



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Modeling and Design of Moving Particle Charge Sensor with Coin Shaped Electrode

Teimour Tajdari ^{a,*} 

^a Department of Electrical Engineering, Velayat University, Iranshahr, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2022-02-21

Revised: 2024-06-21

Accepted: 2024-08-17

Keywords:

Electrodynamic sensor;
Finite element method;
Transducer;
Sensitivity model;
Signal conditioning
circuit.

ABSTRACT

The subject of this article is the design and modeling of an electrodynamic sensor with improved circuit specifications to measure the charge of moving particles. This sensor can be used to observe magnetic field changes, non-intrusively, to measure velocity, density, and distribution parameters of moving particles in industrial pipelines and conveyors. The two main components of the sensor are the transducer and the signal conditioning circuit. The transducer is made of a coin-shaped metal electrode and a transimpedance amplifier. The electrode design process involves obtaining the magnetic sensitivity model of the electrode and calculating the induced current. In addition, the signal conditioning circuit components, with upgraded electronics, include sequential voltage amplifiers and a noise reduction filter that are based on transducer modeling results. The results of the experiments and simulations of the final design showed that the sensor can detect a wide range of magnetic field amplitudes produced by moving particles. Also, the sensor has high sensitivity and good circuit stability and can be a good choice for use in measuring instruments.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.26343.2227>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: tajdari.t@velayat.ac.ir

How to cite this article:

Tajdari, T. (2025). Modeling and design of moving particle charge sensor with coin shaped electrode. Journal of Modeling in Engineering, 23(80), 209-217. doi: 10.22075/jme.2024.26343.2227

مدل سازی و طراحی حسگر اندازه گیری بار ذرات متحرک با الکترو دینامیک

تیمور تاجداری^{۱*}

چکیده	اطلاعات مقاله
موضوع این مقاله طراحی و مدل سازی یک حسگر الکترو دینامیک با مدار و مشخصات بهبود یافته برای اندازه گیری بار ذرات متحرک است. این حسگر می تواند با رصد تغییرات میدان مغناطیسی، در طراحی و ساخت ادوات نوع غیرمستقیم در اندازه گیری پارامترهای سرعت، تراکم و توزیع ذرات متحرک در لوله ها و انتقال دهنده های صنعتی استفاده گردد. دو جزء اصلی حسگر شامل ترانس دیوسر و مدار شکل دهنده سیگنال است. بخش ترانس دیوسر از یک الکترو دینامیک و یک مبدل جریان به ولتاژ ساخته شده است که فرآیند طراحی آن شامل بدست آوردن مدل حساسیت الکترو مغناطیسی الکترو دینامیک و محاسبه جریان القاء شده به آن است. همچنین، اجزای مدار شکل دهنده سیگنال، با قطعات الکترونیکی بروز، شامل تقویت کننده های متوالی ولتاژ و فیلترهای کاهش نویز است که بر مبنای نتایج مدل سازی ترانس دیوسر طراحی شده اند. نتایج حاصل از آزمایش ها و شبیه سازی های طرح نهایی نشان داد که حسگر می تواند طیف وسیعی از دامنه میدان مغناطیسی ناشی از ذرات متحرک را با حساسیت بالا و پایداری مناسب مدار تشخیص دهد و می تواند گزینه مناسبی در استفاده در ابزارهای اندازه گیری باشد.	دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۰۲ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۲۷
	واژگان کلیدی: حسگر الکترو دینامیک، روش اجزاء محدود، ترانس دیوسر، مدل حساسیت، مدار شکل دهنده سیگنال.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.26343.2227>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه

حسگر الکترو دینامیک، که گاهی حسگر الکترواستاتیک نیز نامیده می شود، ابزار مهمی برای اندازه گیری بار ذرات متحرک است. میدان مغناطیسی متغیر حس شده توسط ترانس دیوسر به سیگنال الکتریکی تبدیل می شود سپس توسط مدار شکل دهنده سیگنال به یک سیگنال قابل اندازه گیری و قابل ذخیره تبدیل می شود. مشخصه های دامنه و فرکانس سیگنال خروجی حسگر رابطه مستقیمی با ویژگی های جریان ذرات سیال دارد. بنابراین، با تجزیه و تحلیل تغییرات دامنه یا طیف فرکانسی سیگنال خروجی حسگر می توان اطلاعات مفیدی در مورد پارامترهای مهم جریان ذرات سیال، مانند اندازه ذرات، جرم ذرات، سرعت و توزیع ذرات در درون لوله ها و انتقال دهنده های صنعتی به

دست آورد [۱]. حسگر الکترو دینامیک، برای اندازه گیری متغیرهای جریان ذرات سیالی می تواند قابل استفاده باشد که در آن پدیده الکتریسیته مالشی در ذرات قابلیت شکل گیری داشته باشد، مانند ذراتی که از جنس پلاستیک یا ذغال سنگ هستند [۲، ۳]. برای محاسبه تغییرات جرمی جریان ذرات سیال، تحلیل دامنه سیگنال خروجی حسگر می تواند اطلاعات لازم را برای این منظور فراهم کند [۴]. سرعت جریان ذرات سیال را می توان با استفاده از روش همبستگی متقابل [۵] یا روش فیلتر فضایی [۶، ۷] اندازه گیری کرد. همچنین، با تحلیل سیگنال خروجی این حسگر به کمک روش های فیلتر فضایی می توان سائز ذرات را نیز اندازه گیری کرد [۸]. از این حسگر می توان به عنوان یک ابزار آزمایشگاهی برای

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: tajdari.t@velayat.ac.ir

۱. دانشکده مهندسی برق، دانشگاه ولایت، ایرانشهر، ایران

استناد به این مقاله:

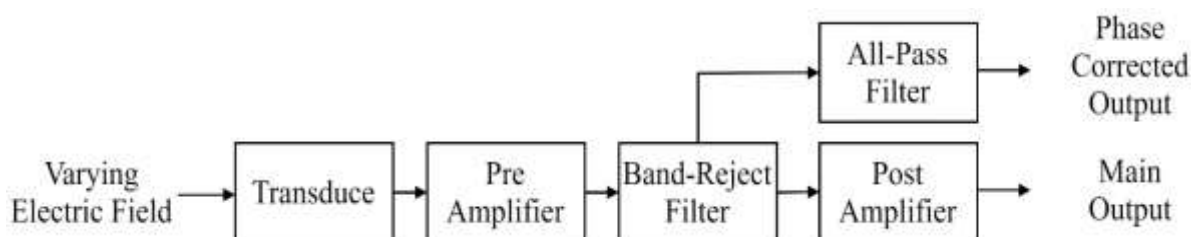
تاجداری، تیمور. (۱۴۰۴). مدل سازی و طراحی حسگر اندازه گیری بار ذرات متحرک با الکترو دینامیک. مدل سازی در مهندسی، ۲۳(۸۰)، ۲۰۹-۲۱۷.

doi: 10.22075/jme.2024.26343.2227

پایدارتر و قابل اطمینان‌تر با طراحی و بهبود یافته‌اند. همچنین، در حسگر جدید یک مدار کاهش نویز به مدار آن اضافه شده است تا اثر نویز خارجی جذب شده توسط ترانسدیوسر، که عمدتاً منبع آن القای کابل‌های برق خانگی است، را به حداقل برساند. برای بهبود سیگنال، یک واحد تصحیح فاز قابل تنظیم بصورت موازی با خروجی اصلی به مدار اضافه شده است که در آن امکان تغییر فاز در یک بازه مشخص فراهم شده است که می‌تواند برای تصحیح فاز و هم در بعضی از کاربردهای ابزار دقیق مورد قرار گیرد. در این مقاله ابتدا طراحی الکتروود شرح داده شده است، سپس مدل حساسیت مغناطیسی و مدل جریان القایی به آن توسط یک ذره با بار فرضی به دست آورده شده‌اند. در انتها فرآیند طراحی واحدهای مختلف مدار در حسگر از جمله مدار تقویت‌کننده مقاومت انتقالی در ترانسدیوسر و تقویت‌کننده‌های ولتاژ، فیلتر نویز، و مدار خروجی در شکل‌دهنده سیگنال به تفصیل بیان شده‌اند.

۲- روش کار

پروژه طراحی حسگر شامل مدل‌سازی ترانسدیوسر و ساخت مدار شکل‌دهنده سیگنال است. ترانسدیوسر دارای یک الکتروود فلزی از نوع سکه‌ای است که مستقیماً به یک میدل جریان به ولتاژ متصل است. بخش‌های دیگر مدار شامل تقویت‌کننده ولتاژ، فیلتر نویز و مدار خروجی است. شکل (۱) بلوک دیاگرام این طرح را نشان می‌دهد.



شکل ۱- ساختار کلی در واحدهای شکل‌دهنده حسگر

مزیت این الکتروود سهولت در جابجایی و استفاده از آن است، و عیب آن می‌تواند وضوح پایین آن در استفاده از بعضی لوله‌ها و انتقال دهنده‌های صنعتی با قطر زیاد باشد که این نقیصه می‌تواند با افزایش تعداد حسگرها و استفاده از الگوریتم‌های سنسور فیوژن مرتفع گردد. ابعاد، هندسه و جنس الکتروود، در شکل‌دهی حساسیت الکتروود تعیین کننده هستند [۱۰، ۱۱]. با داشتن مدل حساسیت الکتروود می‌توان تخمینی از کارایی یا

اندازه‌گیری بار الکترواستاتیک ذخیره شده در اجسام نیز استفاده کرد. همچنین، از آنجا که مدار حسگر به عنوان یک مشتق‌گیر از تغییرات دامنه بار القاء شده عمل می‌کند، با عبور دادن یک جسم باردار در یک خط مستقیم از حوزه حسگر، سیگنال خروجی شکلی سینوسی خواهد داشت. با این قابلیت می‌توان از این حسگر به عنوان یک ابزار آزمایشگاهی ساده در مدارس برای تولید موج سینوسی استفاده کرد [۹].

حسگر الکتروودینامیک شامل دو جزء اصلی است: ترانسدیوسر و مدار شکل‌دهنده سیگنال. هنگامی که یک ذره باردار یا یک قطعه کوچک آهنربا از محدوده حسی ترانسدیوسر در حال عبور باشد، حسگر میدان مغناطیسی آن را تشخیص می‌دهد و مدار شکل‌دهنده سیگنال اثر این القاء مغناطیسی را بصورت سیگنال الکتریکی در خروجی مدار ظاهر می‌کند. نسخه‌ای متفاوت از این حسگر با الکتروود حلقه‌ای و مدار ساده‌تر توسط نگارنده برای یک پروژه ابزار دقیق اندازه‌گیری سائز ذرات طراحی و استفاده شده است [۸]. در حسگر جدید الکتروود از نوع سکه‌ای است که برعکس نوع حلقه‌ای برای یک سائز مشخص لوله ساخته نشده است بلکه قابلیت جابجایی دارد و می‌تواند بصورت چسبان در هر سائزی از لوله‌های انتقال‌دهنده مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر آن، مدار مبدل در ترانسدیوسر و مدار تقویت‌کننده‌ها در مدار شکل‌دهنده سیگنال برای عملکرد

۲-۱- طراحی ترانسدیوسر

ترانسدیوسر بخش اصلی در طراحی حسگر است که می‌تواند میدان الکتریکی متغیر ناشی از یک ذره در حال حرکت را شناسایی کند و آن را به سیگنال الکتریکی تبدیل نماید. اجزای ترانسدیوسر شامل یک الکتروود فلزی و یک تقویت‌کننده امپدانس انتقالی است. الکتروود فلزی، بستگی به نوع استفاده، می‌تواند هر شکل قابل اجرایی داشته باشد. در این پروژه الکتروود با ساختار سکه‌ای شکل انتخاب شده است.

گونه ای است که الکتروود در آن دارای بیشترین حساسیت است.

معادله حساسیت یک الکتروود در یک فضای سه بعدی با فرض ثابت بودن موقعیت ذره در محور X و Y و حرکت آن در محور Z می تواند به فرم کلی زیر بیان شود [۶].

$$s(z) = \left| \frac{q(z)}{Q} \right| \quad (۱)$$

طبق این رابطه، حساسیت الکتروود $s(z)$ تابعی از موقعیت ذره بر روی محور Z است. محور Z نشان دهنده موقعیت ذره در مسیر گرانش را نشان می دهد. همچنین، $q(z)$ مقدار باری است که به الکتروود القاء می شود و Q بار الکتریکی کل بر روی ذره است.

با استفاده از معادلات میدان می توان بار القایی بر روی الکتروود را محاسبه کرد. مقدار بار الکتریکی q در یک سطح برابر است با انتگرال چگالی بار σ در آن سطح:

$$q = \int_s \sigma ds \quad (۲)$$

همچنین، طبق قانون گاوس می توان نشان داد که چگالی بار بر روی الکتروود می تواند از گرادیان پتانسیل الکتریکی به صورت زیر محاسبه شود:

$$\sigma = \epsilon_0 \cdot (\nabla \phi) \quad (۳)$$

در این معادله ϕ پتانسیل الکتریکی بر روی سطح الکتروود و ϵ_0 ضریب گذردهی خلاء است. بنابراین طبق معادله (۳) محاسبه بار الکتریکی القاء شده بر روی الکتروود منوط به محاسبه توزیع پتانسیل الکتریکی روی آن است. معادله پواسون با شرایط مرزی مشخص را می توان برای حل این مسئله استفاده کرد [۹، ۱۴].

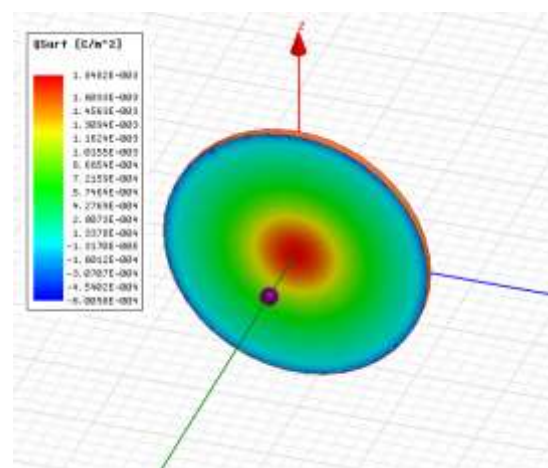
$$\begin{cases} \nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\epsilon} \\ \phi(x, y, z)|_{(x, y, z) \in \Gamma_e} = \text{constant} \end{cases} \quad (۴)$$

در این معادله ρ چگالی حجمی بار الکتریکی، ϵ ضریب گذردهی هوا و Γ_e شرایط مرزی برای الکتروود است. برای حل معادله دیفرانسیل جزئی مرتبه دوم پواسون روش آنالیز عددی و تحلیل المان محدود به کار رفته است. برای انجام محاسبات از نرم افزار Ansys Maxwell استفاده شده است. این نرم افزار به کمک روش های آنالیز عددی توانایی محاسبه بار القایی از سوی یک ذره به صفحه الکتروود در هر نقطه را دارد [۹، ۱۵].

محدودیت های الکتروود برای استفاده در لوله های انتقال با ابعاد متفاوت یا در کار با ذرات دارای خواص رسانایی متفاوت به دست آورد. همچنین، مدل جریان القایی الکتروود پارامتر و مبنای اصلی در طراحی و انتخاب واحدهای مداری حسگر است. در دو قسمت بعد به این مهم پرداخته شده است.

۲-۱-۱-۲ مدل حساسیت الکتروود

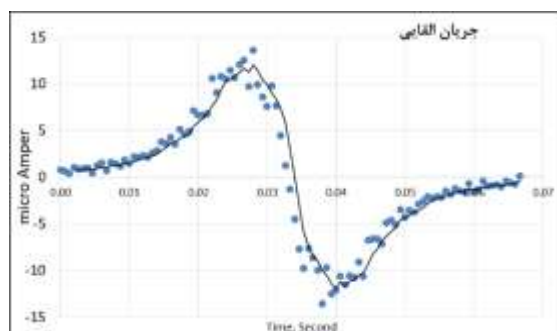
مدل حساسیت برای یک الکتروود نشان دهنده توانایی حسگر و محدوده حسی آن در قابلیت تشخیص نوسانات دامنه میدان الکتریکی ناشی از ذرات متحرک باردار است [۱۲، ۱۳]. در این پروژه الکتروود به کار رفته دارای هندسه سکه ای و ساخته شده از جنس مس است. شکل (۲) توزیع بار الکتریکی بر روی سطح الکتروود بر اثر نیروی مغناطیسی اعمال شده از طرف یک ذره باردار را نشان می دهد.



شکل ۲- اثر میدانی ذره باردار با قطر ۱ میلی متر و بار الکتریکی منفی ۱ میکرو کولن در موقعیت $[10, 0, 0]$ میلی متر بر الکتروود با ضخامت ۱ میلی متر و قطر ۳۰ میلی متر

الکتروود دارای ضخامت ۱ میلی متر و قطر ۳۰ میلی متر است. برای آنالیز حساسیت، الکتروود در معرض یک بار الکتریکی متحرک قرار می گیرد. بار الکتریکی می تواند ذره ای با قطر و بار الکتریکی دلخواه باشد که با فاصله ثابت در محورهای X و Y از سطح الکتروود قرار داده شده است و دارای حرکت در جهت گرانش یا محور Z است. در این شبیه سازی ذره دارای قطر ۱ میلی متر و بار منفی ۱ میکرو کولن است و در موقعیت ثابت ۱۰ میلی متر در محور X و در مبدأ محور Y قرار دارد. اثر میدان الکتریکی آن در طول ± 100 میلی متر نسبت به مبدأ محور Z در هر ۲ میلی متر اندازه گیری شده است. فاصله ۱۰ میلی متر در محور X برای ضخامت فرضی لوله ای که الکتروود بر سطح آن نصب می شود در نظر گرفته شده است. موقعیت ذره در این شبیه سازی به

است. شکل (۴) جریان الکتریکی به دست آمده ناشی از القای میدان الکتریکی یک ذره باردار با بار منفی ۱ میکرو کولن به الکتروده را نشان می‌دهد.



شکل ۴- نمودار جریان القاء شده به الکتروده

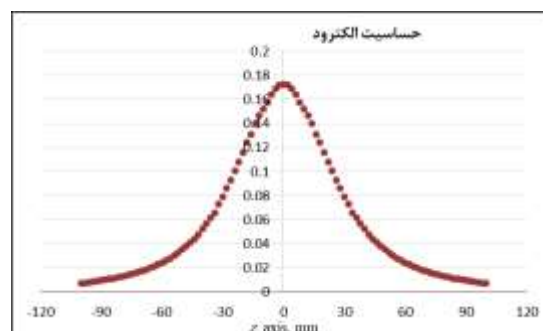
نقاط آبی در نمودار، جریان محاسبه شده در هر نقطه را نشان می‌دهد و خط ممتد نمودار جریان پوسته است که با فیلتر میانگین متحرک از نقاط بدست آمده است. این سیگنالی است که در ورودی مدار حسگر قرار می‌گیرد. از نمودار می‌توان استنتاج کرد بیشترین دامنه جریان القایی حدود ۱۰ میکرو آمپر به ازای یک ذره با بار منفی ۱ میکروکولن است.

اما مقدار بار الکتریکی در ذرات واقعی یک مقدار تصادفی است و مقدار آن بسیار کمتر از میکرو کولن است. بر طبق تحقیقات یانگ و همکاران [۱۶] و همچنین آزمایش‌های نگارنده بر روی ذرات باردار پلاستیکی با قطر ۴ میلی‌متر تا ۱۴ میلی‌متر [۱۷] نشان می‌دهد که این ذرات عمدتاً دارای باری حدود ۱۰۰ پیکو کولن تا ۵۰۰ پیکو کولن هستند. با توجه به مشخصات حساسیت و مشخصات جریان به دست آمده برای الکتروده، پیشبینی جریان القاء شده به آن بین ۱ نانو آمپر تا ۵ نانو آمپر خواهد بود. بنابراین، واحدهای مداری حسگر با توجه به همین رنج از جریان ورودی طراحی و ساخته شده‌اند.

۲-۱-۳- مدار مبدل جریان به ولتاژ

برای دریافت جریان ورودی ناشی از تغییرات بار الکتریکی، الکتروده مستقیماً به یک مدار تقویت کننده امپدانس انتقالی متصل شده است. طبقه اول در مدار شکل (۵) این تقویت کننده را نشان می‌دهد که توسط آن یک مسیر برای جریان الکتروده به زمین ایجاد شده است. این مدار سیگنال جریان ورودی را به سیگنال ولتاژ در خروجی خود تبدیل می‌کند [۱۸]. بهره این تقویت کننده ۱۰۰ دسیبل است. با توجه به دامنه کوچک جریان ورودی که ۲ نانو آمپر است، به منظور

شکل (۳) نتایج به دست آمده از محاسبه حساسیت الکتروده در طول ± 100 میلی‌متر از محور Z در هر ۲ میلی‌متر را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمودار حساسیت الکتروده در طول ± 100 میلی‌متر از محور Z در هر ۲ میلی‌متر

شکل (۳) حساسیت الکتروده را با حرکت ذره در طول محور Z نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که با نزدیک شدن ذره به مرکز الکتروده، بیشترین نیروی مغناطیسی از سوی ذره به آن وارد می‌شود. در این نقطه حساسیت نزدیک به ۱۸ درصد خواهد رسید.

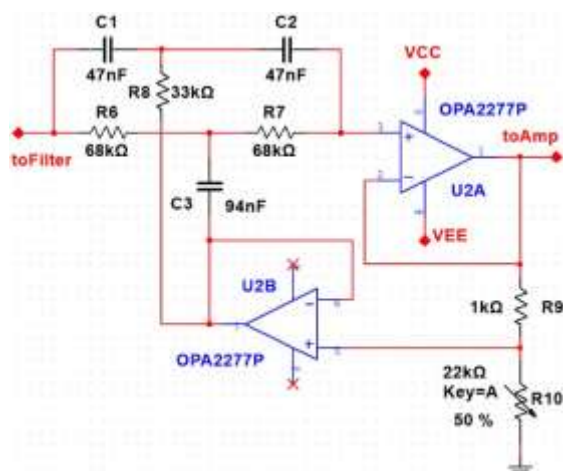
۲-۱-۲- مدل جریان القایی

تغییرات بار الکتریکی در الکتروده فلزی باعث شکل‌گیری جریان الکتریکی در مدار متصل به آن می‌شود. جریان الکتریکی ناشی از تغییرات بار القاء شده در الکتروده می‌تواند با محاسبه نرخ تغییرات بار الکتریکی در الکتروده به صورت معادله زیر محاسبه گردد.

$$i(t) = \left| \frac{dq(t)}{dt} \right| \quad (5)$$

برای به دست آوردن جریان از معادله (۵) لازم است که زمان صرف شده توسط ذره برای طی کردن طول ۲۰۰ میلی‌متری محاسبه شود. اگر فرض کنیم ذره از فاصله ۵۰ سانتیمتری با سرعت اولیه صفر رها شده باشد، سرعت آن در هنگام رسیدن به الکتروده برابر با ۳ متر بر ثانیه خواهد بود. با توجه به فاصله کوتاه ۲۰۰ میلیمتری طی شده توسط ذره، می‌توان فرض کرد ذره دارای سرعت ثابت بوده است. با این فرض زمان صرف شده برای طی شدن این مسافت برابر با ۰.۰۶۶ ثانیه خواهد بود و زمان صرف شده برای طی کردن هر ۲ میلی‌متر برابر با $\Delta t = 0.0007$ ثانیه است. بنابراین، با مشتق‌گیری از نمودار بار القاء شده به الکتروده، که نمودار حساسیت با تقسیم آن بر بار کل به دست آمده، جریان الکتریکی القاء شده از ذره باردار به الکتروده قابل محاسبه

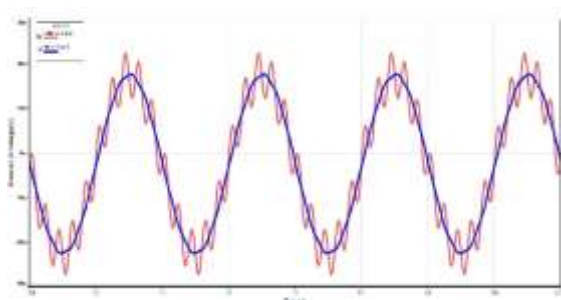
$$f_{rej} = \frac{1}{2\pi R_6 C_1} \quad (۶)$$



شکل ۶- مدار فیلتر حذف باند ۵۰ هرتز از نوع دابل تی

در این طراحی $C_1=C_2=0.5C_3$ و $R_6=R_7=2R_8$ است. فرکانس حذف نزدیک به ۴۹ هرتز خواهد بود ولی با توجه به فاصله زیاد آن از فرکانس اصلی که حدود چند هرتز است می توان با تنظیم ضریب کیفیت، دامنه نویز ۵۰ هرتز را نزدیک به صفر رساند. تنظیم فاکتور کیفیت توسط مقاومت های R_9 و R_{10} انجام می شود [۲۰].

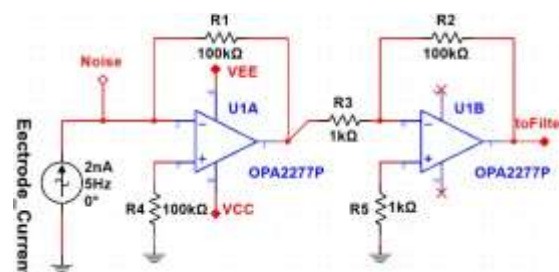
شکل (۷) تفاوت سیگنال ورودی و سیگنال خروجی از فیلتر را نشان می دهد. در این نمودار سیگنال آلوده به نویز در ورودی فیلتر با رنگ نارنجی نشان داده شده است که دارای نسبت سیگنال به نویز ۴ است. سیگنال خروجی از فیلتر با رنگ آبی نشان داده شده است که در آن اثر نویز به صفر نزدیک شده است.



شکل ۷- سیگنال ورودی به فیلتر با رنگ نارنجی و سیگنال خروجی از آن با رنگ آبی نشان داده شده است.

خروجی فیلتر دارای دامنه ای کوچک در حدود ۲۰ میلی آمپر است. در قسمت بعد سیگنال خروجی از فیلتر تقویت شده و برای ترمینال خروجی آماده می گردد.

ایجاد بهره بیشتر، در مرحله بعد یک پیش تقویت کننده این بهره را به ۱۲۰ دسیبل افزایش می دهد. با این بهره، دامنه سیگنال در خروجی پیش تقویت کننده به ۲۰ میلی ولت خواهد رسید.



شکل ۵- طبقه تقویت کننده امپدانس انتقالی به همراه یک طبقه پیش تقویت کننده وارون ساز در مدار حسگر

با توجه به بهره بسیار بالا، الکتروود مانند یک آنتن میدان های مغناطیسی اطراف خود را دریافت می کند که به صورت نویز در سیگنال اصلی ظاهر می شوند. از آنجا که الکتروود مانند یک فیلتر پایین گذر عمل می کند [۱۹] امواج رادیویی بر آن بی اثر هستند اما القای ناشی از کابل های برق ۲۲۰ ولت در محیط کار باعث ایجاد تداخل نویز ۵۰ هرتز به سیگنال اصلی می شود. بنابراین، در مدار شکل (۵) علاوه بر ورودی جریان اصلی که ناشی از الکتروود است، یک جریان القایی نویز با دامنه ۵/۵ نانو آمپر و فرکانس ۵۰ هرتز نیز پیش بینی شده است تا اثر نویز در طراحی دیده شود.

۲-۲ طراحی مدار شکل دهنده سیگنال

سیگنال الکتریکی در خروجی ترانس دیوسر دارای دامنه ای کوچک و آلوده به نویز است. سیگنال خروجی برای پردازش نیاز دارد تا هم دامنه ای مناسب داشته باشد و هم تا حد امکان عاری از نویز باشد. برای این منظور در مدار شکل دهنده سیگنال، قبل از تقویت کننده نهایی، یک فیلتر کاهش نویز تدارک دیده شده است. همچنین برای بهبود سیگنال، در خروجی مدار، موازی با خروجی اصلی یک خروجی دیگر با فیلتر تصحیح فاز در نظر گرفته شده است.

۲-۲-۱ مدار فیلتر نویز ۵۰ هرتز

مدار کاهش نویز یک فیلتر پسیو از نوع حذف باند فرکانسی، با طراحی دابل تی و بهره واحد است که برای فرکانس حذف ۵۰ هرتز طراحی شده است. در شکل (۶) این مدار نشان داده شده است.

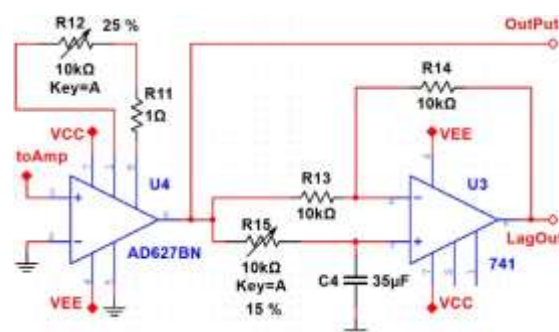
در این مدار فرکانس حذف با تنظیم مقدار مقاومت R_6 و خازن C_1 از معادله زیر به دست می آید.

۲-۲-۲- مدار تقویت کننده

برای تقویت کننده نهایی از یک تقویت کننده ابزار دقیق استفاده شده است. یکی از مزایای تقویت کننده ابزار دقیق توانایی فراهم کردن بهره بالا با قابلیت تنظیم به کمک یک پتانسیومتر است. بهره آ‌ی‌سی AD627BN به کار رفته در این مدار، طبق دیتاشیت شرکت سازنده به کمک رابطه زیر به دست می‌آید.

$$G = 5 + \frac{200k\Omega}{R_G} \quad (7)$$

طبق ادعای سازنده این تقویت کننده قابلیت فراهم نمودن بهره‌ای بین ۵ تا ۱۰۰۰ را دارد [۲۱]. طبقه اول در مدار شکل (۸) تقویت کننده نهایی را نشان می‌دهد.



شکل ۸- تقویت کننده ابزار دقیق با مدار تصحیح فاز

در این طراحی یک مقاومت ۱ کیلو اهم و یک پتانسیومتر ۱۰ کیلو اهم به صورت سری مقاومت R_G تشکیل را می‌دهند. با تغییر رنج مقاومت در پتانسیومتر می‌توان به بهره‌ای از ۲۵ تا ۲۲۵ دست یافت. با وجود طبقه نهایی تقویت کننده، بهره کل مدار حسگر بین ۱۶۸ دسیبل تا ۱۸۷ دسیبل خواهد بود. این قابلیت حسگر را قادر به شناسایی رنج وسیعی از بار الکتریکی ذرات خواهد کرد و می‌تواند دامنه سیگنال خروجی را تا حد دامنه اشباع نزدیک کند. در قسمت انتهایی مدار، موازی با خروجی اصلی، یک فیلتر تمام‌گذر با بهره واحد به صورت سری با تقویت کننده ابزار دقیق به منظور تصحیح فاز قرار داده شده است. این فیلتر، بسته به سرعت عبور ذرات از مقابل الکتروود که فرکانس سیگنال را مشخص می‌کند، می‌تواند اختلاف فازی بین ۰ تا ۱۸۰ درجه در سیگنال خروجی ایجاد کند.

۳- نتیجه گیری

هدف این پروژه طراحی یک حسگر بار ذرات متحرک است که به نام حسگر الکتروودینامیک شناخته می‌شود. این حسگر می‌تواند میدان الکتریکی متغیر ناشی از ذرات باردار

در حال حرکت را که به محدوده حسسی سنسور نزدیک می‌شوند را شناسایی کرده و آن را به یک سیگنال الکتریکی قابل اندازه‌گیری تبدیل کند. از این حسگر می‌توان برای طراحی ابزارهای اندازه‌گیری پارامترهای جریان ذرات سیال در صنعت استفاده کرد. حسگر الکتروودینامیک از دو جزء اصلی تشکیل شده است: ترانسدیوسر و واحد شکل‌دهنده سیگنال. روند طراحی این حسگر شامل محاسبه مدل حساسیت و مدل جریان برای الکتروود و طراحی واحدهای مختلف مداری برای شکل دهنده سیگنال بوده است. از آنجایی که شدت میدان الکتریکی یک ذره می‌تواند هر مقدار تصادفی باشد، بهره حسگر متغیر طراحی شده است که بتواند دامنه وسیعی از شدت میدان ذرات را پوشش دهد. علاوه بر این، مدار حسگر مجهز به یک مدار تصحیح فاز در خروجی است.

حاصل طراحی این پروژه یک حسگر الکتروودینامیک با بهره مناسب و متغیر است که قابلیت تصحیح فاز و توانایی کاهش چشمگیر نویز القایی را در مدار خود دارد. همچنین، ساختار سکه‌ای الکتروود در این حسگر آن را قادر می‌سازد تا به سهولت و با قابلیت جابجایی آسان به عنوان بخشی از ابزار اندازه‌گیری پارامترهای جریان ذرات سیال در صنعت و سایر کاربردهای تحقیقاتی استفاده شود.

تقدیر و تشکر

با سپاس و قدردانی فراوان از اساتید و همکاران محترم دانشگاه ولایت که با راهنمایی‌های ارزشمند، نظرات سازنده و حمایت‌های بی‌دریغ خود مرا در تهیه و تکمیل این پژوهش یاری نمودند. از زحمات و الطاف آنان صمیمانه سپاسگزارم.

تعارض منافع

نویسنده اعلام می‌کند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی

نویسنده متعهد می‌شود که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده است.

مشارکت‌های نویسندگان

تمامی مراحل تهیه، نگارش و ویرایش این مقاله به صورت مستقل توسط اینجانب تیمور تاجداری انجام شده است و هیچ‌گونه مشارکت مستقیم دیگری در فرآیند تدوین آن وجود نداشته است.

منابع مالی

نهادها، سازمان ها یا اشخاص حقیقی و حقوقی انجام

شده است.

این پژوهش بدون دریافت هرگونه حمایت مالی از

مراجع

- [1] I.T. Thuku, M.F.a. Rahmat, N. Abdul Wahab, and T. Tajdari. "Determination of Concentration Profile for Flowing Solid Particles in Pipeline Using Electric Charge Tomography System." *Mathematical Problems in Engineering* 2014, (2014): 1-16.
- [2] S. Zhong, T. Guan, Y. Xu, C. Zhou, L. Shi, C. Guo, X. Zhou, Z. Li, Y. He, and X. Xing. "Simultaneous sensing axial and radial magnetic fields based on weak measurement." *Optics Communications* 486, (2021): 126777.
- [3] H. Ding, J. Li, H. Wang, and C. Xu. "Development of ring-shaped electrostatic coupled capacitance sensor for the parameter measurement of gas-solid flow." *Transactions of the Institute of Measurement and Control* 43, no. 11 (2021): 2567-2576.
- [4] M.F.b Rahmat, and T. Tajdari. "Inhomogeneous mass flow rate measurement of solid particles using a single electrostatic sensor." In *International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering 2011 (InECCE)*, vol. 1, pp. 103-106, Malaysia, 2011.
- [5] C. Xu, B. Zhou, and Shimin Wang. "Dense-phase pneumatically conveyed coal particle velocity measurement using electrostatic probes." *Journal of Electrostatics* 68, no. 1 (2010): 64-72.
- [6] C. Xu, S. Wang, and Y. Yan. "Spatial Selectivity of Linear Electrostatic Sensor Arrays for Particle Velocity Measurement." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 62, (2013): 167-176.
- [7] X. Qian, Y. Yan, S. Wu, and S. Zhang. "Measurement of velocity and concentration profiles of pneumatically conveyed particles in a square-shaped pipe using electrostatic sensor arrays." *Powder Technology* 377 (2021): 693-708.
- [8] T. Tajdari, M.F.a. Rahmat, and N. Abdul Wahab. "New technique to measure particle size using electrostatic sensor." *Journal of Electrostatics* 72, no. 2 (2014): 120-128.
- [9] X. Qian, Y. Yan, S. Wu, and S. Zhang. "Measurement of velocity and concentration profiles of pneumatically conveyed particles in a square-shaped pipe using electrostatic sensor arrays." *Powder Technology* 377, (2021): 693-708.
- [10] L. Peng, Y. Zhang, and Y. Yan. "Characterization of electrostatic sensors for flow measurement of particulate solids in square-shaped pneumatic conveying pipelines." *Sensors and Actuators A: Physical* 141, no. 1 (2008): 59-67.
- [11] J. Zhang, B. Zhou, C. Xu, and S. Wang. "Modelling and calibration of a ring-shaped electrostatic meter." In *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 147, no. 1, p. 012001. IOP Publishing, 2009.
- [12] H. Bahador. "A new highly sensitive refractive index sensor using vertically coupled plasmonic elliptic-disk up elliptic-ring nanostructure." *Journal of Modeling in Engineering* 19, no. 64 (2021): 64-75 (in Persian).
- [13] S. Rahimi, S. Rezazadeh Mofradnia, F. Yazdian, B. Rasekh and S. Shojasadati. "Simulation and evaluation of the performance of various sensor-sensing silicones to detect methane-soluble in fermentation process." *Journal of Modeling in Engineering* 17, no. 58 (2019): 329-336 (in Persian).
- [14] J. Zhang, and J. Coulthard. "Theoretical and experimental studies of the spatial sensitivity of an electrostatic pulverised fuel meter." *Journal of Electrostatics* 63, no. 12 (2005): 1133-1149.
- [15] T. Tajdari, M.F.a. Bin Rahmat, and I. Tizhe Thuku. "Sensitivity characteristics of electrostatic sensor using finite element modeling." In *2012 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*, pp. 194-197. IEEE, 2012.
- [16] Y. Yan, B. Byrne, S. Woodhead, and J. Coulthard. "Velocity measurement of pneumatically conveyed solids using electrodynamic sensors." *Measurement Science and Technology* 6, no. 5 (1995): 515.
- [17] T. Tajdari. "Particle Size Measurement Using Electrostatic Sensor Through Spatial Filtering Method." PhD diss., Universiti Teknologi Malaysia, 2014.
- [18] N. Moaleman, E. Farshidi, and M. Rezvani. "Analysis and Design of a New Voltage Amplifier Applying In The Time and Voltage Domain Converters." *Journal of Modeling in Engineering* 14, no. 45 (2016): 123-131 (in Persian).

- [19] Z. Chen, X. Tang, Z. Hu, and Y. Yang. "Investigations into sensing characteristics of circular thin-plate electrostatic sensors for gas path monitoring." *Chinese Journal of Aeronautics* 27, no. 4 (2014): 812-820.
- [20] H. Boukabache, C. Escriba, and J.Y. Fourniols. "Toward smart aerospace structures: Design of a piezoelectric sensor and its analog interface for flaw detection." *Sensors* 14, no. 11 (2014): 20543-20561.
- [21] Analog Devices. "AD 627, Micropower, Single- and Dual-Supply, Rail-to-Rail Instrumentation Amplifier". USA (2013), URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad627.pdf>