

مقاله علمی-ترویجی

## کنترل کننده‌های الکترونیکی مدرن در سوپاپ‌های سیلندر خودرو

■ محمدرضا متولی کسمائی/ گروه مهندسی برق/ دانشکده فنی و مهندسی/ دانشگاه قم/ قم-ایران/ motavallireza@gmail.com

■ کریستین کونزلمان/ دکترای مهندسی برق-الکترونیک/ محقق کمپانی خودروسازی/Schwalbach/Automotive GmbH/ Xing, Schwabach/ آلمان

christian@gunselmann.de

### چکیده

یکی از روش‌های کمینه کردن مصرف مواد سوختی در خودروها، استفاده از سوپاپ‌های قابل کنترل در سیلندر است. سیستم‌های مکانیکی و هیدرولیکی قدیمی، نمی‌توانند یک انطباق زمانی سریع بین موتور و موقعیت لحظه‌ای خودرو برقرار کنند. با کنترل جداگانه تک تک سوپاپ‌ها در سیلندر امکان انطباق کامل زمانی بین سوپاپ‌ها و حرکت آنی خودرو وجود دارد. به‌طور معمول کنترل کننده‌های با سنسور یا مشکل تکنیکی دارند و یا از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیستند. از این رو تحقیقات کمپانی‌های خودروسازی به سمت سوپاپ‌های پیش‌مورد که بدون سنسور را جایگزین کنند، تا از یک طرف از محاسبات طاقت فرسا به‌دور باشند و از طرف دیگر در مقابل مزاحمت‌ها، قابلیت انعطاف بیشتری داشته باشند. سوپاپ‌های مدرن که با نیروی الکترومغناطیسی کار می‌کنند به سوپاپ‌های الکترومغناطیسی معروف‌اند. آنها از دو سلف سیم‌پیچی شده با هسته فرومغناطیسی که در مقابل یکدیگر قرار دارند، تشکیل شده‌اند. این هسته فرومغناطیسی سیم‌پیچی شده، یک سیستم رزونانس الکتریکی-مکانیکی ایجاد می‌کند که زمینه حرکت سوپاپ‌ها در سیلندر را فراهم می‌سازد. در این مقاله، قسمت کنترل کننده الکترونیکی سوپاپ الکترومغناطیسی، تجزیه و تحلیل، طراحی و تست می‌شود.

**کلمات کلیدی:** سوپاپ الکترومغناطیسی، هسته فرومغناطیسی، کنترل کننده الکترونیکی مدرن، رزونانس الکتریکی - مکانیکی

## Modern Electronic Controllers in Car Cylinder Valves

■ Mohammad Reza Motavalli Kasmaie/ Department of Electrical Engineering/ University of Qom/ Qom, Iran/ motavalliReza@gmail.com

■ Christian Gunselmann/ Doctor of Electronic Engineering/ Automotive researcher/ Automotive GmbH Xing, Schwabach, Germany/ christian@gunselmann.de

### Abstract

One of the ways to minimize fuel consumption in automobiles is to use cylinder-controlled valves. Traditional mechanical and hydraulic systems cannot achieve a fast time adaptation between the engine and the instantaneous position of the vehicle. With the separate control of each valve in the cylinder, it is possible to fully adjust the timing between the valves and instantaneous movement of the car. Sensor controllers usually have either a technical problem or are not economically viable. So the research of car companies is moving towards replacing the sensorless approach, to avoid overwhelming computation on the one hand, and to be more flexible against interference, on the other. Modern

valves that work with electromagnetic force are known as electromagnetic valves. They are composed of two coiled inductors with a ferromagnetic core facing each other. This coiled ferromagnetic core creates an electrical-mechanical resonance system that provides the ground for the valves to move in the cylinder. In this article, the electronic controller part of the electromagnetic valve is analyzed, designed, and tested.

**Keywords:** Electromagnetic valve, ferromagnetic core, modern electronic controller, electrical - mechanical resonance

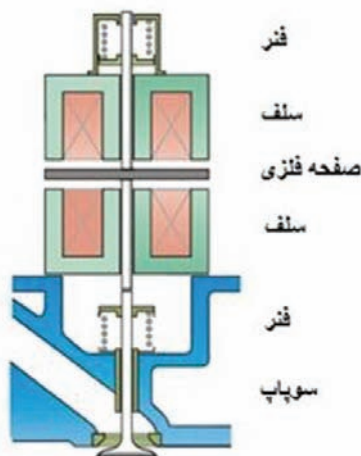
## ۱- مقدمه

به علت گرانی حامل‌های سوخت نظیر بنزین، گاز و غیره و نیز جهت تدابیر حمایتی از محیط زیست، کاهش مصارف سوختی از اولیت‌های اول کمپانی‌های بزرگ خودروسازی جهان بشمار می‌رود. موتورهای هوشمند که می‌توانند مواد سوختی را به‌طور هوشمند تغذیه کنند و یا تنظیم هوشمند زمان احتراق سیلندر را انجام دهند، یکی از راه‌های حل مشکل عنوان شده می‌باشد. یکی از پتانسیل‌های ناشناخته دیگر در کاهش مصرف مواد سوختی، استفاده از کنترل الکترونیکی حرکت سوپاپ‌ها در سیلندر است. در سال‌های اخیر توجه و علاقه شرکت‌های خودروسازی به تحقیق در این‌گونه سوپاپ‌ها و استفاده بهینه از آنها بیشتر شده است [۱-۴]. سیستم‌های مکانیکی و هیدرولیکی قدیمی فقط می‌توانند تا اندازه‌ای کنترل حرکت زمانی سوپاپ‌ها را اجازه دهند. به عبارت دیگر، اینها می‌توانند فقط یک کنترل محدود زمانی سوپاپ‌ها را باعث شوند. یک طرح چند منظوره، برای کنترل کامل الکترونیکی حرکت سوپاپ‌ها، استفاده از سوپاپ‌های الکترومغناطیسی است [۵-۶]. طرح مذکور طرح خیلی جدیدی نیست، اما از آنجایی که سرعت فرود بالای سوپاپ‌ها، باعث سر و صدای زیاد و کاهش عمر مفید آنها می‌شود، توسعه عملی و کاربردی آن امکان پذیر نبوده است. استفاده از سنسور برای تنظیم حرکت سوپاپ‌ها نیز به علت ارتعاشات زیاد موتور و نوسانات بالای دمایی عملی نیست [۷]. با توجه به نکات ذکر شده، انگیزه به خدمت گرفتن روشی بدون سنسور، با حذف معایب فوق بوجود آمد. در این مقاله، یک کنترلگر بدون سنسور معرفی می‌شود که برای کنترل حرکت سوپاپ‌ها در سیلندر، اطلاعات لازم را از چرخه جریان «سلف محرک سوپاپ» اخذ می‌کند. در این حالت نه تنها از سنسور صرفه جویی می‌شود بلکه می‌توان به وسیله انتخاب درست الگوریتم کنترلی، از هزینه زیاد محاسبات نیز کاست. زمان باز و بسته شدن سوپاپ‌ها در سیلندر می‌تواند طوری تنظیم شود که توان خروجی موتور بیشینه شود.

مهمترین فوائد سوپاپ‌های متغیر قابل کنترل در سیلندر را می‌توان در سه عبارت عنوان کرد. الف) مصرف بهینه انرژی. با سوپاپ‌های قابل کنترل الکترونیکی، توان خروجی موتور می‌تواند حتی تا ۵۰٪ افزایش و در مقابل اتلاف انرژی، تا ۵٪ کاهش یابد [۸-۱۰]. ب) رفتار بهینه موتور هنگام روشن و خاموش شدن خودرو. با کنترل الکترونیکی سوپاپ‌های ورودی و خروجی سیلندر، انتشار هیدروکربن در هنگام روشن شدن موتور، می‌تواند تا ۶۰٪ کمتر شود [۱۱-۱۴]. همچنین می‌توان سیلندر را جداگانه و به‌طور مجزا از همدیگر خاموش کرد (در موتورهای چند سیلندر). بدین ترتیب خاموش شدن سیلندر می‌تواند به‌طور تعویضی تغییر کند که در نتیجه باعث انتشار یکنواخت حرارت در موتور می‌گردد. ج) خروج قابل کنترل گازهای متراکم از سیلندر. به وسیله کنترل الکترونیکی سوپاپ‌های خروجی سیلندر، خروج مواد سوختی متراکم از سیلندر هدفدار انجام می‌گیرد. بدین وسیله تاثیر ترمز موتور افزایش می‌یابد و بدین ترتیب دیگر به نیروی متداول اضافی برای ترمز کردن در خودروها احتیاج نیست.

## ۲- اساس کار

اساس کار سوپاپ که با نیروی الکترومغناطیسی کار می‌کند، بر نوسان یک صفحه فلزی استوار شده که بین دو سلف الکترومغناطیسی حرکت می‌کند. به عبارت دیگر محرک الکترومغناطیسی بر اساس قانون القای الکترومغناطیسی، یک سیستم رزونانس الکتریکی - مکانیکی تولید می‌کند. دو سلف مقابل به یکدیگر، که بر روی یک هسته فرومغناطیسی سیم پیچی شده‌اند، این محرک الکترومغناطیسی را تشکیل می‌دهند (شکل ۱). بر روی محور مرکزی این دو سلف (جهت Y)، یک صفحه فلزی قرار دارد که می‌تواند آزادانه بین آنها (در جهت محور) حرکت کند. هنگام عبور جریان الکتریکی از سلف‌ها، شار الکترومغناطیسی عبور کننده و در نتیجه نیروی مغناطیسی بوجود آمده، باعث کشاندن صفحه فلزی به آن سمت می‌شود. حرکت صفحه فلزی مستقیماً به وسیله یک میله به سوپاپ‌ها منتقل می‌شود. استفاده از این چنین سوپاپ الکترومغناطیسی، به علت نبود سیستم هیدرولیکی باعث کاهش چشمگیر هزینه‌ها می‌شود. اگر هر دو سوپاپ ورودی و خروجی هر سیلندر و در نتیجه همه سیلندرهای یک موتور جداگانه از هم، قابل کنترل باشند می‌توان به‌طور کامل از امتیاز زمانی سوپاپ‌ها، برای کنترل بهینه خودرو بهره جست [۱۵-۱۷]. به علت جریان الکتریکی زیادی که احتیاج است تا صفحه فلزی را از موقعیتی به موقعیت دیگر حرکت دهد، دو فنر در بالا و پایین سلف‌ها حمایت از حرکت صفحه فلزی، تعبیه شده است. فنرها طوری تعبیه شده‌اند که صفحه فلزی در حالت سکون، در وسط دو سلف قرار گیرد. هنگامی که صفحه فلزی در یکی از دو موقعیت بالایی و یا پایینی قرار می‌گیرد، جریان الکتریکی بین ۲ تا ۳ آمپر احتیاج است تا آن را در این موقعیت نگه دارد [۱۸-۱۹].



شکل ۱: سوپاپ الکترومغناطیسی

هنگامی که جریان الکتریکی قطع شود، صفحه فلزی ابتدا فقط به وسیله نیروی فنر به سمت دیگر شتاب می‌گیرد. به علت اتلاف انرژی موجود در سیستم، صفحه فلزی نمی‌تواند به‌طور کامل و فقط با نیروی فنر به طرف دیگر آورده شود. فقدان انرژی که احتیاج است

الکترومغناطیسی واقعی و ارزیابی عددی آنها ارتباط برقرار می‌شود. این کار توسط نرم‌افزار MATLAB انجام گرفته است. این نرم‌افزار به کمک بعضی از توابع تعریف شده خود، امکان بررسی سیگنال‌ها را بصورت عددی فراهم می‌سازد. به‌وسیله این روش هم می‌توان ارتباط پارامترهای الکتریکی همچون جریان، ولتاژ و غیره را با پارامترهای مکانیکی همچون نیرو به‌دست آورد (از طریق محاسبه پارامترهای الکتریکی، پارامترهای مکانیکی سوپاپ به‌دست می‌آیند). این روش بهترین مدل را برای رفتار واقعی سوپاپ الکترومغناطیسی می‌دهد. بر اساس این مدل، رفتار الکتریکی سوپاپ و کنترل‌کننده الکترونیکی آن طراحی و ساخته شده است. شکل (۲) شمای کلی از سلف مدل حاصله هسته آهنی پایینی شکل (۱) را نشان می‌دهد.

#### ۴- رفتار سوپاپ الکترومغناطیسی ایده‌آل

سوپاپ مغناطیسی یک سیستم مغناطیسی - مکانیکی است که به علت پدیده‌هایی همچون هیستریزس و اشباع، رفتار در شکل تحلیلی آن فقط به‌طور تقریبی قابل توجیح است. برای درک بهتر موضوع، رفتار سوپاپ الکترومغناطیسی را می‌توان از سه منظر جداگانه الکتریکی، مغناطیسی و مکانیکی بررسی کرد که بدین وسیله موقعیت کل سیستم سوپاپ و در نتیجه رفتار مدار کنترل‌کننده الکترونیکی آن را می‌توان به‌درستی استنتاج و پیاده سازی کرد.

#### الف) رفتار الکتریکی

رفتار الکتریکی سوپاپ الکترومغناطیسی را می‌توان به‌وسیله مکان و سرعت صفحه فلزی آن (شکل ۱) که وابسته به مقدار اندوکتانس،  $L$  سلف آن است، توصیف کرد. از لحاظ ریاضی ارتباط بین ولتاژ اندوکتانس سوپاپ،  $V_L(t)$  و شار مغناطیسی سلف عبارت است از:

$$V_L(t) = -N \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (1,4)$$

با  $N$  به عنوان تعداد سیم پیچ‌های سوپاپ  $\phi(t)$  به عنوان شار مغناطیسی عبوری از سلف سوپاپ

شار مغناطیسی به‌طور مستقیم به جریان  $I(t)$  و مکان صفحه فلزی وابسته است که در نتیجه ارتباط بین ولتاژ و جریان سوپاپ الکترومغناطیسی نتیجه می‌شود.

برای تعیین رفتار الکتریکی سوپاپ الکترومغناطیسی تغییرات ولتاژ و جریان یکی از سلف‌های آن در موقعیت‌های مختلف مکانی بر حسب زمان بررسی و اندازه‌گیری شد. برای این اندازه‌گیری از مدار شکل (۳) استفاده شده است. برای سیگنال ورودی از یک منبع پالسی استفاده می‌شود. برای اندازه‌گیری جریان عبوری از سوپاپ از مقاومت اندازه‌گیری،  $R_M$  استفاده شده که برای جلوگیری از اتلاف انرژی،

تا صفحه فلزی را به‌طور کامل به سمت دیگر حرکت دهد، در فرم یک انرژی الکتریکی به سلف سوپاپ داده می‌شود. تزریق این انرژی الکتریکی به وسیله یک کنترل‌کننده الکترونیکی انجام می‌گیرد. در هنگام نوسان صفحه فلزی، یک جریان ثابت به سلف‌های سوپاپ الکترومغناطیسی تزریق می‌شود. اما برای فائق آمدن بر اتلاف انرژی و نیز نگه داشتن صفحه فلزی در موقعیت اوج بالایی یا پایینی، جریان زیادی احتیاج است. از این‌رو دو جریان متفاوت برای حرکت صفحه فلزی استفاده می‌شود: جریان تقریباً بزرگ،  $I_H$ ، ۶ تا ۸ آمپر برای گیرانداختن صفحه فلزی و جریان تقریباً کوچک،  $I_L$ ، ۲ تا ۴ آمپر برای نگهداشتن آن [۲۰]. از آنجایی که ماده فرومغناطیسی استفاده شده یک رفتار غیرخطی شدید (رفتار هستریزس و یا حالت اشباع) را از خود نشان می‌دهد، یک تحلیل کامل برای رفتار سوپاپ الکترومغناطیسی امکان‌پذیر نمی‌باشد، بلکه فقط یک تحلیل تقریبی برای آن میسر است [۲۱].

#### ۳- مدل سوپاپ الکترومغناطیسی

برای درست کردن مدل سوپاپ از سه روش زیر استفاده شده است:

#### الف) مدل فیزیکی

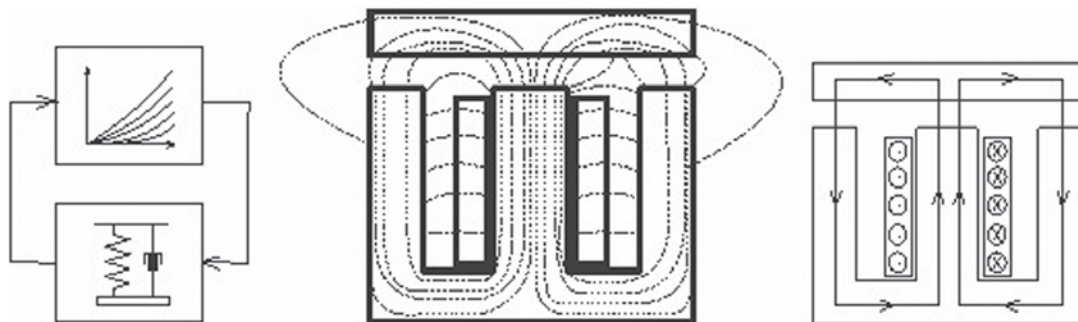
در این روش مدل سوپاپ الکترومغناطیسی به‌وسیله محاسبه حلقه‌های مغناطیسی که از توزیع هندسی میدان هسته آهنی بوجود می‌آید، درست می‌شود. از آنجایی که هسته آهنی از مواد فرومغناطیسی تشکیل شده که ذاتاً غیرخطی اند، از این‌رو خطای مدل درست شده قابل ملاحظه بوده و در نتیجه استفاده از مدل فیزیکی روش مناسبی نیست.

#### ب) استفاده از نرم‌افزار ANSYS

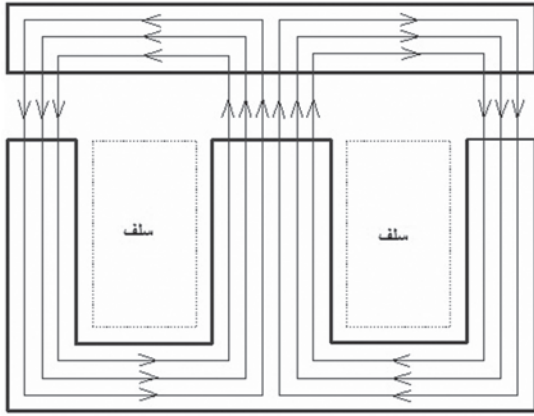
این نرم‌افزار توانایی محاسبات دما، میدان‌های الکتریکی، مغناطیسی و همچنین محاسبات مکانیکی را با توجه به طبیعت غیرخطی و غیرمتقارن مواد دارد. به‌عبارت دیگر با این نرم‌افزار محاسبه میدان‌های مواد غیر خطی و نیز پدیده پراگندگی میدان امکان‌پذیر است، بنابراین محاسبات توزیع میدان‌ها در مدل فراهم می‌شود. ارزیابی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به واسطه محاسبات معادلات ماکسول در این نرم‌افزار انجام می‌گیرد. با استفاده از محاسبات توزیع میدان‌ها، محاسبه پارامترهای دیگر همچون بزرگی نیروهای وارد شده بر سوپاپ و غیره که پارامترهای مکانیکی می‌باشند، نیز ممکن می‌شود [۵،۱۷].

#### ج) استفاده از تحلیل عددی

در تحلیل عددی ارزیابی مقایسه اندازه‌گیری شده امکان‌پذیر می‌باشد، از این‌رو در این روش بین مقادیر اندازه‌گیری‌های سوپاپ



شکل ۲: روش‌های مدل سوپاپ الکترومغناطیسی، الف) مدل فیزیکی، ب) استفاده از نرم‌افزار ANSYS، ج) تحلیل عددی

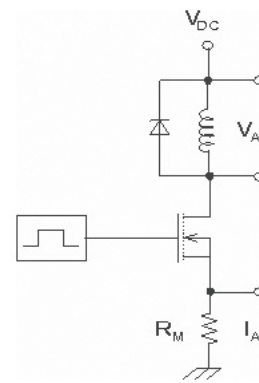


شکل ۵: خطوط میدان ایده ال برای مدل یک سوپاپ الکترومغناطیسی

مقدار آن در محدوده میلی اهم می باشد. با روشن شدن مدار، تمام ولتاژ منبع مستقیم،  $V_{DC}$ ، به طور تقریبی در سوپاپ الکترومغناطیسی ظاهر می شود و جریان در لحظه روشن شدن بر اساس رابطه:

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{V}{L} \quad (4-2)$$

به طور ضعیفی افزایش می یابد، چرا که مقدار اندوکتانس،  $L$ ، در ابتدا بزرگ است. از آنجایی که بعد از مدت زمان کوتاهی مواد مغناطیسی موجود در آن سمت اشباع میل می کند، لذا افزایش جریان کم کم بیشتر می شود (مقدار اندوکتانس کاهش می یابد). برای  $t \rightarrow \infty$ ، جریان عبوری از سوپاپ به وسیله مجموع مقاومت ها،  $R_T$  (مقاومت های سیم پیچ بکار رفته، مقاومت اندوکتانس،  $R_A$ ، مقاومت  $R_M$  و غیره) محدود می شود ( $I_{MA} = \frac{V_A}{R_T} \approx \frac{V_A}{R_A}$ ). تغییرات زمانی ولتاژ و جریان سوپاپ الکترومغناطیسی در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۳: مدار اندازه گیری ولتاژ و جریان سوپاپ الکترومغناطیسی

برای حلقه های مغناطیسی شکل (۵)، ولتاژ مغناطیسی،  $V_{mag}(t)$ ، را می توان بر حسب جریان عبوری،  $I(t)$ ، نوشت، یعنی:

$$V_{mag}(t) = NI(t) \quad (4-3)$$

شار مغناطیسی عبوری از صفحه فلزی بر اساس رفرنس [۲۳] تعیین می شود:

$$\phi(t) = \frac{NI(t)}{\frac{2l_L(t)}{\mu_0 A} + R_F} \quad (4-4)$$

با

$\mu_0$  به عنوان نفوذپذیری هوا  
 $A$  به عنوان سطح هسته آهنی

$R_F$  به عنوان مقاومت مغناطیسی هسته آهنی و صفحه فلزی  
 $l_L(t)$  به عنوان طول شکاف هوایی بین هسته و صفحه فلزی  
 برای فواصلی که مقاومت مغناطیسی هسته آهنی و صفحه فلزی در مقابل طول شکاف هوایی کوچک باشد، رابطه ۴-۴ تبدیل می شود به:

$$\phi(t) = \frac{NI(t)}{\frac{2l_L(t)}{\mu_0 A}} \quad (4-5)$$

برای نیروی مغناطیسی که با آن صفحه فلزی سوپاپ الکترومغناطیسی کشیده می شود، در نتیجه می توان نوشت:

$$F_{mag} = \frac{\phi(t)^2}{\mu_0 A} \quad (4-6)$$

### ج) رفتار مکانیکی

رفتار مکانیکی سیستم سوپاپ مغناطیسی به وسیله نیروی  $F_F(t)$  که از طریق اعمال فنرهایی بر روی صفحه فلزی حاصل می شود، قابل تعیین است (شکل ۱) که متناسب با موقعیت صفحه فلزی است [۲۲]:

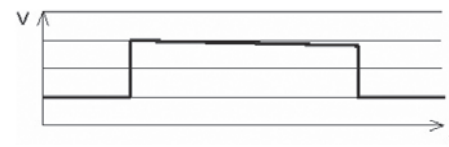
$$F_F(t) = -K_F \cdot S(t) \quad (4-7)$$

با

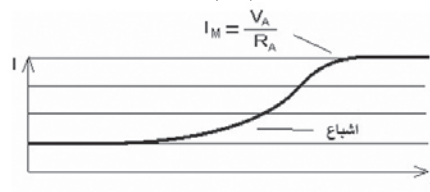
$S(t)$  به عنوان موقعیت صفحه فلزی نسبت به محل مرکزی  
 $K_F$  به عنوان ثابت فنر

### ۵- کنترل سوپاپ الکترومغناطیسی

وظیفه اصلی واحد کنترل کننده الکترونیکی، تغذیه جریان های الکتریکی از قبل تعریف شده و مشخص در زمان های معین، در سلف های سوپاپ الکترومغناطیسی است. برای این مهم می توان از



(الف)



(ب)

شکل ۴: مقادیر اندازه گیری های مورد انتظار سوپاپ الکترومغناطیسی.

(الف) ولتاژ، (ب) جریان

### ب) رفتار مغناطیسی

برای مقادیر بزرگ جریان و میدان مغناطیسی،  $H$ ، هسته آهنی سوپاپ الکترومغناطیسی به طور کامل اشباع (ناحیه به طور کامل غیرخطی) می شود. همچنین تغییرات مکانی صفحه فلزی در سوپاپ پدیده میدان پراکندهگی اضافی ایجاد می کند که می تواند بر رفتار الکتریکی و مغناطیسی سیستم تاثیر بگذارد. برای محاسبه رفتار سوپاپ الکترومغناطیسی ایده ال، خطوط میدان مغناطیسی همچون شکل (۵) در نظر گرفته شده است [۲۲].

تنظیم کننده (regulator) خطی و یا تنظیم کننده کلیدی استفاده کرد. برای تحقق یک تنظیم کننده خطی بر اساس شکل ۶ ترانزیستور T چنان هدایت می شود که افت ولتاژ دو سر مقاومت،  $R_M$  به علت جریان عبوری، I از سلف سوپاپ، متناسب با  $V_C$  باشد. اما این مدار عیب بزرگی دارد و آن اینکه در حالت جریان ثابت عبوری از سلف،  $L_A$ ، افت ولتاژ دو سر آن به سمت صفر میل می کند و برای مقادیر کوچک  $R_A$  (مقاومت اندوکتانس سلف سوپاپ الکترومغناطیسی) و  $R_M$  (مقاومت لازم جهت اندازه گیری جریان عبوری از سلف سوپاپ الکترومغناطیسی) تقریباً کل ولتاژ منبع تغذیه مستقیم،  $V_{DC}$  در ترانزیستور T ظاهر می شود ( $V_D$  در عمل حدود ۴۲ ولت می باشد). در نتیجه اتلاف انرژی قابل ملاحظه ای در ترانزیستور بوجود می آید که هزینه های خنک کردن ترانزیستور و کاهش بازدهی را به دنبال خواهد داشت.

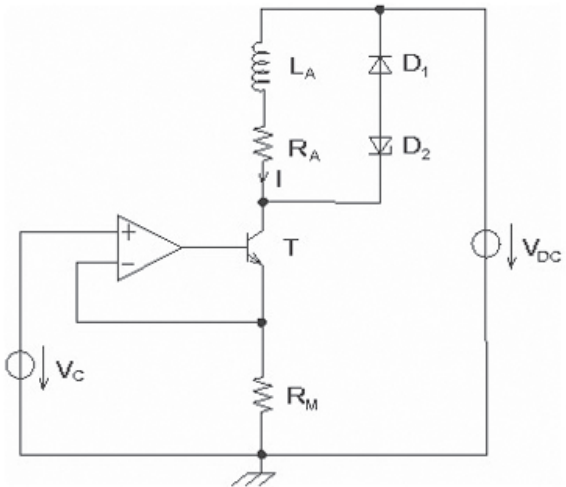
مدار شکل (۷) به طور کلی می تواند در سه حالت مختلف کار کند: الف) اگر هر دو ترانزیستور  $T_1$  و  $T_2$  روشن باشند. در این حالت جریان عبوری را از بالا به سمت پایین یعنی ترانزیستور،  $T_1$ ، اندوکتانس  $L_A$ ، مقاومت  $R_M$  و ترانزیستور،  $T_2$ ، داریم. هنگام روشن شدن مدار جریان به وسیله  $L_A$ ، افزایش می یابد. شیب افزایش جریان  $(\frac{dI(t)}{dt})$  با توجه به ناچیز بودن مقاومت  $R_M$  به وسیله رابطه زیر مشخص می شود:

$$\frac{dI(t)}{dt} = \frac{V_{DC} - R_A I(t)}{L_A(t)} \quad (5-1)$$

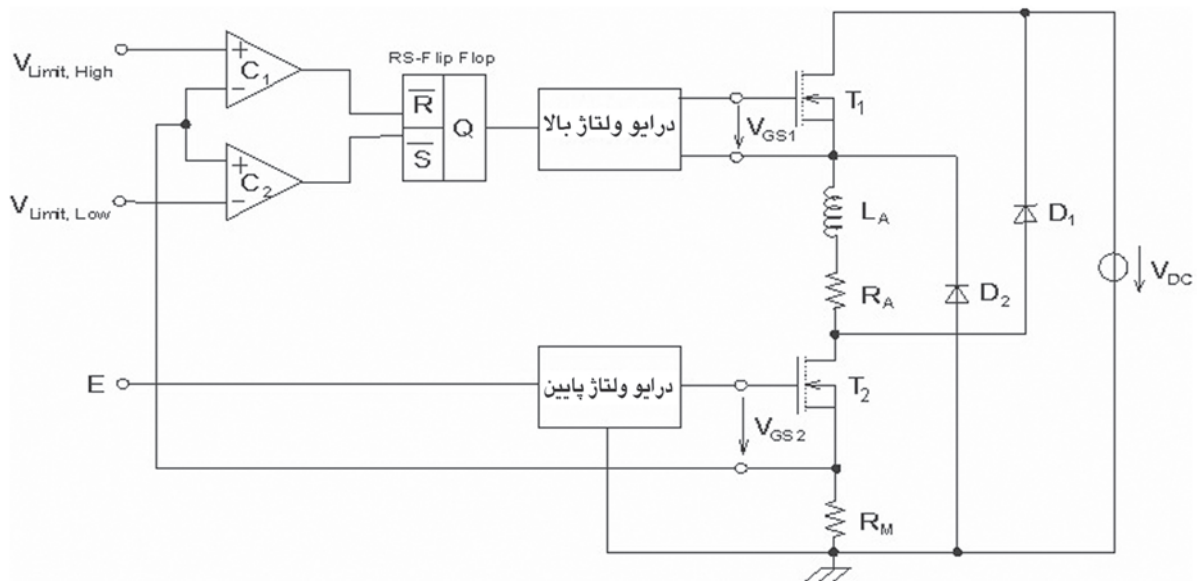
به عنوان اندوکتانس وابسته به زمان سوپاپ الکترومغناطیسی و  $V_{DC}$  در ابتدا وابسته به زمان در نظر گرفته می شود. اگر ترانزیستور  $T_1$  و یا  $T_2$  خاموش نشوند، در نتیجه جریان در محدوده حد خودش افزایش می یابد.

$$I_M = \frac{V_{DC}}{R_A} \quad (5-2)$$

ب) ترانزیستور  $T_2$  روشن و ترانزیستور  $T_1$  خاموش باشد. جریان عبوری از سلف سوپاپ و از طریق مقاومت  $R_A$ ، ترانزیستور  $T_2$ ، مقاومت  $R_M$  و دیود  $D_2$  دوباره به سلف سوپاپ بر می گردد. از آنجایی که اتلاف انرژی در این حالت ناچیز است، جریان الکتریکی به طور آهسته کاهش پیدا می کند.



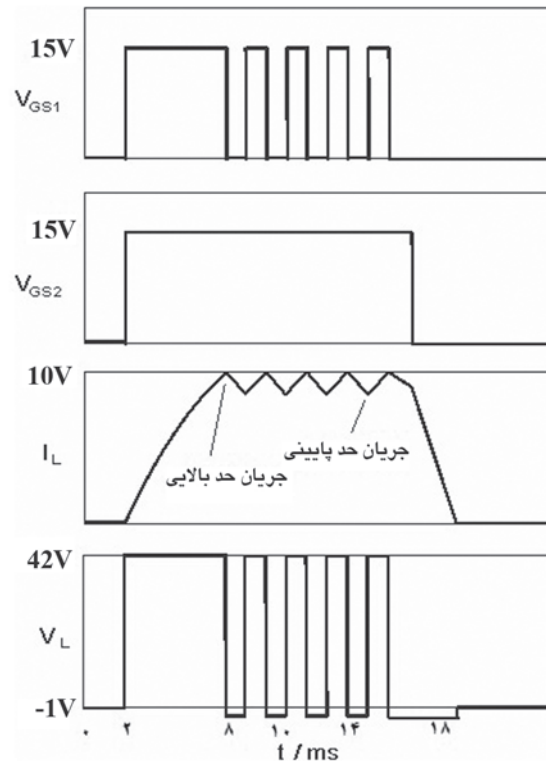
شکل ۶: مدار کنترل کننده سوپاپ الکترومغناطیسی بر اساس تنظیم کننده خطی بنابراین ساختار مدار شکل (۷) که بر اساس تنظیم کننده کلیدی (حالت قطع و وصل) کار می کند. انتخاب شده است. در مدار شکل (۷) ترانزیستور،  $T_2$  به وسیله سیگنال E روشن می شود و در نتیجه جریان سوپاپ I از مقاومت،  $R_M$ ، عبور می کند. افت ولتاژ دو سر مقاومت  $R_M$



شکل ۷: مدار کنترل کننده سوپاپ الکترومغناطیسی بر اساس تنظیم کننده کلیدی

پ) هیچ کدام از ترانزیستورهای  $T_1$  و  $T_2$  روشن نباشند. جریان عبوری از سلف به وسیله دیودهای  $D_1$  و  $D_2$  به منبع ولتاژ، برمی گردد و به عبارت دیگر انرژی ذخیره شده در سلف سوپاپ به منبع ولتاژ برمی گردد و در نتیجه جریان الکتریکی خیلی سریع کاهش می یابد.

شکل (۸) نمونه‌ای از جریان عبوری و ولتاژ دو سر سلف سوپاپ الکترومغناطیسی با سیگنال‌های کنترل کننده ترانزیستورهای  $T_1$  و  $T_2$  را نشان می دهد. برای تنظیم جریان الکتریکی، ابتدا هر دو ترانزیستور روشن اند. شیب جریان الکتریکی در ابتدا به طور خطی افزایش می یابد. همین که جریان الکتریکی از حد مجاز بالایی تجاوز کند، حالت (ب) یعنی کاهش جریان اتفاق می افتد. جریان الکتریکی در حالت ایده‌ال، مقدار لحظه‌ای خود را حفظ می کند که به علت اتلاف انرژی الکتریکی در این حالت به صورت نمایی با ثابت زمانی بزرگ، کاهش پیدا می کند. بعد از تغییر کاهش جریان مدت زمانی سپری خواهد شد تا جریان الکتریکی به حد مجاز پایینی خود برسد. در این هنگام دوباره ترانزیستور  $T_1$  روشن می شود. ترانزیستور  $T_2$  همیشه روشن است و فقط وقتی خاموش می شود که جریان عبوری از سلف سوپاپ و دیودهای  $D_1$  و  $D_2$  سریع کاهش پیدا کند.



شکل ۸: نمودار جریان و ولتاژ سلف و سیگنال‌های هدایت کننده ترانزیستورهای  $T_1$  و  $T_2$

ولتاژ دو سر سلف  $L_A$  در حالت کاهش جریان، بسیار کوچک است (تقریباً یک ولت) چرا که ولتاژ دو سر سلف در این حالت تقریباً برابر با ولتاژ دو سر دیود  $D_2$  می باشد (افت ولتاژ مقاومت‌های  $R_A$  و  $R_M$  ناچیز است). توجه شود که شیب کاهش جریان الکتریکی در مقایسه با شیب افزایش جریان الکتریکی کوچک است. از آنجایی که ترانزیستور  $T_1$  در فواصل معین روشن و خاموش می شود، جریان و در نتیجه ولتاژ الکتریکی سلف سوپاپ بین دو مقدار مجاز بالایی و پایینی

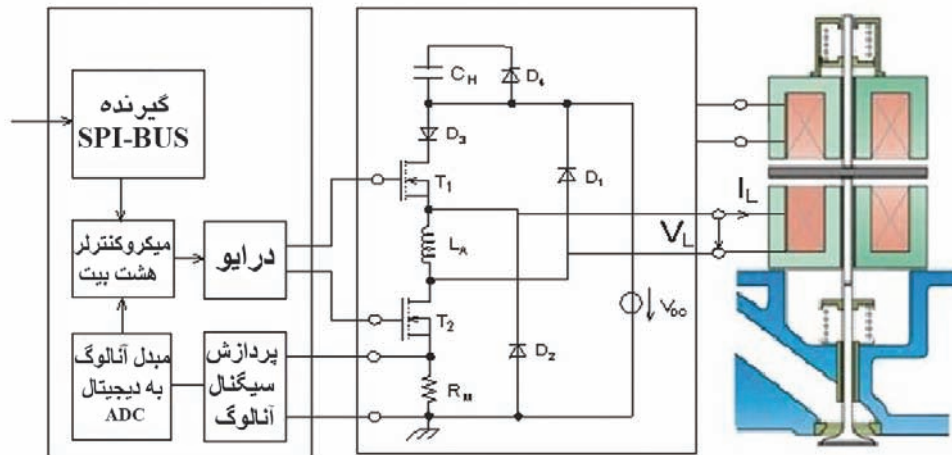
مورد نظر، به طور ثابت نگه داشته می شود. به عبارت دیگر مدار بین دو حالت پیشینه و کمینه جریان تغییر وضعیت می دهد تا جریان و ولتاژ الکتریکی سلف در محدوده مجاز حد وسط باقی بمانند. جریان الکتریکی از زمان تغذیه انرژی افزایش می یابد، از این زمان به بعد، صفحه فلزی شروع به حرکت می کند. در ابتدا شیب جریان الکتریکی مثبت است. اتلاف انرژی الکتریکی نیز در این حالت مثبت است. در حالت کاهش جریان (حالت ب)، شیب جریان الکتریکی منفی است. پس در این حالت برای حاصل ضرب ولتاژ و جریان سلف، یک مقدار منفی ظاهر می شود. به عبارت دیگر مدار از شبکه هیچ انرژی دریافت نمی کند. از اینرو برای محاسبه انرژی داده شده، باید مداری طراحی شود که در حالت کاهش جریان انرژی را روی صفر تنظیم کند.

شکل (۹) نحوه ارتباط مدار کنترل کننده الکترونیکی (شکل ۷) را به واحد تولیدکننده سیگنال‌های جریان، جهت هدایت سوپاپ الکترومغناطیسی نشان می دهد. بعد از پردازش آنالوگ سیگنال‌های ورودی، آنها به واحد میکروکنترلر عرضه می شوند. واحد میکروکنترلر سپس سیگنال‌های مورد نظر را بر طبق الگوریتم کنترل در خواستی تولید می کند که به کمک درایور به ترانزیستورهای قدرت (و جهت روشن و خاموش کردن آنها) عرضه می شود و بدین ترتیب سیگنال‌های جریان مورد نظر در سوپاپ الکترومغناطیسی تولید می شود.

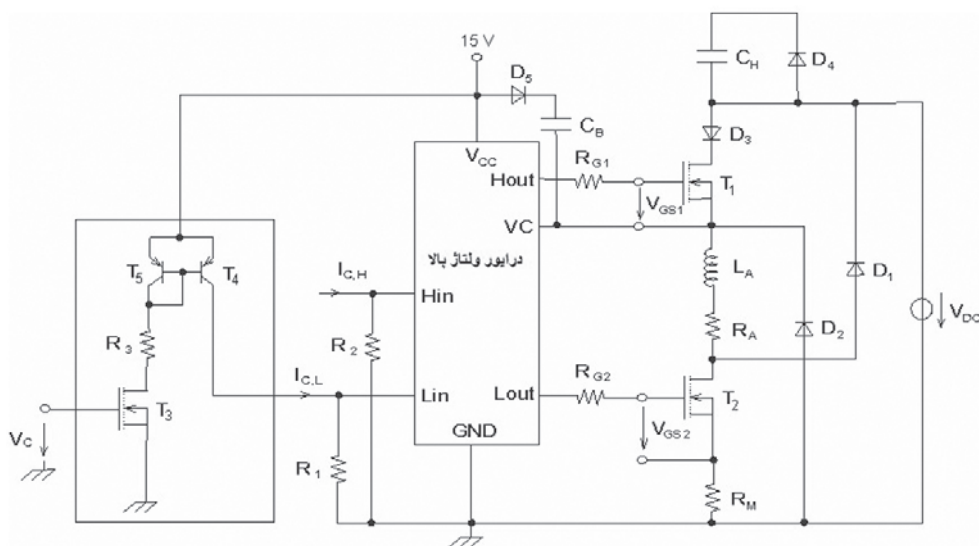
شکل (۱۰) مدار تغذیه کننده به کنترل کننده الکترونیکی را جهت روشن و خاموش کردن ترانزیستورهای قدرت نشان می دهد که در آن از یک درایور ولتاژ بالا استفاده شده است. همانطوریکه در شکل (۱۰) می بینیم در اینجا از یک خازن کمکی،  $C_H$ ، برای تولید ولتاژ بالای دینامیکی استفاده شده است. در مواقع خاموش بودن ترانزیستور،  $T_1$ ، خازن کمکی،  $C_H$ ، پر می شود، به طوریکه در هنگام روشن شدن ترانزیستور،  $T_1$ ، به کمک همین خازن از لحاظ دینامیکی ولتاژی تولید می شود که بیشتر از ولتاژ منبع،  $V_{DC}$ ، است. کنترل درایور ولتاژ بالا از جریان آئینه ای با ترانزیستورهای  $T_3$  و  $T_6$ ، نتیجه می شود که با تغذیه جریان الکتریکی و روشن بودن ترانزیستور،  $T_4$ ، انجام می گیرد. سپس جریان تولید شده در ترانزیستور،  $T_6$ ، در مقاومت،  $R_1$ ، جاری می شود که افت ولتاژ حاصله به عنوان سیگنال محرک در درایور ولتاژ بالا استفاده می شود.

#### ۶- مدارهای اندازه گیری

روش‌های مختلفی برای تحقق مراحل کنترلی سوپاپ الکترومغناطیسی وجود دارد که هر کدام پیچیده گی خاص خود را دارد، به عنوان مثال دیجیتالی کردن سیگنال مشتق جریان سلف که فقط با نمونه برداری زیاد امکان پذیر است و یا تطبیق کامل قسمت‌های مختلف مدار در قسمت آنالوگ. بنابراین جهت سادگی کار، ترکیبی از هر دو روش آنالوگ و دیجیتالی برای تجزیه و تحلیل سیگنال‌ها انتخاب شده است. بدین ترتیب که برای تقویت سیگنال‌ها و عملیات مشتق گیری و انتگرال گیری از مدارهای آنالوگ و برای کنترل سیگنال‌ها از مدارهای دیجیتالی استفاده می شود. میکروپروسسورهای قسمت دیجیتالی مدار به کمک درایورهای ولتاژ بالا، سیگنال‌های مورد نظر به ترانزیستورهای قدرت  $T_1$  و  $T_2$  را مطابق الگوریتم انتخاب شده، تولید میکنند تا با روشن و خاموش کردن این ترانزیستورها، رفتار حرکتی سوپاپ ایجاد شود. در تشکیل سیگنال‌های آنالوگ، باید از سیگنال‌های اندازه گیری شده جریان و ولتاژ الکتریکی سلف،  $L_A$ ، مشتق گیری و انتگرال گیری شود تا موقعیت صفحه فلزی سوپاپ الکترومغناطیسی تعیین شود. این کار توسط مدار شکل (۱۱) انجام می گیرد.



شکل ۹: ساختار کلی واحد کنترل



شکل ۱۰: نحوه تغذیه ترانزیستورهای قدرت استفاده شده توسط درایور ولتاژ بالا

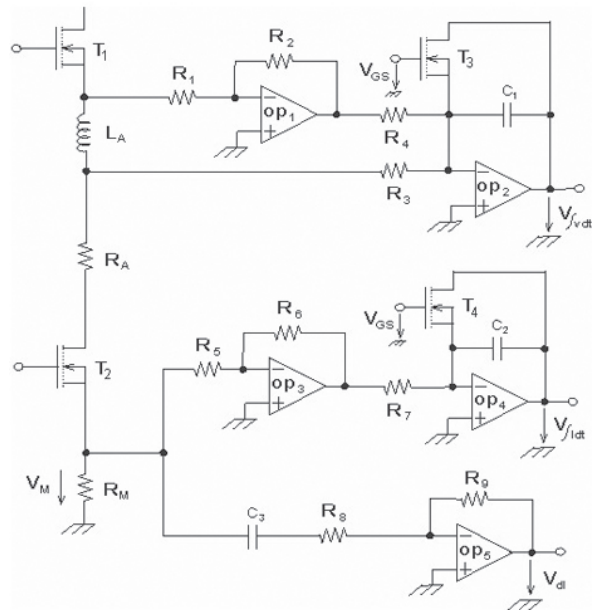
محاسبه توان مصرفی سلف، می بایستی سه ولتاژ دیود،  $D_2$ ، سلف  $L_A$  و مقاومت،  $R_M$  مورد توجه قرار گیرد ( $V_{D2}$  ولتاژ دیود  $D_2$  در حالت کاهش جریان سلف است). خروجی های  $V_{in}$  و  $V_{out}$  (شکل ۱۲)، به ترتیب توان و انرژی مصرفی معادل را نشان می دهند. انرژی مصرفی هر سوپاپ، از مجموع انرژی مصرفی سلف های بالایی و پایینی واحد محرک آن به دست می آید. ولتاژ دو سر سلف،  $V_L$ ، به ورودی سر منفی مقایسه کننده  $C_3$  و تقسیم کننده ولتاژ  $N_1$  (با مقاومت های  $R_{11}$  و  $R_{12}$ ) متصل می گردد. ولتاژ  $V_M$  (افت ولتاژ دو سر مقاومتی که برای اندازه گیری جریان عبوری از سلف استفاده می شود) تقسیم کننده ولتاژ  $N_2$  با مقاومت های  $R_{13}$  و  $R_{14}$  را تغذیه می کند. از دو تقسیم کننده ولتاژ  $N_1$  و  $N_2$ ، به علت تطبیق به ورودی های ضرب کننده استفاده شده است. مقایسه کننده  $C_3$  به ترانزیستور  $T_5$  متصل می گردد. شاخه درین ترانزیستور  $T_5$  به خروجی نخستین تقسیم کننده ولتاژ  $N_1$  متصل می گردد، که هر دو این ها، نخستین شاخه ورودی ضرب کننده را تشکیل می دهند. خروجی دومین تقسیم کننده ولتاژ  $N_2$ ، دومین شاخه ورودی ضرب کننده را تشکیل می دهد. به سر منفی مقایسه کننده  $C_3$ ، یک مقاومت  $R_{10}$  و یک دیود زنر  $D_Z$  نیز متصل می گردد که برای تامین جریان الکتریکی دیود زنر از

انتگرالگیری ولتاژ سلف  $L_A$  با محاسبه اختلاف پتانسیل های دو سر سلف، در سر منفی ورودی تقویت کننده عملیاتی معکوس  $OP_2$  انجام می گیرد. جهت تنظیم انتگرالگیر از ترانزیستور  $T_3$  استفاده می شود. برای انتگرالگیری و مشتقگیری جریان نیز از ولتاژ الکتریکی استفاده می کنیم (افت ولتاژی که در مقاومت  $R_M$  به واسطه جریان عبوری از سلف،  $L_A$ ، ایجاد می شود). ولتاژ دو سر مقاومت  $R_M$  توسط یک تقویت کننده تفاضلی و یک مبدل جریان به ولتاژ به دست می آید. بدین وسیله می توان به پهنای باند و  $CMRR$  (common mode rejection ratio) بزرگتر برای فرکانسهای بالا دست یافت. برای انتگرالگیری جریان الکتریکی از تقویت کننده عملیاتی معکوس  $OP_4$  استفاده می شود. خازن  $C_2$  با هدایت ترانزیستور  $T_4$  جهت تنظیم مجدد انتگرالگیر خالی می شود. برای مشتقگیری جریان الکتریکی نیز تقویت کننده عملیاتی معکوس  $OP_5$  و خازن  $C_3$  نقش ایفا می کنند. در شکل (۱۲) مدار اندازه گیری انرژی مصرفی نشان داده شده است. این مدار انرژی داده شده به هر سلف واحد محرک سوپاپ الکترومغناطیسی (سلف بالایی و پایینی شکل (۱)) را به طور جداگانه و از طریق تعیین توان مصرف شده (که از حاصل ضرب ولتاژ و جریان مصرف شده در سلف حاصل می شود) محاسبه می کند. برای

خروجی مقایسه کننده  $C_3$  مثبت است، ترانزیستور  $T_5$  هدایت می کند (ولتاژ گیت ترانزیستور  $T_5$  مثبت است) در نتیجه ولتاژ درین - سورس ترانزیستور  $T_5$  خیلی کوچک و نزدیک به صفر می شود. یعنی ولتاژ اولین شاخه ورودی ضرب کننده، تقریباً صفر است. پس برای مقادیر منفی  $V_L$  ( $V_L \approx -1V$ ) ضرب کننده، دو ولتاژ ورودی  $V_M$  و صفر را ضرب می کند. بدین ترتیب می توان، توان محاسباتی را برای مقادیر منفی  $V_L$ ، روی صفر تنظیم کرد. ولتاژ خروجی ضرب کننده،  $V_{Mult}$ ، به وسیله یک تقویت کننده عملیاتی،  $OP_6$  با مقاومت های  $R_{16}$  و  $R_{17}$  تقویت می شود. به دلیل خنثی کردن ولتاژ افست تقویت کننده عملیاتی،  $OP_6$  از یک تقسیم کننده ولتاژ  $N_3$  با مقاومت  $R_{15}$  و یک پتانسیومتر  $R_p$  روی شاخه مثبت استفاده می شود (به کمک تقسیم کننده ولتاژ  $N_3$  حاوی پتانسیومتر، یک تفریق کننده برای خنثی کردن ولتاژ افست درست می شود). جهت محاسبه انرژی مصرفی از توان خروجی  $P_{in}$  (به عبارتی از ولتاژ خروجی  $V_{in}$ ) به وسیله تقویت کننده عملیاتی،  $OP_7$  (با مقاومت  $R_{18}$  و خازن  $C_4$ ) انتگرالگیری می شود. از ترانزیستور  $T_6$  برای تنظیم مجدد انتگرالگیر  $OP_7$  استفاده می گردد.

### ۷- نتایج اندازه گیری

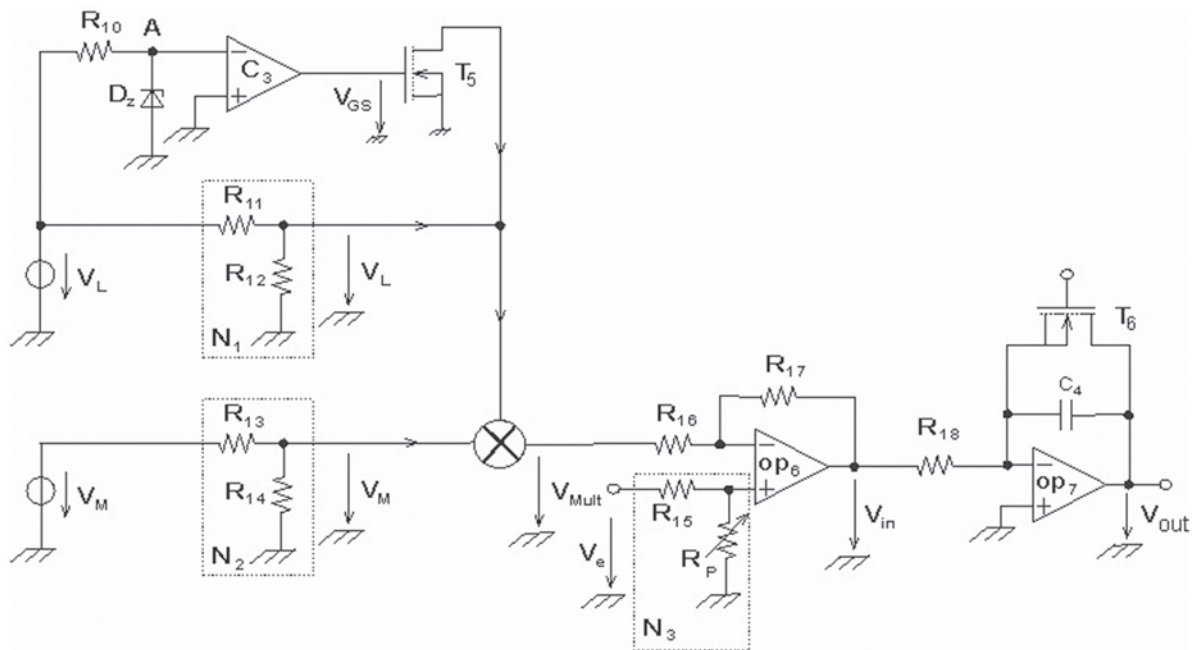
در شکل (۱۳) تغییرات زمانی جریان، ولتاژ و توان مصرفی سلف سوپاپ الکترومغناطیسی نشان داده شده است. نمودار بالایی، تغییرات جریان، وسطی تغییرات ولتاژ و نمودار پایینی ضرب این دو (توان) را نشان می دهد. منبع جریان مستقیم DC به کمک واحد کنترل کننده، ولتاژ ۴۲ ولت و جریان عبوری ۱۲ آمپر را ایجاد می کند که این ولتاژ به کمک چندین تقویت کننده DC/DC تولید می شود. در شکل (۱۴) تغییرات زمانی جریان، ولتاژ و انرژی مصرفی نیز رسم شده است. نمودار بالایی، تغییرات جریان، پایینی تغییرات ولتاژ و نمودار وسطی تغییرات انرژی مصرفی را نشان می دهد. حداکثر توان انرژی مصرفی برای یک سلف به ترتیب حدود ۴۴۰W و ۰.۳J می باشد (یعنی ۸۸۰W و ۰.۶J برای یک سوپاپ).



شکل ۱۱: مدارهای مشتق گیر و انتگرالگیر

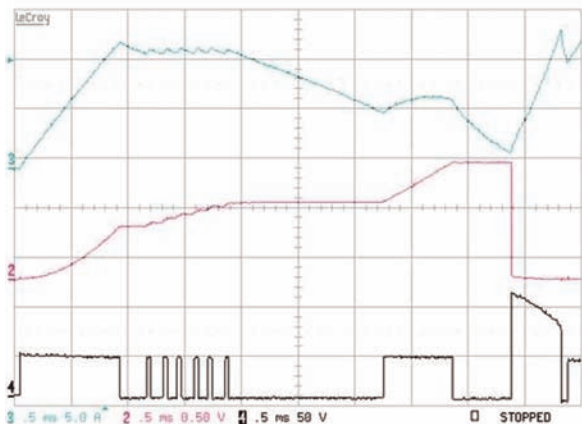
مقاومت  $R_{10}$  استفاده می شود. ولتاژ دیود زبر نقش ولتاژ دیود  $D_2$  در حالت کاهش جریان را بازی می کند. برای مقادیر مثبت  $V_L$ ، ولتاژ نقطه A همان ولتاژ دیود زبر است.

به عبارت دیگر دیود زبر هدایت می کند و ولتاژ خروجی مقایسه کننده  $C_3$  منفی می شود. برای مقادیر منفی  $V_L$ ، ولتاژ نقطه A منفی است و در نتیجه ولتاژ خروجی مقایسه کننده  $C_3$  مثبت. وقتی ولتاژ خروجی مقایسه کننده  $C_3$  منفی است، ترانزیستور  $T_5$  هدایت نمی کند (ولتاژ گیت ترانزیستور  $T_5$  منفی است). پس ولتاژ نخستین شاخه ورودی ضرب کننده،  $V_L$ ، یعنی اینکه برای مقادیر مثبت  $V_L$ ، ضرب کننده دو ولتاژ ورودی  $V_M$  و  $V_L$  را ضرب می کند. وقتی ولتاژ

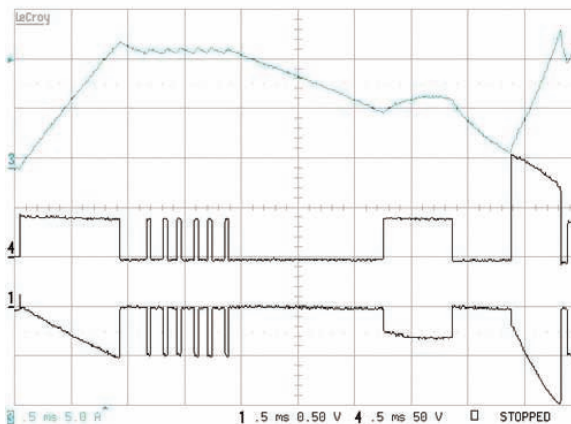


شکل ۱۲: مدار اندازه گیری انرژی مصرف شده





شکل ۱۴: اندازه‌گیری تغییرات زمانی جریان، ولتاژ و انرژی مصرفی برای یک سلف سوپاپ الکترومغناطیسی



شکل ۱۳: اندازه‌گیری تغییرات زمانی جریان، ولتاژ و توان مصرفی برای یک سلف سوپاپ الکترومغناطیسی

- [8] M.Herrmann, "Design, calculation and regulation of magnetic reluctance actuators", Dissertation, University Munich, Germany 2008
- [9] U. Becker, "Method of estimating a needle lift of a solenoid valve", Patent DE198 34 405 A1, Robert Bosch GmbH, Germany, 2000
- [10] F. Denk, "Determination of the standard series opening Behavior of a fuel injector based on a test Opening behavior under the influence of a test pulse with a constant voltage", .Patent 10 2011 076 363 B 4, Continental Automotive GmbH, Germany, 2011
- [11] G. Rösler, F Denk, "Determining the temporal movement behavior of a fuel injector based on an evaluation of the time course of various electrical parameters". DE 102012 205 573 A1, Continental Automotive GmbH, Germany, 2013
- [12] A. Dukart, "Einspritzventil", DE10 2009 055 045 A 1, Robert Bosch GmbH, 2009.
- [13] W. Imoehl, "Fuel Injection System Trends and Emissions Implications", Continental Automotive Systems Newport News, SAE Technical Paper, 2013
- [14] J. Mumford, "Electromagnetic Valves", Patent 94 13 991 A1, PI RESEARCH LTD, 1994
- [15] K.Reif, Bosch, "Car electrics and car electronics", Robert Bosch GmbH, Teubner, Germany, 2011
- [16] A.Schultz, "Simulation-based design of electromagnetic linear actuators for fluidic valves", Dissertation, university of Aachen, Germany, 2006
- [17] V. Konev, "Foundations and Applications Electromagnetic actuators" Mechatronics, May 27, 2006
- [18] Y.Wang, X. Liu, "The Optimal Drive Current of Solenoid Valve and its Effect on Fuel Injection Characteristics", IEEE, 2010
- [19] S. Staples, "Transfer Report Using Magneto striation and the Villard Effect to detect Anomalies in Steel Materials", 2012
- [20] M. Sunwoo, J. Kang, "Nadelhub- Abschätzvorrichtung einer Kraftstoffein spritzdüse mit gemeinsamer Druckleitung", Patent DE 102 20 388 A1, Hyundai Motor Company, Germany 2002
- [21] S. Rosenbaum, "Design of electromagnetic actuators taking into account hysteresis", university Ilmenau Germany, 2011
- [22] P. Schneider, "FEM-gestützte Ableitung von Magnet kreismodellen für elektromagnetische Aktoren im Graf-Zeppelin"-Haus Friedrichshafe, Fraunhofer Institute, Germany, 2000
- [23] Kuchling, "physics Handbook", Harri Verlag Germany, 1989

\*\*\*

## ۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله کنترل کننده الکترونیکی سوپاپ‌های سیلندر برای خودروها و یا هر موتور مکانیکی دیگر تجزیه و تحلیل شده است. این کنترل کننده با یک محرک الکترومغناطیسی و بر اساس قانون القای الکترومغناطیسی، یک سیستم رزونانس الکتریکی - مکانیکی تولید می‌کند. دو سلف مقابل به یکدیگر که بر روی یک هسته فرومغناطیسی سیم پیچی شده‌اند، این محرک الکترومغناطیسی را تشکیل می‌دهند. هنگام عبور جریان الکتریکی از یکی از سلف‌ها، شار الکترومغناطیسی عبور کننده و در نتیجه نیروی مغناطیسی بوجود آمده، باعث کشاندن صفحه فلزی ومیله سوپاپ به آن سمت می‌شود. با تغذیه تعویضی جریان الکتریکی به سلف‌ها، سوپاپ متصل شده به میله فلزی بین دو سلف حرکت می‌کند. در این حال کنترل حرکت، سرعت و هر متغیر دیگری در خودرو فقط به وسیله جریان و ولتاژ الکتریکی انجام می‌گیرد. کنترل کننده الکترونیکی با نصب بر روی یک موتور با منبع ولتاژ مستقیم DC تست شد و توانست خواسته‌های مورد انتظار را برآورده کند.

## ۹- مراجع

- [1] Wright. "Engine Valve Actuated Control System", USA Patent 5,873,335, 1999
- [2] R. Flierl, M. Kluting, "New Fully Variable Valve trains for Throttle", Free Load Control, The Third Generation of Valve trains, SAE Special Publication, 2000
- [3] F. Staay, Variable Valve Timing, "A new Dimension of Engine Controls", European Automotive, Congress, Barcelona, 1999
- [۴] متولی کسمایی، محمدرضا، «اندازه‌گیری انرژی در کنترل کننده های الکترونیکی سوپاپ های سیلندر خودرو»، سومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی پژوهش های کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک، تهران، ۱۳۹۴
- [5] H. P. Zink, "Simulation of an electromagnetic Actuator in the Engine", M.Sc. Thesis, Institute for Physic, University of Regensburg, Germany, 1997
- [6] M. Pischinger, "Benefits of the Electromechanical Valve Train in Vehicle Operation", SAE Special Publication", 2000
- [7] F. Denk, " Electromagnetic Injectors for Otto - motor", A contribution to the characterization and system integration of fast switching actuators, university ilmenau, Germany, 2018