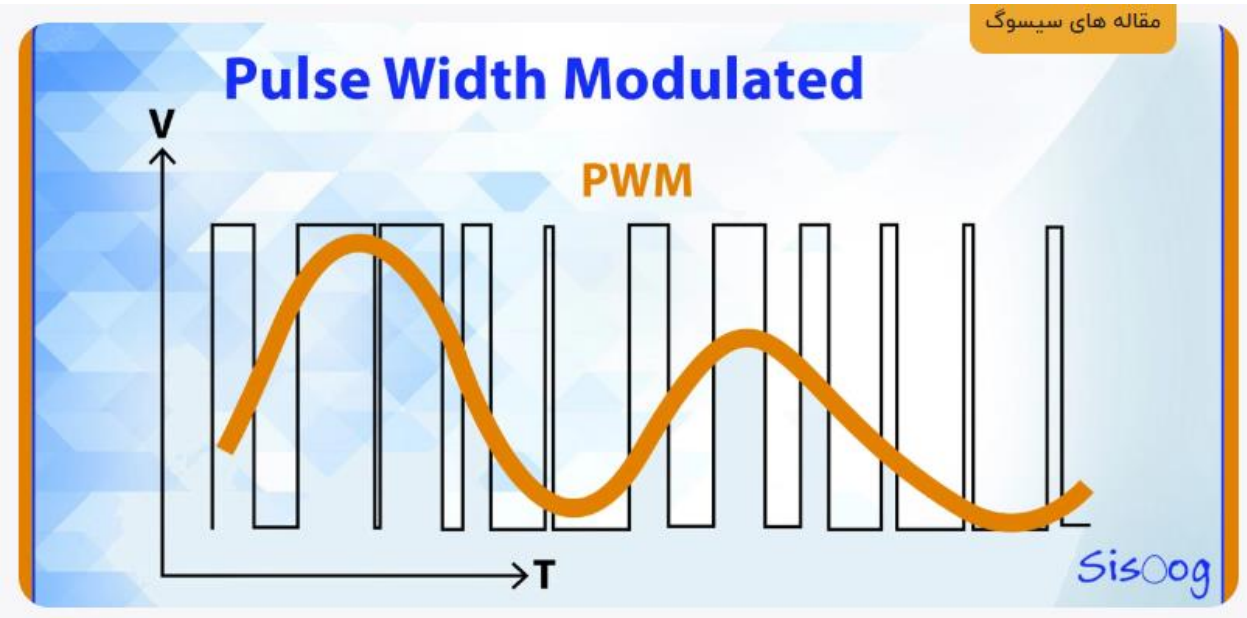
موج PWM چیست؟ (مدولاسیون پهنای پالس به زبان ساده)



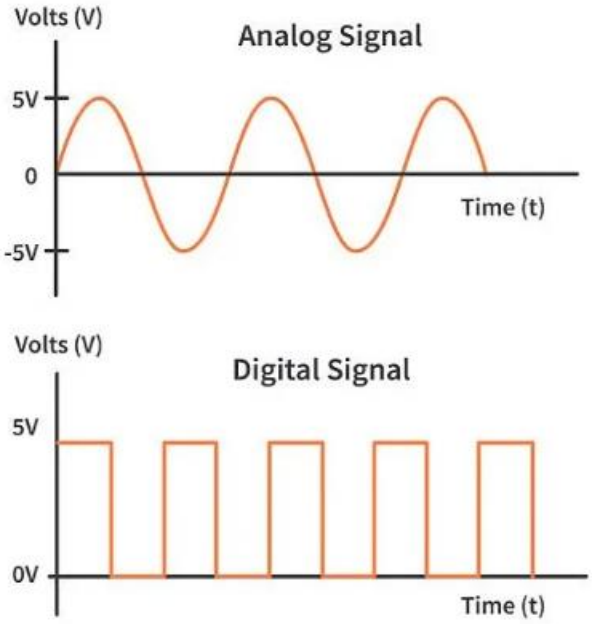
مدولاسیون پهنای پالس (Pulse Width Modulation) یا PWM تکنیکی است که برای کنترل دستگاه‌های آنالوگ با استفاده از سیگنال دیجیتال استفاده می‌شود.

با استفاده از این تکنیک، می‌توانیم موتورها، چراغ‌ها و تجهیزات دیگر را با استفاده از سیگنال PWM تولیدشده کنترل کنیم. نکته مهمی که در اینجا باید به آن توجه کرد این است که PWM یک سیگنال آنالوگ واقعی نیست. در واقع، PWM یک سیگنال دیجیتال است که به گونه‌ای اصلاح شده که سیگنال آنالوگ باشد.

Pwm چیست؟

سیگنال‌های دیجیتال سیگنال‌هایی هستند که می‌توان آن‌ها را با 0 یا 1 نمایش داد. از طرف دیگر، سیگنال‌های آنالوگ دارای مقادیر بیشتری از مقادیر ممکن 0 یا 1 هستند. هر دوی این سیگنال‌ها در الکترونیک استفاده می‌شوند. اگر نیاز به ورودی آنالوگ داشته باشیم، می‌توانیم داده‌های آنالوگ بلادرنگ را از یک سنسور دریافت کنیم و سپس با

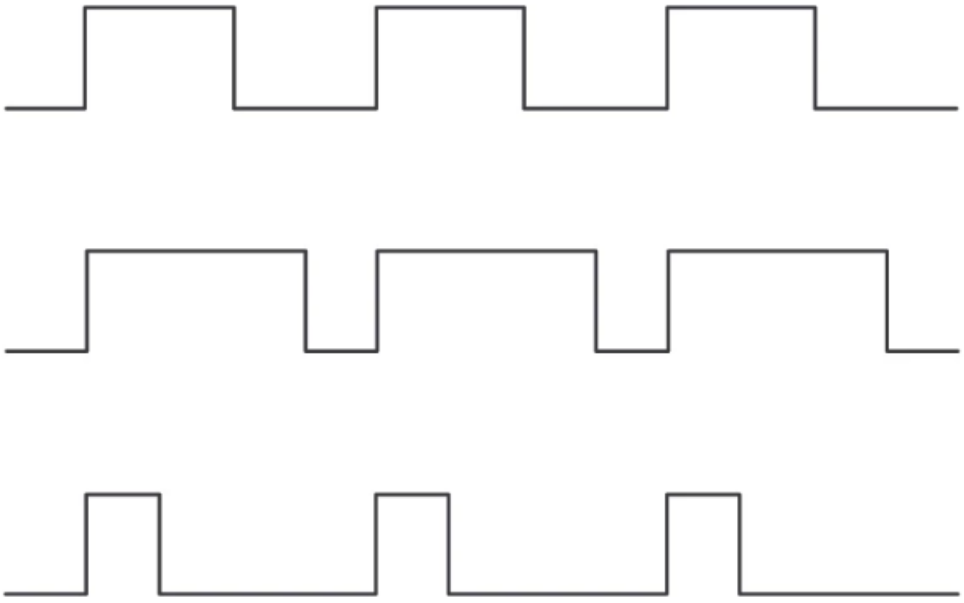
استفاده از مبدل آنالوگ به دیجیتال (ADC) آن را به داده‌های دیجیتال برای میکروکنترلر تبدیل کنیم.



اما اگر نیاز به کنترل یک دستگاه آنالوگ با استفاده از میکروکنترلر داشته باشیم، باید چه کنیم؟ برخی از میکروکنترلرها دارای مبدل دیجیتال به آنالوگ (DAC) داخلی برای خروجی سیگنال آنالوگ واقعی به منظور کنترل دستگاه‌های آنالوگ هستند و حتی می‌توان از DAC خارجی نیز استفاده کرد. اما تولید DAC از نظر هزینه نسبتاً گران است و همچنین فضای فیزیکی سیلیکونی زیادی را اشغال می‌کند. برای غلبه بر این مسائل و دستیابی آسان به عملکرد DAC، می‌توانیم از یک روش بسیار مقرون به صرفه‌تر، یعنی تکنیک PWM، استفاده کنیم.

با قطعات الکتریکی می‌توان جریان تحویلی مدار را کنترل کرد، حتی اگر تنها کنترلی که داریم روشن و خاموش کردن منبع تغذیه باشد. در واقع، برای کنترل جریان تحویلی به دستگاه، می‌توانیم به سرعت منبع تغذیه را به صورت الگوی روشن و خاموش کنیم. روشن نگه داشتن منبع برای مدتی بیشتر از مدت زمان خاموش، میانگین سطح توان را افزایش می‌دهد و انجام عکس آن، سطح توان متوسط را کاهش می‌دهد.

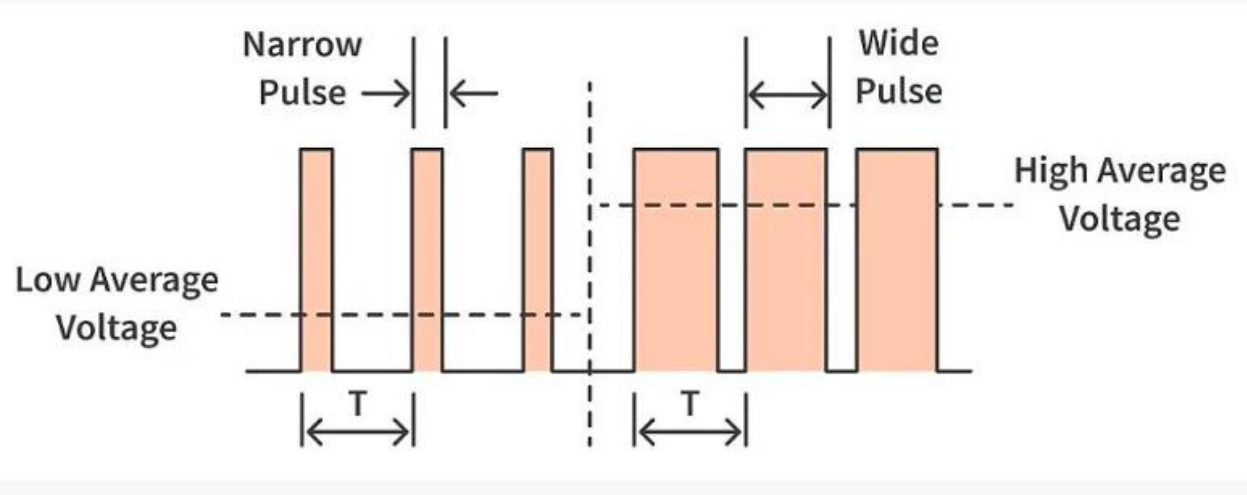
می‌توانیم طیف متنوعی از سرعت‌ها (آنالوگ) را برای موتورها و سایر بارها تولید کنیم، حتی اگر در واقعیت فقط بین دو حالت ممکن روشن و خاموش (دیجیتال) سوئیچ کنیم. این دقیقاً همان مفهوم سیگنال PWM است.



با یک مثال، مفهوم PWM را واضح‌تر بیان می‌کنیم. تصور کنید یک پنکه سقفی در خانه خود دارید که بدون تنظیم‌کننده سرعت است و می‌توانید آن را روشن کنید تا به تدریج به حداکثر سرعت برسد یا می‌توانید آن را خاموش کنید. حال اگر از بخواهید فن را با حداکثر 50 درصد سرعتش روشن کنید باید چه کنید؟ آیا بدون تنظیم‌کننده سرعت این کار امکان‌پذیر است؟ در حالی که انجام این کار واقعاً توصیه نمی‌شود، می‌توانید با کمی بازی با سوئیچ پنکه سقفی به این سرعت دست پیدا کنید.

می‌دانیم که پنکه در لحظه‌ای که آن را روشن می‌کنیم فوراً به حداکثر سرعت نمی‌رسد و همچنین بلافاصله بعد از خاموش شدن متوقف نمی‌شود. سوئیچ را روشن کنید، صبر کنید تا ببینید فن به 50 درصد سرعت رسیده است و سپس آن را خاموش کنید. با کم شدن سرعت، دوباره آن را روشن کنید. با استفاده از این تأخیر، می‌توانیم پنکه را روشن یا خاموش کنیم، آن را سریع‌تر یا کندتر کنیم تا به سرعتی که می‌خواهیم برسیم. نکته مهمی که در اینجا باید به آن توجه داشت این است که تعویض مداوم حالت روشن و خاموش پنکه باعث می‌شود که جریان زیادی را مصرف کند، بنابراین باز هم تکرار

می‌کنیم که انجام این کار توصیه نمی‌شود و آنچه بیان شد تنها یک مثال برای آشنایی با مفهوم PWM بود.



روشن و خاموش شدن یک پالس (Pulse) است. مدت زمانی که پالس در حالت بالا (On یا روشن) نگه داشته می‌شود، عرض یا پهنای پالس (Pulse Width) نام دارد. پارامتر T کل زمان صرف شده برای تکمیل یک چرخه (Cycle) را نشان می‌دهد. مدولاسیون نیز به تغییر سیگنال اصلی برای دریافت سیگنال مورد نظر اشاره دارد. بنابراین، در واقع ما یک سیگنال یا پالس را طوری تغییر می‌دهیم که برای مدت زمانی که نیاز داریم، روشن باشد و به همین دلیل است که به آن مدولاسیون پهنای پالس می‌گوییم.

کاربردهای PWM

موج PWM (Pulse Width Modulation) یا مدولاسیون عرض پالس، یکی از تکنیک‌های پرکاربرد در الکترونیک و مهندسی است که برای کنترل و تنظیم توان، سیگنال و سرعت در سیستم‌های مختلف مورداستفاده قرار می‌گیرد. در این تکنیک، پهنای پالس سیگنال دیجیتال برای کنترل مشخصه‌های مختلف یک سیستم تغییر می‌کند. این روش به دلیل کارایی بالا و سادگی پیاده‌سازی، در بسیاری از کاربردهای صنعتی، خانگی و تحقیقاتی به کار گرفته می‌شود.

1. کنترل سرعت موتورهای الکتریکی

یکی از رایج‌ترین کاربردهای PWM در کنترل سرعت موتورهای الکتریکی، به‌ویژه موتورهای DC و موتورهای بدون جاروبک (BLDC) است. با تغییر پهنای پالس، می‌توان ولتاژ مؤثر ورودی به موتور را تنظیم کرد و در نتیجه سرعت چرخش آن را به‌صورت دقیق کنترل نمود. این ویژگی در ماشین‌آلات صنعتی، خودروهای الکتریکی و دستگاه‌های خانگی مانند جاروبرقی یا پنکه‌ها استفاده می‌شود.

2. کنترل روشنایی LED

PWM به‌عنوان یک روش مؤثر برای تنظیم روشنایی‌LED ها شناخته می‌شود. با تغییر نسبت چرخه کاری (Duty Cycle) ، شدت نور LEDها را می‌توان کنترل کرد. این ویژگی در نمایشگرها، چراغ‌های هوشمند و سیستم‌های روشنایی محیطی استفاده می‌شود. مزیت این روش نسبت به کاهش جریان مستقیم این است که بهره‌وری انرژی بالاتری دارد و طول عمرLEDها افزایش می‌یابد.

3. کاربرد در منابع تغذیه سوئیچینگ

در منابع تغذیه سوئیچینگ (Switching Power Supplies)، PWM نقش کلیدی در تبدیل انرژی و تنظیم ولتاژ و جریان دارد. با تغییر پهنای پالس، خروجی این منابع می‌تواند با دقت بالا تنظیم شود. این کاربرد در دستگاه‌های الکترونیکی مانند لپ‌تاپ‌ها، شارژرهای گوشی و تجهیزات پزشکی بسیار مهم است.

4. انتقال داده و مخابرات

در سیستم‌های مخابراتی، PWM می‌تواند برای انتقال داده‌ها و مدولاسیون سیگنال‌های حامل استفاده شود. این تکنیک امکان رمزگذاری اطلاعات روی سیگنال‌ها را فراهم می‌کند و در برخی کاربردهای رادیویی و ارتباطات بی‌سیم استفاده می‌شود.

5. کنترل دما

PWM در کنترل دما نیز به کار می‌رود، به‌ویژه در سیستم‌هایی که از فن‌های خنک‌کننده استفاده می‌کنند. با تنظیم پهنای پالس، سرعت چرخش فن کنترل می‌شود تا دمای

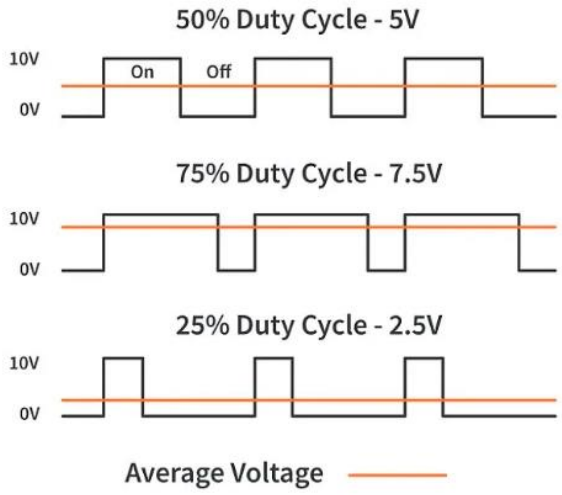
مطلوب حفظ گردد. این تکنیک در کامپیوترها، یخچال‌ها و سیستم‌های تهویه‌مطبوع کاربرد دارد.

به‌طورکلی، PWM به دلیل انعطاف‌پذیری بالا، مصرف انرژی کم و عملکرد دقیق، یک ابزار اساسی در طراحی سیستم‌های الکترونیکی و کنترل است. این روش به مهندسان امکان می‌دهد تا تجهیزات کارآمدتر، هوشمندتر و کم‌هزینه‌تری تولید کنند.

چرخه کاری PWM

در سیگنال‌ها، ما منطق بالا را به عنوان "On" تعریف می‌کنیم. برای نشان دادن مدت زمان"On" ، از مفهوم چرخه وظیفه یا چرخه کاری (Duty Cycle) استفاده می کنیم. به عبارت ساده، چرخه وظیفه درصد زمانی را نشان می‌دهد که یک سیگنال دیجیتال در یک بازه یا دوره "On" یا روشن است. چرخه وظیف به صورت درصد (%) یا عددی در بازه 0 تا 1 بیان می‌شود.

یک سیگنال با حداکثر ولتاژ 10 ولت را در نظر بگیرید. اگر سیگنال یک ثانیه طول بکشد تا یک چرخه کامل شود و سیگنال برای 0.5 ثانیه روشن و برای 0.5 ثانیه دیگر خاموش باشد، چرخه وظیفه 50٪ است و 5 ولت را به عنوان میانگین ولتاژ خروجی دریافت خواهیم کرد. اگر سیگنال برای 0.75 ثانیه روشن و برای 0.25 ثانیه دیگر خاموش باشد، چرخه کاری 75٪ و خروجی 7.5 ولت خواهد بود. تصویر زیر نشان‌دهنده سیگنال‌هایی با چرخه‌های کاری مختلف و میانگین ولتاژ تولید شده توسط آن‌ها است.



چرخه کاری را می‌توان طبق فرمول زیر محاسبه کرد:

$$D = \frac{T_{on}}{Period} * 100$$

که در آن،

D درصد چرخه وظیفه، Tonمدت زمان On بودن سیگنال و Period کل زمان یک سیکل (Ton + Toff) است.

پس از محاسبه چرخه وظیفه، می‌توانیم ولتاژ متوسط سیگنال را با استفاده از فرمول زیر محاسبه کنیم:

$$V_{avg} = \frac{D}{100} * V_{max}$$

که در آن، Vavg ولتاژ متوسط سیگنال، D چرخه وظیفه برحسب درصد و Vmaxحداکثر ولتاژ سیگنال است.

فرکانس PWM

درست مانند چرخه وظیفه، فرکانس نیز یک مؤلفه اصلی است که رفتار سیگنال PWM را تعریف می‌کند. تعداد دفعاتی که یک سیگنال در هر ثانیه تکرار می‌شود فرکانس است. فرکانس مورد نیاز بستگی به برنامه دارد. به عنوان مثال، اگر بخواهیم هنگام کنترل LEDها نور مناسبی داشته باشیم، فرکانس سیگنال PWM باید به اندازه کافی بالا باشد. هنگامی که LED در حال روشن و خاموش شدن است، چرخه کاری 20٪ در 1 هرتز برای چشم انسان خوشایند نیست. با این حال، اگر فرکانس را به 100 هرتز افزایش دهیم، شاهد کاهش نور مناسب LED خواهیم بود.

تولید PWM در میکروکنترلرها

راه‌های مختلفی برای تولید سیگنال PWM وجود دارد. می‌توانیم از یک آی سی تایمر 555 یا حتی یک مدار مقایسه‌کننده برای تولید PWM استفاده کنیم. اما ساده‌ترین راه برای مشاهده عملکرد PWM استفاده از میکروکنترلر است. می‌توانیم یک سیگنال PWM را با بردهای میکروکنترلر معروف مانند Arduino Uno فقط با تایپ کردن چند خط در کدمان تولید کنیم.

مدارهای PWM موجود در میکروکنترلرها از تایمرها استفاده می‌کنند، اما به صورت داخلی به پین‌های خاصی متصل هستند. برای مثال، اگر بخواهیم یک سیگنال PWM برای تغییر سرعت موتور DC با آردوینو Uno تولید کنیم، می‌توانیم از تابع آنالوگ آردوینو analogWrite(pin, value) استفاده کنیم. با این حال، نکته مهمی که در اینجا باید به آن توجه کرد این است که همه پین‌های Arduino Uno قادر به تولید سیگنال PWM نیستند. در مورد آردوینو Uno، تنها 6 پایه ورودی/خروجی (3،5،6،9،10،11) وجود دارد که از تولید PWM پشتیبانی می‌کنند که با یک tilde (~) در جلوی شماره پین خود در برد مشخص شده‌اند.

تابع analogWrite() از مقادیر 0 تا 255 پشتیبانی می‌کند، که عبور از 0 نشان‌دهنده 0٪ چرخه کاری و 255 نشان‌دهنده یک چرخه کاری 100٪ است.

```
1 analogWrite(PWM_PIN, 64);   // 25% Duty Cycle or 25% of max speed
2 analogWrite(PWM_PIN, 127);  // 50% Duty Cycle or 50% of max speed
3 analogWrite(PWM_PIN, 191);  // 75% Duty Cycle or 75% of max speed
4 analogWrite(PWM_PIN, 255);  // 100% Duty Cycle or full speed
```

سایر میکروکنترلرها می‌توانند در اجرای خود پیچیده‌تر باشند، اما در پایین‌ترین سطح، معمولاً بر اساس همان اصول کار می کنند.

پرسش‌های متداول درباره PWM

در این بخش، به چند پرسش رایج درباره PWM پاسخ می‌دهیم.

۱. تکنیک مدولاسیون پهنای پالس چیست؟

مدولاسیون پهنای پالس یا PWM یک تکنیک کنترلی رایج است که سیگنال‌های آنالوگ را از قطعات دیجیتال مانند میکروکنترلرها تولید می‌کند. در تکنیک PWM، انرژی سیگنال به جای سیگنال پیوسته متغیر (آنالوگ)، از طریق یک سری پالس توزیع می‌شود.

۲. چرا از مدولاسیون پهنای پالس استفاده می‌شود؟

مدولاسیون پهنای پالس یک روش مؤثر است که برای کنترل مقدار توان تحویلی به یک بار بدون هدررفت انرژی استفاده می‌شود.

۳. تفاوت بین چرخه وظیفه و فرکانس سیگنال PWM چیست؟

فرکانس یک سیگنال PWM بیان می‌کند که سیگنال هر چند وقت یک بار بین ولتاژ بالا و پایین سوئیچ می‌شود (تغییر می‌کند). فرکانس با واحد هرتز بیان می‌شود. چرخه وظیفه درصد زمانی است که سیگنال در یک ولتاژ بالا باقی می‌ماند و به عنوان درصد دوره بیان می‌شود.

منبع: CircuitBread