های مناسب بلوک‌های لرزه‌گیر برای این کاربرد شامل بلوک‌های گرانیتی یا میزهای نوری فولادی لانه زنبوری می‌باشد. اگر ارتعاش لرزه‌ای قابل توجهی در محیط کالیبراسیون وجود داشته باشد بهتر است بلوک لرزه‌گیر از رزونانس‌های کمتر از ۲ Hz مربوط به حالت معلق عمودی و افقی، ایزوله ارتعاشی شود.

۵-۵ ادوات اندازه‌گیری‌های نسبت ولتاژ مختلط

از ادواتی با خصوصیات زیر استفاده کنید:

الف- گستره بسامدی: ۴۰ Hz تا ۵ kHz؛

ب- بیشینه عدم قطعیت در مدولها (بزرگی) نسبت ولتاژ مختلط: ۰٫۱٪؛

پ- بیشینه عدم قطعیت در آرگومان نسبت ولتاژ مختلط: ۰٫۱°.

۶-۵ مقاومت

بیشینه عدم قطعیت در تعیین اندازه مقاومت باید ۰٫۰۵٪ در کل گستره بسامدی کالیبراسیون و گستره اتلاف توان باشد.

اطمینان حاصل کنید که مقدار امپدانس مقاومت استاندارد مورد استفاده برای تعیین جریان، به دلیل اثرات القایی و گرمایی به‌طور محسوس تغییر نمی‌کند.

۷-۵ مجموعه جرم‌های آزمون

جرم‌های آزمون باید:

الف- گستره‌ای از حداقل پنج فاصله تقریباً مساوی که بزرگترین جرم آزمون بین تقریباً نصف تا یک برابر جرم عنصر متحرک لرزاننده است را پوشش دهد و

ب- دارای بیشینه عدم قطعیت ۰٫۰۵٪ در تعیین جرم آن‌ها باشد.

توصیه می‌شود شکل جرم‌های آزمون شبیه مکعب یا استوانه‌ای با نسبت طول به عرض تقریباً یک باشد. بیشینه بسامدی که در آن جرم آزمون مانند جسم صلب رفتار می‌کند را می‌توان با استفاده از فرمول $c/2L$ تخمین زد که در آن c سرعت صوت در ماده جرم آزمون و L طول آن می‌باشد. بهتر است، مشخصات

1 -Element
2 -Resonance

پرداخت سطح و رواداری‌های ماشین‌کاری پایه نگهدارنده این جرم‌های آزمون، الزامات تعیین شده برای نصب ترانسدیوسر تحت کالیبراسیون را برآورده ساخته یا از آن فراتر رود. این امر اگر کالیبراسیون در بسامدهای بالا انجام شود، حیاتی‌تر می‌شود. توصیه می‌شود جرم‌های آزمون از مواد نسبتاً سفت‌تری مانند کاربرد تنگستن ساخته شود تا رزونانس‌های طبیعی در بسامدهای بالاتر رخ دهد.

در عمل، تعداد و اندازه جرم‌های آزمون انتخاب شده توازنی بین کاهش عدم قطعیت آماری در برابر افزایش عدم قطعیت اندازه‌گیری برقرار خواهد کرد. این عدم قطعیت اندازه‌گیری به دلیل اثرات حرارتی سیم‌پیچ محرک می‌باشد؛ که ناشی از انجام اندازه‌گیری‌های متعددی است که در آن‌ها اختلافات زیادی در ادمیتانس الکتریکی اندازه‌گیری شده، مشاهده می‌شود.

۵-۸ اعوجاج ادوات اندازه‌گیری

از ادواتی استفاده کنید که اعوجاج کلی هارمونیک آن‌ها در اندازه‌گیری از ۰٫۱٪ تا ۵٪ باشد و خصوصیات زیر را داشته باشند:

الف- گستره بسامدی: ۴۰ Hz تا ۵ kHz؛

ب- بیشینه عدم قطعیت: ۱۰٪ مقدار اندازه‌گیری شده اعوجاج.

۵-۹ اسیلوسکوپ

با این که اسیلوسکوپ برای بررسی شکل موج‌های شتاب‌سنج و کوئل متحرک الکتروپدینامیک مفید است، استفاده از آن الزامی نمی‌باشد.

۵-۱۰ تجهیزات کنترل کننده هوا

این تجهیزات باید قادر به حفظ شرایط محیط مطابق الزامات مشخص شده در بند ۶ باشند.

۶ شرایط محیط

کالیبراسیون باید تحت شرایط محیطی زیر انجام شود:

الف- دمای اتاق: $(23 \pm 3)^{\circ}\text{C}$ ؛

ب- بیشینه رطوبت نسبی: ۷۵٪.

۷ دامنه‌ها و بسامدهای ترجیحی

توصیه می‌شود دامنه‌ها و بسامدهای شتاب مورد استفاده در حین کالیبراسیون، از سری‌های زیر انتخاب شود:

الف- شتاب: 10 m/s^2 ، 20 m/s^2 ، 50 m/s^2 ، 100 m/s^2 ؛

ب- شتاب مرجع: 100 m/s^2 ، 50 m/s^2 ، 20 m/s^2 یا 10 m/s^2 ،

پ- بسامدهای یک سوم اکتاو استاندارد شده از 40 Hz تا 5 kHz که در استاندارد ISO 266 ارائه شده است، انتخاب می‌شود؛

ت- بسامد مرجع: 160 Hz ؛

کالیبراسیون‌های انجام شده در شتاب با دامنه زیاد، به دلیل اثرات حرارتی رخ داده در سیم پیچ محرک، می‌توانند عدم قطعیت‌های نسبتاً بزرگی داشته باشند.

۸ روش اجرایی

۱-۸ کلیات

کالیبراسیون ترانسدیوسرهای الکترومکانیکی با تاثیر متقابل از رابطه خطی دوجانبه بین ترمینال‌های الکتریکی و مکانیکی ترانسدیوسرهای کالیبره شده استفاده می‌کند. به منظور انجام کالیبراسیون مطلق دو ترانسدیوسر، به سه ترانسدیوسر نیاز است. یک ترانسدیوسر فقط به‌عنوان حسگر^۱ ارتعاش، یکی فقط به‌عنوان منبع ارتعاش و یکی به‌صورت دوجانبه به‌عنوان حسگر ارتعاش و منبع (تولیدکننده) ارتعاش مورد استفاده قرار می‌گیرد. در اصل، کوپلینگ الکترومکانیکی ترانسدیوسرهای دوجانبه می‌تواند الکترودینامیکی یا پیزوالکتریکی باشد. با این حال، در عمل، ترانسدیوسرهای الکترودینامیکی به‌عنوان ترانسدیوسرهای دوجانبه در کالیبراسیون‌های ارتعاش با استفاده از تاثیر متقابل، به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند. در نتیجه، روش‌های توصیف شده در این استاندارد براساس استفاده از سیم‌پیچ لرزاننده الکترودینامیکی که به‌عنوان ترانسدیوسر دوجانبه با سیم‌پیچی که در نزدیکی ترانسدیوسر تحت کالیبراسیون قرار گرفته است، می‌باشد.

ترانسدیوسری که فقط به‌عنوان منبع ارتعاش استفاده می‌شود می‌تواند لرزاننده ثانویه‌ای باشد که به‌طور مکانیکی با عنصر متحرک حاوی ترانسدیوسر دوجانبه و ترانسدیوسر شتاب‌سنج، یا یک سیم‌پیچ ثانویه اضافه شده به همان عنصر متحرک، کوپل شده باشد. (برای آشنایی با تجربه‌های عملی سیستم‌هایی که از لرزاننده ثانویه یا سیم‌پیچ دوم استفاده می‌کنند، به کتاب‌نامه مراجعه شود.) اگر از لرزاننده ثانویه استفاده شود، می‌توان با استفاده از یک میله کوتاه دو سر رزوه، آن را به صورت نسبتاً صلب به عنصر متحرک متصل کرد به شرطی که ترانسدیوسر دوجانبه به صورت کامل از منبع ارتعاش ثانویه ایزوله شود و نیز حرکت خطی عنصر متحرک تحت تاثیر حضور منبع ارتعاش ثانویه قرار نگیرد. اگر منبع ارتعاش ثانویه الکترودینامیکی است، توصیه می‌شود برای جلوگیری از اثرات ناخواسته عدم قطعیت در نتایج کالیبراسیون که ناشی از کوپلینگ دوجانبه بین دو عنصر الکترودینامیکی است، توجه بیشتری صورت گیرد. شکل‌های ۱ و ۲ حاوی بلوک دیاگرام‌هایی از سیستم کالیبراسیون قابل تحقق بر مبنای تاثیر متقابل است که به همراه ترانسدیوسر

1 - Sensor

شتابسنج نصب شده درون لرزاننده، ترانسدیوسر دوجانبه و منبع ارتعاش ثانویه به عنوان لرزاننده ثانویه، نشان داده شده است.

کالیبراسیون باید در بسامدهایی انجام شود که به اندازه کافی کمتر از بسامدهای رزونانس عنصرهای متحرک شامل ترانسدیوسر دوجانبه و نگهدارنده‌ی ترانسدیوسر در حال کالیبره، باشد. رزونانس‌های عرضی و محوری می‌تواند با استفاده از شتابسنج سه محوره با بسامدهای رزونانس نسبتاً بالا تعیین شود. انحراف از حرکت جسم صلب عنصر متحرک می‌تواند از اندازه‌گیری‌های نسبی انجام شده بر روی سطح بالایی عنصر متحرک، تعیین شود. به صورت ایده‌آل، بهتر است رزونانس‌های عرضی و محوری با شتابسنج سه محوره نصب شده بر روی فیکسچر آزمون تعیین شود، که مجموع جرم‌های شتابسنج و سازه تست با بزرگترین جرم آزمون که برای تعیین $Y_n - Y_0$ به کار می‌رود، برابر است

معمولاً حد بالای بسامد کالیبراسیون بهتر است ۰٫۲۵ بسامد رزونانس عنصر متحرک حین بارگذاری با ترانسدیوسر تحت آزمون و بزرگترین جرم آزمون باشد که برای تعیین $Y_n - Y_0$ به کار می‌رود. بهتر است در بسامدهایی که رزونانس‌های خفیفی رخ می‌دهد از انجام کالیبراسیون اجتناب شود. این رزونانس‌های خفیف، که شامل رزونانس‌های سازه‌ای و تعلیق هستند، به عنوان قسمتی از رزونانس (های) طبیعی عنصر متحرک در نظر گرفته نمی‌شوند.

نتایج اندازه‌گیری با ترانسدیوسر دوجانبه استفاده شده به عنوان منبع ارتعاش (محرک) و به عنوان حسگر ارتعاش (سیم‌پیچ سرعت) را به دست آورید (به ترتیب به زیربندهای ۱-۲-۸ و ۲-۲-۸ مراجعه شود). مورد اول نیازمند این است که اندازه‌گیری‌ها با و بدون جرم آزمون اضافه شده به عنصر متحرک انجام شود. این مهم است که این اندازه‌گیری‌ها تحت شرایط دمایی یکنواخت با سیم‌پیچ ترانسدیوسر دوجانبه در همان موقعیت استاتیکی در فاصله مغناطیسی، انجام شود. بهتر است حد بالای تغییرپذیری شرایط دمایی بین یک درجه سلسیوس و دو درجه سلسیوس باشد. انحراف موقعیت استاتیکی ترانسدیوسر دوجانبه ممکن است با اعمال ولتاژ بایاس d.c. در سیم‌پیچ دوجانبه اصلاح شود. به طور ایده‌آل، بهتر است ادوات فقط در یک نقطه زمین شوند تا از حلقه‌های زمین اجتناب شود. بهتر است همه ولتاژهای اندازه‌گیری شده بین سیم‌پیچ دوجانبه و مقاومت استاندارد تا حد امکان نزدیک به منبع ولتاژ اندازه‌گیری شوند تا نویز القایی را به حداقل برساند. مقاومت استاندارد ممکن است در طی اندازه‌گیری‌های نسبت ولتاژ U_V (به زیربند ۲-۲-۸ مراجعه شود) حذف شده یا اتصال کوتاه شود. هرچند، اگر مقاومت استاندارد اتصال کوتاه شود، توصیه می‌شود که کاهش عدم قطعیت در بسامدهای بالا ناشی از اثرات القایی، ارزیابی گردد.

بعد از برقرار کردن تنظیمات ادوات، یک کالیبراسیون در بسامد ۱۶۰ Hz و دامنه مرجع انجام دهید و سپس کالیبراسیون را در سایر بسامدهای انتخابی و دامنه‌های شتاب انجام دهید. سپس نتایج اندازه‌گیری را می‌توان به صورت مدولها (بزرگی) حساسیت مختلط، آرگومان (تغییر فاز) حساسیت مختلط یا هر دوی این‌ها بیان

کرد. برای هر ترکیبی از بسامد و شتاب، اعوجاج، حرکت عرضی (شتاب گهواره‌ای^۱ و خمشی)، سروصدا و نویز باید منطبق با عدم قطعیت داده شده در بند ۳ باشد. در هنگامی که دستگاه خود را کالیبره می‌کند، لازم نیست تمام ادوات از دستگاه‌های اندازه‌گیری جدا شوند.

۲-۸ رویه تجربی

۱-۲-۸ آزمون ۱: اندازه‌گیری ادمیتانس الکتریکی مختلط Y (نسبت مختلط جریان سیم‌پیچ محرک به ولتاژ خروجی مدار باز شتاب‌سنج)

با استفاده از سیم‌پیچ متحرک الکتروپدینامیک دوجانبه که به‌عنوان سیم‌پیچ محرک (منبع ارتعاش) می‌باشد، ادمیتانس الکتریکی مختلط را با تقسیم نسبت ولتاژ مختلط (U_d) بر مقاومت استاندارد (R) اندازه‌گیری کنید؛ که U_d افت ولتاژ (u_r) در سرتاسر مقاومت استاندارد تقسیم بر ولتاژ مدار باز در خروجی شتاب‌سنج (u_{a1}) است، یعنی (به شکل ۱ مراجعه شود):

$$Y = U_d/R = (u_r/u_{a1})(1/R)$$

یک سری از این اندازه‌گیری‌ها را با و بدون جرم‌های آزمون اضافه شده به عنصر متحرک انجام دهید. در معادلاتی که در ادامه می‌آید، ادمیتانس الکتریکی مختلط بدون جرم اضافه شده به عنصر متحرک و ادمیتانس الکتریکی مختلط با جرم آزمون m_n که به عنصر متحرک اضافه شده است، به ترتیب با Y_n و Y_0 نشان داده می‌شوند.

یکسان بودن پتانسیل زمین شتاب‌سنج و مقاومت استاندارد، هنگام اندازه‌گیری U_d ، ضروری است. آزمون ۱ باید در کلیه دامنه‌های شتاب استفاده شده در طول کالیبراسیون، انجام شود.

۲-۲-۸ آزمون ۲: اندازه‌گیری نسبت ولتاژ مدار باز مختلط U_v (نسبت ولتاژ مدار باز مختلط خروجی شتاب‌سنج به خروجی سیم‌پیچ سرعت می‌باشد)

با استفاده از سیم‌پیچ متحرک الکتروپدینامیک دوجانبه که به‌عنوان سیم‌پیچ سرعت، عمل می‌کند (حسگر ارتعاش)، نسبت ولتاژ مدار باز مختلط را که نسبت خروجی شتاب‌سنج (u_{a2}) به خروجی سیم‌پیچ متحرک (u_c) است، اندازه‌گیری کنید. به منظور تحریک عنصر متحرک از یک منبع ارتعاش خارجی یا یک سیم‌پیچ متحرک ثانویه بر روی عنصر متحرک استفاده کنید (به شکل ۲ مراجعه شود). این نسبت ($U_v = u_{a2}/u_c$) بدون اضافه شدن جرم به عنصر متحرک، تعیین می‌شود.

یکسان بودن پتانسیل زمین شتاب‌سنج و سیم‌پیچ دوجانبه، هنگام اندازه‌گیری U_v ، ضروری است.

۹ محاسبه حساسیت

به معادلات (۱) تا (۱۰) و پیوست ب مراجعه شود.

با استفاده از روش کوچکترین مربعات، تابع زیر را برازش کنید:

$$F(m_n, Y_n, Y_0) = \frac{m_n}{Y_n - Y_0} \quad (۱)$$

عرض از مبدا و شیب مختلط $F(m_n, Y_n, Y_0)$ در هر بسامد و دامنه کالیبراسیون را با استفاده از مقادیر اندازه-گیری شده m_n و Y_n به دست آورید. این برازش ممکن است با استفاده از مقدار وزنی یکنواخت ($w_n=1$) یا مقادیر وزنی آماری غیریکنواخت، از فرمول‌های زیر محاسبه شود:

$$\text{Re } \alpha = \frac{\sum (w_n^2 m_n^2) \sum \text{Re} \left(\frac{w_n^2 m_n}{Y_n - Y_0} \right) - \sum w_n^2 m_n \sum \text{Re} \left(\frac{w_n^2 m_n^2}{Y_n - Y_0} \right)}{\sum w_n^2 \sum (w_n^2 m_n^2) - \left[\sum (w_n^2 m_n) \right]^2} \quad (۲)$$

$$\text{Im } \alpha = \frac{\sum (w_n^2 m_n^2) \sum \text{Im} \left(\frac{w_n^2 m_n}{Y_n - Y_0} \right) - \sum w_n^2 m_n \sum \text{Im} \left(\frac{w_n^2 m_n^2}{Y_n - Y_0} \right)}{\sum w_n^2 \sum (w_n^2 m_n^2) - \left[\sum (w_n^2 m_n) \right]^2} \quad (۳)$$

$$\text{Re } \beta = \frac{\sum w_n^2 \sum \text{Re} \left(\frac{w_n^2 m_n^2}{Y_n - Y_0} \right) - \sum w_n^2 m_n \sum \text{Re} \left(\frac{w_n^2 m_n}{Y_n - Y_0} \right)}{\sum w_n^2 \sum (w_n^2 m_n^2) - \left[\sum (w_n^2 m_n) \right]^2} \quad (۴)$$

$$\text{Im } \beta = \frac{\sum w_n^2 \sum \text{Im} \left(\frac{w_n^2 m_n^2}{Y_n - Y_0} \right) - \sum w_n^2 m_n \sum \text{Im} \left(\frac{w_n^2 m_n}{Y_n - Y_0} \right)}{\sum w_n^2 \sum (w_n^2 m_n^2) - \left[\sum (w_n^2 m_n) \right]^2} \quad (۵)$$

که در آن‌ها:

α عرض از مبدا مختلط در تابع $F(m_n, Y_n, Y_0)$ ، برحسب کیلوگرم اهم است؛

β شیب مختلط در تابع $F(m_n, Y_n, Y_0)$ ، برحسب اهم است؛

n نمایه متناظر با جرم آزمون m_n است؛

w_n ضریب وزنی استاتیکی که با استفاده از جرم آزمون m_n برای اندازه‌گیری به کار گرفته می‌شود، است؛

m_n جرم آزمون اضافه شده برحسب کیلوگرم است؛

Y_n ادمیتانس الکتریکی برحسب زمینس که با جرم m_n اضافه شده به عنصر متحرک اندازه گیری می شود، است؛

Y_0 ادمیتانس الکتریکی برحسب زمینس که بدون جرم اضافه شده به عنصر متحرک اندازه گیری می شود، است.

یادآوری- بسته به این که شتاب سنج چگونه کالیبره می شود ممکن است نیاز به محاسبه شیب و محاسبه اجزای حقیقی و موهومی عرض از مبدا نباشد و فقط اندازه آن محاسبه شود؛ به معادلات (۸) تا (۱۰) مراجعه شود [۱].

از فرمول های زیر، دامنه و فاز حساسیت مختلط شتاب سنج را می توان به عنوان تابعی از بسامد به دست آورد. در خصوص شتاب سنجی که دارای یک ترانسدیوسر مرجع استاندارد که به صورت دائم بر روی عنصر متحرک لرزاننده نصب شده (است) و برای کالیبراسیون سایر ترانسدیوسرها، از طریق مقایسه استفاده می شود، حساسیت با امپدانس مکانیکی قطعه بارگذاری کننده عنصر متحرک تغییر می کند و از طریق فرمول های زیر تعیین می شود:

$$S_a = \left| \sqrt{\frac{U_v \alpha}{j2\pi f}} \left[\frac{1}{1 - \beta(Y_t - Y_0)} \right] \right| \frac{V}{m/s^2} \quad (6)$$

$$\varphi_a = \arg \sqrt{\frac{U_v \alpha}{j2\pi f}} \left[\frac{1}{1 - \beta(Y_t - Y_0)} \right] \text{ deg} \quad (7)$$

که در آن ها:

$|S_a|$ مدولها (بزرگی) حساسیت مختلط شتاب سنج برحسب ولت بر متر بر مجذور ثانیه در بسامد f است؛

φ_a آرگومان (تغییر فاز) حساسیت مختلط شتاب سنج برحسب درجه در بسامد f است؛

j یکای موهومی، $j^2 = -1$ است؛

f بسامد برحسب هرتز است؛

U_v نسبت ولتاژ مدار باز مختلط اندازه گیری شده در بسامد f به وسیله ترانسدیوسر دوجانبه ای که به عنوان سیم پیچ سرعت عمل می کند، است؛

α عرض از مبدا مختلط در تابع $F(m_n, Y_n, Y_0)$ ، در بسامد f برحسب کیلوگرم اهم است؛

β شیب مختلط در تابع $F(m_n, Y_n, Y_0)$ ، در بسامد f برحسب اهم است؛

Y_t ادمیتانس الکتریکی برحسب زمینس در بسامد f به همراه ترانسدیوسر ویژه ای که به عنصر متحرک لرزاننده اضافه شده است؛

Y_0 ادمیتانس الکتریکی برحسب زمینس در بسامد f بدون هرگونه جرم اضافه شده به عنصر متحرک

لرزاننده است.

در خصوص شتابسنجی که دارای ترانسدیوسر استاندارد است که از روی عنصر متحرک برداشته شده، حساسیت از معادلات زیر به دست می آید:

$$S_a = \sqrt{\frac{U_v \alpha}{j2\pi f}} \frac{V}{m/s^2} \quad (8)$$

$$\varphi_a = \arg \sqrt{\frac{U_v \alpha}{j2\pi f}} \text{ deg} \quad (9)$$

نمادها، همان تعاریف داده شده برای معادلات (۶) و (۷) را دارند.

در بسامدهایی که به اندازه کافی پایین هستند (معمولا برای بسامدهای زیر یک کیلو هرتز)، β تقریبا صفر اهم بوده، آرگومان (U_v) تقریبا 90° و آرگومان (U_d) تقریبا صفر درجه می باشد. زمانی که این شرایط برقرار باشد، دامنه حساسیت مختلط شتابسنج به رابطه زیر کاهش می یابد:

$$|S_a| = \sqrt{\frac{|U_v| |\alpha|}{2\pi f}} \frac{V}{m/s^2} \quad (10)$$

که در آن ها:

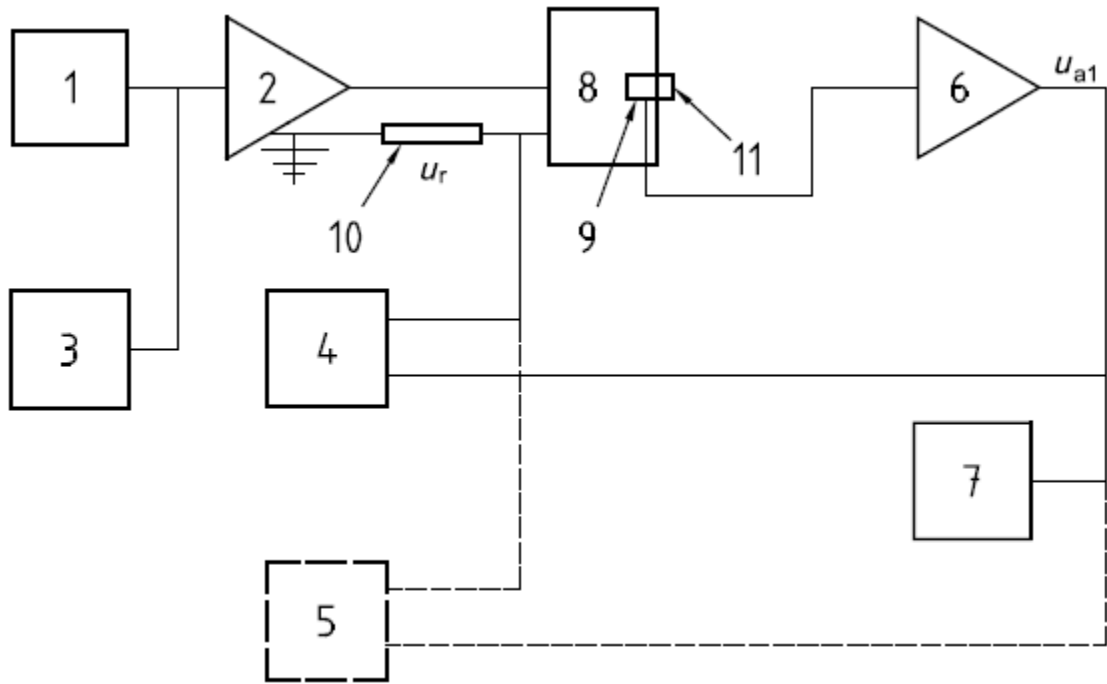
$|U_v|$ دامنه (مقدار) نسبت ولتاژ مدارباز مختلط اندازه گیری شده در بسامد f به وسیله ترانسدیوسر دوجانبه ای که به عنوان سیم پیچ سرعت عمل می کند، است؛

$|\alpha|$ دامنه (مقدار) عرض از مبدا مختلط در تابع $F(m_n, Y_n, Y_0)$ در بسامد f ، برحسب کیلوگرم اهم است؛

نمادها، همان تعاریف داده شده برای معادلات (۶) و (۷) را دارند.

در مواردی که معادله (۱۰) به کار می رود، فقط دامنه (مقدار) نسبت ولتاژ مختلط لازم است که به دست آید و دامنه α از تابع حاصل از برازش کوچکترین مربعات $F(m_n, Y_n, Y_0)$ با استفاده از قدر مطلق اختلاف در ادیتمانس مختلط به دست می آید.

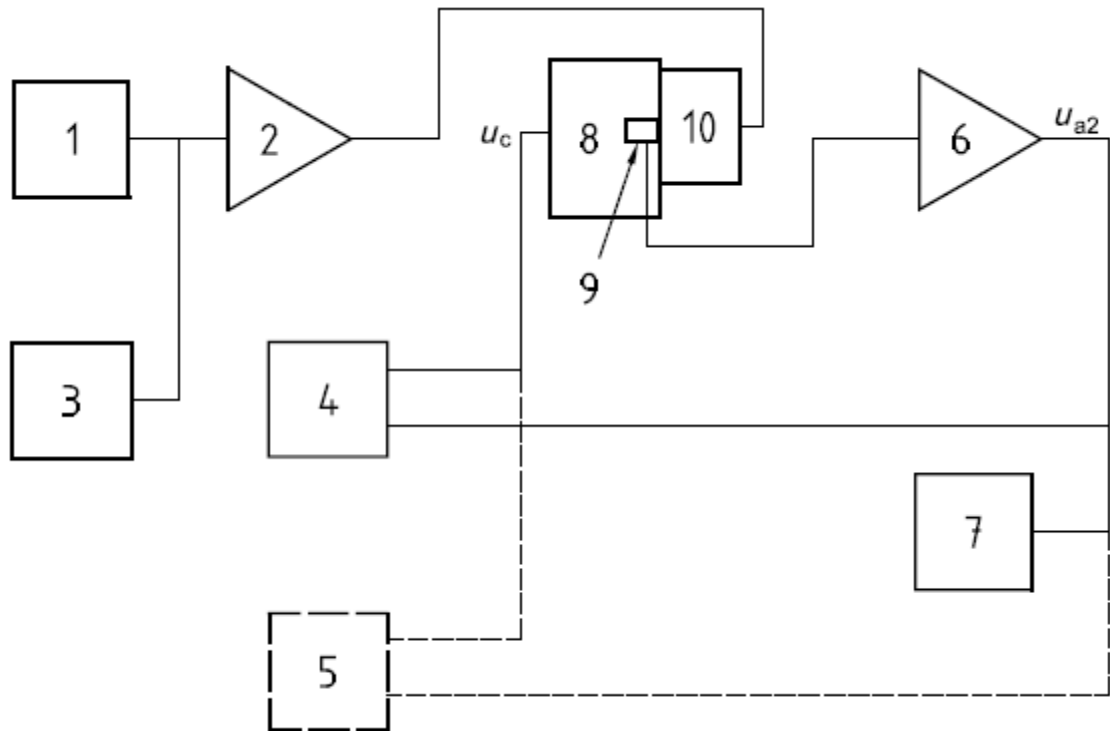
زمانی که نتایج کالیبراسیون گزارش می شود، مجموع عدم قطعیت کالیبراسیون و عامل پوششی^۱ متناظر آن باید مطابق پیوست الف و با استفاده از عامل پوششی $k = 2$ محاسبه گردد.



راهنما:

| | | | |
|-------------------------------------|---|--------------------------------|----|
| مولد بسامد | 1 | تحلیل‌گر اعوجاج | 7 |
| تقویت‌کننده توان | 2 | لرزاننده با ترانسدیوسر دوجانبه | 8 |
| شمارنده بسامد | 3 | ترانسدیوسر | 9 |
| ادوات نسبت ولتاژ | 4 | مقاومت استاندارد | 10 |
| اسیلوسکوپ (اختیاری) | 5 | جرم آزمون | 11 |
| شکل‌دهنده سیگنال یا تقویت‌کننده بار | 6 | | |

شکل ۱- بلوک دیاگرام سیستم اندازه‌گیری برای آزمون ۱ به همراه ترانسدیوسر دوجانبه استفاده شده به عنوان منبع ارتعاش



راهنما:

| | | | |
|---|---------------------|----|-------------------------------------|
| 1 | مولد بسامد | 6 | شکل دهنده سیگنال یا تقویت کننده بار |
| 2 | تقویت کننده توان | 7 | تحلیل گر اعوجاج |
| 3 | شمارنده بسامد | 8 | لرزاننده یا ترانسدیوسر دوجانبه |
| 4 | ادوات نسبت ولتاژ | 9 | ترانسدیوسر |
| 5 | اسیلوسکوپ (اختیاری) | 10 | منبع ارتعاش ثانویه |

شکل ۲- بلوک دیاگرام سیستم اندازه گیری برای آزمون ۲ به همراه ترانسدیوسر دوجانبه استفاده شده به عنوان حسگر ارتعاش

پیوست الف

(الزامی)

محاسبه عدم قطعیت

الف-۱ محاسبه عدم قطعیت گسترده در اندازه گیری مدول ها (بزرگی) حساسیت مختلط و عدم قطعیت گسترده در اندازه گیری آرگومان (تغییر فاز) حساسیت مختلط برای بسامدها، دامنه ها و تنظیمات تقویت کننده استفاده شده حین کالیبراسیون

الف-۱-۱ محاسبه $U(|S|)$

عدم قطعیت گسترده، $U(|S|)$ ، در اندازه گیری مدول ها (بزرگی) حساسیت مختلط برای بسامدها، دامنه ها و تنظیمات تقویت کننده به کار رفته در حین کالیبراسیون مطابق پیوست A استاندارد ISO 16063-1:1998، از فرمول زیر محاسبه می شود:

$$U(|S|) = k u_c(|S|) \quad (\text{الف-۱})$$

$$u_c(|S|) = \frac{1}{|S|} \sqrt{\sum_{i=1}^9 u_i^2(|S|)} \quad (\text{الف-۲})$$

با استفاده از اجزای عدم قطعیت نشان داده شده در جدول الف-۱ و عامل پوششی $k=2$.

جدول الف-۱- مؤلفه های عدم قطعیت در تعیین $|S|$

| سهم عدم قطعیت | منبع عدم قطعیت | مؤلفه عدم قطعیت استاندارد | i |
|---------------|---|---------------------------|-----|
| $u_i(y)$ | | $u(x_i)$ | |
| $u_1(S)$ | عدم قطعیت در بسامد | $u(f_{FG})$ | 1 |
| $u_2(S)$ | عدم قطعیت در دمای ترانسدیوسر شتاب سنج مرجع حین کالیبراسیون | $u(u_{Temp})$ | 2 |
| $u_3(S)$ | عدم قطعیت در مدول ها (بزرگی) طیف مختلط خروجی شتاب سنج به دلیل اعوجاج | $u(u_D)$ | 3 |
| $u_4(S)$ | عدم قطعیت در مدول ها (بزرگی) خروجی مختلط شتاب سنج به دلیل خروج از حرکت ایده آل به وسیله عنصر متحرک لرزاننده (مثلا حرکت عرضی، کرنش تکیه گاه) | $u(u_T)$ | 4 |
| $u_5(S)$ | عدم قطعیت در تعیین جرم | $u(m_m)$ | 5 |
| $u_6(S)$ | عدم قطعیت در تعیین مدول ها (بزرگی) نسبت ولتاژ مدار باز مختلط خروجی شتاب سنج به خروجی سیم پیچ سرعت | $u(u_U)$ | 6 |
| $u_7(S)$ | عدم قطعیت در مقاومت، زمانی که دامنه ادمیتانس مختلط اندازه گیری می شود | $u(R_Y)$ | 7 |
| $u_8(S)$ | عدم قطعیت در تعیین مدول ها (بزرگی) نسبت ولتاژ مختلط، زمانی که دامنه ادمیتانس مختلط، اندازه گیری می شود | $u(U_Y)$ | 8 |
| $u_9(S)$ | عدم قطعیت به دلیل اثرات باقیمانده بر روی تعیین مدول ها (بزرگی) حساسیت مختلط (مثلا نویزهای تصادفی، انحراف معیار تجربی) | $u(S_{RE})$ | 9 |

الف-۱-۲ محاسبه $U(\varphi)$

عدم قطعیت گسترده، $U(\varphi)$ ، در اندازه گیری آرگومان (تغییر فاز) حساسیت مختلط برای بسامدها، دامنه‌ها و تنظیمات تقویت کننده به کار رفته حین کالیبراسیون، مطابق پیوست A استاندارد ISO 16063-1:1998 از فرمول زیر محاسبه می شود:

$$U(\varphi) = k u_c(\varphi) \quad (\text{الف-۳})$$

$$u_c(\varphi) = \sqrt{\sum_{i=1}^9 u_i^2(\varphi)} \quad (\text{الف-۴})$$

با استفاده از اجزای عدم قطعیت نشان داده شده در جدول الف-۲ و عامل پوششی $k=2$.

جدول الف-۲- مؤلفه‌های عدم قطعیت در تعیین φ

| سهم عدم قطعیت | منبع عدم قطعیت | مؤلفه عدم قطعیت استاندارد | i |
|-------------------|--|---------------------------|-----|
| $u_i(\mathbf{y})$ | | $u(x_i)$ | |
| $u_1(\varphi)$ | عدم قطعیت در بسامد | $u(f_{FG})$ | 1 |
| $u_2(\varphi)$ | عدم قطعیت در دمای ترانسدیوسر شتابسنج مرجع حین کالیبراسیون | $u(u_{Temp})$ | 2 |
| $u_3(\varphi)$ | عدم قطعیت در آرگومان طیف مختلط خروجی از شتابسنج به دلیل اعوجاج | $u(u_D)$ | 3 |
| $u_4(\varphi)$ | عدم قطعیت در آرگومان خروجی مختلط شتابسنج به دلیل خروج از حرکت ایده-آل به وسیله عنصر متحرک لرزاننده (مثلا حرکت عرضی، کرنش تکیه‌گاه) | $u(u_T)$ | 4 |
| $u_5(\varphi)$ | عدم قطعیت در تعیین جرم | $u(m_m)$ | 5 |
| $u_6(\varphi)$ | عدم قطعیت در تعیین آرگومان نسبت ولتاژ مدار باز مختلط خروجی شتابسنج به خروجی سیم‌پیچ سرعت | $u(u_U)$ | 6 |
| $u_7(\varphi)$ | عدم قطعیت در مقاومت، زمانی که دامنه ادمیتانس مختلط اندازه گیری می شود | $u(R_Y)$ | 7 |
| $u_8(\varphi)$ | عدم قطعیت در تعیین آرگومان نسبت ولتاژ مختلط، زمانی که دامنه ادمیتانس مختلط اندازه گیری می شود | $u(U_Y)$ | 8 |
| $u_9(\varphi)$ | عدم قطعیت به دلیل اثرات باقیمانده بر روی تعیین آرگومان حساسیت مختلط (مثلا نویزهای تصادفی، انحراف معیار تجربی) | $u(S_{RE})$ | 9 |

الف-۲ محاسبه عدم قطعیت گسترده در اندازه‌گیری مدول‌ها (بزرگی) حساسیت مختلط و عدم قطعیت گسترده در اندازه‌گیری آرگومان (تغییر فاز) حساسیت مختلط بر روی کل گستره بسامد و دامنه

الف-۲-۱ محاسبه $U(|S_t|)$

عدم قطعیت گسترده، $U|S|$ ، در اندازه‌گیری مدول‌ها (بزرگی) حساسیت مختلط ارائه شده در زیربند الف-۱-۱ فقط برای بسامدها، دامنه‌ها و تنظیمات تقویت‌کننده مخصوص به کار رفته حین کالیبراسیون اعتبار دارد. عدم قطعیت گسترده، $U(|S_t|)$ ، در مدول‌ها (بزرگی) حساسیت مختلط برای کل گستره بسامد و دامنه در هر فاصله زمانی بین کالیبراسیون‌های متوالی، از فرمول‌های زیر محاسبه می‌شود:

$$U(|S_t|) = k u_c(|S_t|) \quad (\text{الف-۵})$$

$$u_c(|S_t|) = \frac{1}{|S_t|} \sqrt{\sum_{i=1}^{10} u_i^2(|S_t|)} \quad (\text{الف-۶})$$

با استفاده از اجزای عدم قطعیت نشان داده شده در جدول الف-۳ و عامل پوششی $k = 2$.

جدول الف-۳- مؤلفه‌های عدم قطعیت در تعیین $|S_t|$

| سهم عدم قطعیت $u_i(y)$ | منبع عدم قطعیت | مؤلفه عدم قطعیت استاندارد $u(x_i)$ | i |
|------------------------|--|------------------------------------|-----|
| $u_1(S_t)$ | عدم قطعیت مرکب در مدول‌ها (بزرگی) حساسیت مختلط در بسامدها، دامنه‌ها و تنظیمات تقویت‌کننده به کار رفته در کالیبراسیون، مطابق زیربند الف-۱-۱ محاسبه شده‌اند. | $u_c(S)$ | 1 |
| $u_2(S_t)$ | عدم قطعیت در بهره تقویت‌کننده مرجع، به‌عنوان تابعی از تنظیمات تقویت‌کننده | $u(e_{GA})$ | 2 |
| $u_3(S_t)$ | عدم قطعیت در بهره تقویت‌کننده مرجع، به‌عنوان تابعی از بسامد | $u(e_{FA})$ | 3 |
| $u_4(S_t)$ | عدم قطعیت در اندازه حساسیت ترانسدیوسر مرجع، به‌عنوان تابعی از بسامد | $u(e_{FT})$ | 4 |
| $u_5(S_t)$ | عدم قطعیت در خطی بودن دامنه تقویت‌کننده مرجع | $u(e_{LA})$ | 5 |
| $u_6(S_t)$ | عدم قطعیت در خطی بودن دامنه ترانسدیوسر مرجع | $u(e_{LT})$ | 6 |
| $u_7(S_t)$ | عدم قطعیت در بهره تقویت‌کننده مرجع و امپدانس خروجی شتاب‌سنج مرجع به‌عنوان تابعی از زمان (ناپایداری در طول زمان) | $u(e_{TA})$ | 7 |
| $u_8(S_t)$ | عدم قطعیت در اندازه حساسیت ترانسدیوسر مرجع، به‌عنوان تابعی از زمان (ناپایداری در طول زمان) | $u(e_{TT})$ | 8 |
| $u_9(S_t)$ | عدم قطعیت در بهره تقویت‌کننده مرجع به دلیل اثرات محیطی | $u(e_{EA})$ | 9 |
| $u_{10}(S_t)$ | عدم قطعیت در اندازه حساسیت ترانسدیوسر مرجع به دلیل اثرات محیطی | $u(e_{ET})$ | 10 |

الف-۲-۲ محاسبه $U(\varphi_t)$

عدم قطعیت گسترده، $U(\varphi)$ ، اندازه گیری آرگومان (تغییر فاز) حساسیت مختلط ارائه شده در زیربند الف-۱-۲ فقط برای بسامدها، دامنه ها و تنظیمات تقویت کننده مخصوص به کار رفته حین کالیبراسیون اعتبار دارد. عدم قطعیت گسترده، $U(\varphi_t)$ ، در آرگومان (تغییر فاز) حساسیت مختلط برای کل گستره بسامد و دامنه در هر فاصله زمانی بین کالیبراسیون های متوالی، از فرمول زیر محاسبه می شود:

$$U(\varphi_t) = k u_c(\varphi_t) \quad (\text{الف-۷})$$

$$u_c(\varphi_t) = \sqrt{\sum_{i=1}^{10} u_i^2(\varphi_t)} \quad (\text{الف-۸})$$

با استفاده از اجزای عدم قطعیت نشان داده شده در جدول الف-۴ و عامل پوششی $k=2$.

جدول الف-۴- مؤلفه های عدم قطعیت در تعیین φ_t

| سهم عدم قطعیت $u_i(y)$ | منبع عدم قطعیت | مؤلفه عدم قطعیت استاندارد $u(x_i)$ | i |
|------------------------|--|------------------------------------|-----|
| $u_1(\varphi_t)$ | عدم قطعیت مرکب در آرگومان حساسیت مختلط در بسامدها، دامنه ها و تنظیمات تقویت کننده به کار رفته در کالیبراسیون، مطابق زیربند الف-۱-۲ محاسبه شده اند. | $u_c(\varphi)$ | 1 |
| $u_2(\varphi_t)$ | عدم قطعیت در تغییر فاز تقویت کننده مرجع، به عنوان تابعی از تنظیمات تقویت کننده | $u(e_{GA})$ | 2 |
| $u_3(\varphi_t)$ | عدم قطعیت در تغییر فاز تقویت کننده مرجع، به عنوان تابعی از بسامد | $u(e_{FA})$ | 3 |
| $u_4(\varphi_t)$ | عدم قطعیت در تغییر فاز حساسیت ترانسدیوسر مرجع، به عنوان تابعی از بسامد | $u(e_{FT})$ | 4 |
| $u_5(\varphi_t)$ | عدم قطعیت در تغییر فاز تقویت کننده مرجع، به عنوان تابعی از دامنه | $u(e_{LA})$ | 5 |
| $u_6(\varphi_t)$ | عدم قطعیت در تغییر فاز حساسیت ترانسدیوسر مرجع، به عنوان تابعی از دامنه | $u(e_{LT})$ | 6 |
| $u_7(\varphi_t)$ | عدم قطعیت در تغییر فاز تقویت کننده مرجع و امپدانس خروجی شتاب سنج مرجع، به عنوان تابعی از زمان (ناپایداری در طول زمان) | $u(e_{TA})$ | 7 |
| $u_8(\varphi_t)$ | عدم قطعیت در تغییر فاز حساسیت ترانسدیوسر مرجع، به عنوان تابعی از زمان (ناپایداری در طول زمان) | $u(e_{TT})$ | 8 |
| $u_9(\varphi_t)$ | عدم قطعیت در تغییر فاز تقویت کننده مرجع، به دلیل اثرات محیطی | $u(e_{EA})$ | 9 |
| $u_{10}(\varphi_t)$ | عدم قطعیت در تغییر فاز حساسیت ترانسدیوسر مرجع، به دلیل اثرات محیطی | $u(e_{ET})$ | 10 |

پیوست ب

(آگاهی‌دهنده)

کاربرد نظریه تاثیر متقابل در کالیبراسیون ترانسدیوسرهای الکترومکانیکی

کاربرد تئوری تاثیر متقابل ترانسدیوسرهای الکترومکانیکی و کالیبراسیون آنها با این فرض است که ترانسدیوسرها خطی بوده و حرکت دوطرفه‌ای با یک درجه آزادی دارند. با توجه به این محدودیت‌ها، معادلات توصیف کننده کوپلینگ الکترومکانیکی مانند ترانسدیوسر، هنگامی که به عنوان شبکه دو درگاهی^۱ مدل می‌شوند از تساوی امپدانس به صورت زیر استفاده می‌کنند:

$$u = z_e i + z_{em} v \quad (\text{ب-۱})$$

$$F = z_{me} i + z_m v \quad (\text{ب-۲})$$

که در آنها:

| | |
|-------|---|
| u | ولتاژ مختلط در ترمینال‌های الکتریکی است؛ |
| i | جریان مختلط داخل ترمینال‌های الکتریکی است؛ |
| F | نیروی مختلط در ترمینال‌های الکتریکی است؛ |
| v | ولتاژ مختلط داخل ترمینال‌های الکتریکی است؛ |
| z_e | نقطه محرک ^۲ امپدانس الکتریکی با $v=0$ است؛ |
| z_m | نقطه محرک امپدانس مکانیکی با $i=0$ است؛ |

z_{em} و z_{me} ضرایب انتقالی هستند که اگر سازوکار انتقال پیزوالکتریک یا الکترواستاتیک باشد، $z_{me} = z_{em}$ و اگر مکانیسم انتقال الکترومغناطیسی باشد $z_{me} = -z_{em}$ است.

حساسیت ترانسدیوسر به عنوان حسگر سرعت با S_v تعریف می‌گردد که نسبت مختلط ولتاژ خروجی مدار باز به سرعت داخل ترمینال‌های مکانیکی می‌باشد و حساسیت ترانسدیوسر به عنوان تولیدکننده نیرو با G_F تعریف می‌شود که نسبت مختلط نیروی مدار باز (امپدانس مکانیکی بلوکه شده) به جریان داخل ترمینال‌های الکتریکی می‌باشد. آنگاه:

1 - Two-port
2 - Driving point

$$S_v = \frac{u}{v} \Big|_{i=0} = z_{em} \quad (\text{ب-۳})$$

$$G_F = \frac{F}{i} \Big|_{v=0} = z_{me} \quad (\text{ب-۴})$$

$$G_F = \pm S_v \quad (\text{ب-۵})$$

اگر دو ترانسدیوسر خطی وجود داشته باشد، که حداقل یکی از آن‌ها دوجانبه بوده و با یک درجه آزادی به صورت سینوسی حرکت کند، می‌توان دو پروتکل اندازه‌گیری را برای تعیین حاصلضرب و نسبت حساسیت‌های مختلط مطلق ترانسدیوسرها، S_{v1} و S_{v2} ایجاد کرد و سپس قدر مطلق حساسیت هر کدام یا هر دو ترانسدیوسرها از این طریق تعیین می‌شود. اگر این دو ترانسدیوسر در کنار هم به صورت صلب کوپل مکانیکی شده باشند به طوری که در درگاه‌های مکانیکی ترانسدیوسرها دامنه سرعت دو ترانسدیوسر با هم برابر و در فاز مخالف هم باشند در نتیجه $(v_1 = -v_2)$ است. اگر ترانسدیوسر ۱ به عنوان مولد نیرو برای حرکت دادن ترانسدیوسر ۲ به کار رود، سپس حاصلضرب حساسیت‌های ترانسدیوسرها را می‌توان به صورت زیر تعیین کرد (به آزمون ۱ در زیر بند ۶-۱-۱ مراجعه شود). هنگامی که درگاه‌های مکانیکی ترانسدیوسرها به طور مستقیم با هم کوپل شده‌اند، Z_T برابر امپدانس مکانیکی ترکیبی دو ترانسدیوسر می‌باشد. بنابراین از معادله (ب-۴) داریم:

$$F = G_{F1} i_1 = v_1 z_T = -v_2 z_T \quad (\text{ب-۶})$$

و

$$z_T = -G_{F1} i_1 \frac{S_{v2}}{u_2} = \mp S_{v1} S_{v2} Y_0 \quad (\text{ب-۷})$$

که در آن‌ها:

$$Y_0 = \frac{i_1}{u_2}$$

اگر امپدانس مکانیکی شناخته شده z_n ، بین دو درگاه مکانیکی ترانسدیوسرها قرار گیرد، امپدانس مکانیکی به دست آمده به صورت زیر می‌شود:

$$z_T + z_n = \mp S_{v1} S_{v2} Y_n \quad (\text{ب-۸})$$

که در آن:

$$Y_n = \frac{i_1}{u_2} \quad \text{با امپدانس مکانیکی شناخته شده اضافه شده}$$

با کم کردن Z_T از $Z_n + Z_T$:

$$z_n = \mp S_{v1} S_{v2} (Y_n - Y_0) \quad (\text{ب-۹})$$

و بنابراین:

$$S_{v1} S_{v2} = \pm \frac{z_n}{(Y_n - Y_0)} \quad (\text{ب-۱۰})$$

اگر امیدانس مکانیکی اضافه شده، یک جرم شناخته شده باشد، z_n برای تحریک سینوسی $j\omega m_n$ بوده و حاصلضرب حساسیت‌ها می‌شود:

$$S_{v1} S_{v2} = \pm \frac{j\omega m_n}{(Y_n - Y_0)} \quad (\text{ب-۱۱})$$

که در آن‌ها:

j یکای موهومی، $j^2 = -1$ است؛

ω بسامد زاویه‌ای که برابر با $2\pi f$ است؛

m_n جرم اضافه شده است.

نسبت حساسیت‌های ترانسدیوسرها را می‌توان به شرح زیر تعیین کرد (به آزمون ۲ در زیر بند ۸-۲-۲ مراجعه شود). مجدداً با دو ترانسدیوسر که به‌طور صلب در کنار هم کوپل مکانیکی شده‌اند به‌طوری که دامنه سرعت در درگاه‌های مکانیکی ترانسدیوسرها با هم برابر بوده ولی در فاز مخالف یکدیگرند ($v_1 = -v_2$)، و با ترانسدیوسر دوجانبه که به‌عنوان حسگر سرعت عمل می‌کند با $i_1 = i_2 = 0$ سپس با اعمال معادله ب-۳ به هر دو ترانسدیوسر داریم:

$$\frac{S_{v2}}{S_{v1}} = -\frac{u_2}{u_1} = -U_v \quad (\text{ب-۱۲})$$

که U_v نسبت ولتاژ مدار باز ترانسدیوسر ۱ و ترانسدیوسر ۲ است که ترانسدیوسر ۱ به‌عنوان حسگر سرعت عمل می‌کند.

قدر مطلق حساسیت مختلط هر یک یا هر دوی ترانسدیوسرها را می‌توان از حاصلضرب و نسبت حساسیت‌ها محاسبه کرد. برای مثال در مورد ترانسدیوسر ۲ داریم:

$$S_{v2} = \sqrt{\pm \frac{U_v j\omega m_n}{(Y_n - Y_0)}} \quad \text{برای سرعت‌سنج} \quad (\text{ب-۱۳})$$

$$S_{a2} = \sqrt{\pm \frac{U_v m_n}{j\omega(Y_n - Y_0)}} \quad \text{برای شتاب‌سنج} \quad (\text{ب-۱۴})$$

اگر مکانیسم انتقال ترانسدیوسر دوجانبه الکترومغناطیسی باشد، علامت زیر رادیکال مثبت و اگر مکانیسم انتقال ترانسدیوسر دوجانبه پیزوالکتریک یا الکترواستاتیک باشد، علامت زیر رادیکال منفی می‌شود.

به‌طور کلی حساسیت را می‌توان فقط با استفاده از یک جرم تعیین کرد. هرچند، در عمل اگر یک سری از جرم‌های m_1, m_2, \dots, m_n و ادمیتانس‌های الکتریکی مختلط اندازه‌گیری شده متناظر آن‌ها Y_1, Y_2, \dots, Y_n برای به‌دست آوردن برازش کوچکترین مربعات خطی تابع $m/(Y-Y_0)$ بر حسب m و معادله خط $\alpha + \beta m$ که در آن α و β به ترتیب عرض از مبدا و شیب مختلط خط متناظر با $m/(Y-Y_0)$ بر حسب m هستند، استفاده شود، عدم قطعیت‌های بسیار کوچک‌تری به‌دست می‌آیند. با جایگزینی حساسیت مختلط اندازه‌گیری شده ترانسدیوسر ۲ خواهیم داشت:

$$S_{v2} = \sqrt{\pm U_v j \omega \alpha} \quad \text{برای سرعت‌سنج} \quad (15-ب)$$

$$S_{a2} = \sqrt{\pm \frac{U_v \alpha}{j \omega}} \quad \text{برای شتاب‌سنج} \quad (16-ب)$$

غالباً در پیاده‌سازی عملی سیستم‌های طراحی شده برای انجام کالیبراسیون ترانسدیوسرهای الکترومکانیکی به روش تاثیر متقابل، دو ترانسدیوسر به وسیله یک امیدانس مکانیکی از یکدیگر جدا می‌شوند. این امر به‌طور مناسبی از محل نقطه نصب جرم اضافه شده لازم، که به‌عنوان یک امیدانس مکانیکی دیگر است، صورت می‌گیرد. در این حالت مطلوب است که حساسیت نسبت مختلط ولتاژ خروجی مدار باز ترانسدیوسر به سرعت سطحی که جرم به آن اضافه شده است را کالیبره کنیم. بنابراین ترانسدیوسر کالیبره شده ممکن است برای کالیبره کردن (از طریق مقایسه) ترانسدیوسر دومی که بر روی سطحی که جرم به آن اضافه شده است، استفاده شود. همچنین می‌توان نشان داد (به بند [۸] کتاب‌نامه مراجعه شود) هنگامی که ترانسدیوسر دوجانبه‌ای که در کالیبراسیون به روش تاثیر متقابل استفاده می‌شود الکترودینامیکی است، معادلات مرتبط با نیرو و سرعت در سطح نصب، جریان و ولتاژ در درگاه الکتریکی ترانسدیوسر دوجانبه (ترانسدیوسر ۱) و ولتاژ خروجی مدار باز حسگر سرعت (ترانسدیوسر ۲) از مقایسه حرکت به‌دست می‌آید:

$$i_1 = y_e u_1 - y_{em} F \quad (17-ب)$$

$$v = y_{em} u_1 + y_m F \quad (18-ب)$$

$$u_2 = k_e u_1 + k_m F \quad (19-ب)$$

که در آن‌ها:

u_1 ولتاژ مختلط پایانه‌های الکتریکی ترانسدیوسر ۱ است؛

u_2 ولتاژ مختلط پایانه‌های الکتریکی ترانسدیوسر ۲ است؛

i_1 جریان مختلط پایانه‌های الکتریکی ترانسدیوسر ۱ است؛

F نیروی مختلط روی سطح نصب است؛

v سرعت مختلط سطح نصب است؛

که y_e ، y_m ، y_{em} ، k_e و k_m ، به طور کلی توابع امپدانس‌های مکانیکی و الکتریکی مختلط و ضرایب متقابل ترانسدیوسر الکتروپینامیکی دوجانبه، حسگر سرعت و عنصر متحرک می‌باشند؛ که این مقادیر به وضعیت فیزیکی دستگاه‌های کالیبراسیون وابسته است.

اگر F نیروی عکس‌العمل امپدانس مکانیکی z_n در سرعت ایجاد شده v باشد:

$$-F = vz_n \quad (\text{ب-} 20)$$

با به دست آوردن v در معادله (ب-۲۰)، جاگذاری نتیجه در معادله (ب-۱۸) و سپس به دست آوردن نیرو در سطح نصب داریم:

$$-F = \frac{u_1 y_{em} z_n}{y_m z_n + 1} \quad (\text{ب-} 21)$$

حساسیت مختلط ترانسدیوسر ۲، S_{v2} ، با جایگزینی عبارت به دست آمده برای نیرو در معادله (ب-۲۱) در معادله‌های (ب-۱۹) و (ب-۲۰) و تشکیل نسبت مختلط ولتاژ خروجی مدار باز ترانسدیوسر ۲ به سرعت در سطح نصب، به دست می‌آید:

$$S_{v2} = \frac{u_2}{v} = \frac{k_e}{y_{em}} + \left(\frac{k_e y_m}{y_{em}} - k_m \right) z_n \quad (\text{ب-} 22)$$

ادمیتانس انتقالی مختلط، Y_n ، با جاگذاری عبارت به دست آمده برای نیرو در معادله (ب-۲۱) در معادله‌های (ب-۱۷) و (ب-۱۹) و تشکیل نسبت مختلط جریان در سیم‌پیچ محرک ترانسدیوسر ۱ به ولتاژ خروجی مدار باز ترانسدیوسر ۲ به دست می‌آید:

$$Y_n = \frac{i_1}{u_2} = \frac{y_e + (y_e y_m + y_{em}^2) z_n}{k_e + (k_e y_m - y_{em} k_m) z_n} \quad (\text{ب-} 23)$$

مانند قبل، اگر امپدانس مکانیکی اضافه شده به سطح نصب، جرم شناخته شده m_n باشد، بنابراین z_n برای تحریک سینوسی اعمال شده $j\omega m_n$ می‌باشد و داریم:

$$\frac{m_n}{(Y_n - Y_0)} = \alpha + \beta m_n \quad (\text{ب-} 24)$$

که در آن‌ها:

Y_n ادمیتانس الکتریکی اندازه‌گیری شده، با جرم اضافه شده m_n به سطح نصب است؛

Y_0 ادمیتانس الکتریکی اندازه‌گیری شده، بدون جرم اضافه شده به سطح نصب است.

از معادله (ب-۲۳) برای تشکیل تابع $m_n / (Y_n - Y_0)$ استفاده می‌شود:

$$\alpha = \frac{k_e^2}{j\omega y_{em} (y_{em} k_e + y_e k_m)} \quad (\text{ب-} 25)$$

و

$$\beta = \frac{k_e (k_e y_m - y_{em} k_m)}{y_{em} (y_{em} k_e + y_e k_m)} \quad (\text{ب-۲۶})$$

که در آن‌ها:

ز یکای موهومی، $z^2 = -1$ است؛

و) بسامد زاویه‌ای که برابر با $2\pi f$ است.

با استفاده متقابل از ترانسدیوسر ۱ به‌عنوان حسگر سرعت، U_v به‌عنوان نسبت u_2 به u_1 با $i_1 = i_2 = 0$ تعریف شده و توسط معادله (ب-۱۷) داریم:

$$F = u_1 \frac{y_e}{y_{em}} \quad (\text{ب-۲۷})$$

با جاگذاری عبارت به‌دست آمده برای نیرو در معادله (ب-۲۷) در معادله (ب-۱۹)، نسبت U_v به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$U_v = \frac{y_{em} k_e + y_e k_m}{y_{em}} \quad (\text{ب-۲۸})$$

با ضرب عبارت α و U_v داده‌شده در معادلات (ب-۲۵) و (ب-۲۸)، به ترتیب، خواهیم داشت:

$$U_v \alpha = \frac{k_e^2}{j\omega y_{em}^2} \quad (\text{ب-۲۹})$$

و

$$\sqrt{j\omega U_v \alpha} = \frac{k_e}{y_{em}} \quad (\text{ب-۳۰})$$

نسبت β به حاصلضرب ωz و α را با استفاده از عباراتی که برای α و β به‌ترتیب در معادلات (ب-۲۶) و (ب-۲۵) داده‌شده، به‌دست آورید و سپس با ضرب نتیجه آن در عبارت داده‌شده برای k_e/y_{em} در معادله (ب-۳۰) عبارت زیر به‌دست می‌آید:

$$\frac{\beta}{j\omega \alpha} \sqrt{j\omega U_v \alpha} = \frac{k_e y_m}{y_{em}} - k_m \quad (\text{ب-۳۱})$$

از معادلات (ب-۲۲)، (ب-۳۰) و (ب-۳۱)، حساسیت مختلط ترانسدیوسر ۲ را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$S_{v2} = \sqrt{j\omega U_v \alpha} \left[1 + \frac{\beta m_n}{\alpha} \right] \quad (\text{ب-۳۲})$$

از معادله (ب-۲۴) داریم:

$$m_n = \frac{\alpha(Y_n - Y_0)}{1 - \beta(Y_n - Y_0)} \quad (\text{ب-۳۳})$$

با جاگذاری عبارت به دست آمده برای m_n حاصل از معادله (ب-۳۳) در معادله (ب-۳۲)، حساسیت مختلط ترانسدیوسر ۲ بر حسب سرعت به صورت زیر است:

$$S_{v2} = \sqrt{j\omega U_v \alpha} \left[\frac{1}{1 - \beta(Y_n - Y_0)} \right] \quad (\text{ب-۳۴})$$

و بر حسب شتاب به صورت زیر است:

$$S_{a2} = \sqrt{\frac{U_v \alpha}{j\omega}} \left[\frac{1}{1 - \beta(Y_n - Y_0)} \right] \quad (\text{ب-۳۵})$$

کتابنامه

- [1] BOUCHE, R.R., ENSOR, L.C. Use of reciprocity calibrated accelerometer standards for performing routine laboratory comparison calibrations. Shock and Vibration Bulletin, 34 (4), 1965, pp. 21-29
- [2] COOK, R.K. Absolute pressure calibration of microphones. Journal of Research of the National Bureau of Standards, 25 (5), November 1940, pp. 489-505
- [3] DIMOFF, T. and PAYNE, B. Development and calibration of NBS vibration shaker AFV. National Bureau of Standards Internal Report 9670, Washington DC, January 1968
- [4] HARRISON, M., SYKES, A.O. and MARCOTTE, P.G. The reciprocity calibration of piezoelectric accelerometers. David Taylor Model Basin Report 811, Washington DC, August 1953
- [5] HARRISON, M., SYKES, A.O. and MARCOTTE, P.G. The reciprocity calibration of piezoelectric accelerometers. Journal of the Acoustical Society of America, 24 (4), July 1952, pp. 384-389
- [6] HUNT, F.V. Electroacoustics: The analysis of transduction, and its historical background. American Institute of Physics for the Acoustical Society of America, Woodbury, NY, 1982
- [7] LEVY, S. and BOUCHE, R.R. Calibration of vibration pickups by the reciprocity method. Journal of Research of the National Bureau of Standards, 57 (4), October 1956
- [8] LONDON, A. The absolute calibration of vibration pickups. National Bureau of Standards Technical News Bulletin, 32 (1), January 1948, pp. 8-10
- [9] THOMPSON, S.P. Reciprocity calibration of primary vibration standards. Naval Research Laboratory Report F-3337, Washington DC, August 1948
- [10] THOMPSON, S.P. Reciprocity calibration of primary vibration standards. Journal of the Acoustical Society of America, 20 (5), September 1948, pp. 637-640
- [11] TRENT, H.M. The absolute calibration of electromechanical pickups. Journal of Applied Mechanics, 15, 1948, pp 49-52
- [12] PAYNE, B. and EVANS, D.J. Comparison of results of calibrating the magnitude of the sensitivity of accelerometers by laser interferometry and reciprocity. Metrologia, 36, 1999, pp. 391-394
- [13] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. BIPM, IEC, IFCC, ISO, OIML, IUPAC, 1993)