NAISL
Volume 4, Number 1, 2020
Pages: 05-17
Print ISSN: 2588-6401
Online ISSN: 2588-641X
Website: shaajournal.msrt.ir
Article type: Scientific extension
Date Received: 2019/11/06
Acceptance date: 2020/01/13
Online publishing: 2020/04/03

Study of In-field Calibration Techniques for Laboratory Sensors

Mohsen Davoudi[1*], Saeed Firouz-Bahrafzal[2], Hamid Firouz-Bahrafzal[3]

Abstract

Due to the advancement in the measurement and Instrumentation field and development of the laboratory sensors in parallel with the estimation algorithms, the usage of such sensors has been increased. But due to the errors of the sensors that derive from the time, exhaustion, physical impacts, electrical fluctuations, etc, the measurements based on such sensors need to be with error detection and calibrations. Calibration is an action that is done to test the accuracy and determination of the equipment errors. In the laboratories and industries, the calibration is a principle. Proper calibration leads the instruments to produce correct results within their range. In this paper, the technical notes of the calibration methods for laboratory sensors like Voltage, Current, Temperature, Moisture, Force, Weight, Strain Gauge, Piezo Accelerometer, MEMS Accelerometer and Flowmeter has been considered. Calibration of a sensor includes the electrical part (Transducer and transmitter) too. The presented methods in this paper include this issue too.

Key Words:

Calibration, Measurement, Laboratory Sensors, Strain Gauge, Temperature Sensor

Authors:
1. Electrical Engineering Department, Imam Khomeini International University, Iran.
E-mail: davoudi@eng.ikiu.ac.ir
Tel: 09123838610
2. Electrical Engineering Department, Imam Khomeini International University, Iran.
E-mail: saeedfba@gmail.com
Tel: 02833901281
3. Graduated in Electrical Engineering, Imam Khomeini International University, Iran.
E-mail: hamid.firouz@gmail.com
Tel: 09388458842

*. Corresponding author

بررسی تکنیک‌های واسنجی برای انواع حسگرهای آزمایشگاهی

محسن داودی[1*]، سعید فیروز بهرافضل[2]، حمید فیروز بهرافضل[3]

نشریه رویکردهای نوین در آزمایشگاه‌های علمی ایران
سال چهارم، شماره ۱، ۱۳۹۹
صفحات: ۱۷-۰۵
شاپای چاپی: ۶۴۰۱-۲۵۸۸
شاپای الکترونیکی: ۶۴۱X-۲۵۸۸
وب‌سایت: shaajournal.msrt.ir
نوع مقاله: علمی -ترویجی
تاریخ ارسال: ۱۳۹۸/۰۸/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۳
نشر آنلاین: ۱۳۹۹/۰۱/۱۵

چکیده

با گسترش فناوری‌ها در حوزه اندازه‌گیری و ابزار دقیق و توسعه روز افزون حسگرهای آزمایشگاهی در کنار الگوریتم‌های تخمین پیشرفته، کاربری اینگونه حسگرهای در آزمایشگاه‌های مختلف رشد چشم‌گیری یافته است. با این وجود، به خاطر خطاهای نسبتا زیاد حسگرها که ناشی از گذشت زمان، فرسودگی، ضربه‌های فیزیکی، نوسانات الکتریکی و .... پیش می‌آید، اندازه‌گیری‌های مبتنی بر این حسگرها نیازمند شناسایی خطاها و واسنجی[1] آن‌ها می‌باشد. واسنجی به عمل و فعالیتی گفته می‌شود که برای تست صحت و تعیین میزان خطای تجهیزات اندازه‌گیری، چه در ابزار دقیق و چه اتوماسیون صنعتی و آزمایشگاه‌ها انجام می‌گیرد. درک لزوم کالیبره کردن تجهیزات و کاربرد صحیح آن‌ها یک موضوع اساسی در صنایع و آزمایشگاه‌های اندازه‌گیری می‌باشد. واسنجی مناسب باعث می‌شود که تجهیزات در محدوده‌های تعیین شده و استاندارد عملکرد خود باقی مانده و نتایج دقیقی ارایه کنند. در این مقاله به بررسی فنی روش‌های واسنجی انواع حسگرها آزمایشگاهی شامل ولتاژ، جریان الکتریکی، دما، رطوبت، نیرو و وزن، استرین گیج، شتاب پیزو، شتاب MEMS[2]، فلومتر، پرداخته می‌شود. واسنجی یک حسگرها شامل در نظر گرفتن بخش الکتریکی (مبدل و ترنسمیتر) نیز می‌گردد. روش‌های مطرح شده برای واسنجی این بخش را نیز در بر می‌گیرد.

محسن داوودی

سعید فیروز بهرافضل

حمید فیروز بهرافضل

واژگان کلیدی:
واسنجی،
اندازه‌گیری،
حسگرهای آزمایشگاهی،
استرین گیج،
حسگر دما

نویسندگان:
۱. گروه مهندسی برق، دانشگاه بین المللی امام خمینی، ایران.
ایمیل: davoudi@eng.ikiu.ac.ir
تلفن: ۰۹۱۲۳۸۳۸۳۱۰
۲. گروه مهندسی برق، دانشگاه بین المللی امام خمینی، ایران.
ایمیل: saeedfba@gmail.com
تلفن: ۰۲۸۳۳۹۰۱۲۸۱
۳. فارغ‌التحصیل رشته برق قدرت، دانشگاه بین المللی امام خمینی، ایران.
ایمیل: hamid.firouz@gmail.com
تلفن: ۰۹۳۸۸۴۵۸۸۴۲

*. نویسنده مسئول

[1] Calibration
[2] Micro Electro-Mechanical Systems

۱- مقدمه

کیفیت، مقوله‌ای است که با سرشت انسان سازگاری دارد و همراه نیاز مادی و معنوی اوست و نبود آن می‌تواند دشواری‌هایی برای وی بوجود آورد. به همین دلیل از گذشته‌های دور تلاش برای رسیدن به کیفیت و رفع دشواری‌های موجود در این راه موضوعی مطرح در جوامع انسانی بوده است. امروزه این واژه از مرحله رفع نیاز پا فراتر گذاشته است. با گسترش دنیای رقابت در بازارهای جهانی، کیفیت تنها زبانی است که می‌شود با آن، با سایرین سخن گفت. بدیهی است کنترل کیفیت و تضمین آن بر اندازه‌گیری استوار است. فراگیری روش اندازه‌گیری کمیت‌های گوناگون و در نگاهی وسیع تر تضمین صحت اندازه‌گیری و کالیبراسیون دستگاه‌ها، راهی برای نیل به این خواسته است [۱].

حضور در بازارهای رقابتی فشرده در جهان امروز، صنعتگران را برآن داشته است تا بیش از گذشته به کیفیت محصولات خود توجه نمایند. کشورهای در حال توسعه نیز که تمایل به رشد صنعتی دارند از این قاعده مستثنی نیستند. عوامل متعددی بر کیفیت یک محصول تاثیر می‌گذارند که در اینجا می‌توان از دانش فنی، مواد اولیه، نیروی انسانی، تکنولوژی و ماشین آلات نام برد. یکی دیگر از این عوامل موثر، ابزارهای اندازه‌گیری هستند که وظیفه محک زدن کیفیت محصول را با توجه به استانداردها بر عهده دارند. برای حصول اطمینان از کیفیت یک محصول، باید ابزارها از صحت[۳] و دقت[۴] عملکرد لازم برخوردارباشند؛ و به همین منظور مفهوم واسنجی کردن ابزارهای اندازه‌گیری مطرح می‌گردد.

بنابراین، به نظر می‌رسد که درک صحیح و کامل از مفهوم واسنجی در بهینه‌سازی سیستم اندازه‌گیری و نیز در جلوگیری از هزینه‌های اضافی، و اجرای درست آن کمک شایانی می‌کند. ابزار اندازه‌گیری و کنترل و تجهیزات و واسنجی آن‌ها عاملی بسیار مهم و دارای اثر مستقیم بر کیفیت یک محصول است. واسنجی یکی از ابزارهای مهم برای این چنین پیشرفت‌هایی محسوب می‌شود. این بدان معنی است که درصورت عدم اجرای واسنجی صحیح روی ابزار نمی‌توان اندازه‌گیری را به صورت صحیح انجام داد و بدون اندازه‌گیری صحیح، واحدهای تحقیقاتی و بازرسی می‌توانند به کنترل‌های مورد نیاز خود دست یابند و یا در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی نتایج تست‌ها از اعتبار کافی برخوردار نخواهند شد [۲].

ابزارهای اندازه‌گیری به دلایل گوناگون از جمله گذشت زمان و ساعات کار با ابزار اندازه‌گیری، شرایط محیطی استفاده و غیره، نمی‌توانند به طور دائم درست کار کنند و فقط از طریق واسنجی صحیح می‌توان به خطاهای موجود در ابزار اندازه‌گیری پی برد و یا تصحیح نتایج اندازه‌گیری با خطای کمتری را انتظار داشت [۳].

تخمین زده می‌شود حدود یک سوم از عوارض بیماری‌ها، مرگ و میرها و طولانی شدن دوره‌های درمان قابل اجتناب در سطح بیمارستان‌های کشور، مربوط به مسائل نگهداری و استفاده صحیح و به موقع از وسایل و تجهیزات پزشکی است [۵،٤].

در این مقاله روش‌های واسنجی تعدادی از انواع حسگرهای آزمایشگاهی کاربردی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. بخش اول به تعاریف واسنجی و اهداف آن، فصل دوم واسنجی سنسور رطوبت، فصل سوم واسنجی حسگر دما، فصل چهارم واسنجی سنسور شتاب میکرو الکترومکانیکی (MEMS)، فصل پنجم واسنجی فلومتر، فصل ششم واسنجی سنسور نیرو و وزن، فصل هفتم واسنجی حسگر ولتاژ، فصل هشتم واسنجی استرین گیج و فصل نهم واسنجی حسگر شتاب پیزو می‌پردازد.

۱-۱- واسنجی چیست ؟

تعاریف متعددی برای واسنجی یا کالیبراسیون ارائه شده است.

• دراستاندارد ملی ایران[۵] واسنجی چنین تعریف شده است: «مقایسه ابزار دقیق با یک مرجع استاندارد آزمایشگاهی در شرایط استاندارد، جهت اطمینان از دقت و سلامت آن و تعیین میزان خطای این وسیله نسبت به آن استاندارد و تنظیم آن در مقایسه با استاندارد است.»

• تعریف دیگری که می‌توان ارائه داد این است که: «واسنجی مقایسه دو سیستم یا وسیله اندازه‌گیری است (یکی با عدم قطعیت[۶] معلوم و دیگری با عدم قطعیت نامعلوم) به منظور محاسبه عدم قطعیت وسیله‌ای که عدم قطعیت آن نامعلوم است».

• تعریف دیگری که در ایزو[۷] آمده است واسنجی کردن را چنین معرفی کرده است: « مجموعه‌ای از عملیات که تحت شرایط مشخصی برقرار می‌شود و رابطه بین مقادیر نشان داده شده توسط وسیله اندازه‌گیری و مقادیر متناظر آن کمیت توسط استاندارد مرجع را مشخص می‌نماید» [۲].

۱-۲- هدف از واسنجی تجهیزات آزمایشگاهی

دستگاه‌های اندازه‌گیری باید به طور دوره‌ای واسنجی شوند. گذشت زمان، حوادث غیر قابل پیش‌بینی، فرسودگی، باعث می‌شوند تا قابلیت ردیابی نتایج آن‌ها با استانداردها زیر سوال رفته و نیازمند تایید مجدد

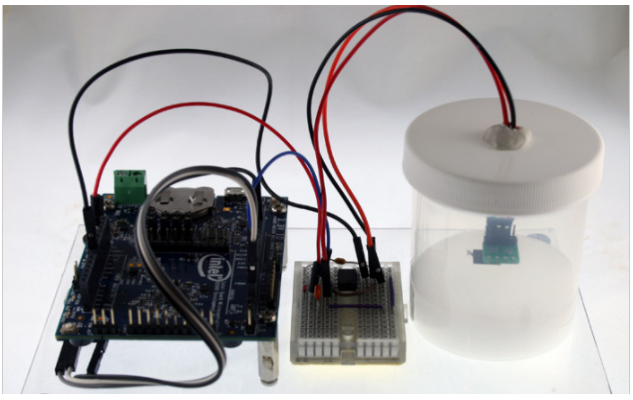
[۳] Accuracy
[۴] Precision
[۵] Treability
[۶] Uncertainty
[۷] ISO 10012: استاندارد مدیریت اندازه‌گیری

- هدف اول واسنجی برقراری قابلیت ردیابی عنوان شده است. قابلیت ردیابی[۸] مهم‌ترین ویژگی است که یک اندازه‌گیری باید داشته باشد. وجود قابلیت ردیابی باعث می‌شود تا نتایج آن با استانداردهای ملی و سپس بین‌المللی منطبق باشد.
- هدف دوم واسنجی ایجاد نظامی مؤثر به منظور کنترل صحت‌های آزمون و وسایل و دقت پارامترهای مترولوژیکی دستگاه اندازه‌گیری و کلیه تجهیزاتی است که عملکرد آن‌ها بر کیفیت فرایند تأثیرگذار می‌باشد. این کار به منظور اطمینان از تطابق اندازه‌گیری‌های انجام شده با استانداردهای جهانی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

معمولا واسنجی اولیه دستگاه آزمون و اندازه‌گیری در مرحله ساخت و تولید آن انجام می‌گیرد که می‌تواند شامل این مراحل باشد: درجه‌بندی دستگاه، تنظیم مدارات الکتریکی موجود روی وسیله (مانند تنظیم نشان دهنده‌های دیجیتالی)، تخمین عدم قطعیت و پایداری دستگاه. پس از این مراحل وسیله اندازه‌گیری با توجه به طول عمر آن، مورد استفاده قرار می‌گیرد. واسنجی مجدد جهت اطمینان از عملکرد صحیح دستگاه‌ها و کنترل کیفیت اجزای آن‌ها مورد نیاز است. بنابراین با واسنجی مجدد می‌توان عوامل و اجزایی از دستگاه را که کیفیت خود را از دست داده است، شناسایی کرد [۹-۱۱].

۲- واسنجی حسگر رطوبت

برای بررسی دقت و صحت یک حسگر رطوبت، مقادیری بدست آمده با منابع استاندارد مقایسه می‌شوند. معمولا برای معرفی استانداردها از روش نمک اشباع شده استفاده می‌شود تا صحت حسگر رطوبت بررسی شود. قرار دادن برخی نمک‌ها (از نوع یون مرکب مانند نمک معمولی یا پتاسیم کلراید)، در زمانی که یک محلول حل می‌شود، فضایی با میزان مشخصی از رطوبت را ایجاد می‌کند. این تنظیمات شیمیایی برای ساخت محیط‌های کوچک با **درصد رطوبت نسبی (RH)** به کار می‌رود و حسگرها درون این محیط‌های کوچک خوانده می‌شوند. محلول‌های مشخصی در ظرف‌های خاص ساخته می‌شوند تا محیط مورد نظر را بوجود بیاورند و سپس حسگر متصل شده در این ظرف قرار می‌گیرد (شکل۱). پس از آن حسگر چند بار خوانده شده و مقادیر آن ذخیره می‌شود.



شکل۱: راه‌اندازی آزمایشگاهی جهت یک حسگر رطوبت

با استفاده از چندین نمک مختلف این روند تکرار می‌گردد که در هر کدام از آن‌ها رطوبت نسبی متفاوتی وجود دارد و دیتا شیت هر نمک را مطابق جدول ۱ یادداشت می‌کنیم.

جدول۱: رطوبت نسبی با استفاده از چندین نمک مختلف این روند تکرار می‌گردد که در هر کدام از آن‌ها رطوبت نسبی متفاوتی وجود دارد و دیتا شیت هر نمک را مطابق جدول ۱ یادداشت می‌کنیم.

برخی از نمک‌های اشباع

نمک	رطوبت نسبی	دیتا شیت
لیتیم کلرید	۱۱،۳۰	SDS liCl[۸]
منیزیم کلرید	۳۲،۷۸	SDS MgCl
سدیم کلرید	۷۵،۲۹	SDS NaCl
پتاسیم کلرید	۸٤،۳٤	SDS KCl

برای هر کدام از نمک‌ها، با اضافه کردن مقداری آب مقطر محلول غلیظی ساخته می‌شود و میزان آب به قدری خواهد بود که مخلوط ظاهری شبیه به شن و ماسه بسیار نمناک باشد. حسگر رطوبت (THD-۲۲) که به میکروکنترلر[۹] متصل شده است باید تقریبا در فاصله ۱/۵ تا ۲/۵ سانتی متری در بالای مخلوط قرار گیرد. در این آزمایش در حدود ۹۰ تا ۱۲۰ دقیقه به هر محلول زمان استراحت داده می‌شود تا پایدار شود.

[۸] MSDS = SDS : material safety data sheet

[۹] Microcontroller D2000 Quark

علاوه بر این تمام مقادیر خوانده شده در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) محاسبه شده‌اند که مقدار RH داده شده در استاندارد نیز برای دمای ۲۵ درجه درجه سانتی‌گراد داده شده است (جدول ۲).

جدول۲: مقدار رطوبت نسبی (RH) برای نمک‌های اشباع جدول (۱)

رفرنس RH	OBS	ERR
LiCL	29.16	4,99
MgCL	33,79	1,01
NaCl	74,50	-0,79
KCl	82,15	-2,19
REMES	2,799	

رابطه‌ای که در این محاسبه استفاده شده به شکل زیر است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^n (O_i - I_i)^2}{n}}$$

O همان مقدار خوانده شده از سنسور و I مقدار ایده آل یا همان مقدار استاندارد است [۲].

۲-۱- روش‌های واسنجی کردن حسگر

برای واسنجی کردن یک سنسور لازم است تا در ابتدا تابعی که مقادیر مورد انتظار رابه مقادیر مشاهده شده مربوط می‌سازد، به صورت ریاضی تعیین شود. برای این کار می‌توان از یک روش رگرسیون خطی استفاده کرد. کلمه "خطی" که در این کار می‌توان از یک روش رگرسیون خطی استفاده کرد. کلمه "خطی" که در نام رگرسیون وجود دارد به معنی تابع خطی نیست، بلکه این کلمه به ترکیب خطی متغیرها اشاره می‌کند. تابع مربوط نتیجه‌گیری می‌تواند خطی بوده یا به شکل متغیرها اشاره می‌کند. تابع مربوط نتیجه‌گیری می‌تواند خطی بوده یا به شکل منحنی باشد. هر سه تابعی که در زیر بیان شده رگرسیون خطی هستند

- $Y = a x + b$ (درجه اول، خطی)
- $Y = a x2 + b x + c$ (درجه دوم، مربعی)
- $Y = a x3 + b x2 + c x + d$ (درجه سوم، مکعبی)

در اینجا چون از ٤ نوع نمک داریم از معادله درجه سه استفاده می‌کنیم. روش حداقل مربعات معمولا برای رگرسیون خطی استفاده می‌کند. در این روش، پیدا کردن خطی مطلوب است که مجموع فاصله از هر پایه تا خط کمترین مقدار باشد. برنامه‌های زیادی وجود دارد که از روش حداقل مربعات برای انجام رگریسون خطی استفاده می‌کند. می‌توان برای این کار از برنامه اکسل نیز استفاده کرد در اینجا چند جم جمله‌ای مکعبی (معادله $Y = AX^3 + BX^2 + CX + D$ که در آن Y مقدار واسنجی شده و X مقدار خوانده شده از حسگر رطوبت است) انتخاب شده و محدود شده است که در آن داریم:

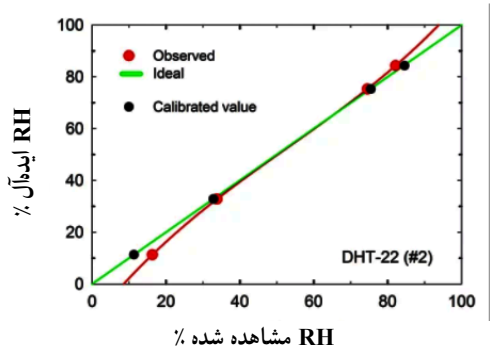
a = 0.000091367 b = -0.01452993,

c = 1.77623089 d = -14.17403758

جدول۳: ضرایب تصحیح چندجمله‌ای درجه ۳

	درجه یک		درجه دو		درجه سه		
Ref RH	OBS	ERR	Correct-ed	ERR	Corrected	ERR	
11.30	20.79	9.49	11.36	0.06	11.30	0.00	
32.78	40.77	7.99	32.83	0.05	32.78	0.00	
75.29	83.83	8.54	75.85	0.55	75.29	0.00	
84.34	93.43	9.09	84.83	0.49	84.34	0.00	
		0.562146		0.371478		0.00212	

مرحله نهایی اصلاح مقادیر نتایج حاصل از حسگر رطوبت با استفاده از چندجمله‌ای برای محاسبه مقادیر واسنجی شده است. در این بخش روشی برای ارزیابی و بررسی دقت حسگر رطوبت بیان شد.



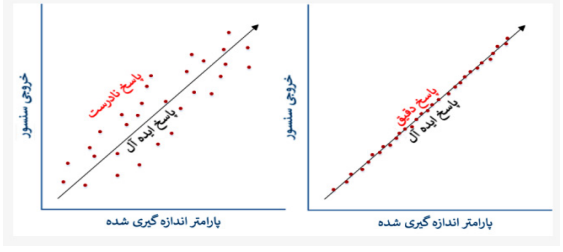
شکل۲: نمودار تصحیح ضرایب چندجمله‌ای درجه ۳ جهت واسنجی حسگر رطوبت

۳- واسنجی حسگر دما

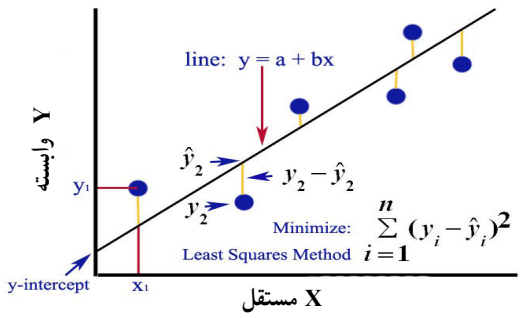
حسگرهای دمایی باید مثل هر وسیله مورد استفاده دیگری، به روشی منظم و با دقت بالا بررسی شوند. واسنجی تجهیزات برای این وسایل باید دست کم یک بار در سال انجام شود. مراحل واسنجی به شرح زیر است:

- قدم ۱: محفظه‌ای را پر از آب کنید و مقداری یخ به آن بیفزایید تا دما را به مقدار کم‌تر از نمونه برای اندازه‌گیری برسانید.
- قدم ۲: ابزار را همراه با ابزار دیگری که منطبق با استانداردهای NIST (موسسه ملی فناوری و استانداردها) است درون آب قرار دهید.
- قدم ۳: وقتی اعداد روی هردو ثابت شد، اندازه‌ها را با هم مقایسه کنید.

این فرایند را با آبی که گرم شده و به دمایی بالاتر از نمونه برای اندازه‌گیری رسیده است تکرار کنید. اگر اندازه‌ها بیشتر از بیشینه مجاز با هم تفاوت دارند، ابزار نیازمند واسنجی است (شکل ۳) [۸].



شکل۳: نمودار خروجی حسگر بر حسب پارامتر اندازه‌گیری شده در دو حالت «پاسخ دقیق» و «پاسخ نادرست»



شکل٤: نمودار واسنجی سنسور دما با استفاده از رابطه خطی y=ax+b

طبق نمودار شکل ٤ و رابطه ۲، مقادیر x اندازه‌گیری شده و مقادیر صحیح y در جدولی یادداشت می‌شوند. سپس توسط رابطه‌های ٤ و ٥ مقادیر a و b محاسبه می‌گردند. برای محاسبه بیشینه خطا نیز از رابطه ۳ می‌توان استفاده کرد.

$$y_i = a + b\,x_i \qquad (2)$$

$$\min \sum e_i^2 = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \qquad (3)$$

$$a = \frac{n\sum_1^n x_i y_i - \sum_1^n x_i \sum_1^n y_i}{n\sum_1^n x_i^2 - (\sum_1^n x_i)^2} \qquad (4)$$

$$b = \frac{\sum_1^n y_i - \sum_1^n x_i}{n} \qquad (5)$$

٤- واسنجی حسگر شتاب MEMS-IMU[10]

حسگرهای شتاب MEMS تجهیزات ارزان قیمتی هستند که نسبت به حسگرهای مکانیکی دارای اندازه های بسیار کوچک‌تری هستند. در کنار مزایای بسیار آن‌ها نظیر وزن کم، مصرف کم‌توان و قیمت پایین آن‌ها، خروجی آن‌ها عمدتا دارای خطای زیادی است و در عین حال خطای سیستماتیک که به دلیل نقایص ساخت در آن‌ها ایجاد می‌شود، به خروجی اضافه می‌گردد.

٤-١- روش‌های اصلی واسنجی سنسور شتاب MEMS

- روش شش موقعیت استاتیک[11]
- روش واسنجی چند موقعیتی[12]
- روش کمترین مربعات بازگشتی[13]

[10]
[11] SPS
[12] MP
[13] RLS

در این مقاله خروجی یک نمونه حسگر شتاب‌سنج سه محوره مورد بررسی قرار گرفته و به وسیله روش واسنجی چند موقعیتی واسنجی شده (دقیق‌ترین روش) و در پایان نتیجه واسنجی به طور کامل آورده شده است. این روش واسنجی از این واقعیت استفاده می‌کند، که صرف نظر از جهت واحد اندازه‌گیری اینرسی، برآیند مقادیر مشاهده شده توسط شتابسنج و ژیروسکوپ در حالت ساکن به ترتیب برابر با گرانش و سرعت چرخش زمین می‌باشد. بنابراین معادلات (٦) و (٧) در صورت نبود هیچ خطای برابر با مقدار صفر خواهند بود.

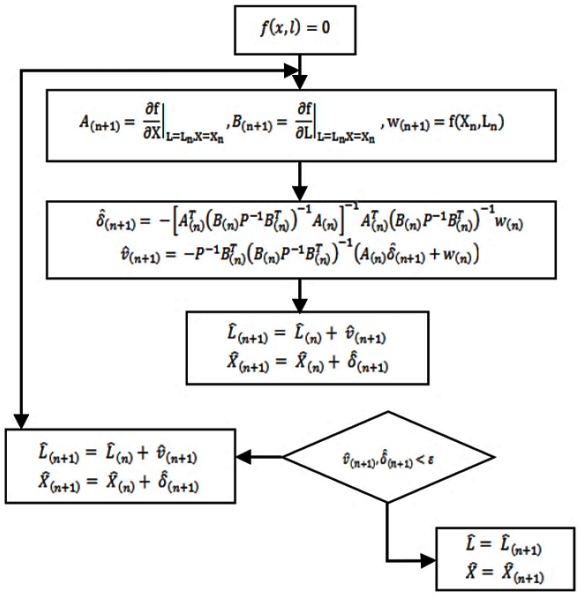
$$f_g = \sqrt{g_x^2 + g_y^2 + g_z^2} - g \qquad (6)$$

$$f_\omega = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2} - \omega_{ie} \qquad (7)$$

مقادیر g و ω_{ie} مقادیر واقعی جاذبه محلی زمین و سرعت زاویه‌ای دوران زمین می‌باشند. مقدار جاذبه محلی زمین با استفاده از عرض جغرافیایی و ارتفاع از سطح مبنا، محل اندازه‌گیری مشاهدات بدست می‌آید. با توجه به وجود خطاهایی بایاس، فاکتور مقیاس و عدم تعامد بین محورها و یا به عبارت دیگر مدل ریاضی بین مقادیر واقعی مشاهدات و مقدار مشاهده شده، می‌توان مقادیر هر یک از محورهای شتاب‌سنج و ژیروسکوپ در معادلات بالا را با استفاده از معادله ماتریسی ٨ بر پایه مقادیر مشاهده شده توسط سیستم اینرسی نوشت.

$$\begin{bmatrix} l_{ax} \\ l_{ay} \\ l_{az} \end{bmatrix} = \overbrace{\begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 \\ M_{yx} & S_Y & 0 \\ M_{zx} & M_{zy} & S_Z \end{bmatrix}}^{M} \times \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix}$$

حال با مشخص شدن مدل ریاضی و به که دلیل این مدل ریاضی از مدل f (x.l)=٠ تابعیت می‌کند. در این معادله x نشان دهنده مجهولات (پارامترهای کالیبراسیون) و l مشاهدات خروجی سنجیده می‌باشد. می‌توان با استفاده از سرشکنی ترکیبی و خطی‌سازی معادله بر پایه مجهولات و مشاهدات پارامترهای کالیبراسیون را بدست آورد (شکل ٥) [١٢، ١٣].



شکل٥: فلوچارت محاسبه مقادیر کالیبراسیون شتاب سنج

٥- واسنجی فلومتر (دبی متر)

واسنجی کردن دبی برای هر سیستم اندازه‌گیری که اطلاعات مربوط به مقدار دبی جا به جا شده را مهیا می‌سازد، لازم و ضروری است. این اندازه‌گیری‌ها به دو صورت جرم در واحد زمان و حجم در واحد زمان است. در هر دو نوع از اندازه‌گیری نیاز به دانستن چگالی مواد عبوری ضروری می‌باشد. فاکتورهای اصیل تاثیرگذار در چگالی شامل فشار و دماست و این فاکتورها در کالیبره کردن ابزار دقیق فلومتر مورد توجه قرار می‌گیرد.

تجهیزات لازم برای کالیبره کردن می‌تواند حجیم و گران باشد. امکانات مربوط به واسنجی دبی اب در آزمایشگاهای بین‌المللی شامل تانک ذخیره آب به حجم ٢٢٠ متر مکعب، ٤ پمپ با توان ١٠٠ تا ١٥٠ اسب بخار وزنی برابر با ترازوهایی تا محدوده ٢٠٠٠٠ کیلوگرم ١٠ تا ١٥ متر، لوله با قطرهای ١ تا ١٦ اینچ است. تانک ذخیره‌سازی به تنهایی می‌تواند ٢٥ متر طول، ٣ متر عمق و ٣ متر عرض داشته باشد [١٤].

در واسنجی ٥ نقطه‌ای از این مخزن استفاده می‌شود و نیاز به صرف زمان ٤ هفته‌ای می‌باشد. این فاکتورها به معنی آن است که اغلب ازمایشگاهای تست و واحدهای صنعتی نمی‌توانند از امکانات واسنجی در داخل سازمان خود بهره ببرند و معمولا کم‌ترین تمایل برای واسنجی کردن دبی سنج‌ها در سیستم‌های کنترلی وجود دارد.

بسیاری از دبی سنج‌ها بر پایه داشتن المان اولیه با ساین و شکل مناسب

برای تولید سیگنالی متناسب با دبی هستند. این تجهیزات شامل صفحات روزنه‌دار، ونتوری‌ها، مجرای دبی، دبی سنج‌های گردابی و توربینی هستند. ابعاد فیزیکی این المان‌ها تغیر نمی‌کند مگر اینکه سیال در حال عبور باعث ساییدگی شده یا در حین نصب این المان خراب شود برای واسنجی کردن تعداد زیادی دبی سنج یا در صنایع تولید این دبی سنج تمهیداتی وجود دارد. این تمهیدات شامل موارد زیر می‌باشد:

- Prover برای گازها و مایعات
- تمهیدات واسنجی دبی به صورت وزنی
- کالیبراتیورهای گازی PVTt
- کالیبراتورهای مرجع دبی

۵-۱- PROVERS

کالیبراتورهای این نوع برای کاربردهای گاز و مایع به کار می‌رود. PROVER مایع تحت عنوان PROVER پیستونی یا کالیبراتور دبی جابه‌جایی مشخص نیز شناخته می‌شوند. Prover گاز نیز به عنوان BELL PROVER شناخته می‌شود. این کالیبراتورها براساس انتقال حجم شخصی از سیال جاری از دبی سنج در زمان اندازه‌گیری شده کار می‌کنند.

بنابراین هرپالس می‌تواند نشان دهنده تغیر کوچک در حجم مایعی باشد که به سمت دبی سنج در حال واسنجی شدن ارسال می‌شود. دانستن زمان بین این پالس‌ها اندازه‌گیری دبی حجمی را به دست می‌آورد.

۵-۲- تانک توزین

این کالیبراتور دبی تانکی روی ترازو است که زمان پرشدن آن به کمک یک کورنومتر اندازه‌گیری می‌شود. در عمل کورنومتر به سیستم حسگرهای زمان‌سنج با ساعت کریستالی تبدیل می‌شود. طرح کالیبراتور طوری است که از ثابت بودن دبی در دوره زمانی اندازه‌گیری اطمینان حاصل شود و شرایط دما و فشار نگه‌داری شده اندازه‌گیری می‌شود. سیستم دریافت اطلاعات کل سیستم را کنترل کرده و پارامترهای تست را اندازه‌گیری می‌کند. سیستم واسنجی از تانک‌های بزرگ ذخیره‌سازی پمپ شیرهای انحرافی صافی‌های دبی و لوله‌کشی مستقیم و بلند با قطرهای مختلف بهره می‌برند. شیرهای منحرف کننده برای منحرف کردن مسیر دبی نرمال به تانک ذخیره‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مسیر دبی پس از طی زمان مشخص باید پس از جمع شدن مقدار مشخصی از سیال داخل تانک وزن تعویض می‌گردد [۱۵].

۵-۳- تجهیزات واسنجی PVTt

تمهیدات فشار حجم دما و زمان برای واسنجی کردن دبی سنج‌های گاز عموما در محدوده‌های ۱ تا ۲۰۰۰ لیتر در دقیقه به کار می‌رود. این نوع واسنجی به عنوان سیستم واسنجی استاتیک حجمی دبی شناخته می‌شود زیرا این روش زمان لازم برای پرشدن تانکی با حجم معین را مشخص می‌کند. گاز ورودی از طریق کمپرسور یا سیلندر پر فشار گاز تامین می‌شود. این گاز از دبی سنج در حال واسنجی شدن عبور کرده سپس از ونتوری دبی می‌گذرد و قبل از تست از شیر کنارگذر عبور می‌کند. ونتوری دبی برای ایزوله کردن دبی سنج از تغییرات فشار پایین دست ناشی از کارکردن شیرها یا پر و خالی شدن تانک به کار می‌رود. تانک با کمک پمپ‌های خلا تخلیه شده و سپس شیر تخلیه بسته می‌شود. چندین اندازه‌گیری فشار و دما برای محاسبه چگالی اولیه محتویات تانک صورت می‌پذیرد. جرم اولیه محتویات تانک از طریق دانستن حجم دقیق سیلندر و مقدار چگالی گاز داخل آن محاسبه می‌گردد. سپس گاز از طریق بستن شیر تانک به درون آن فرستاده شده، زمان‌سنج شروع به کار کرده و دبی‌سنج گاز به درون تانک وارد می‌گردد تا به فشار مشخصی برسد. در این هنگام وضعیت شیرها بر عکس شده و زمان سنج‌ها می‌ایستد. اندازه‌گیری دما و فشار دوباره صورت می‌پذیرد تا چگالی نهایی محتویات تانک محاسبه شود. جرم نهایی بدست آمده را از جرم اولیه کم کرده و با دانستن مدت زمان افزایش این جرم دبی جرمی بدست می‌آید. در پایان نیز دبی جرمی را با دبی نشان داده شده از دبی سنج مقایسه می‌کند.

۵-۴- حسگر دبی مرجع

مبدل‌های مرجع دبی برای واسنجی کردن ابزار دقیق‌های سنجش سطح به کار می‌رود. در این روش از مبدل مرجع و سطح سنج در حال کار استفاده می‌شود یا با نصب مبدل مرجع به صورت سری با ابزار دقیق در حال کار در لوله کشی موجود در فیلد واسنجی کردن صورت می‌پذیرد. در حقیقت برای هر دو حسگر نیاز به لوله‌کشی بلندی است که در عمل کار را مشکل می‌سازد مگر اینکه از پیش چنین تدبیری اندیشده شده باشد. حسگرهای مرجع دبی معمولا از نوع ونتوری نازلی جا به جایی مشخص و توربینی هستند. در ابتدا این حسگرها در ازمایشگاه واسنجی می‌شوند [۱۵].

[۱۴] Loadcell

٦- واسنجی حسگر وزن

در این مقاله به بررسی یکی از شیوه‌های واسنجی لودسل یا همان حسگر وزن می‌پردازیم. در این روش با موازی کردن یک مقاومت با لودسل می‌توانید وزن را شبیه‌سازی کنید که در ادامه توضیح داده می‌شود. استرین گیج[15] (ترنسمیتر وزن) یک المان الکتریکی است. برای واسنجی کردن سیستم لودسل یا همان حسگر وزن روش ساده و موثر، هم با وجود نیروی واقعی اعمال شده و هم با نبود نیروی واقعی اعمال شده، وجود دارد. عدم توازن الکتریکی در مدار پل استرین گیج لودسل می‌تواند عدم توازن ناشی از به کار بردن نیروی واقعی بر لودسل را شبیه‌سازی کند. در این صورت گین سیستم به نحوی تنظیم می‌شود که نمایشگر Localcell مقادیر مشخصی از نیروی سیگنال خروجی سیستم را نشان دهد (شکل ٦).

شکل٦: تنظیمات آزمایشگاهی واسنجی یک لودسل

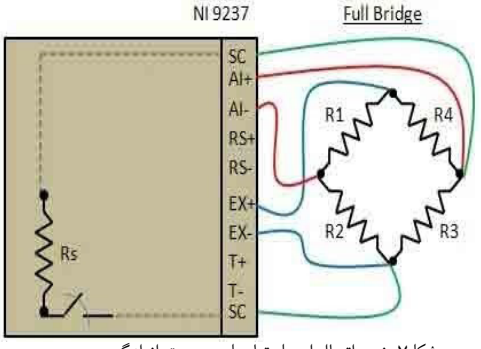
جهت انجام واسنجی موازی، از سازوکار زیر استفاده می‌گردد:

•تمام نیروهای وارد بر Laodcell را حذف یا تثبیت نمایید.

• صفر نمایشگر یا ترانسمیتر را به گونه‌ای تنظیم کنید که دقیقا مقدار صفر را نمایش دهد

• مقاومت واسنجی موازی را به پایانه‌های معین شده در استاندارد واسنجی متصل کرده و گین یا ظرفیت را تا جایی تنظیم کنید که نمایشگر مقدار نیروی تعیین شده در استاندارد Laodcell را نمایش دهد (شکل ٧).

• مراحل فوق را تا رسیدن به واسنجی قابل اطمینان تکرار نمایید.



شکل٧: نحوه اتصال لودسل تمام پل به سیستم اندازه‌گیری مرجع

٦-١- واسنجی کردن ماژول لودسل از طریق نرم‌افزار

فرض کنید لودسلی داریم که می‌خواهیم آن را در وزن‌های استاندارد که بر روی صفحه فلزی لودسل قرار دارد و از روی صفحه HMI، واسنجی کنیم. مقداری که حسگر لودسل اندازه‌گیری می‌کند مقدار واقعی وزنه بعلاوه وزن صفحه فلزی که بر روی حسگر لودسل قرار دارد. این موارد به علاوه خطای اندازه‌گیری باعث می‌شود که مقداری که از حسگر لودسل می‌خوانیم مقدار واقعی وزنه نباشد. بنابراین الزام است ابتدا حسگر لودسل را با استفاده ازدستورات PLC وHMI واسنجی کنیم. در این مثال الگوریتم زیر را در HMI به این کار اختصاص داده‌ایم:

روش انجام این مثال به این صورت است که ابتدا وزنه اول را (که معموال نقطه صفر هست) را انتخاب می‌کنیم و اگر این وزن برابر صفر بود (وزنه‌ای روی صفحه حسگر لودسل نبود) توسط HMI به رجیستر DO عدد صفر را نسبت می‌دهیم و دکمه تایید واسنجی حد پایین را به صورت لحظه‌ای فشار می‌دهیم. سپس یک وزنه استاندارد را بر روی صفحه قرار می‌دهیم (مثال ٣٦ کیلوئی) و توسط HMI وزن آن وزنه را به رجیستر مربوطه D10 وارد می‌کنیم و دکمه تایید واسنجی حد بالا را به صورت لحظه‌ای می‌زنیم [١٦].

٧- واسنجی حسگر ولتاژ

برای آزمون و واسنجی مولتی مترهای دیجیتالی لازم است واسنجی کننده از وظایف و مشخصات فنی مولتی متر آگاه باشد. در حقیقت مشخصات فنی مولتی‌متر، توصیفس از عملکرد مدارات داخلی مورد نیاز است تا با وجود آن‌ها بتوان به وظایف خواسته شده برای مولتی‌متر دست پیدا کرد.

کارکرد مولتی‌متر بدین صورت انجام می‌شود که ابتدا سیگنال‌های آن‌ها بصورت ولتاژ مستقیم در آمده و سپس با استفاده از مدار ولتاژ مستقیم و مبدل آنالوگ به دیجیتال آن اندازه‌گیری کمیت‌ها انجام می‌گیرد. روشی که غالباً برای انجام تبدیل سیگنال‌های آنالوگ به دیجیتال استفاده می‌شود تکنیکی است به نام انتگرال‌گیری دو شیبه[16] در این روش، سیگنال ورودی برای یک فاصله زمانی ثابت به یک انتگرال‌گیر اعمال می‌شود و سپس خازن انتگرال‌گیر تخلیه می‌گردد و زمان تخلیه اندازه‌گیری می‌شود.

مشخصه ترکیبی مولتی متر که بصورت:

[15] Strain Gauge

[16] Dual Slope Integration

$$\pm[\ A\%\ rdg + B\%\ F.S + C\ \mu V\ ] \qquad (9)$$

بیان می‌شود بدست خواهد آمد. (A و B و C اعداد ثابت، rdg مخفف مقدار خوانده شده (Reading) و F.S مخفف حداکثر مقدار گستره اندازه‌گیری (Full Scale)است. به منظور تصدیق عملکرد مولتی‌متر در اندازه‌گیری ولتاژ مستقیم، بهتر است اثرات فوق بصورت مستقل از یکدیگر ارزیابی شوند و عدم قطعیت استاندارد هر یک از عوامل مشخص شوند و سپس بایکدیگر ترکیب شوند (عدم قطعیت استاندارد ترکیبی). بنابراین در فرآیند تصدیق و یا واسنجی آن لازم است ابتدا میزان خطی بودن DC بیان می‌شود بدست خواهد آمد. (A و B و C اعداد ثابت، rdg مخفف مقدار خوانده شده (Reading) و F.S مخفف حداکثر مقدار گستره اندازه‌گیری (Full Scale)است. به منظور تصدیق عملکرد مولتی‌متر در اندازه‌گیری ولتاژ مستقیم، بهتر است اثرات فوق بصورت مستقل از یکدیگر ارزیابی شوند و عدم قطعیت استاندارد هر یک از عوامل مشخص شوند و سپس بایکدیگر ترکیب شوند (عدم قطعیت استاندارد ترکیبی). بنابراین در فرآیند تصدیق و یا واسنجی آن لازم است ابتدا میزان خطی بودن DC را بر روی محدوده پایه DC میزان تقویت مدار تقویت کننده مستقیم در آن برابر یک [۱] است، مورد ارزیابی و در صورت نیاز تنظیم کرد تا حداکثر پاسخ خطی در محدوده پایه بدست بیاید. بدیهی این تنظیم تأثیر بسزائی روی عملکرد مولتی‌متر در سایر محدوده‌های اندازه‌گیری دارد. سایر مدوده‌های اندازه‌گیری ولتاژ مستقیم (غیر از محدوده پایه) دارای ضریب تقویت یا تضعیف غیر از یك [۱] می‌باشند.

اولین وظیفه و محدوده‌ای که بایستی مورد ارزیابی، واسنجی و در صورت نیاز تنظیم قرار گیرد، همان «محدوده اصلی» (محدوده پایه) که در آن ولتاژ ورودی نه تضعیف و نه تقویت می‌شود، می‌باشد. علت آن نیز اینست که خطاها و عدم قطعیت این محدوده، نه تنها به محدوده ولتاژ مستقیم بلکه به سایر محدوده‌های اندازه‌گیری مولتی‌متر منتقل می‌شود. معمولاً برای واسنجی تمامی محدوده‌های ولتاژ مستقیم لازم است آن را در هر دو پلارتیه مثبت و منفی واسنجی نمود که «محدوده اصلی» نیز از این امر مستثنی نیست. پس از واسنجی «محدوده اصلی»، جریان واسنجی و یا تنظیم به محدوده‌های پائین‌تر از محدوده اصلی و بعد از آن به محدوده‌های بالاتر از محدوده اصلی ادامه پیدا می‌کند. بطور مثال اگر محدوده اصلی ۱۰ ولت باشد، پس از واسنجی آن محدوده‌های پائین‌تر یعنی ۱ ولت و ۱۰۰ میلی ولت بایستی واسنجی شوند و بعد از آن محدوده‌های بالاتر یعنی ۱۰۰ ولت و ۱ کیلو ولت واسنجی می‌شوند. علت اینکه محدوده‌های بالاتر پس از محدوده‌های پائین‌تر بایستی واسنجی شوند اینست که در این محدوده‌ها به دلیل ولتاژهای بالای تولید و اندازه‌گیری شده به ترتیب توسط منبع ولتاژ (کالیبراتور) و مولتی‌متر، تلفات توان زیاد است و می‌تواند بر روی فرآیند بعدی واسنجی تاثیر بگذارد [۱۷].

در فرآیند واسنجی ولتاژ مستقیم، در هر محدوده لازمست ابتدا صفر ولت (zero) و سپس حداکثر مقدار اسمی گستره اندازه‌گیری در پلاریته مثبت و پس از آن در پلاریته منفی تنظیم و واسنجی شوند (Gain). فقط برای «محدوده اصلی» لازم است میزان خطی بودن مولتی‌متر نیز پس از تنظیمات صفر و حداکثر مقدار اسمی ارزیابی شود.

اما معمولاً ترجیح داده می‌شود بجای انجام تنظیم و یا واسنجی در صفر و حداکثر مقدار اسمی هر محدوده، تنظیم و یا واسنجی بترتیب در ۱۰ ٪ و ۹۰٪ حداکثر مقدار اسمی همان محدوده انجام گیرد تا هنگام تنظیم یا واسنجی، مشکل عوض شدن اتوماتیک محدوده که در اکثر مولتی‌مترهای دیجیتالی وجود دارد و یا نمایش بیش از محدوده که بصورت OL[۱۷] برروی نمایشگر مولتی متر ظاهر می‌شود پیش نیاید.

برای درک بهتر مطلب، ترتیب تنظیم و یا واسنجی براي یک مولتی‌متر دیجیتالی با محدوده اصلی ۱۰ ولت و محدوده‌های وابسته ۱۰۰ میلی ولت، ۱ ولت بشرح زیر می‌تواند باشد:

- **10 V Range (Prime DC Range)**

  Zero, +10V Gain , -10 V Gain*, Linearity

- **1 V Range**

  Zero, + 1 V Gain, - 1 V Gain*

- **100 mV Range**

  Zero, + 100 mV Gain, -100 mV Gain*

تحلیل دقیق نتایج حاصل از واسنجی، می‌تواند نکات بیشتری از عملکرد تجهیزات را آشکار کند. بطور مثال چون هرگونه خطا و تغییراتی در محدوده ۱۰ولت، به سایر محدوده‌های وابسته نیز سرایت می‌کند، بنابراین اگر محدوده ۱۰ ولت افزایشی بمیزان ۵ + mpp و محدوده ۱۰۰ ولت هیچ خطائی را نشان ندهد، معنای آن اینست که محدوده ۱۰۰ ولت بطور واقعی حدود ۵- ۵ppm خطا داشته است، اما بواسطه خطای محدوده ۱۰ ولت جبران شده است اینگونه تحلیل‌ها زمانی که نتایج با مشخصات فنی هر محدوده تطابق نداشته

[۱۷] Over Load

باشد بسیار مفید خواهد بود و ما را به تنظیمات و یا تعمیرات مورد نیاز نزدیک می‌کند.

۸- واسنجی استرین گیج

استرین گیج[۱۸] یا کرنش سنج یک سنسور الکترونیکی است که برای اندازه‌گیری کرنش یا تغییرات نسبی طول یک جسم به کار گرفته می‌شود. تغییرات طول نسبی یک جسم برابر است با حاصل تقسیم طول فعلی جسم به طول اولیه آن به فرض مثال اگر یک میله فلزی یک متری تحت کشش ۱ میلی‌متر بر متر افزایش طول دهد، کرنش این میله برابر ۱ میلی‌متر بر متر (۱mm/m) خواهد بود.

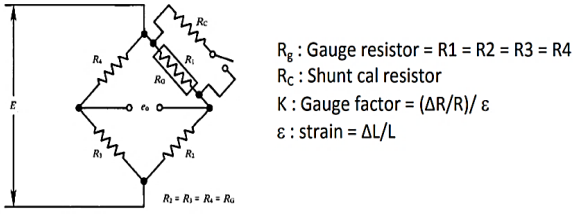
رایج‌ترین نوع استرین گیج در حال حاضر دارای یک الگوی فلزی پیچاپیچ بر روی یک قطعه عایق انعطاف‌پذیر است، میزان مقاومت رسانای به کار رفته در این حسگر با تغییرات طول آن به صورت خطی تغییر می‌کند و علت اینکه از یک الگوی پیچاپیچ برای این رسانا استفاده می‌شود اینست که کوچک‌ترین میزان تغییرات طول حسگر، بیشترین تاثیر را بر روی مقاومت حسگر داشته باشد و به عبارتی بتوان کمترین میزان کرنش را نیز اندازه‌گیری نمود.

شکل۸: تغییرات استرین گیجدر برابر کشیدگی و فشردگی: الف) حالت عادی، ب) حالت کشیدگی (در این حالت طول رسانا زیاد و پهنای آن کم می‌شود در نتیجه مقاومت افزایش می‌یابد) و ج) حالت فشردگی (در این حالت طول رسانا کم و پهنای آن زیاد می‌شود در نتیجه مقاومت کاهش می‌یابد)

وقتی بر جسمی نیرو وارد می‌گردد استرس و استرین ایجاد می‌شود. استرس معرف مقاومت درونی جسم در مقابل نیرو است و استرین در حقیقت بیانگر جابجائی و تغییر شکل جسم می‌باشد. استرین گیج یا کرنش سنج در واقع برای اندازه‌گیری کرنش و تغییرات فیزیکی ناشی از اعمال فشار بر جسم طراحی گردیده است و معمولا استرین گیج‌ها را از سیم‌هایی با جنس مس نیکل می‌سازند و به شکل رفت و برگشت روی پلاستیک‌های مقاومی می‌چسبانند. ابعاد استرین گیج‌ها از چند میلی مترمربع تا چند سانتی مترمربع است و دارای مقاوتی از چند ده تا چند هزار اهم می‌باشند. استرین گیج‌ها در اندازه‌گیری فشار، وزن در لودسل، گشتاور در ترکمتر، و همچنین حسگرهای موقعیت به وفور مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای اندازه‌گیری تغییرات مقاومتی حسگر استرین گیج از پل وتسون استفاده می‌گردد. از خاصیت تغییر مقاومت الکتریکی فلز با افزایش و یا کاهش طول آن استفاده می‌کند و لذا با تغییر کرنش جسم و تغییر طول استرین گیج متصل به آن مقاومت استرین گیج تغییر می‌کند.

$$R = \rho \frac{L}{A} \qquad (10)$$

در مبحث واسنجی موازی مشخصه Shunt-to-load Correalation تعریف می‌شود که اختلاف دو قرائت خروجی است به طوری که یکی از شبیه‌سازی الکترونیکی و دیگری از اعمال بار فیزیکی گرفته شود. واسنجی موازی عمومی‌ترین روش سریع واسنجی است. معمولا یک مقاومت دقیق معین به یک بازوی پل وتسون مبدل وصل می‌شود که مانند شبیه‌ساز اعمال محرک فیزیکی به مبدل می‌باشد.



شکل۹: کالیبراسیون استرین گیج با مقاومت موازی

$$\Delta R = \frac{R_1 R_C}{R_1 + R_C} - R_1 \qquad (11)$$

$$\frac{\Delta R}{R_1} = \frac{-R_1}{R_1 + R_c} \qquad (12)$$

$$R_2 = R_3 = R_4 = R_g \qquad (13)$$

در واسنجی استرین گیج نیاز است کرنش[۱۹] شبیه‌سازی شده، یعنی زمانی که مقاومت R_C به استرین گیج موازی می شود، محاسبه گردد و به همین وسیله آن سامانه نمایشگر کرنش‌سنج واسنجی شود. با توجه به تعاریف K و ε مقدار کرنش برای تنظیم سامانه پس از وصل مقاومت R_C، برحسب پارامتر های K و Rg که در جزوات فنی مشخص هستند، به دست می‌آید [۱۸].

$$\varepsilon = \frac{R_g}{(R_g + R_c), K} \qquad (14)$$

[۱۹] Strain

۹- واسنجی شتاب سنج پیزو الکتریک[۲۰]

عملکرد شتاب‌سنج‌های پیزو بر اساس اثر پیزوالکترونیک کریستال‌های کوارتز یا سرامیک بوده که در آن متناسب با شتاب اعمال شده به کریستال، جریان الکتریکی توسط کریستال تولید می‌گردد. اثر پیزوالکترونیک موجب جمع شدن شارژ بارهای مخالف در کریستال می‌گردد.

وقتی بر جسمی نیرو وارد می‌گردد استرس و استرین ایجاد می‌شود. استرس معرف مقاومت درونی جسم در مقابل نیرو است و استرین در حقیقت بیانگر جابجائی و تغییر شکل جسم می‌باشد. استرین گیج یا کرنش‌سنج در واقع برای اندازه‌گیری کرنش و تغییرات فیزیکی ناشی از اعمال فشار بر جسم طراحی گردیده است و معمولا استرین گیج‌ها را از سیم‌هایی با جنس مس نیکل می‌سازند و به شکل رفت و برگشت روی پلاستیک‌های مقاومی می‌چسبانند. ابعاد استرین گیج‌ها از چند میلی مترمربع تا چند سانتی مترمربع است و دارای مقاوتی از چند ده تا چند هزار اهم می‌باشند. استرین گیج‌ها در اندازه‌گیری فشار، وزن در لودسل، گشتاور در ترکمتر، و همچنین سنسورهای موقعیت به وفور مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای اندازه‌گیری تغییرات مقاومتی سنسور استرین گیج از پل وتسون استفاده می‌گردد از خاصیت تغییر مقاومت الکتریکی فلز با افزایش و یا کاهش طول آن استفاده می‌کند و لذا با تغییر کرنش جسم و تغییر طول استرین گیج متصل به آن مقاومت استرین گیج تغییر می‌کند.

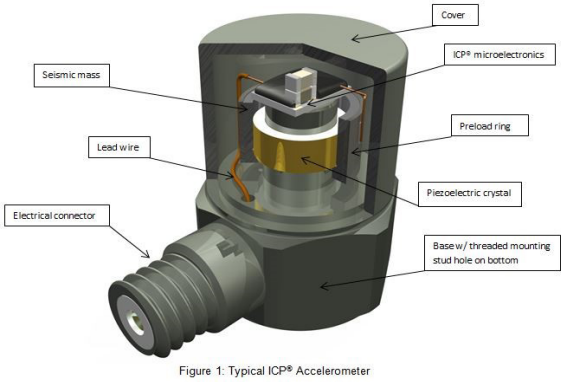


Figure 1: Typical ICP® Accelerometer

شکل۱۰: نمونه یک سنسور شتاب پیزو با استاندارد خروجی IEPE

با توجه به کاربرد وسیع سنسورهای شتاب برای ارتعاش سنجی و گاها مکان‌یابی و تعیین موقعیت، با توجه به کاهش دقت این سنسور به دلیل وجود برخی خطاها، در این مقاله به کالیبراسیون سنسور شتاب پیزو پرداخته می‌شود. کالیبراسیون این نوع سنسورها به دلیل استاندارد تبادل سیگنال IEPE که از نوع جریانی است اهمیت ویژه ای پیدا می‌کند چونکه دیتالاگرهای قابل اتصال به این نوع سنسورها ممکن است در قرائت ولتاژ خروجی دچار خطا گردند.

به دلیل این که روش‌های کالیبراسیون سنتی بسیار زمان بر و پرهزینه بوده و نیاز به تجهیزات دقیق آزمایشگاهی دارد، روش‌های کالیبراسیون میدانی پیشنهاد می‌شوند که سریع، آسان و ارزان بوده و به تجهیزات دقیق آزمایشگاهی نیاز ندارد. در این روش‌ها با استفاده از اندازه بردار جاذبه در حالت ایستا تابع هزینه‌ای بدست می‌آید و آن را بهینه کرده تا ضرایب کالیبراسیون شامل بایاس و ضریب مقیاس که دو عامل مهم خطا در مدل شتاب‌سنج هستند بدست آیند. سپس شتاب‌سنج در نرم‌افزار MATLAB مدل شده و روش‌های میدانی برای کالیبراسیون آن به کار می‌رود و آن‌ها از چهار منظر دقت، سرعت، میزان اثر پذیری از تغییرات نویز و میزان اثر پذیری از تغییرات شرایط اولیه بررسی می‌شوند. سریع‌ترین و آسان‌ترین روش، حداقل مربعات است ولی دقت همه روش‌ها در بدست آوردن پارامترهای مجهول تقریبا یکسان است. از منظر اثرپذیری نویز چهار روش لونبرگ مارکارد، نیوتن، شبه نیوتن و حداقل مربعات و از جهت تاثیر شرایط اولیه بعد از روش حداقل مربعات به دلیل عدم وابسته بودن به شرایط اولیه، روش الگوریتم بهینه‌سازی براساس الگوریتم شبه نیوتن و لونبرگ مارکارد بهترین عملکرد را دارند [۱۹].

برای سنسورهای شتابی که پهنای باند آنها مقدار DC را در بر نمی گیرد، به تولید کننده‌های فرکانس (شیکر) برای کالیبراسیون سنسور شتاب پیزو و موازی‌سازی سنسور با یک سنسور کالیبره شده نیاز می‌باشد.

۱۰- نتیجه گیری

واسنجی یا کالیبراسیون عبارت است از مقایسه یک دستگاه اندازه‌گیری با یک استاندارد و تعیین میزان خطای این وسیله نسبت به آن و در صورت لزوم تنظیم دستگاه در مقایسه با استانداردهای مربوطه، به زبان ساده واسنجی اندازه‌گیری و صحت وسیله اندازه‌گیری در مطابقت با مرجع تایین شده می‌باشد. در این مقاله ضمن بررسی اهمیت واسنجی حسگرها در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی و صنایع مختلف، به بررسی اجمالی واسنجی حسگرهای پرکاربرد آزمایشگاهی شامل حسگرهای دما، رطوبت، شتاب MEMS، شتاب پیزو الکتریک، حسگر وزن، فلومتر، حسگر ولتاژ ، استرین گیج و لودسل و نکات فنی واسنجی آن‌ها

[۲۰] Piezoelectric Accelerometers

پرداخته شد. به طور کلی عمده‌ترین و پر کاربردترین روش‌های واسنجی حسگرها روش حداقل مربعات بر پایه رگرسیون خطی (در ابعاد واسنجی‌ها دو نقطه‌ای و چند نقطه‌ای) است. برای کاربردهای آزمایشگاهی، هر دستگاه ویژگی‌های اندازه شناختی خود را دارد. با توجه به این که دستیابی به کیفیت برتر از طریق انجام آزمون‌ها و اندازه‌گیری‌های مطمئن ارزیابی می‌گردد، سوال این است که اندازه‌گیری مطمئن چگونه اندازه‌گیری می باشد؟ پاسخ اینست که تنها واسنجی صحیح و دوره‌ای به نتایج خروجی دستگاه‌ها و محصولات، کیفیت و بهبود می‌بخشد. با انجام واسنجی به دنبال یافتن ویژگی‌های اندازه شناختی دستگاه هستیم تا در صورت نیاز اصلاحات لازم را انجام دهیم. اغلب استانداردهای مدیریت کیفیت در بخش الزامات فنی، از واسنجی تجهیزات نام برده و آن را الزام نموده‌اند.

۱۱- مراجع

[1]. Calibration, available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Calibration (accessed October 2019)

[2]. Crouch, Stanley & Skoog, Douglas A. Principles of Instrumental Analysis. Pacific Grove: Brooks Cole. ISBN 0-495-

[۳]. فرزان پ، تاریخچه اندازه گیری و کالیبراسیون تجهیزات ابعادی، ناشر: کیان، چاپ اول، ۱۳۸۷

[٤]. شریفی عارف ف، خزاعی‌پور آ، واسنجی، چرا و چگونه؟، فصلنامه تخصصی دانش آزمایشگاهی ایران، شماره پیاپی ۱۳، شماره ۱، ۱۳۹۵

[٥]. مهریان اصفهانی ع، تعیین زمان واقعی واسنجی تجهیزات اندازه‌گیری ابعادی در صنعت برق و دیگر صنایع، پنجمین همایش کیفیت و بهره‌وری در صنعت برق، ۱۳۸۳

[6]. Model-Based Calibration Toolbox, Simulink®, http://www.mathworks.com

[7]. Trabelsi, S., .Kraszewski, a.w., & Nelson, S.O., (2001). New calibration technique for moisture sensors, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Volume: 50 , Issue: 4 , Aug 2001.

[8]. Zheng, Z., , Chen, M., Jie Zhou, & Wang, G., (20018). CMOS Temperature Sensor With Single-Point Calibration for Retinal Prosthesis, IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS).

[9]. Kophaldt, T.R. (2018). Lessons on Industrial Instrumentation.

[10]. Cameron, D.N. Measurement and calibration handbook.

[11]. Battikha, N,E. (20017). The condensed handbook of measurement and control, International Society of Automation; 4th edition, October.

[12]. SYED, Z., AGGARWAL, P., GOODALL, C., NIU, X. & SHEIMY, E.L. (2017). A new multi-position calibration method for MEMS inertial navigation systems, Measurement Science and Technology.

[13]. Asgari, J., A., Amiri, A., B.C. & Zanganeh, F. Combining Real-Time Kinematic GPS Navigation System With MEMS IMU Applications, Journal of Science and Space Technology, Volume 5, PP. 57-49.

[14]. Zhang, Y., Wang, Y., Yu , K., Jia, H., & Wang, R. (2017). Simulation research of electromagnetic flow meter dry calibration, IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC).

[15]. Zheng, H., Ge, Y., & Mao, Q. (2011). Design of gas flow meter calibration based on sonic nozzles using negative pressure method, International Conference on Electric Information and Control Engineering.

[16]. Ang, T.J., & Kong, N.N. (2017). Innovative of mechanical top clamp fixture calibration through load cell methodology, IEEE 37th International Electronics Manufacturing Technology (IEMT) & 18th Electronics Materials and Packaging (EMAP) Conference.

[17]. Starkloff, M., Bauer, M., Schubert,M., Lee, J., Behr, R., Palafox, L., Schaidhammer, L., Böck, A.C., & Fleischmann,P.M. (2018). The AC Quantum Voltmeter Used for AC Current Calibrations, Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM).

[18]. Krzysztof,G., Tomasz, D., Marosz, K., & Pavel, F. (2018). Position for calibrating resistance strain gauges, Applications of Electromagnetics in Modern Techniques and Medicine (PTZE).

[۱۹]. رنجبران س، عبادالهی س، مقایسه و بررسی روش‌های واسنجی میدانی برای سنسور شتاب‌سنج بر مبنای بردار جاذبه، نشریه علمی ترویجی مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی. ۱۳۹۷