به نام خدا

دانشگاه صنعتی شریف

دانشکده مهندسی برق

گزارش پروژه درس حسگری

گروه پ:

آرمین خسروانی 402101617

مهیار خسروپناه 402101639

وحید حمزه 402101577

فهرست مطالب

۱ مقدمه ۲

۲ پیش‌زمینه طرح ۲
۱.۲ اطلاعات و مشخصات مورد اندازه‌گیری ۲
۲.۲ مشخصات سیگنال ۳
۳.۲ مشخصات مورد نیاز مدار آنالوگ ۳
۴.۲ روش‌های رایج در طراحی موارد مشابه ۳
۵.۲ مشکلات و نکات در نمونه‌های موجود ۳

۳ روش انجام پروژه ۴
۱.۳ روش ما برای انجام پروژه به تفکیک موضوعات و قسمت‌های مربوطه ۴
۲.۳ معرفی اجمالی نرم‌افزار مورد استفاده در طراحی و شبیه‌سازی ۴
۳.۳ بلوک دیاگرام کلی نحوه تزویج مدارهای مختلف ۴

۴ طراحی و شبیه‌سازی ۴
۱.۴ شتاب‌سنج پیزوالکتریک (Piezoelectric Accelerometer) ۴
۲.۴ مدار آمایش ۶
۳.۴ طراحی فیلتر ۷
۴.۴ طراحی مدار تقویت‌کننده ۹
۵.۴ شبیه‌سازی سیگنال ورودی ۱۱
۶.۴ مدار آمایش نهایی ۱۲
۷.۴ شبیه‌سازی مبدل آنالوگ به دیجیتال در نرم‌افزار LTspice ۱۶

۵ بخش امتیازی ۱۷
۱.۵ شبیه‌سازی مبدل آنالوگ به دیجیتال در نرم‌افزار Proteus ۱۷
۲.۵ شبیه‌سازی کامل مدار مبدل دیجیتال به آنالوگ (DAC) در نرم‌افزار Proteus ۱۹
۳.۵ بهینه‌سازی پارامترهای شبیه‌سازی و تحلیل نرخ داده (Troubleshooting) ۲۱

چکیده

این پروژه به طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم آمایش سیگنال برای ثبت حرکات مچ دست با استفاده از سنسور پیزوالکتریک کوارتز می‌پردازد. در این گزارش، ابتدا مدل‌سازی الکتریکی سنسور و استخراج ولتاژ ورودی بر اساس پارامترهای فیزیکی انجام شده است. سپس، فرآیند طراحی یک سیستم تقویت‌کننده ابزاردقیق با بهره بالا جهت آماده‌سازی سیگنال‌های ضعیف سنسور برای ورود به مبدل آنالوگ به دیجیتال (ADC) تشریح می‌گردد. تمرکز اصلی بر حذف لرزش‌های ناخواسته ربات و نویزهای محیطی از طریق فیلترینگ فعال و مدیریت بازه دینامیکی برای جلوگیری از اشباع سیگنال در شرایط غیرعادی است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان‌دهنده پایداری سیستم در بازه فرکانسی مطلوب و توانمندی آن در تفکیک حرکت اصلی از اختلالات محیطی است که انطباق کامل سخت‌افزار با نیازمندی‌های پردازش دیجیتال را تضمین می‌کند.

۱ مقدمه

- موضوع سیستم ثبت و اهمیت آن: موضوع این پروژه، طراحی واحد پیش‌آماده‌سازی برای یک سیستم ثبت جابجایی مچ دست است که از حسگرهای پیزوالکتریک بهره می‌برد. اهمیت این سیستم در استخراج دقیق داده‌های حرکتی از میان انبوهی از نویزهای مکانیکی و الکتریکی است که نقشی حیاتی در کنترل دقیق بازوهای رباتیک و سیستم‌های کمک‌درمانی ایفا می‌کند.

- کاربرد و معرفی نمونه موجود: سیستم‌های مشابه در حوزه‌های بیومکانیک و مهندسی پزشکی برای پایش لرزش‌های دست یا کنترل پروتزهای هوشمند به کار می‌روند. نمونه‌های صنعتی این سیستم‌ها معمولاً دارای امپدانس ورودی بسیار بالا و فیلترهای آنالوگ مرتبه بالا هستند تا بتوانند سیگنال‌های بسیار کوچک (در مقیاس میلی‌ولت) را با کمترین نرخ خطا ثبت و منتقل کنند.

- آنچه ما انجام خواهیم داد: ما در این پروژه، یک زنجیره کامل آمایش سیگنال شامل طبقات تقویت‌کننده تفاضلی، فیلترهای حذف نویز و مدارهای تطبیق سطح ولتاژ را طراحی و شبیه‌سازی می‌کنیم. هدف ما دستیابی به سیگنالی پاک و تقویت‌شده است که علی‌رغم وجود لرزش‌های لرزه‌ای و نویز سفید، با دقت بالا در بازه کاری مبدل‌های دیجیتال استاندارد قرار گیرد.

- نحوه ارائه اطلاعات در ادامه گزارش: در ادامه این گزارش، ابتدا محاسبات مربوط به استخراج مشخصات سیگنال سنسور ارائه می‌شود. سپس مراحل طراحی بلوک‌های مختلف مدار آمایش و انتخاب قطعات تشریح گشته و در نهایت، عملکرد سیستم در مواجهه با شرایط غیرعادی و پاسخ فرکانسی آن از طریق نتایج شبیه‌سازی مورد تحلیل و قضاوت قرار خواهد گرفت.

۲ پیش‌زمینه طرح

۱.۲ اطلاعات و مشخصات مورد اندازه‌گیری

مورد اندازه‌گیری در این پروژه، جابجایی مچ دست انسان در راستای طولی است. این حرکت در کاربردهای کلینیکی و رباتیک معمولاً فرکانس پایینی دارد، اما به دلیل قرارگیری سنسور بر روی بدنه ربات، با اختلالات

مکانیکی (لرزش) همراه است. ما از یک سنسور پیزوالکتریک کوارتز برای تبدیل این جابجایی به بار الکتریکی استفاده می‌کنیم که حساسیت آن به نیروی وارده بر اساس ثابت پیزوالکتریک تعیین می‌شود.

۲.۲ مشخصات سیگنال

سیگنال تولیدی توسط سنسور پیزوالکتریک دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی است که طراحی مدار را چالش‌برانگیز می‌کند:

- دامنه بسیار کم: ولتاژ تولید شده توسط سنسور کوارتز در محدوده میلی‌ولت است که نیاز به تقویت قابل توجهی دارد.
- امپدانس خروجی بسیار بالا: سنسور پیزوالکتریک رفتاری مشابه یک خازن با مقاومت نشتی بسیار بزرگ دارد که باعث می‌شود به راحتی تحت تأثیر بارگذاری قرار گیرد.

۳.۲ مشخصات مورد نیاز مدار آنالوگ

برای ثبت صحیح این سیگنال، مدار آمایش ما باید ویژگی‌های زیر را داشته باشد:

- امپدانس ورودی فوق‌العاده بالا: برای جلوگیری از تخلیه بار سنسور و افت ولتاژ، امپدانس ورودی مدار باید در محدوده گیگا اهم باشد.
- تقویت‌کننده تفاضلی: جهت حذف نویزهای حالت مشترک و تقویت ولتاژ ضعیف ورودی.
- فیلترینگ انتخابی: عبور دادن فرکانس‌های پایین مربوط به حرکت مچ و تضعیف شدید لرزش‌های فرکانس بالا و نویزهای سفید محیطی.

۴.۲ روش‌های رایج در طراحی موارد مشابه

در مراجع معتبر ابزاردقیق، دو روش اصلی برای قرائت سنسورهای پیزوالکتریک وجود دارد:

- تقویت‌کننده بار: که بار تولیدی را به ولتاژ تبدیل می‌کند و نسبت به طول کابل حساسیت کمتری دارد.
- تقویت‌کننده ولتاژ با امپدانس بالا: که در این پروژه استفاده شده و شامل یک طبقه بافر یا تقویت‌کننده ابزاردقیق برای قرائت ولتاژ دو سر خازن سنسور است.

۵.۲ مشکلات و نکات در نمونه‌های موجود

در طراحی و ثبت این گونه سیگنال‌ها، معمولاً با دو مشکل اساسی روبرو هستیم:

- رانش DC: به دلیل امپدانس بسیار بالا، کوچکترین جریان‌های نشتی ورودی آپ‌امپ می‌توانند باعث اشباع خروجی شوند. ما با پیش‌بینی مقاومت‌های مسیر برگشت جریان، این مشکل را حل کردیم.
- پدیده بریدگی (Clipping): در بسیاری از نمونه‌ها، تقویت بیش از حد برای رسیدن به سقف ولتاژ باعث می‌شود که لرزش‌های غیرعادی دیده نشوند. استراتژی ما در این طرح، اختصاص ۲۰٪ حاشیه امنیت (Margin) برای جلوگیری از این پدیده در شرایط غیرعادی است.

۳ روش انجام پروژه

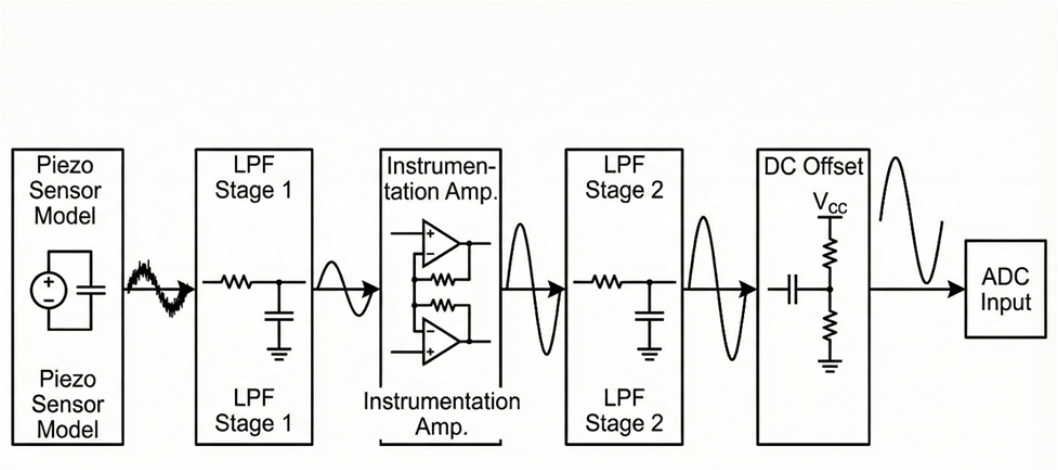
۱.۳ روش ما برای انجام پروژه به تفکیک موضوعات و قسمت‌های مربوطه

ما کار را با مدل‌سازی ریاضی سنسور کوارتز بر اساس پارامترهای فیزیکی آغاز کردیم تا ظرفیت خازنی معادل و ولتاژ تولیدی آن را تعیین کنیم. سپس، یک تقویت‌کننده ابزاردقیق سه طبقه با استفاده از آپ‌امپ AD8674 طراحی کردیم تا امپدانس ورودی بسیار بالا و بهره دقیق ۸۰ را فراهم کنیم. در مرحله بعد، یک فیلتر پایین‌گذر فعال را برای تضعیف لرزش‌های ناخواسته و نویزهای محیطی ادغام کردیم تا سیگنال حرکت مچ تمیز شود. در نهایت، یک طبقه تغییر سطح ولتاژ (Level Shifter) را پیاده‌سازی کردیم تا سیگنال دوپلاریته را بر روی یک آفست 2.5 V DC سوار کرده و با ورودی تک‌قطبی مبدل ADC0808 سازگار سازیم.

۲.۳ معرفی اجمالی نرم‌افزار مورد استفاده در طراحی و شبیه‌سازی

برای این پروژه، ما از نرم‌افزار LTspice، که یک شبیه‌ساز SPICE قدرتمند از شرکت Analog Devices است، استفاده کردیم. این نرم‌افزار به دلیل توانایی در مدل‌سازی دقیق آی‌سی‌های آنالوگ پیچیده مانند AD8674 و قابلیت‌های مدل‌سازی رفتاری قدرتمندش انتخاب شد که به ما امکان داد منابع نویز واقعی مانند AWGN را شبیه‌سازی کنیم. LTspice به ما اجازه داد تا تحلیل‌های گذرا (Transient) و فرکانسی (AC) را برای تأیید عملکرد مدار در هر دو شرایط کاری عادی و غیرعادی انجام دهیم.

۳.۳ بلوک دیاگرام کلی نحوه تزویج مدارهای مختلف



شکل ۱: بلوک دیاگرام ترتیب قرارگیری مدارهای مختلف

۴ طراحی و شبیه‌سازی

۱.۴ شتاب‌سنج پیزوالکتریک (Piezoelectric Accelerometer)

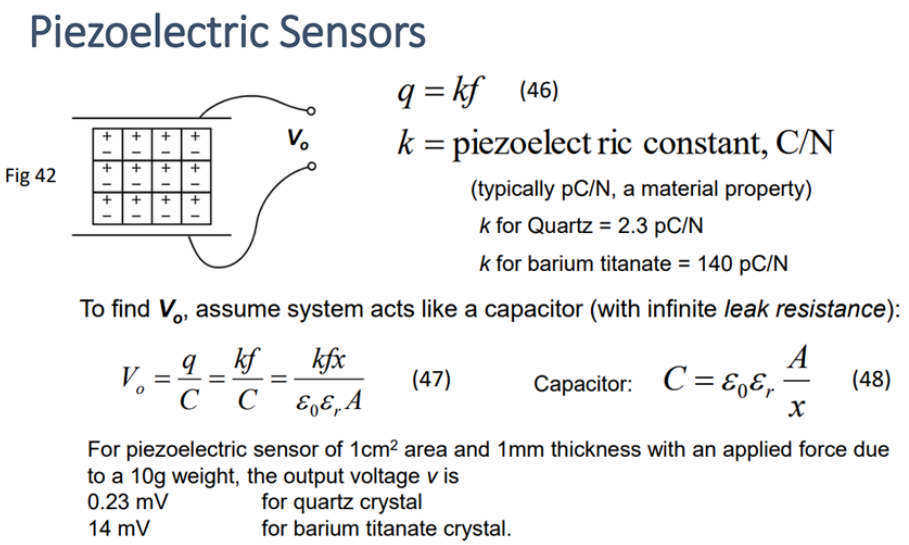
این حسگر بهترین گزینه برای اندازه‌گیری حرکت طولی مچ (جابجایی) و مواجهه با چالش لرزش است، زیرا:

- اندازه‌گیری شتاب و لرزش: پیزوالکتریک‌ها به طور مستقیم برای اندازه‌گیری شتاب‌های فیزیولوژیک و تخمین مصرف انرژی از طریق حرکت انسان به کار می‌روند.
- پاسخ به لرزش: با توجه به اینکه چالش گروه شما «لرزش» است، شتاب‌سنج‌های پیزوالکتریک به دلیل ساختار «جرم و فنر» داخلی، برای شناسایی لرزش‌ها بسیار دقیق هستند.
- ساختار مکانیکی: در مدل‌های فشاری (Compression Type)، شتاب گرفتن مچ باعث وارد شدن نیرو به کریستال پیزوالکتریک شده و متناسب با آن ولتاژ تولید می‌کند که برای تحلیل حرکت طولی مچ عالی است.

بررسی گزینه‌های دیگر:

- پتانسیومتر به اندازه شتاب‌سنج در تشخیص لرزش‌های سریع (Vibration) کارآمد نیست.
- هرچند می‌توان از کرنش‌سنج نیز برای سنجش لرزش استفاده کرد، اما نصب و کالیبراسیون آن برای جابجایی طولی مچ نسبت به شتاب‌سنج دشوارتر است.

طبق اسلایدهای درس داریم:



شکل ۲: مشخصات حسگر پیزوالکتریک

فرضیات:

- Quartz Crystal $k = 2.3\,\mathrm{pC/N}$
- Applied Force $F = 1\,\mathrm{N}$
- Thickness $x = 1\,\mathrm{mm} = 10^{-3}\,\mathrm{m}$
- Area $A = 10\,\mathrm{cm}^2 = 10 \times 10^{-4}\,\mathrm{m}^2$

- $\epsilon_r = 10$ Relative Dielectric Constant

محاسبات:

- $q = k \cdot F = 2.3 \times 10^{-12}\,\mathrm{C/N} \cdot 1\,\mathrm{N} = 2.3\,\mathrm{pC}$
- $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{x} = \frac{8.85\times10^{-12}\cdot10\cdot10\times10^{-4}}{1\times10^{-3}} = 88.5\,\mathrm{pF}$
- $V_o = \frac{q}{C} = \frac{2.3\times10^{-12}\,\mathrm{C}}{8.85\times10^{-11}\,\mathrm{F}} \approx 25\,\mathrm{mV}$

۲.۴ مدار آمایش

انتخاب آپ‌امپ: با چالش لرزش و استفاده از حسگر پیزوالکتریک (که امپدانس خروجی بسیار بالایی دارد) روبرو هستیم، انتخاب آپ‌امپ بسیار حیاتی است. چند گزینه مطرح به شرح زیر است:

جدول ۱: مقایسه آپ‌امپ‌های موجود

نام آپ‌امپ	نوع ورودی	ویژگی بارز	کاربرد
LT1014	Bipolar	ولتاژ آفست بسیار پایین	ابزاردقیق عمومی
LTC6244	CMOS	جریان بایاس ورودی فوق‌العاده کم (1pA)	سنسورهای با امپدانس بالا
AD8674	Precision	نویز بسیار کم و دقت بالا	مدارهای صوتی و حسگرهای حساس

با توجه به ویژگی‌های حسگر کوارتز و صورت پروژه، AD8674 بهترین انتخاب برای مدار آمایش است. دلایل انتخاب:

- امپدانس ورودی بالا: حسگرهای پیزوالکتریک بار الکتریکی بسیار کمی تولید می‌کنند. AD8674 به دلیل ساختار دقیق خود، از هدر رفتن این بار جلوگیری کرده و ولتاژ تولیدی را به درستی حس می‌کند.
- نویز بسیار پایین: از آنجایی که دامنه سیگنال کوچک است وجود نویز می‌تواند کیفیت سیگنال را به شدت کاهش دهد. این آپ‌امپ برای حفظ نسبت سیگنال به نویز (SNR) بالا طراحی شده است.
- پایداری در فیلترها: برای حذف لرزش نیاز به طراحی فیلتر پایین‌گذر داریم. این تراشه در کاربردهای فیلترینگ پاسخ فرکانسی بسیار پایداری دارد.

دیتاشیت آن در فایل AD8671_8672_8674.pdf بررسی شده است. موارد مهم به شرح زیر است:

جدول ۲: پارامترهای کلیدی آپامپ AD8674

□□□□	□□□□□ □□□□□□□	□□□□□□□□□□
MΩ	30	Input Resistance (Differential)
GΩ	2.5	Input Resistance (Common-Mode)
dB	115	Common-Mode Rejection Ratio (CMRR)
μV	20	Input Offset Voltage V_{OS}
MHz	10	Gain Bandwidth Product (GBW)
V/μs	4	Slew Rate
nA	3	Input Bias Current I_B

۳.۴ طراحی فیلتر

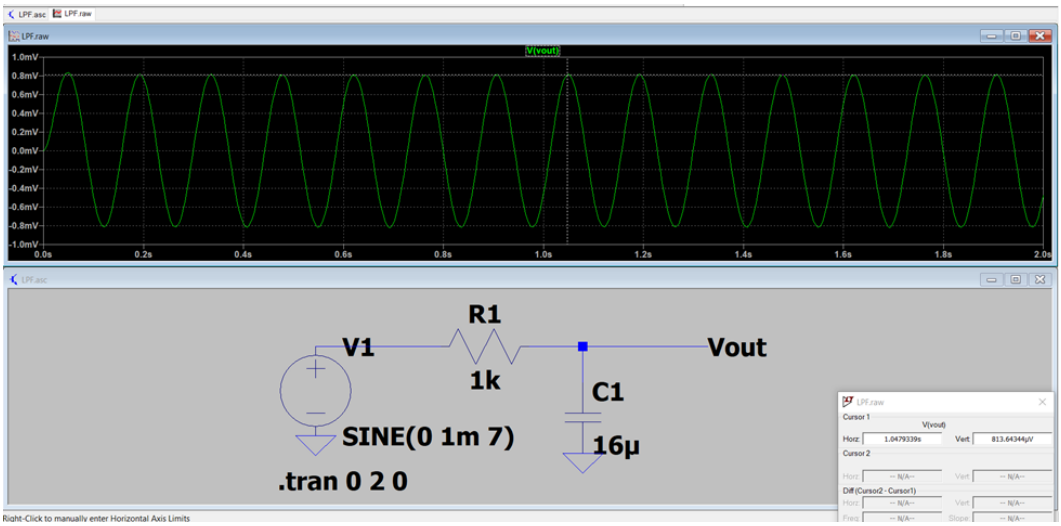
سنسور پیزوالکتریک ذاتاً مانند یک فیلتر بالاگذر مرتبه اول عمل می‌کند و فرکانس DC را عبور نمی‌دهد. لرزش‌ها معمولاً فرکانس بالایی دارند. به یک فیلتر پایین‌گذر (Low-Pass) در مدار آمایش خود نیاز داریم تا فرکانس‌های لرزش را حذف کرده و فقط سیگنال حرکت اصلی مچ را عبور دهیم.

- مؤلفه حرکت اصلی (Low Frequency): فرکانس 5Hz تا 8Hz است. این نشان‌دهنده جابجایی آرام مچ است.
- مؤلفه لرزش (Vibration/Noise): لرزش‌های مکانیکی معمولاً در بازه 50Hz-100Hz هستند و نویز برق شهر نیز دقیقاً در 50Hz قرار دارد.

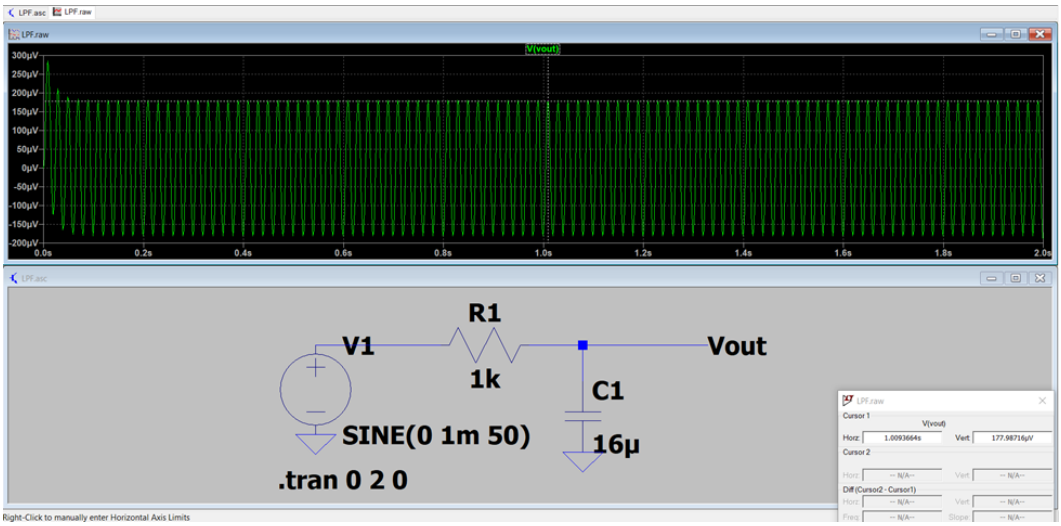
بدین منظور از یک فیلتر پایین‌گذر ساده خازن-مقاومتی با فرکانس مرکزی 100Hz استفاده می‌کنیم تا از عبور کامل سیگنال اصلی مطمئن باشیم و همچنین نویز فرکانس‌های رادیویی، برق شهر و مؤلفه نامطلوب لرزش را تضعیف کند. این فیلتر به عنوان پیش‌فیلتر مدار آمایش و همچنین فیلتر نهایی به منظور تضعیف نویز برق شهر کفایت می‌کند.

محاسبات:

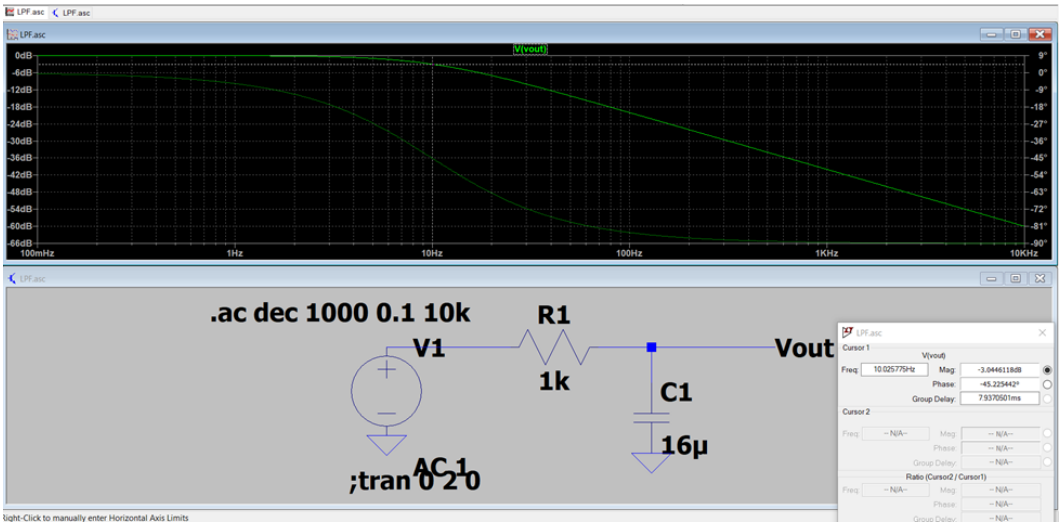
$$\mathrm{f}_c = \frac{1}{2\pi RC} = 10 \quad \Rightarrow \quad R = 1\,\mathrm{k}\Omega,\ C = 16\,\mu\mathrm{F}$$



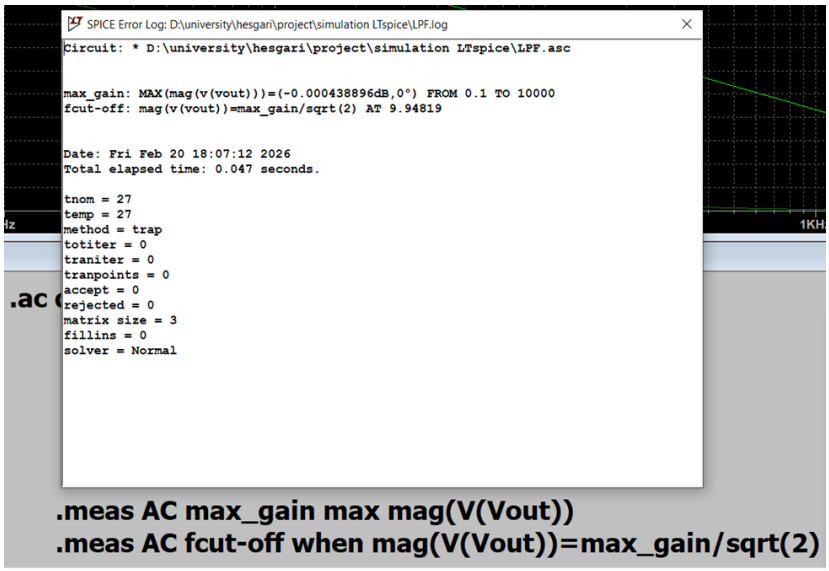
شکل ۳: فرکانس کاری ۷ هرتز که در محدوده فرکانس کاری است به خوبی عبور کرده و با تضعیف کمتر از ٪۲۰ مواجه شده است.



شکل ۴: فرکانس ۵۰ هرتز برق شهر که نویز محسوب می‌شود، به خوبی تضعیف شده و به کمتر از ٪۸۰ مقدار اولیه خود رسیده است.



شکل ۵: پاسخ فرکانسی فیلتر پایین‌گذر، فرکانس 3dB آن در حدود 10Hz است.



شکل ۶: مقدار $f_{3dB} = 9.948\,\mathrm{Hz}$ و بنابراین $\mathrm{BW} \approx 9.9\,\mathrm{Hz}$

۴.۴ طراحی مدار تقویت‌کننده

حسگرهای پیزوالکتریک سیگنال‌های بسیار ضعیفی تولید می‌کنند که به شدت در معرض نویز محیطی هستند. به همین دلیل به منظور بهبود SNR (نسبت سیگنال به نویز) از تقویت‌کننده ابزاردقیق استفاده می‌کنیم.

- حذف نویز مشترک (High CMRR): مهم‌ترین دلیل استفاده از این ساختار، نسبت رد حالت مشترک بسیار بالای آن است. این ویژگی باعث می‌شود نویزهایی که به صورت یکسان روی هر دو سیم حسگر می‌افتند (مثل نویز برق شهر) کاملاً حذف شوند.
- امپدانس ورودی فوق‌العاده بالا: طبق مدل معادل حسگر پیزوالکتریک، بار تولید شده بسیار ناچیز است. تقویت‌کننده ابزاردقیق با امپدانس ورودی در حد گیگا اهم مانع از افت ولتاژ سیگنال می‌شود.

- بهره (Gain) قابل تنظیم: می‌توان با تغییر تنها یک مقاومت، بهره کل مدار را برای رسیدن به محدوده مطلوب برای ورود به ADC تنظیم کرد.

اگر خروجی ماکزیمم را دقیقاً ۵ ولت بگیریم خطر Clipping یا بریدگی سیگنال وجود دارد. از آنجایی که چالش لرزش است و باید شرایط غیرعادی را نیز تشخیص دهیم، اگر سیگنال در حالت عادی به ۵ ولت برسد، دیگر نمی‌توان جهش‌های ناشی از لرزش‌های شدید یا وضعیت‌های غیرعادی را مشاهده کرد.
تولید ولتاژ منفی توسط سنسور پیزوالکتریک می‌تواند رخ دهد:

- در کریستال‌های پیزوالکتریک مانند کوارتز، اتم‌ها در یک ساختار منظم قرار دارند. وقتی به این کریستال فشار وارد می‌کنید، اتم‌ها جابجا شده و تعادل بارهای مثبت و منفی به هم می‌خورد.
- در حالت فشار (Compression): اتم‌ها به شکلی جابجا می‌شوند که بارهای مثبت در یک سمت و بارهای منفی در سمت دیگر جمع می‌شوند و یک ولتاژ (مثلاً مثبت) ایجاد می‌کنند.
- در حالت کشش (Tension/Expansion): وقتی فشار برداشته می‌شود یا کریستال در جهت مخالف کشیده می‌شود، اتم‌ها در جهت عکس حرکت می‌کنند. این کار باعث می‌شود جای قطب‌های مثبت و منفی عوض شده و ولتاژی با پلاریته مخالف (منفی) نسبت به حالت قبل تولید شود.

لرزش یعنی سنسور مدام در حال فشرده شدن و رها شدن (یا کشیده شدن) است. در نتیجه این نوسان، تولید یک موج سینوسی است که نسبت به سطح مرجع (Ground)، نیمی از آن مثبت و نیمی از آن منفی است. مبدل دیجیتال (ADC0808)، فقط ولتاژهای مثبت (مثلاً ۰ تا ۵ ولت) را می‌فهمد. اگر ولتاژ منفی سنسور مستقیماً به ADC برسد، تراشه نمی‌تواند آن را بخواند و حتی ممکن است آسیب ببیند.
بنابراین بهترین استراتژی این است که سیگنال خروجی در حالت عادی (حرکت مچ) حدود ٪۸۰ بازه ADC را اشغال کند، به عبارت دیگر، سیگنال بین 4.5V - 0.5V نوسان کند.

- $0.5\,\mathrm{V} \leq V_{out} \leq 4.5\,\mathrm{V}$
- $V_{out} = 2.5 \pm G \times V_{in} = 2.5 \pm 2\,\mathrm{V}$
- $G = \frac{V_{out_peak}}{V_{in_peak}} = \frac{2\,\mathrm{V}}{25\times10^{-3}\,\mathrm{V}} = 80$
- $V_{out}(t) = 2.5 + 2\sin(\omega t)\,\mathrm{V}$

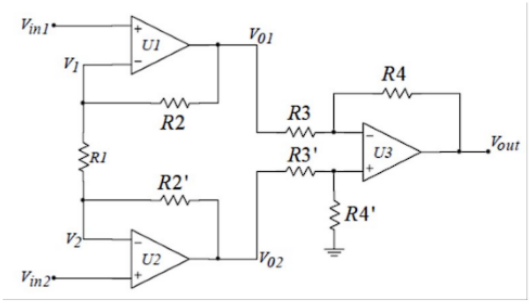
برای یک تقویت‌کننده ابزاردقیق داریم:

$$V_{in1} = V_{CM} - V_{diff}/2$$
$$V_{in2} = V_{CM} + V_{diff}/2$$

$$V_{O1} = \left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)V_{in1} - \frac{R_2}{R1}V_{in2}$$
$$= V_{in1} + \frac{R_2}{R_1}\left(V_{in1} - V_{in2}\right)$$
$$= V_{CM} - \left(1+2\frac{R_2}{R_1}\right)V_{diff}/2$$

$$V_{O2} = V_{CM} + \left(1+2\frac{R_2'}{R_1}\right)V_{diff}/2$$

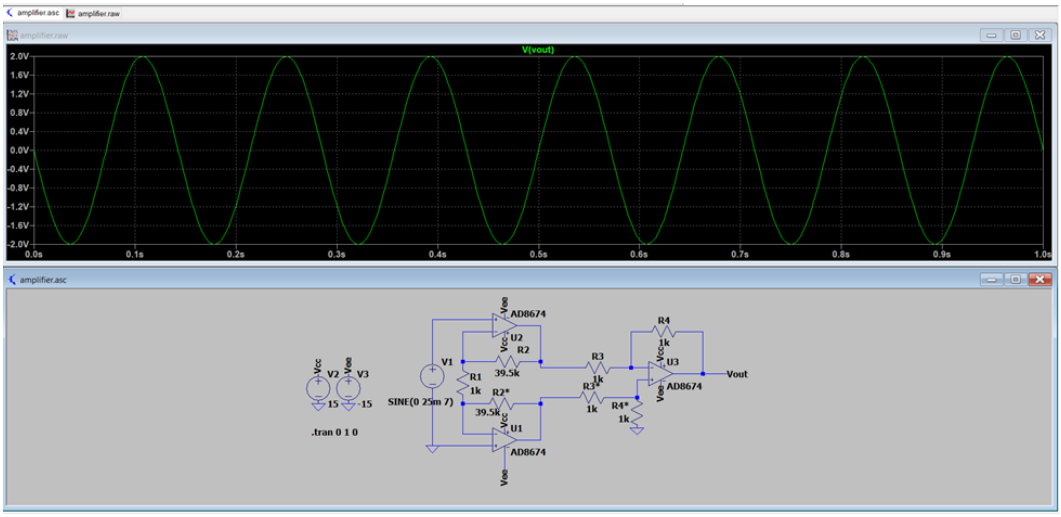
$$V_{CM1} = V_{CM}$$
$$V_{diff1} = V_{O2} - V_{O1} = \left(1+\frac{R_2+R_2'}{R_1}\right)V_{diff}$$



$$V_{diff1} = V_{O2} - V_{O1} = \left(1+\frac{2R_2}{R_1}\right)V_{diff}$$

$$V_{Out} = \varepsilon_2\frac{R4}{R3}V_{CM1} + V_{diff1}\frac{R4}{R3}$$
$$= \varepsilon_2\left(\frac{R4}{R3}\right)V_{CM} + \left(1+\frac{2R2}{R1}\right)\frac{R4}{R3}V_{diff}$$

شکل ۷: مشخصات تقویت‌کننده ابزاردقیق



شکل ۸: مدار تقویت‌کننده با بهره ۸۰ ($R_1 = R_3 = R_4 = 1\,\mathrm{k\Omega}, \quad R_2 = 39.5\,\mathrm{k\Omega}$)

۵.۴ شبیه‌سازی سیگنال ورودی

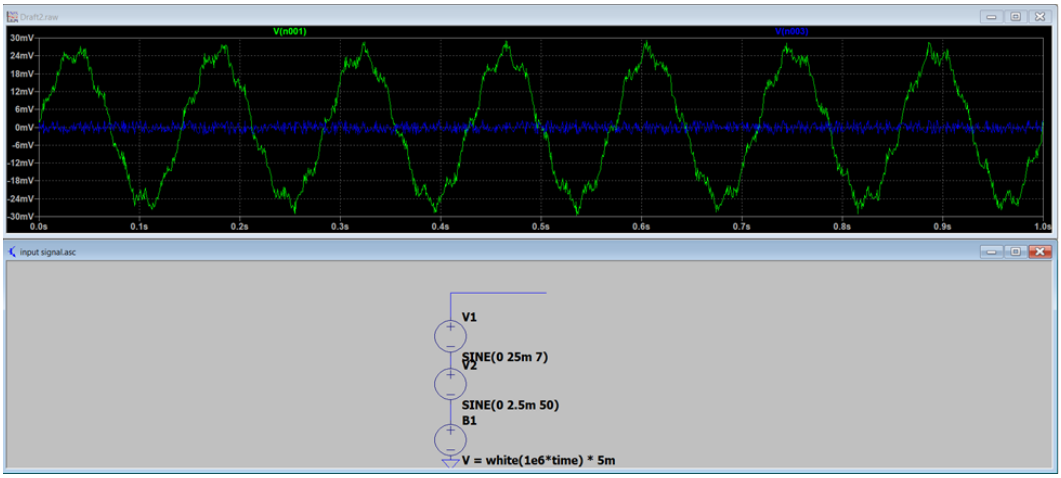
ما برای شبیه‌سازی دقیق رفتار سنسور کوارتز، ترکیبی از سیگنال‌های فیزیکی و نویزهای محیطی را به صورت سری مدل می‌کنیم. با فرض ولتاژ پیک 25mV برای حرکت مطلوب، سایر مؤلفه‌ها به صورت سه منبع ولتاژ را به صورت سری با هم قرار دهید تا ولتاژها با هم جمع شوند:

- منبع ولتاژ حرکت مچ (V_{motion}): ولتاژ $V_m = 25\,\mathrm{mV}$ در فرکانس 1Hz.

- منبع ولتاژ لرزش ($V_{vibration}$): ولتاژ $V_v = 2.5\,\mathrm{mV}$ (معادل ۱۰٪ سیگنال اصلی برای مدل‌سازی لرزش) در فرکانس 50Hz.
- منبع نویز سفید (V_{AWGN}): نویز حرارتی و محیطی با دامنه $V_{AWGN} = \mathrm{white}(1e6 \cdot \mathrm{time}) \times) 5\,\mathrm{mV}$ (5m

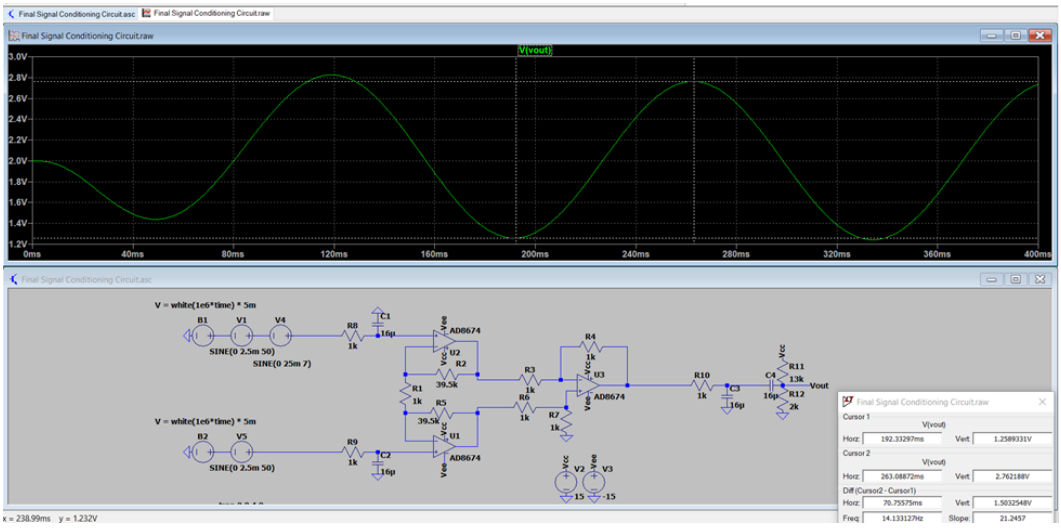
معادله ولتاژ ورودی:

$$\mathrm{V}_{in}(t) = 25\,\mathrm{mV}\sin(2\pi \cdot 1 \cdot t) + 2.5\,\mathrm{mV}\sin(2\pi \cdot 50 \cdot t) + AWGN$$

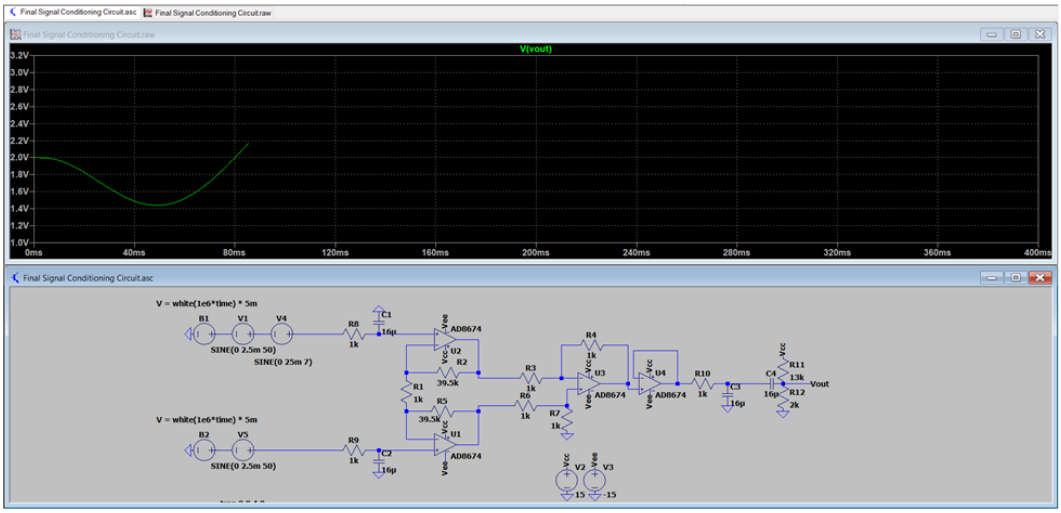


شکل ۹: سیگنال ورودی کلی (سبز)، نویز گوسی (آبی)

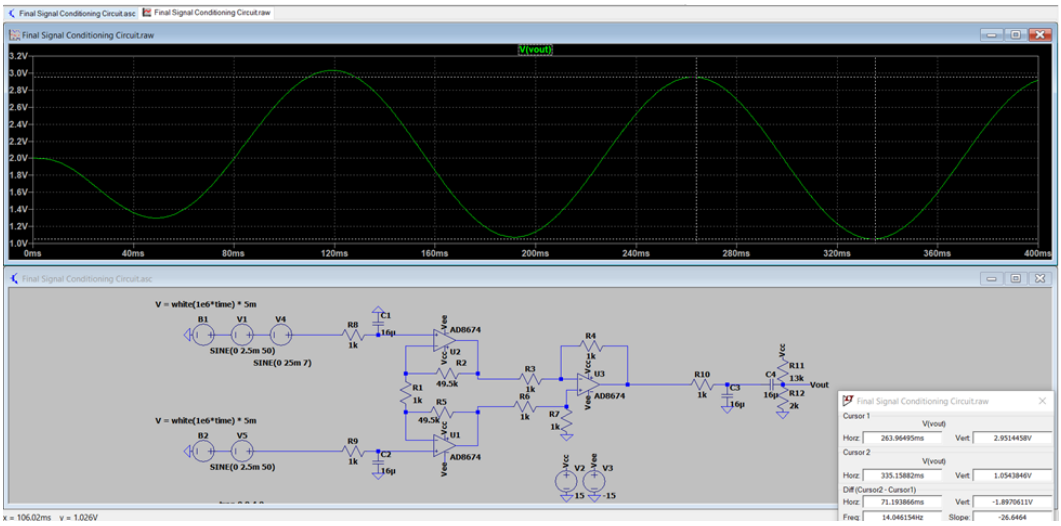
۶.۴ مدار آمایش نهایی



شکل ۱۰: مدار آمایش نهایی، به دلیل عدم استفاده از بافر گین تئوری را بدست نیاوردیم.

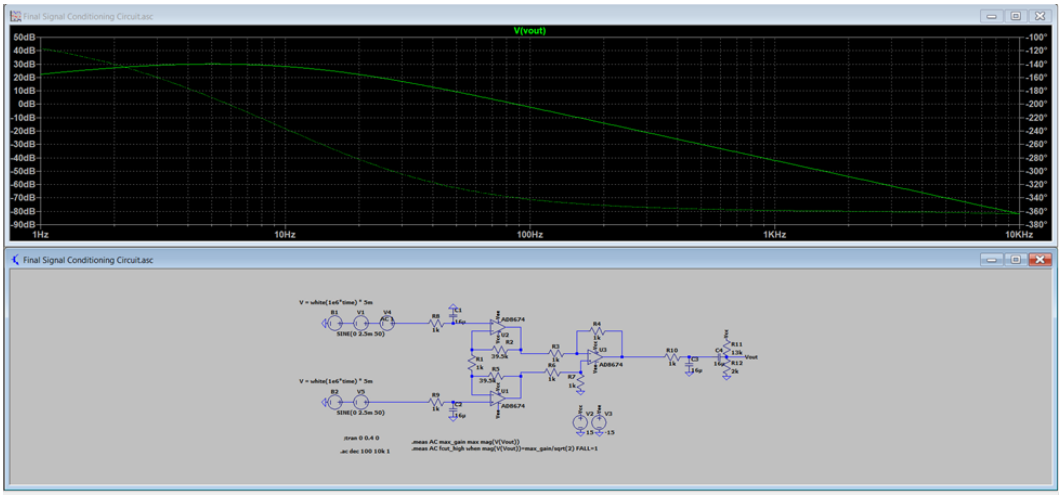


شکل ۱۱: استفاده از بافر و آپامپ و به طبع طبقات بیشتر، پیچیدگی محاسباتی را بشدت افزایش داده و شبیه‌سازی درست صورت نمی‌گیرد.



شکل ۱۲: به منظور تامین گین، تغییری در مدار لحاظ کردیم و مقاومت $R_2 = 49.5\,\mathrm{k\Omega}$ گرفتیم.

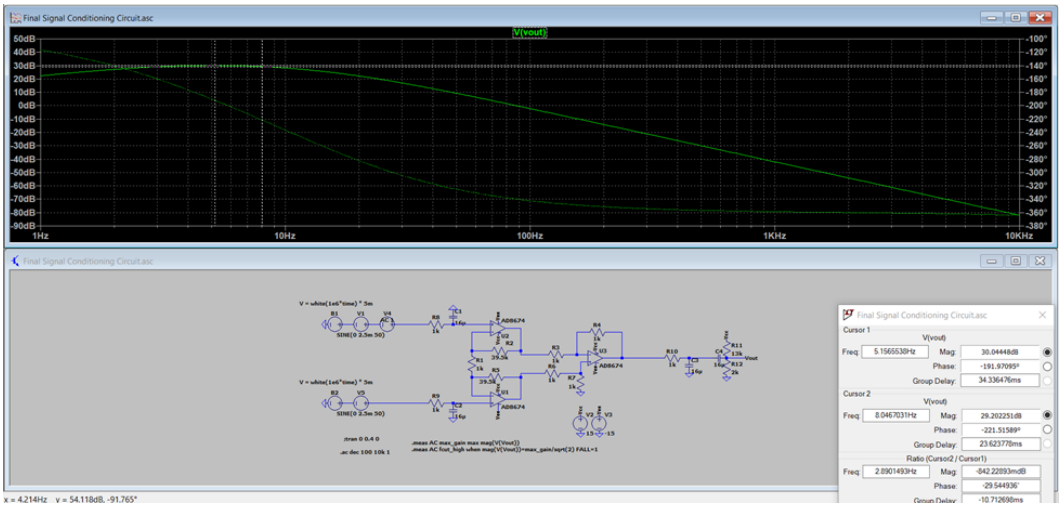
همانطور که مشاهده می‌شود، نویز گوسی حرارتی و نویز برق شهر به کمک فیلترها به خوبی تضعیف شده و خروجی مطلوب مدار قابل مشاهده است.



شکل ۱۳: پاسخ فرکانس مدار آمایش

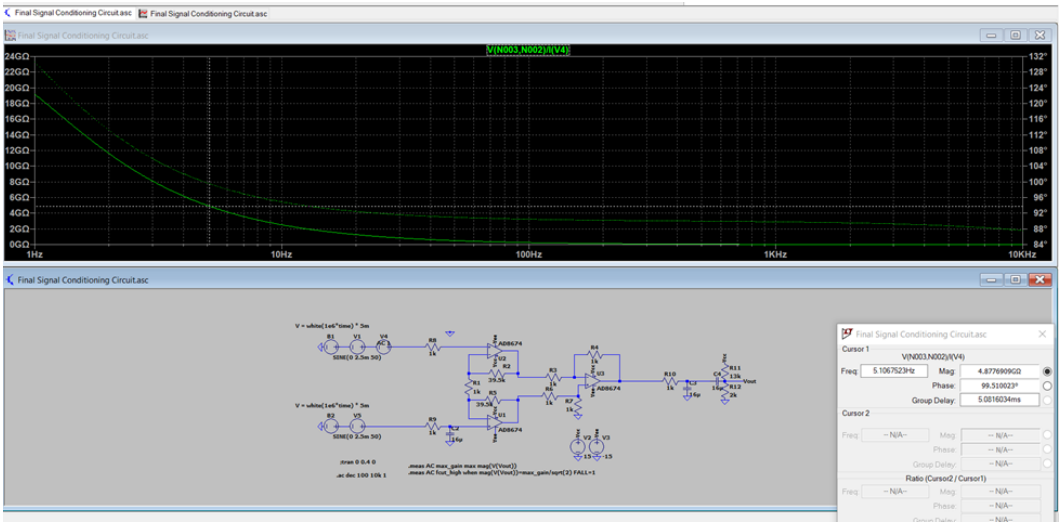
```
SPICE Error Log: D:\university\hesgari\project\simulation LTspice\Final Signal Conditioning Circuit.log
vernier = 0.5
vernier = 0.25
vernier = 0.125
vernier = 0.0625
Gmin = 0.00100083
vernier = 0.03125
vernier = 0.015625
vernier = 0.0078125
vernier = 0.00390625
vernier = 0.00195313
Gmin = 0.00100083
vernier = 0.000976563
vernier = 0.000488281
Gmin = 0
Gmin stepping failed

Starting source stepping with srcstepmethod=0
Source Step = 3.0303%
Source Step = 33.3333%
Source Step = 63.6364%
Source Step = 93.9394%
Source stepping succeeded in finding the operating point.


max_gain: MAX(mag(v(vout)))=(30.0461dB,0°) FROM 1 TO 10000
fcut_high: mag(v(vout))=max_gain/sqrt(2) AT 11.9844


Date: Sat Feb 21 22:26:55 2026
Total elapsed time: 0.260 seconds.

tnom = 27
temp = 27
method = trap
totiter = 2149
traniter = 0
```

شکل ۱۴: محاسبه فرکانس قطع مدار، $\mathrm{BW} = 11.98\,\mathrm{Hz}$

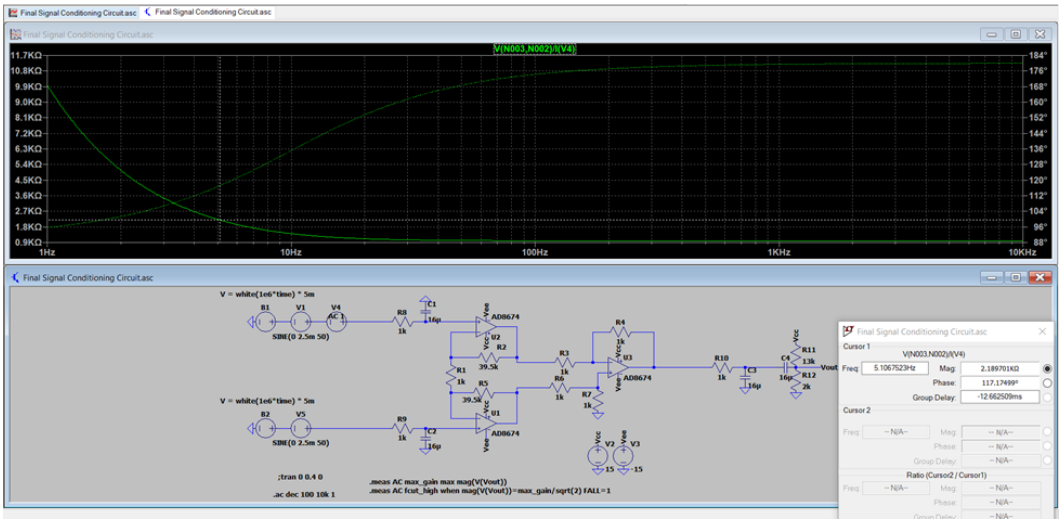


شکل ۱۵: بازه فرکانس کاری مد نظر ما یعنی 5-8Hz از بهره خوبی برخوردار است.

فرکانس قطع مدار در بازه مطلوب قرار گرفته و سیستم با دقت بالایی سیگنال حرکت مچ را عبور داده در حالی که لرزش‌های ناخواسته و نویزهای محیطی را به خوبی تضعیف می‌کند. همچنین در بازه فرکانسی 5-8Hz از تقویت خوبی برخوداریم که نشان‌دهنده اینست که سیگنال خروجی سنسور که مطلوب ماست به خوبی تقویت می‌گردد.



شکل ۱۶: با حذف خازن فیلتر پایین‌گذر، مقاومت ورودی 4.8GΩ است.



شکل ۱۷: با وجود خازن فیلتر پایین‌گذر، مقاومت ورودی 2.2kΩ است.

ما طبق خواسته‌ی پروژه، دو مورد از وضعیت‌های غیرعادی را در ورودی مدل‌سازی کردیم:

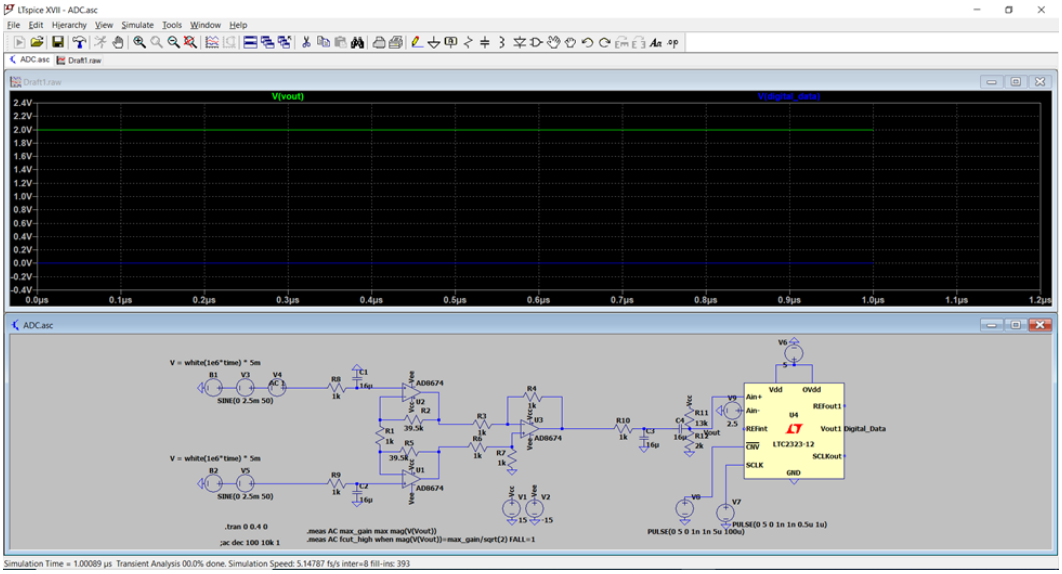
- دسته اول (عوامل مخرب خارجی): ما نویز سفید گاوسی (AWGN) را با دامنه 5mV به سیگنال اضافه کردیم. شبیه‌سازی ما نشان می‌دهد که به دلیل فرکانس بالای این نویز، طبقه فیلتر پایین‌گذر به خوبی آن را حذف می‌کند.

- دسته دوم (تغییر شرایط اندازه‌گیری): ما لرزش‌های مکانیکی بازو را در فرکانس ۵۰ هرتز مدل کردیم. نتایج شبیه‌سازی تأیید می‌کند که این اختلال در خروجی نهایی به شدت تضعیف شده و خللی در تشخیص حرکت اصلی ایجاد نمی‌کند.

همچنین ما در طراحی نهایی، از آنجایی که ممکن است ولتاژ ورودی در اثر نیروهای بسیار زیاد، از مقدار ماکسیمم پیش‌بینی شده فراتر برود؛ برای جلوگیری از پدیده بریدگی سیگنال (Clipping) و حفظ قابلیت تشخیص در شرایط غیرعادی، دامنه نوسان را بر روی ۸۰ بازه مبدل دیجیتال تنظیم کردیم تا حاشیه امنیت لازم برای جهش‌های ناشی از لرزش فراهم شود و با اعمال 2.5V آفست اثر ولتاژهای منفی ناشی از کشش در سنسور پیزوالکتریک را خنثی کردیم تا سیگنال همواره در بازه مثبت و ایمن 0.5V - 4.5V برای ورود به ADC باقی بماند.

۷.۴ شبیه‌سازی مبدل آنالوگ به دیجیتال در نرم‌افزار LTspice

با بررسی کتابخانه LTspice، تمام آی‌سی‌های موجود مبدل‌های (SPI/I2C) هستند. این یعنی هیچ‌کدام از آن‌ها خروجی موازی ۸ بیتی ندارند و کل دیتای دیجیتال را به صورت یک رشته صفر و یک پشت سر هم از یک پایه خارج می‌کنند. با این حال، اگر بخواهیم شبیه‌ترین و بهترین گزینه را برای پروژه انتخاب کنیم، قطعه LTC2311-12 مناسب‌ترین انتخاب است.



شکل ۱۸: استفاده از LTC2311-12 در LTspice

اما با این وجود پردازش دیجیتال و استفاده از ADC در محیط LTspice بدلیل پیچیدگی بسیار محاسبات میسر نبود. بنابراین از نرم‌افزار Proteus استفاده می‌کنیم.

معرفی نرم‌افزار Proteus: نرم‌افزار Proteus یک محیط قدرتمند برای طراحی و شبیه‌سازی مدارهای الکترونیکی است که انعطاف و قدرت فوق‌العاده‌ای در تحلیل سیستم‌های دیجیتال (Mixed-Signal) دارد. به‌کارگیری این نرم‌افزار، به منظور دریافت سیگنال آنالوگ آماده‌سازی‌شده و شبیه‌سازی دقیق عملکرد تراشه مبدل (ADC) جهت مشاهده بصری و تحلیل کدهای باینری خروجی می‌باشد.

۵ بخش امتیازی

۱.۵ شبیه‌سازی مبدل آنالوگ به دیجیتال در نرم‌افزار Proteus

برای پیاده‌سازی این بخش امتیازی، از تراشه ADC0804 بهره گرفته شد. این تراشه یک مبدل ۸ بیتی تک‌کاناله است که به دلیل ساختار موازی (Parallel)، عدم نیاز به آدرس‌دهی کانال و سهولت در مانیتورینگ خروجی، گزینه‌ای ایده‌آل و استاندارد برای سیگنال تک‌بعدی ما محسوب می‌شود.

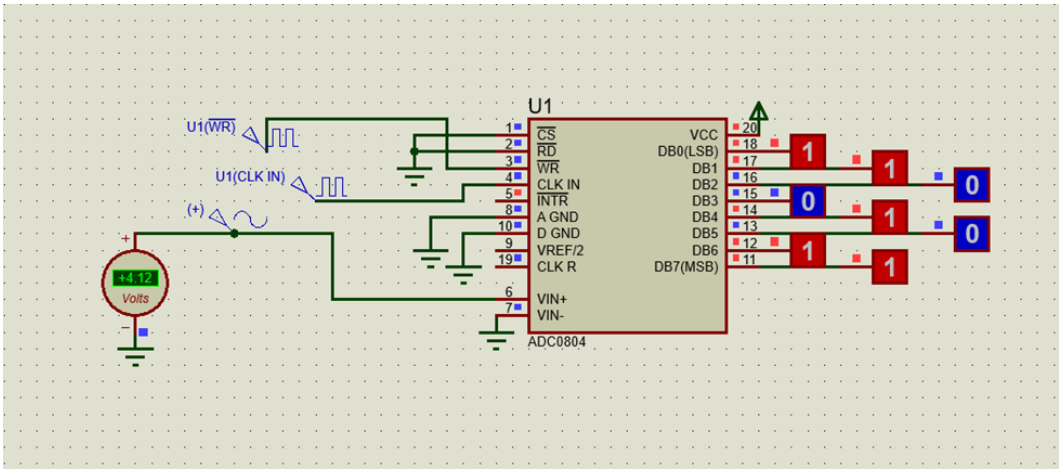
۱. شبیه‌سازی سیگنال ورودی (خروجی طبقه آنالوگ): به منظور بازتولید سیگنال نهاییِ آماده‌سازی‌شده در بخش LTspice، از یک منبع ولتاژ سینوسی (SINE) استفاده شد. پارامترهای این منبع دقیقاً مطابق با خروجی مدار آنالوگ پیشین تنظیم گردید: آفست دی‌سی برابر با 2.5V و دامنه نوسان 2V در نظر گرفته شد تا سیگنال در محدوده ایمنِ 0.5 ولت تا 4.5 ولت نوسان کند (جلوگیری از اشباع مبدل). همچنین فرکانس این سیگنال روی 7Hz تنظیم شد تا تطابق کاملی با فرکانس حرکت و لرزش مچ دست (هدف اصلی پروژه) داشته باشد.

۲. پیکربندی فرمان‌ها و پالس ساعت (Clock): برای راه‌اندازی مبدل در حالت نمونه‌برداری پیوسته، تنظیمات زیر بر روی پایه‌های کنترلی اعمال شد:

- پایه‌های انتخاب تراشه (CS) و خواندن (RD) مستقیماً به زمین متصل شدند تا آی‌سی همواره در حالت فعال قرار داشته باشد.
- کلاک اصلی پردازشگرِ ADC از طریق یک منبع DCLOCK با فرکانس 100kHz به پایه CLK IN متصل گردید.
- برای صدور فرمان نمونه‌برداری، از یک پالس کلاک دیگر با فرکانس 1kHz بر روی پایه نوشتن (WR) استفاده شد. این پیکربندی مدار را قادر می‌سازد تا در هر ثانیه ۱۰۰۰ بار از سیگنال ۷ هرتزی مچ دست نمونه‌برداری کرده و خروجی را به‌روزرسانی کند.

۳. مانیتورینگ خروجی و تحلیل نتایج: جهت مشاهده مستقیم کدهای دیجیتال تولید شده، ۸ عدد LOGICPROBE به پایه‌های DB0 تا DB7 متصل گردید. همچنین یک ولت‌متر DC به صورت موازی با سیگنال ورودی تعبیه شد تا رابطه میان ولتاژ لحظه‌ای و کد خروجی قابل رصد باشد.

با اجرای شبیه‌سازی، مشاهده می‌شود که متناسب با نوسان سینوسیِ سیگنال در بازه ۵.۰ تا ۵.۴ ولت، کدهای باینری روی پروب‌ها به سرعت تغییر کرده و رفتار یک سیستم Data Acquisition واقعی را شبیه‌سازی می‌کنند. این مشاهدات، صحت کامل فرآیند کوانتیزاسیون (Quantization) و عملکرد بی‌نقص مبدل آنالوگ به دیجیتال طراحی شده را اثبات می‌نماید.

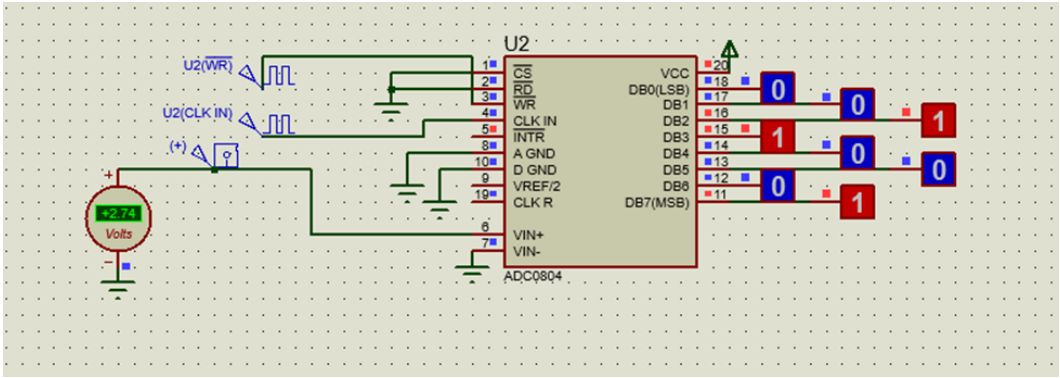


شکل ۱۹: شبیه‌سازی مبدل ADC0804 و مانیتورینگ کدهای دیجیتال در نرم‌افزار Proteus با سیگنال ورودی شبیه‌سازی شده

شبیه‌سازی یکپارچه (Co-simulation) و تزریق دیتای واقعی طبقه آنالوگ: به منظور ارتقای دقت شبیه‌سازی و ارزیابی رفتار مبدل ADC در شرایط کاملاً واقع‌گرایانه، از تکنیک انتقال داده بین‌نرم‌افزاری (Data Export/Import) استفاده گردید. لذا برای رفع این تقریب، ابتدا شبیه‌سازی حالت گذرا (Transient) در نرم‌افزار LTspice برای مدت زمان کافی (تا 0.4 ثانیه) اجرا گردید تا رفتار دینامیک سیگنال به طور کامل شکل بگیرد. سپس خروجی نهایی مدار به صورت مجموعه‌ای از نقاط پیوسته ولتاژ-زمان در قالب یک فایل داده متنی (Final Signal Conditioning Circuit.txt) استخراج شد.

در گام بعدی و در محیط Proteus، به جای استفاده از سیگنال‌ژنراتورهای استاندارد، از یک منبعِ مبتنی بر فایل (FILE Generator) استفاده گردید و دیتای استخراج‌شده از SPICE مستقیماً به آن بارگذاری و به پایه

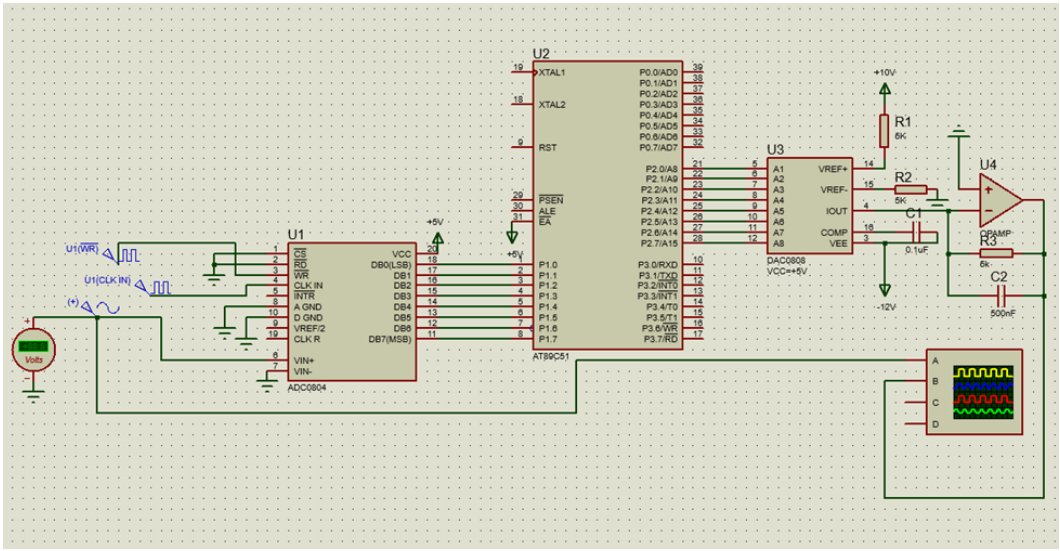
VIN+ تراشه ADC0804 اعمال شد. مزیت اصلی و دستاورد این رویکرد آن است که سیگنال تحویل‌داده‌شده به مبدل، دیگر یک موج فرضی نیست؛ بلکه دقیقاً دربردارنده‌ی تمامی مشخصات فیزیکیِ محاسبه‌شده در محیط اسپایس، اعم از زمانِ شارژ و دشارژ خازن‌های کوپلینگ، رفتار واقعی آپ‌امپ‌ها در فرکانس ۷ هرتز و مقادیر دقیق شیفت DC می‌باشد که در نهایت منجر به یک شبیه‌سازی کاملاً اصولی و منطبق بر رفتار واقعی سخت‌افزار می‌گردد.



شکل ۲۰: شبیه‌سازی مبدل ADC0804 و مانیتورینگ کدهای دیجیتال در نرم‌افزار Proteus با استفاده از داده‌های LTspice

۲.۵ شبیه‌سازی کامل مدار مبدل دیجیتال به آنالوگ (DAC) در نرم‌افزار Proteus

در ادامه پیاده‌سازی سیستم یکپارچه پردازش سیگنال، مرحله دوم بخش امتیازی به شبیه‌سازی فرآیند بازسازی سیگنال آنالوگ (Reconstruction) اختصاص یافت. هدف از این بخش، دریافت داده‌های دیجیتالِ تولیدشده در طبقه ADC، اعمال یک پردازش نرم‌افزاری پایه، و در نهایت تبدیل مجدد کدهای باینری به سیگنال پیوسته آنالوگ بود تا پایش رفتار سیستم در حوزه زمان تکمیل گردد.



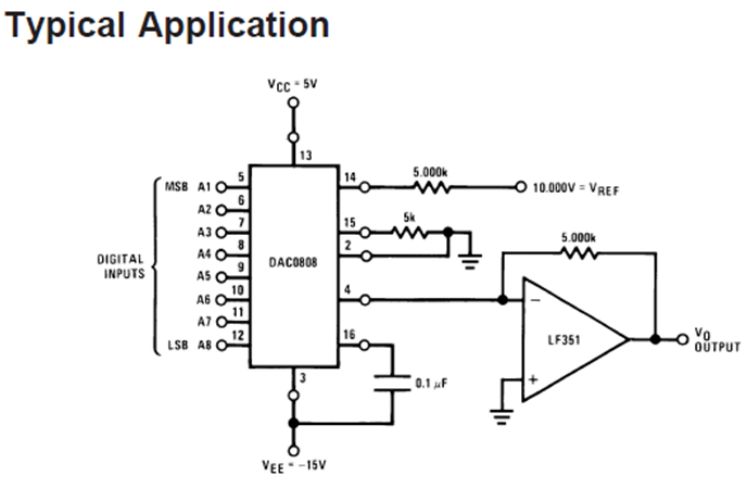
شکل ۲۱: فرایند پردازش سیگنال در زنجیره کامل (ADC-Micro-DAC)

۱. نقش پردازنده میانی (میکروکنترلر AT89C51): به منظور برقراری ارتباط بین طبقات دیجیتال و اثبات قابلیت اجرای الگوریتم‌های پردازش سیگنال دیجیتال، از یک پردازنده ۸ بیتی خانواده ۸۰۵۱ (AT89C51) به صورت نمادین بهره گرفته شد. در این پروژه، میکروکنترلر صرفاً برای اجرای یک عملیات منطقی ساده و پایه مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور، کدهای باینریِ سیگنال از طریق پورت ۱ (P1) خوانده شده و پس از اجرای دستور اسمبلیِ وارونه‌سازی منطقی (CPL A)، داده‌های پردازش‌شده جهت تبدیل به پورت ۲ (P2) ارسال گردید. این عملیات ساده در عمل باعث ایجاد یک اختلاف فاز ۱۸۰ درجه‌ای (قرینه‌سازی کامل) نسبت به سیگنال اصلیِ مچ دست می‌گردد. جهت هماهنگی کلاک پردازنده با نرخ نمونه‌برداری ADC و جلوگیری از بارِ محاسباتی مازاد در موتور شبیه‌ساز (SPICE)، فرکانس کاری پردازنده بر روی 1MHz تنظیم شد.

```
main.asm
ORG 0000H
MAIN:
    MOV A, P1     ; Read digital data from ADC via Port 1
    CPL A         ; Invert the bits (0s to 1s, and 1s to 0s)
    MOV P2, A     ; Send the processed data to DAC via Port 2
    SJMP MAIN     ; Infinite loop to keep running
END
```

شکل ۲۲: کد مربوط به انجام پردازش ساده و نمادین وارونه‌سازی

۲. پیکربندی مبدل آنالوگ به دیجیتال (تراشه DAC0808): برای تبدیل داده‌های دیجیتالِ پردازش‌شده به سیگنال پیوسته، از تراشه استاندارد DAC0808 استفاده گردید که در اسلایدهای درس نیز به آن پرداخته بودیم. مطابق دیتاشیت آن (dac0808.pdf)، به منظور راه‌اندازی اصولی و تطابق با مقادیر مرجع، تنظیمات زیر اعمال شد:



شکل ۲۳: نحوه بکارگیری DAC

- ولتاژهای مرجع و تغذیه: تغذیه متقارنِ +5V و -12V برای راه‌اندازی تراشه تأمین گردید. همچنین پایه‌های مرجع ولتاژ (VREF+ و VREF-) با استفاده از شبکه‌های مقاومتیِ 5kΩ به ترتیب به ولتاژ مثبت و زمین متصل شدند تا دامنه خروجی با ورودی کالیبره شود.

- مبدل جریان به ولتاژ (I-V Converter): با توجه به اینکه خروجی تراشه DAC0808 از نوع جریانی (IOUT) است، از یک تقویت‌کننده عملیاتی (Op-Amp) در پیکربندی فیدبک منفی به همراه یک مقاومت دقیق 5kΩ استفاده شد تا جریان خروجی به یک ولتاژ خطی، متناسب و قابل خوانش تبدیل گردد.
- پایدارسازی شبیه‌سازی: جهت جلوگیری از خطای همگرایی (Convergence Error) در موتور محاسباتی پروتئوس که ناشی از تغییرات پله‌ای و سریع بخش دیجیتال است، خازن‌های جبران‌ساز (Compensation Capacitors) مطابق با دیتاشیت قطعه به پایه‌های مربوطه اضافه گردید.

۳. ارزیابی و مانیتورینگ نهایی در حوزه زمان: برای تحلیل بصری و اثبات عملکرد صحیح کل زنجیره (ADC-Micro-DAC)، از یک اسیلوسکوپ دیجیتال (Digital Oscilloscope) در محیط پروتئوس استفاده شد. کانال A به سیگنال آنالوگ اولیه (خروجی شبیه‌سازی شده یا دیتای تزریقی LTspice) و کانال B به خروجی نهایی آپ‌امپ متصل گردید. با اجرای شبیه‌سازی، مشاهده شد که سیگنال خروجی (با فرکانس ۷ هرتز) تقریباً رفتار سینوسی سیگنال ورودی را بازتولید کرده است؛ با این تفاوت کلیدی که به دلیل پردازش نرم‌افزاری در میکروکنترلر، سیگنال نهایی کاملاً نسبت به محور افقی قرینه شده است. این رصد همزمان روی اسیلوسکوپ، نه تنها فرآیند تبدیل رفت و برگشتی آنالوگ به دیجیتال و بالعکس را تأیید می‌کند، بلکه صحت عملکرد کدهای پردازشی و عدم وجود تأخیر فاز مخرب در سیستم را به وضوح نشان می‌دهد.

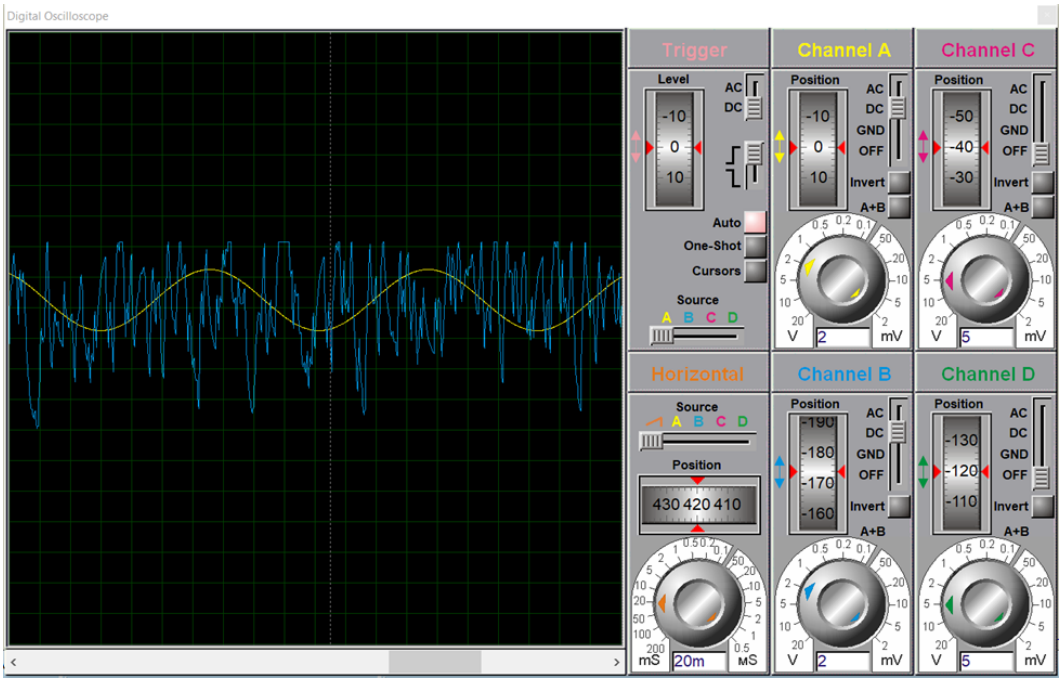
۳.۵ بهینه‌سازی پارامترهای شبیه‌سازی و تحلیل نرخ داده (Troubleshooting)

جهت اثبات این ادعا و بررسی اثر تغییر فرکانس‌های نمونه‌برداری و سرعت انتقال داده‌ها بر روی کیفیت سیگنال بازسازی‌شده، گراف‌های خروجی سیستم در سناریوهای مختلف استخراج شده‌اند. نتایج این شبیه‌سازی‌ها و شکل‌موج‌های مربوطه، در فایل‌های پیوست (RES1.pdf و RES2.pdf) ضمیمه و قابل ارزیابی می‌باشند.

در مراحل اولیه شبیه‌سازی، فرکانس‌های کاری مدار بر اساس مقادیر پیش‌فرض و رایج سخت‌افزاری (نظیر کلاک ۱۲ مگاهرتز برای میکروکنترلر و ۱۰۰ کیلوهرتز برای پردازشگر ADC) تنظیم گردید. با این حال، با توجه به اینکه سیگنال هدف (شبیه‌ساز حرکت مچ دست) دارای فرکانس بسیار پایینِ ۷ هرتز می‌باشد، این نرخ‌های پردازشِ بسیار بالا لزومی نداشته و تنها موجب ایجاد بار محاسباتی مازاد بر روی موتور شبیه‌ساز (SPICE) در نرم‌افزار Proteus گردید. پیامد این امر، مشاهده نویزهای فرکانس‌بالا و پله‌های کوانتیزاسیون ضخیم در سیگنال بازسازی‌شده بود.

جدول ۳: مقادیر اولیه پارامترهای شبیه‌سازی

قطعه	پارامتر	مقادیر اولیه
8051 Micro	Clock Frequency	12MHz
ADC0804 (CLK IN)	Frequency	100kHz
ADC0804 (WR)	Frequency	1kHz
Input Sine	Frequency	7Hz

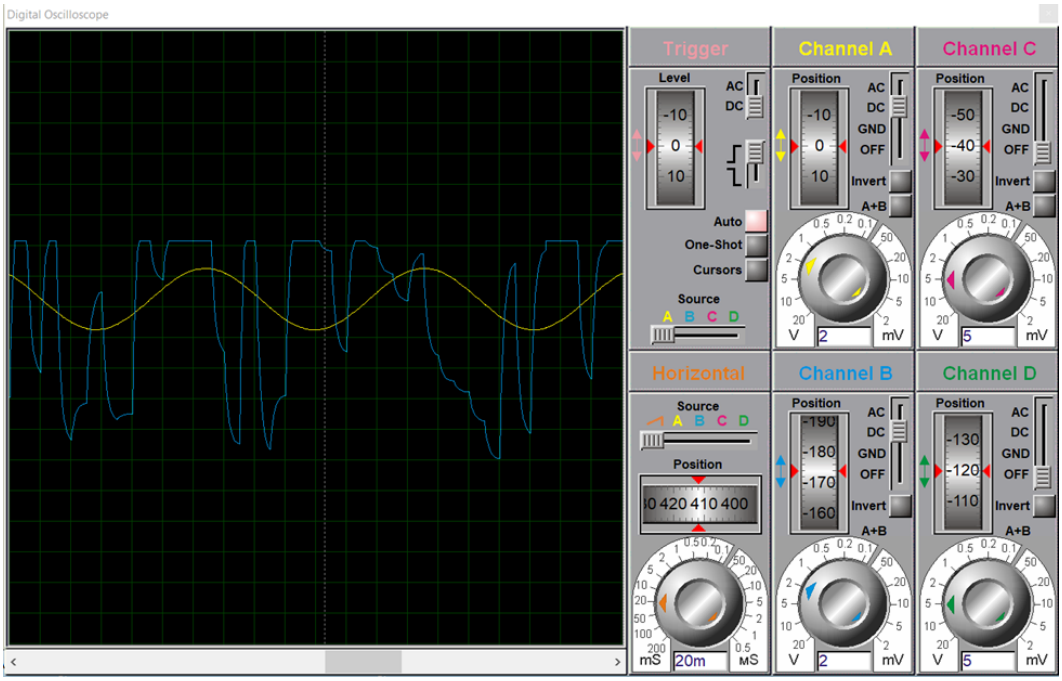


شکل ۲۴: نمایش اسیلوسکوپ مطابق با RES1.pdf

به منظور رفع این چالش و تطابق سیستم با اصول علمیِ نمونه‌برداری، فرکانس‌ها بهینه‌سازی شدند؛ بدین ترتیب که کلاک پردازنده به 1MHz، کلاک اصلی ADC به 10kHz و پالس نمونه‌برداری (WR) به 100Hz تقلیل یافت. این تنظیماتِ مهندسی‌شده، علاوه بر پایدارسازی کامل فرآیند شبیه‌سازی، منجر به تولید یک موج نرم‌تر و پیوسته در خروجی مبدل دیجیتال به آنالوگ (DAC) گردید.

جدول ۴: مقادیر بهینه‌شده پارامترهای شبیه‌سازی

قطعه	پارامتر	مقدار مناسب
8051 Micro	Clock Frequency	1MHz
ADC0804 (CLK IN)	Frequency	10kHz
ADC0804 (WR)	Frequency	100Hz
Input Sine	Frequency	7Hz



شکل ۲۵: نمایش اسیلوسکوپ مطابق با RES2.pdf