

به نام خدا



دانشگاه تهران
پردیس دانشکده‌های فنی
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر



کارگاه عمومی

دستور کار هفته دهم

بهار ۱۴۰۳

فهرست

❖ مقدمات

❖ تغییر ولتاژ به روش کنترل عرض پالس

❖ کنترل حلقه باز و کنترل حلقه بسته

❖ مبدل آنالوگ به دیجیتال میکروکنترلر

❖ کنترل تناسبی - انتگرالی در حالت حلقه بسته

❖ شرح آزمایش

این دستور کار شامل پنج گام است و هدف از آن آشنایی با مبدل آنالوگ به دیجیتال و
برخی مفاهیم کنترل خطی است.

❖ قطعات و دستگاه‌های مورد نیاز

✓ برد بورد

✓ مقاومت $1\text{ k}\Omega$ (دو عدد)

✓ خازن الکتrolیت $100\text{ }\mu\text{F}$

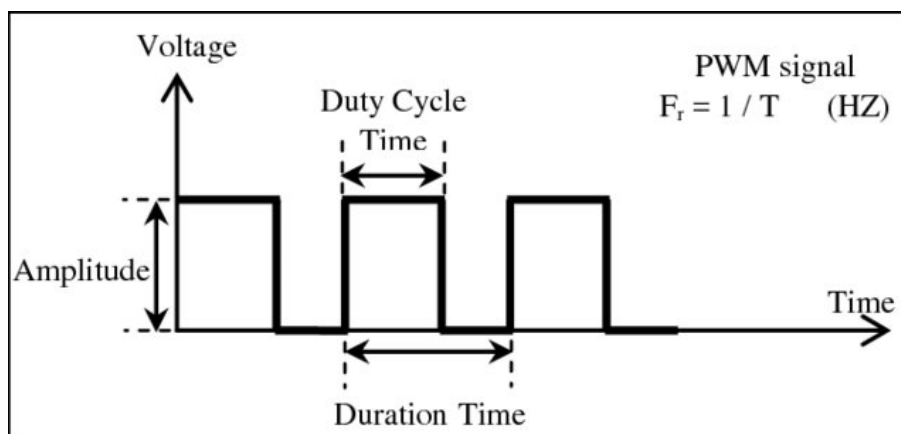
✓ برد آردوینو

✓ منبع تغذیه

در این جلسه قصد داریم با برخی از مفاهیم کنترلی آشنا شویم. این مفاهیم می‌تواند برای کنترل انواع متغیرها استفاده شود اما به دلیل سادگی، در این جلسه می‌خواهیم به کمک آن‌ها ولتاژ خروجی یکی از پایه‌های برد آردوینو را کنترل کنیم. پیش از شروع آزمایش، سه مفهوم مختلف در اینجا توضیح داده می‌شود که شناخت آن‌ها برای انجام آزمایش ضروری است. همچنین، در ویدیوی این جلسه این موارد به تفصیل توضیح داده شده است. پیش از شروع جلسه حتماً ویدیوهای راه‌اندازی مبدل آنالوگ به دیجیتال در آردوینو را مشاهده کنید تا بتوانید مراحل را به درستی دنبال کنید.

❖ تغییر ولتاژ به روش کنترل عرض پالس

یکی از مفاهیمی که امروزه به نحو گسترده‌ای در زمینه الکترونیک قدرت به کار می‌رود، تنظیم سطح ولتاژ (و نوع آن) از طریق کلیدزنی است. در ساده‌ترین حالت در صورتی که یک ولتاژ مشخص و ثابت در ورودی داشته باشیم و بخواهیم ولتاژ کمتری از آن در خروجی داشته باشیم، کافی است تا شروع به قطع و وصل منظم ولتاژ کنیم. در این حالت، در بخشی از زمان ولتاژ خروجی صفر بوده و در بخش دیگری از زمان ولتاژ خروجی دقیقاً برابر ولتاژ ورودی (ولتاژ ۱۰۰٪) است. اگر قطع و وصل ولتاژ با سرعت بالا انجام شود و در خروجی اجزایی مثل سلف و خازن داشته باشیم، خروجی نه ولتاژ صفر و نه ولتاژ ۱۰۰٪ بلکه متوسط آن‌ها را خواهد دید. یعنی ما در خروجی ولتاژی خواهیم داشت که بین ولتاژ صفر و ولتاژ ۱۰۰٪ (یا همان ولتاژ ورودی) خواهد بود.



شکل ۱

شکل ۱ تصویر ولتاژ خروجی را در طول زمان نشان می‌دهد. در این شکل موج مربعی، می‌توان نشان داد که متوسط ولتاژی که در خروجی ظاهر می‌شود از رابطه $D \times V_{in}$ به دست می‌آید که در این رابطه V_{in} ولتاژ ثابت ورودی (همان amplitude در شکل ۱) و D نیز Duty cycle یا نسبت مدت زمان وصل به کل مدت زمان است (نسبت Duty Cycle به Duration Time در شکل ۱). D می‌تواند به صورت یک عدد در بازه صفر تا یک یا به درصد بیان شود. به این ترتیب با کنترل مقدار D ، می‌توان ولتاژ خروجی را تغییر داد. اگر ولتاژ ورودی در مدت بیشتری از کل زمان دوره وصل باشد، ولتاژ خروجی به مقدار V_{in} نزدیک‌تر می‌شود و بالعکس. در حالت مرزی، اگر D برابر یک (۱۰۰٪) باشد، یعنی ورودی همیشه وصل باشد، خروجی با ورودی برابر خواهد بود و اگر D برابر صفر (۰٪) باشد، یعنی ورودی همیشه قطع

باشد، ولتاژ خروجی برابر صفر است. با تنظیم D بر روی 0.5 (50%) متوسط ولتاژ خروجی دقیقا نصف ولتاژ ورودی خواهد بود. در این آزمایش شما با تغییر D قصد تنظیم و کنترل ولتاژ در یکی از پایه‌های بورد آردوینو را دارید.

❖ کنترل حلقه باز و کنترل حلقه بسته

اکنون که رابطه ولتاژ خروجی و ولتاژ ورودی به صورت یک رابطه مشخص است، می‌توان از طریق این رابطه مقدار D را متناسب با اینکه چه ولتاژی در خروجی لازم داریم به دست آورده و آن را تنظیم کنیم. در این حالت ما هیچ عکس‌العملی بر اساس تغییرات خروجی انجام نمی‌دهیم و صرفا از رابطه تحلیلی سیستم (سیستم در حال حاضر یک منبع تولید ولتاژ با عرض پالس متغیر است) استفاده می‌کنیم. به این حالت، کنترل حلقه باز گفته می‌شود. نکته‌ای که کنترل حلقه باز دارد آن است که با تغییر باری که در خروجی وجود دارد، ممکن است ولتاژ خروجی افت کند و سیستم هیچ عکس‌العملی نشان نمی‌دهد که بخواهد D را تغییر دهد. لذا ممکن است در خروجی ولتاژی داشته باشیم که با آن چه مورد انتظار ماست متفاوت باشد.

در نقطه مقابل روش فوق، کنترل حلقه بسته قرار دارد. در این روش، خروجی اندازه‌گیری شده و ورودی سیستم (که در این آزمایش همان D است) بر اساس آن تعیین می‌شود. در این حالت رابطه تحلیلی بیان‌شده در قسمت قبل نقشی در تعیین D ندارد، بلکه D بر اساس تفاوت ورودی و خروجی تعیین می‌شود. برای تقریب به ذهن این مثال را در نظر بگیرید. فرض کنیم می‌خواهیم در خروجی ولتاژ 3 V را داشته باشیم. در روش حلقه بسته ما ولتاژ خروجی را اندازه‌گیری می‌کنیم. اگر ولتاژ خروجی همان 3 V بود، هیچ تغییری در سیستم لازم نیست. اگر ولتاژ کمتر از 3 V بود (یعنی خروجی با مقدار مطلوب تفاوت داشت یا یک خطا بین خروجی و مقدار مطلوب وجود داشت) ما اندکی مقدار D را افزایش می‌دهیم تا ولتاژ خروجی افزایش یابد و مجددا این کار را تکرار می‌کنیم تا به مقدار مطلوب برسیم. به نحو مشابه، اگر ولتاژ خروجی از مقدار مطلوب بزرگتر بود، مقدار D را کم می‌کنیم تا به عدد مناسب برسیم. مفهوم کنترل حلقه بسته اندازه‌گیری خروجی و تغییر سیستم متناسب با خطایی است که بین خروجی تا مقدار مطلوب وجود دارد. (سعی کنید مثال فوق را در مورد تنظیم دما برای خود تکرار کنید.) به اندازه‌گیری خروجی در ادبیات مهندسی کنترل، feedback یا بازخورد نیز گفته می‌شود. یعنی در روش کنترل حلقه بسته ما نیاز به فیدبک یا بازخورد از خروجی داریم تا براساس آن سیستم را تنظیم کنیم.

❖ مبدل آنالوگ به دیجیتال ADC

چنان‌که در بالا اشاره شد در سیستم‌های کنترلی حلقه‌بسته به فیدبک متغیر خروجی نیاز داریم. برای مثال، اگر قصد کنترل ولتاژ را داشته باشیم، بایستی آن ولتاژ را اندازه‌گیری کرده و در محاسبات سیستم کنترلی وارد کنیم. چون در این آزمایش، هدف کنترل ولتاژ است لذا ما قصد داریم ولتاژ نقطه خاصی را نسبت به مرجع پتانسیل به کمک آردوینو اندازه‌گیری کنیم. کمیت‌های دنیای واقعی آنالوگ هستند اما پردازش در میکروکنترلر به صورت دیجیتال انجام می‌شود. لذا لازم است تا ولتاژ که یک کمیت آنالوگ است به یک کمیت دیجیتال تبدیل شده و به میکروکنترلر داده شود تا سایر پردازش‌ها برای کنترل ولتاژ خروجی انجام شود. این کار همان‌طور که در درس نیز توضیح داده شده است، توسط یک مبدل آنالوگ به دیجیتال یا به اختصار ADC (Analog-to-Digital Converter) انجام می‌شود. مفاهیم مبدل

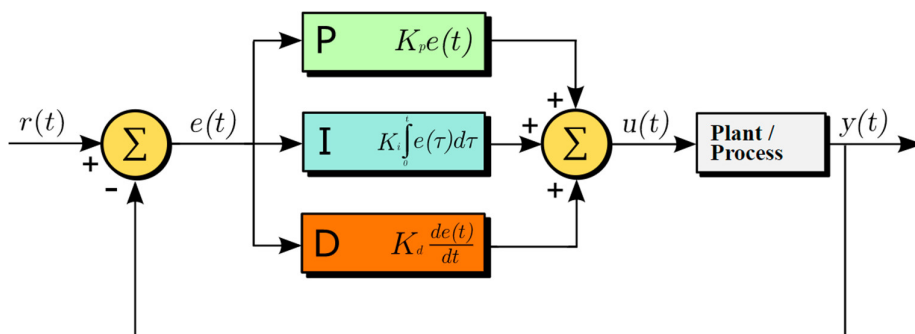
آنالوگ به دیجیتال در کلاس درس توضیح داده شده است. نحوه پیاده‌سازی این مبدل در آردوینو و همچنین نحوه نمایش مقدار قرائت‌شده بر روی کامپیوتر در ویدیوهای آموزشی این جلسه قابل مشاهده است. برای پیاده‌سازی گام‌ها به فعال سازی و استفاده از ADC نیاز خواهید داشت.

❖ کنترل تناسبی – انتگرالی در حالت حلقه بسته

نحوه پیاده‌سازی سیستم کنترل در ساده‌ترین حالت می‌تواند به کمک مفاهیم ریاضی (ضرب، انتگرال و مشتق) باشد. برای درک این مطلب شکل ۲ را در نظر بگیرید. در این شکل ابتدا تفاضل مقدار مطلوب $(r(t))$ و خروجی $(y(t))$ به دست می‌آید. این مقدار که در شکل با $e(t)$ نمایش داده شده است همان خطای بین خروجی و مقدار مطلوب است که در قسمت قبل در مورد آن صحبت شد. در شکل ۲ سه نوع عملکرد بر اساس خطا ترسیم شده است. اولین حالت که با P (Proportional) نمایش داده شده است، حالت تناسبی است، یعنی هر مقدار خطایی که در سیستم وجود داشته باشد در یک ضریب ضرب شده و به سیستم اعمال می‌شود. در حالتی که این جلسه پیاده می‌شود، یعنی خطای بین ولتاژ خروجی و مقدار مطلوب با ضرب در یک عدد ثابت (ضریب تناسبی یا K_p) به عنوان D به سیستم اعمال می‌شود.

عملکرد دوم که با I (Integral) در شکل ۲ نمایش داده شده است، حالت انتگرالی است. در این حالت، انتگرال خطا بین خروجی و ورودی گرفته شده و سپس در یک عدد ثابت (ضریب انتگرالی یا K_i) ضرب شده و به سیستم داده می‌شود. مشخص است که به دلیل وجود انتگرال، گذشته وضعیت خطا نیز در تنظیم سیستم تاثیرگذار است. حالت سوم مربوط به مشتق‌گیری یا D (derivative) است که در این حالت، نرخ تغییرات (همان مشتق) خطای بین خروجی و مقدار مطلوب بر روی تنظیم سیستم تاثیرگذار است.

یک سیستم کنترلی می‌تواند هر یک از حالت‌های فوق به تنهایی یا ترکیبی از آن‌ها باشد. مثلاً کنترل تناسبی-انتگرالی که در این جلسه در نهایت پیاده‌سازی می‌کنید، ترکیب دو حالت P و I است. یعنی خروجی تناسبی با خروجی انتگرالی جمع شده و به سیستم داده می‌شود.



شکل ۲

هر یک از حالت‌های کنترلی فوق و تغییر پارامترهای آن تاثیرهای متفاوتی بر روی نحوه کنترل دارند که بحث بسیار مفصلی است که در درس سیستم‌های کنترل خطی به آن پرداخته می‌شود. در اینجا فقط برای آشنایی به یک نکته اشاره می‌شود. برای مثال در درس سیستم‌های کنترل خطی با تحلیل و به کمک روابط نشان داده می‌شود که استفاده از حالت تناسبی به تنهایی دارای خطای حالت ماندگار است. این عبارت به این معناست که اگر مثلاً بخواهیم

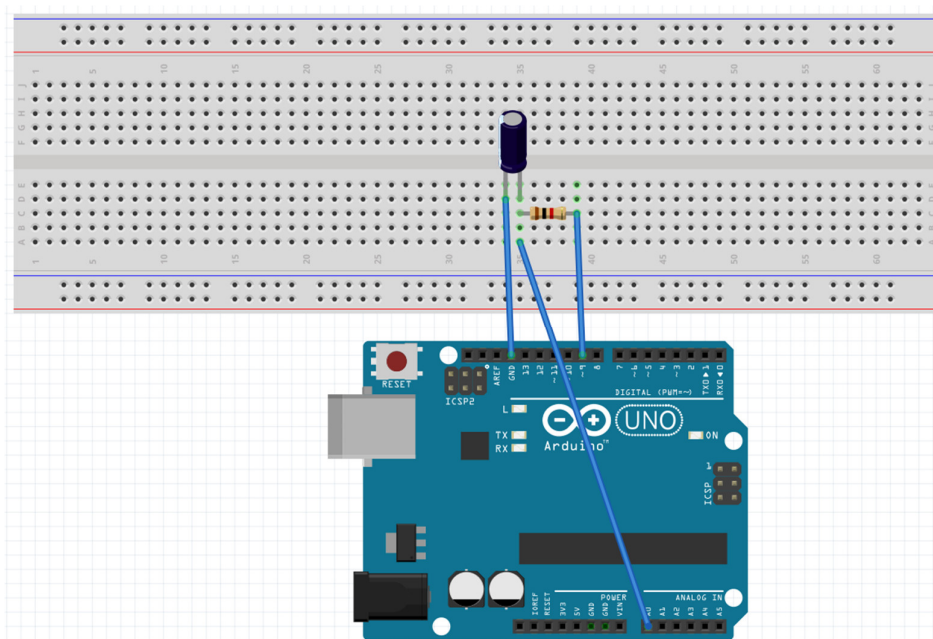
در خروجی به ولتاژ 3 V برسیم، به کمک روش تناسبی همیشه خروجی نسبت به مقدار مطلوب 3 V مقداری اختلاف خواهد داشت. البته سیستم در حال کنترل مقدار خروجی هست، یعنی با تغییر بار یا مسائل دیگر، کنترل انجام می‌شود اما خروجی همیشه نسبت به مقدار مطلوب فاصله دارد. در این آزمایش خواهید دید که استفاده از حالت انتگرالی در کنار حالت تناسبی، خطای حالت ماندگار را صفر می‌کند. مناسب است ذکر شود که با تغییر ضرایب سه حالت فوق، یک سیستم کنترلی ممکن است سریع‌تر یا کندتر شود، حالت نوسانی پیدا کند یا حتی حالت ناپایدار پیدا کند. لذا تحلیل‌هایی برای انتخاب درست ضرایب لازم است که درس سیستم‌های کنترل خطی یاد خواهید گرفت.

❖ شرح آزمایش

در مرحله اول و پیش از پیاده‌سازی سیستم کنترلی، بایستی ADC میکرو را فعال کرد و مقدار آن را با کمک serial plot در کامپیوتر نمایش دهید. با اطمینان از عملکرد صحیح واحد ADC می‌توان گام‌های بعد را دنبال کرد.

گام ۱: منبع تغذیه DC را روشن کرده و مقدار آن را بر روی ولتاژی در حدود 2.5 V تنظیم کنید. حال این ولتاژ را به کمک ADC میکروکنترلر اندازه‌گیری کرده و مقدار آن را بر روی کامپیوتر نمایش دهید. همچنین امتحان کنید که با تغییر ولتاژ منبع تغذیه، قرائت میکروکنترلر از ولتاژ به درستی تغییر کند. برای این کار، ولتاژ منبع تغذیه را از مقدار 2.5 V کم و زیاد کنید و مشاهده کنید که آیا قرائت میکرو نیز به نحو صحیح، تغییرات ولتاژ را دنبال می‌کند یا خیر.

در ادامه مداری برای تولید ولتاژ و کنترل آن بایستی بسته شود. شکل ۳ مدار ساده آزمایش را نشان می‌دهد. در این آزمایش برد آردوینو ولتاژ مربعی با عرض پالس متغیر تولید می‌کند و با اندازه‌گیری آن قرار است که حالت‌های مختلف کنترلی را پیاده‌سازی کرده و اثر آن‌ها را مشاهده کنید. رویه کامل آزمایش در ویدیوی این جلسه آورده شده و اینجا تنها برخی نکات و گام‌ها بیان می‌شود. لذا حتما ویدیوهای جلسه را پیش از جلسه مشاهده کنید.



شکل ۳

در مدار آزمایش به نکات زیر توجه کنید:

- ۱- فقط برخی پایه‌های برد آردوینو می‌توانند شکل موج با عرض پالس متغیر ایجاد کنند. بنابراین بایستی از پایه‌ای در خروجی استفاده کنید که این قابلیت را داشته باشد.
- ۲- از یک مقاومت $1\text{ k}\Omega$ به صورت سری با یک خازن الکترولیتی $100\text{ }\mu\text{F}$ به عنوان بار خروجی برد استفاده کنید. به جهت وصل پایه‌های خازن نیز دقت کنید.
- ۳- برای دیدن اثر تغییر بارگذاری بر روی مدار، لازم است بار خروجی را به نحوی تغییر دهید. در چنین حالت‌هایی می‌توانید یک مقاومت $1\text{ k}\Omega$ دیگر به صورت موازی با خازن قرار داده و سپس آن را بردارید.
- ۴- برای گرفتن فیدبک از پایه مثبت خازن استفاده کنید (مطابق شکل ۳).

گام ۲: در حالت کنترل حلقه باز، تاثیر بارگذاری را بر روی خروجی نشان دهید. در این حالت مثلاً D را برای رسیدن به یک مقدار مطلوب در کد خود تعریف کنید. سپس اثر بارگذاری بر روی ولتاژ خروجی را مشاهده کنید. آیا کنترل در حالت حلقه باز ولتاژ مناسب را در خروجی تولید کرده است؟

گام ۳: در حالت کنترل حلقه بسته و فقط در حالت کنترل تناسبی، با دو مقدار $K_p = 1$ و $K_p = 15$ خروجی را نمایش دهید و توضیح دهید که تاثیر افزایش ضریب تناسبی بر خطای حالت ماندگار چیست (تفاوت بین ولتاژی که در خروجی ایجاد شده با ولتاژی که به عنوان مقدار مطلوب تنظیم کرده‌اید).

گام ۴: در سه حالت زیر، عملکرد مدار را نمایش دهید. در هر مرحله نیز با گذاشتن و برداشتن مقاومت $1\text{ k}\Omega$ به صورت موازی با خازن، عملکرد مدار را در تغییر بار نشان دهید. اول ذکر کنید که تاثیر اضافه شدن حالت انتگرالی چیست. سپس توضیح دهید که افزایش و کاهش ضریب انتگرالی، چه تاثیری بر سرعت سیستم کنترل دارد.

حالت اول: $K_i = 1$ و $K_p = 1$

حالت اول: $K_i = 0.1$ و $K_p = 1$

حالت اول: $K_i = 0.1$ و $K_p = 10$

گام ۵: در حالت کنترل حلقه بسته و با مقادیر $K_p = 10$ و $K_i = 0.1$ به کمک Serial Plotter رفتار ولتاژ خروجی را در تغییر بار (هنگام اضافه کردن مقاومت و برداشتن آن) نشان دهید. آیا کنترل ولتاژ خروجی به نحو مناسب انجام می‌شود؟