

کنترل کننده‌های الکترونیکی مدرن در سوپاپ‌های سیلندر خودرو

محمد رضا متولی کسمایی^۱ کریستین کونزلمان^۲

۱- استادیار- دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی برق - دانشگاه قم - قم - ایران

motavallireza@gmail.com

۲- دکتری مهندسی برق (الکترونیک)- محقق کمپانی خودروسازی، اشوالباخ، 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. معمولاً کنترل کننده‌های با سنسور، یا مشکل تکنیکی دارند و یا از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیستند. لذا تحقیقات کمپانی‌های خودروسازی به سمتی پیش می‌رود که روش بدون سنسور را جایگزین کنند تا از یک طرف از محاسبات طاقت فرسا به دور باشند و از طرف دیگر در مقابل مزاحمت‌ها، قابلیت انعطاف بیشتری داشته باشند. سوپاپ‌های مدرن که با نیروی الکترومغناطیسی کار می‌کنند به سوپاپ‌های الکترومغناطیسی معروف اند. این سوپاپ‌ها 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.

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

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.29252/jiaeee.18.4.167

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۸/۱۰/۲۹

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۹/۱۲/۹

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر محمد رضا متولی کسمایی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران - قم - دانشگاه قم - دانشکده‌ی فنی و مهندسی - گروه برق

۱- مقدمه

به‌علت گرانی حامل‌های سوخت نظیر بنزین و گاز و همچنین به‌منظور در نظرگیری تدابیر حمایتی از محیط زیست، کاهش مصارف سوختی از اولویت‌های اول کمپانی‌های بزرگ خودروسازی جهان به‌شمار می‌رود. موتورهایی که تنظیم هوشمند زمان احتراق سیلندر را انجام می‌دهند، می‌توانند تا حدی در کاهش مصرف سوخت کمک کنند. یکی از پتانسیل‌های ناشناخته‌ی دیگر در کاهش مصرف سوختی، استفاده از کنترل الکترونیکی حرکت سوپاپ‌ها در سیلندر است. در سال‌های اخیر توجه و علاقه شرکت‌های خودروسازی به تحقیق در اینگونه سوپاپ‌ها و استفاده‌ی بهینه از آنها بیشتر شده است [۱ - ۳]. سیستم‌های مکانیکی و هیدرولیکی قدیمی فقط می‌توانند تا اندازه‌ای کنترل حرکت زمانی سوپاپ‌ها را میسر کنند. به عبارت دیگر، این سیستم‌ها فقط می‌توانند کنترل محدود زمانی بر روی سوپاپ‌ها داشته باشند. یک طرح چند منظوره، برای کنترل کامل الکترونیکی حرکت سوپاپ‌ها، استفاده از سوپاپ‌های الکترومغناطیسی است [۴، ۵]. طرح مذکور طرح خیلی جدیدی نیست، ولی چون سرعت فرود زیاد سوپاپ‌ها، سبب ایجاد سر و صدای زیاد و همچنین کاهش عمر مفید آنها می‌شود، تاکنون توسعه‌ی عملی و کاربردی آن امکان‌پذیر نبوده است. استفاده از سنسور برای تنظیم حرکت سوپاپ‌ها نیز به علت ارتعاشات زیاد موتور و نوسانات بالای دمایی عملی نیست [۶]. با توجه به نکات ذکرشده، استفاده از روشی بدون سنسور که قابلیت حذف معایب فوق را داشته باشد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بر این اساس، در این پژوهش یک کنترل‌گر بدون سنسور معرفی می‌شود که برای کنترل حرکت سوپاپ‌ها در سیلندر، اطلاعات لازم را از جریان "سلف محرک سوپاپ" اخذ می‌کند. در این حالت نه تنها از سنسور صرفه‌جویی می‌شود، بلکه می‌توان به‌وسیله انتخاب درست الگوریتم کنترلی، هزینه‌ی محاسبات را نیز کاهش داد.

زمان باز و بسته شدن سوپاپ‌ها در سیلندر می‌تواند طوری تنظیم شود که توان خروجی موتور بیشینه شود. مهمترین فواید سوپاپ‌های متغیر قابل کنترل در سیلندرها را می‌توان در سه عنوان تقسیم‌بندی 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 [۷، ۸].
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 [۹ - ۱۱]. همچنین می‌توان سیلندرها را جداگانه و بطور مجزا از همدیگر خاموش کرد (در موتورهای چند سیلندر). بدین ترتیب خاموش شدن سیلندر می‌تواند به طور تعویضی تغییر کند که در نتیجه باعث انتشار یکنواخت حرارت در موتور می‌گردد.

ج) خروج قابل کنترل گازهای متراکم از سیلندر

به‌وسیله کنترل الکترونیکی سوپاپ‌های خروجی سیلندر، خروج مواد سوختی متراکم از سیلندر هدف‌دار انجام می‌گیرد. بنابراین تاثیر ترمز موتور افزایش می‌یابد و بدین ترتیب دیگر نیازی به نیروی متداول اضافی برای ترمز کردن در خودروها نیست.

۲- اساس کار سوپاپ الکترومغناطیسی

اساس کار سوپاپ الکترومغناطیسی 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 یکدیگر که بر روی یک هسته فرومغناطیسی سیم‌پیچی 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 عبورکننده و در نتیجه نیروی مغناطیسی بوجودآمده، باعث کشاندن صفحه فلزی به آن سمت می‌شود. حرکت صفحه فلزی مستقیماً به‌وسیله یک میله به سوپاپ‌ها منتقل می‌شود. استفاده از 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 سیلندرها یک موتور جداگانه از هم قابل کنترل باشند، در این صورت می‌توان بطور کامل از امتیاز زمانی سوپاپ‌ها برای کنترل بهینه خودرو بهره جست [۱۲ - ۱۵]. به‌علت جریان الکتریکی زیادی که احتیاج است تا صفحه فلزی را از موقعیتی به موقعیت دیگر حرکت دهد، دو فنر در بالا و پائین سلف‌ها جهت 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 پائینی قرار می‌گیرد، به‌منظور نگهداری آن در این موقعیت، حدود ۲ تا ۳ آمپر جریان الکتریکی مورد نیاز است [۱۶ - ۱۸].

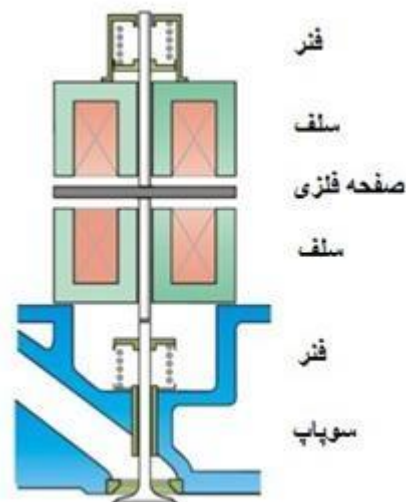
آهنی از مواد فرومغناطیسی تشکیل شده که ذاتا غیرخطی اند و از آنجائیکه شکاف هوا طول بزرگی دارد، لذا خطای مدل تشکیل شده قابل ملاحظه بوده و در نتیجه استفاده از مدل فیزیکی روش مناسبی نیست؛ معذالک برای تخمین اولیه مقادیر موردنظر مفید است (شکل ۲ - الف).

ب) استفاده از نرم‌افزار ANSYS

این نرم‌افزار توانایی محاسبات دما، میدان‌های الکتریکی، مغناطیسی و همچنین محاسبات مکانیکی را با توجه به طبیعت غیرخطی و غیرممتقارن مواد دارد. به عبارت دیگر با این نرم‌افزار محاسبه میدان‌های مواد غیرخطی و نیز پدیده پراگندگی میدان‌ها امکان‌پذیر است، لذا محاسبات توزیع میدان‌ها در مدل فراهم می‌شود. ارزیابی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به‌واسطه محاسبات معادلات ماکسول در این نرم‌افزار انجام می‌گیرد. با استفاده از محاسبات توزیع میدان‌ها، محاسبه پارامترهای دیگر همچون بزرگی نیروهای واردشده بر سوپاپ و غیره که پارامترهای مکانیکی می‌باشند نیز ممکن می‌شود [۱۳]. اما با وجود این برای تنظیمات ساده هندسی، حلقه‌های مغناطیسی ساختار میدانی پیچیده‌ای می‌سازند که محاسبات آن بسیار مشکل است (شکل ۲ - ب).

ج) استفاده از تحلیل عددی

تحلیل عددی، مقادیر اندازه‌گیریهای سوپاپ الکترومغناطیسی واقعی را بکار گرفته و از ارزیابی عددی آنها برای ساخت مدل استفاده می‌کند [۲۰، ۲۱]. شکل ۲ - پ نشان می‌دهد که چگونه مقادیر ارزیابی شده با مدل گره خورده است. این کار توسط نرم‌افزار متلب انجام گرفته است. به کمک ابزار کمکی سیمولینک این نرم‌افزار، بررسی سیگنال‌ها به‌صورت عددی امکان‌پذیر است. با این روش می‌توان ارتباط پارامترهای الکتریکی همچون جریان و ولتاژ را با پارامترهای مکانیکی همچون نیرو بدست آورد (از طریق محاسبه پارامترهای الکتریکی، پارامترهای مکانیکی سوپاپ بدست می‌آید). این روش بهترین مدل را برای رفتار واقعی سوپاپ الکترومغناطیسی می‌دهد؛ لذا بر اساس این مدل، رفتار الکتریکی سوپاپ و کنترل کننده الکترونیکی آن طراحی و ساخته شده است.



شکل (۱): سوپاپ الکترومغناطیسی

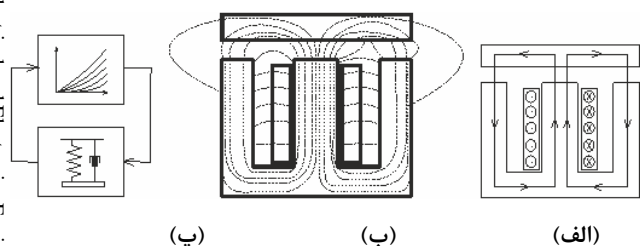
هنگامی که جریان الکتریکی قطع شود، صفحه فلزی ابتدا فقط به‌وسیله نیروی فنر به‌سمت دیگر شتاب می‌گیرد. به‌علت اتلاف انرژی موجود در سیستم، صفحه فلزی نمی‌تواند به‌طور کامل و فقط با نیروی فنر به طرف دیگر آورده شود. فقدان انرژی موردنیاز برای حرکت دادن کامل صفحه فلزی به سمت دیگر، در فرم یک انرژی الکتریکی به سلف سوپاپ داده می‌شود [۱۹]. تزریق این انرژی الکتریکی به وسیله یک کنترل کننده 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 نگاه داشتن صفحه فلزی در موقعیت اوج بالایی یا پائینی، جریان زیادی مورد نیاز است.

از این‌رو از دو جریان متفاوت برای حرکت صفحه فلزی استفاده می‌شود: جریان تقریباً بزرگ I_F با مقدار ۶ تا ۸ آمپر برای گیرانداختن صفحه فلزی و جریان تقریباً کوچک I_H با مقدار ۲ تا ۴ آمپر برای نگاه داشتن آن. از آنجائیکه ماده فرومغناطیسی استفاده شده یک رفتار غیرخطی شدید (هستیزیس) را از خود نشان می‌دهد، لذا یک تحلیل کامل برای رفتار سوپاپ الکترومغناطیسی امکان‌پذیر نیست، بلکه فقط یک تحلیل تقریبی برای آن میسر است.

جهت تحلیل تقریبی رفتار سوپاپ الکترومغناطیسی مدل ریاضی سوپاپ درست شده است که برای این کار سه روش مدل فیزیکی، استفاده از نرم‌افزار ANSYS و استفاده از تحلیل عددی بکارگرفته شده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده اند.

الف) مدل فیزیکی

در این روش مدل سوپاپ الکترومغناطیسی با صرف نظر از پدیده‌های پارازیتی به‌وسیله محاسبه حلقه‌های مغناطیسی که از توزیع هندسی میدان هسته آهنی بوجود می‌آید، درست می‌شود. از آنجائیکه هسته



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

۳- رفتار سوپاپ الکترومغناطیسی ایده‌آل

سوپاپ مغناطیسی یک سیستم مغناطیسی - مکانیکی است که به علت پدیده‌هایی همچون هیستریزس و اشباع، رفتارش فقط به طور تقریبی قابل تحلیل است. برای درک بهتر موضوع، رفتار سوپاپ الکترومغناطیسی را می‌توان از سه منظر جداگانه الکتریکی، مغناطیسی و مکانیکی بررسی کرد که بدین ترتیب موقعیت کل سیستم سوپاپ و در نتیجه رفتار مدار کنترل کننده الکترونیکی آن را می‌توان به درستی استنتاج و پیاده‌سازی کرد.

الف) رفتار الکتریکی

رفتار الکتریکی سوپاپ الکترومغناطیسی را می‌توان به وسیله 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:

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

با

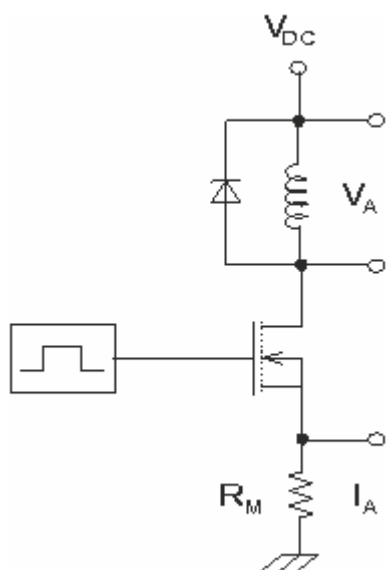
N به عنوان تعداد سیم‌پیچ‌های سوپاپ

و $\phi(t)$ به عنوان شار مغناطیسی عبوری از سلف سوپاپ

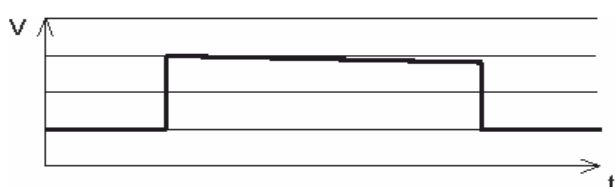
شار مغناطیسی به طور مستقیم به جریان $I(t)$ و مکان صفحه فلزی وابسته است که در نتیجه ارتباط بین ولتاژ و جریان سوپاپ الکترومغناطیسی حاصل می‌شود. برای تعیین رفتار الکتریکی سوپاپ الکترومغناطیسی تغییرات ولتاژ و جریان یکی از سلف‌های آن در موقعیت‌های مختلف مکانی بر حسب زمان بررسی و اندازه‌گیری شد. برای این اندازه‌گیری از مدار شکل ۳ استفاده شده که سیگنال ورودی آن یک منبع پالسی است. برای اندازه‌گیری جریان عبوری از سوپاپ از مقاومت اندازه‌گیری R_M استفاده شده که مقدار آن در محدوده میلی‌اهم است تا از اتلاف انرژی جلوگیری شود. با روشن شدن مدار تمام ولتاژ منبع مستقیم V_{DC} تقریباً در سوپاپ الکترومغناطیسی ظاهر می‌شود و جریان در لحظه روشن شدن بر اساس رابطه:

$$I = \frac{V}{L} \quad (2)$$

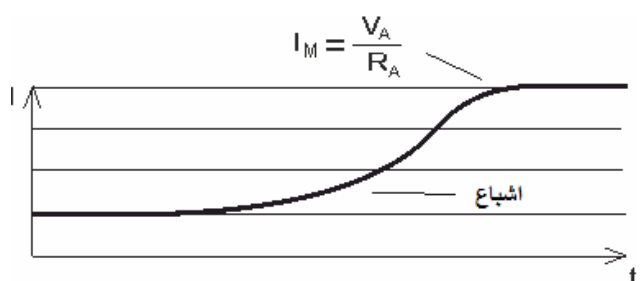
به طور ضعیفی افزایش می‌یابد، چرا که مقدار اندوکتانس L در ابتدا بزرگ است. از آنجائیکه بعد از مدت زمان کوتاهی مواد مغناطیسی موجود در آن به سمت اشباع میل می‌کند، لذا افزایش جریان کم‌کم بیشتر می‌شود (مقدار اندوکتانس کاهش می‌یابد). برای $t \rightarrow \infty$ جریان عبوری از سوپاپ به وسیله مجموع مقاومت R_T (شامل مقاومتهای سیم‌پیچ بکاررفته، مقاومت اندوکتانس R_A ، مقاومت R_M و غیره) محدود می‌شود $(I_{M,A} = \frac{V_A}{R_T} \approx \frac{V_A}{R_A})$. تغییرات زمانی ولتاژ و جریان سوپاپ الکترومغناطیسی در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل (۳): مدار اندازه‌گیری ولتاژ و جریان سوپاپ الکترومغناطیسی



(الف)



(ب)

شکل (۴): مقادیر اندازه‌گیری‌بهای موردانتظار سوپاپ الکترومغناطیسی،

(الف) ولتاژ، (ب) جریان

(ب) رفتار مغناطیسی

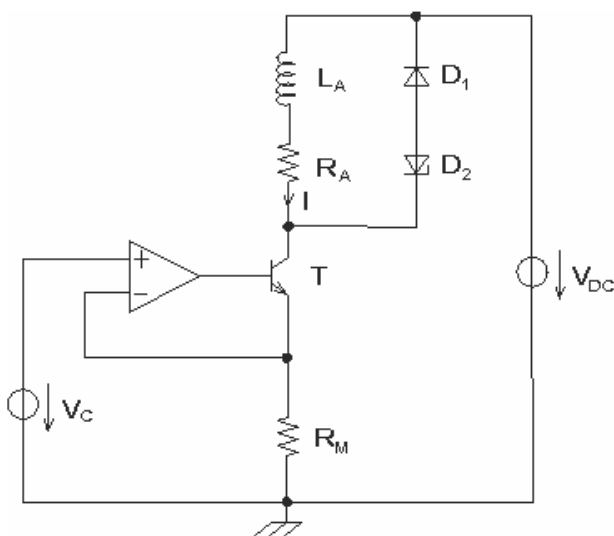
برای مقادیر بزرگ جریان و میدان مغناطیسی H ، هسته آهنی سوپاپ الکترومغناطیسی رفتاری کاملاً اشباع (ناحیه غیرخطی) خواهد داشت. همچنین تغییرات مکانی صفحه فلزی در سوپاپ پدیده میدان پراکندگی اضافی ایجاد می‌کند که می‌تواند بر رفتار الکتریکی و مغناطیسی سیستم تأثیر بگذارد.

برای محاسبه رفتار سوپاپ الکترومغناطیسی ایده‌آل، خطوط میدان مغناطیسی همچون شکل ۵ در نظر گرفته می‌شود [۲۲].

K_F به عنوان ثابت فنر

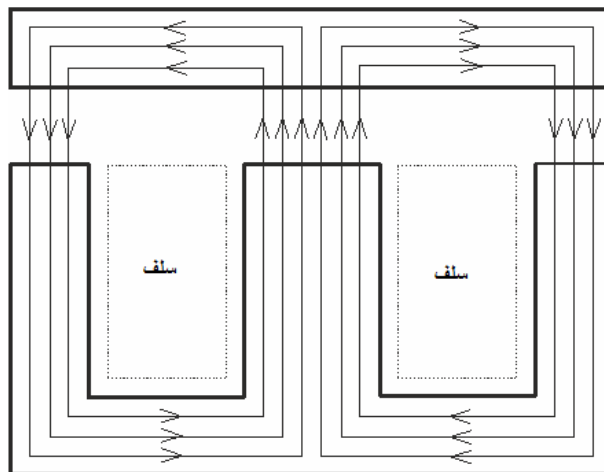
۴- کنترل سوپاپ الکترومغناطیسی

وظیفه اصلی واحد کنترل کننده الکترونیکی، تغذیه جریان‌های الکتریکی از قبل تعریف شده در زمان‌های معین، در سلف‌های سوپاپ الکترومغناطیسی است. برای این مهم می‌توان از 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 می‌شود که افت ولتاژ دو سر مقاومت R_M به علت جریان عبوری I از سلف سوپاپ، متناسب با V_C باشد.



شکل (۶): مدار کنترل کننده سوپاپ الکترومغناطیسی بر اساس تنظیم کننده خطی

اما این مدار عیب بزرگی دارد و آن این است که در حالت جریان ثابت عبوری از سلف L_A افت ولتاژ دو سر آن به سمت صفر میل می‌کند و برای مقادیر کوچک R_A (مقاومت اندوکتانس سلف سوپاپ الکترومغناطیسی) و R_M (مقاومت لازم جهت اندازه‌گیری جریان عبوری از سلف سوپاپ الکترومغناطیسی) تقریباً کل ولتاژ منبع تغذیه مستقیم V_{DC} در ترانزیستور T ظاهر می‌شود (V_{DC} در عمل حدود ۴۲ ولت است). در نتیجه اتلاف انرژی قابل ملاحظه‌ای در ترانزیستور بوجود می‌آید که هزینه‌های خنک کردن ترانزیستور و کاهش بازدهی را به دنبال خواهد داشت. لذا ساختار مدار شکل ۷ که بر اساس تنظیم کننده کلیدی (حالت قطع و وصل) کار می‌کند، انتخاب شده است. در مدار شکل ۷ ترانزیستور T_2 به وسیله سیگنال E روشن می‌شود و در نتیجه جریان سوپاپ I از مقاومت R_M عبور می‌کند. افت ولتاژ دو سر مقاومت R_M به کمک دو مقایسه کننده (comparator) C_1 و C_2 با مقادیر آستانه حد بالایی و پائینی از قبل مشخص شده جریان سوپاپ مقایسه می‌شود. اگر جریان عبوری از R_M بزرگتر از حد آستانه بالایی باشد، مقایسه کننده C_1 روی مقدار کمینه قرار می-



شکل (۵): خطوط میدان مغناطیسی ایده‌آل برای مدل یک سوپاپ الکترومغناطیسی

برای حلقه‌های مغناطیسی شکل ۵ ولتاژ مغناطیسی $V_{mag}(t)$ را می‌توان برحسب جریان عبوری $I(t)$ نوشت، یعنی:

$$V_{mag}(t) = NI(t) \quad (۳)$$

شارمغناطیسی عبوری از صفحه فلزی برابر می‌شود با:

$$\phi(t) = \frac{NI(t)}{\frac{2l_L(t)}{\mu_0 A} + R_F} \quad (۴)$$

با

μ_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 هوای بین هسته و صفحه فلزی

برای فواصلی که مقاومت مغناطیسی هسته آهنی و صفحه فلزی در مقابل طول شکاف هوا کوچک باشد، رابطه ۴ تبدیل می‌شود به:

$$\phi(t) = \frac{NI(t)}{\mu_0 A} \quad (۵)$$

در نتیجه برای نیروی مغناطیسی که با آن صفحه فلزی سوپاپ الکترومغناطیسی کشیده می‌شود، می‌توان نوشت:

$$F_{mag} = \frac{\phi(t)^2}{\mu_0 A} \quad (۶)$$

ج) رفتار مکانیکی

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

$$F_F(t) = -K_F s(t) \quad (۷)$$

با

$s(t)$ به عنوان موقعیت صفحه فلزی نسبت به محل مرکزی و

$$\frac{dI(t)}{dt} = \frac{V_{DC} - R_A I(t)}{L_A(t)} \quad (8)$$

$L_A(t)$ به عنوان اندوکتانس وابسته به زمان سوپاپ الکترومغناطیسی و V_{DC} در ابتدا وابسته به زمان در نظر گرفته می‌شود.

اگر ترانزیستور T_1 و یا T_2 خاموش نشوند، در نتیجه جریان در محدوده حد خودش افزایش می‌یابد:

$$I_M = \frac{V_{DC}}{R_A} \quad (9)$$

ب) اگر ترانزیستور T_2 روشن و ترانزیستور T_1 خاموش باشد.

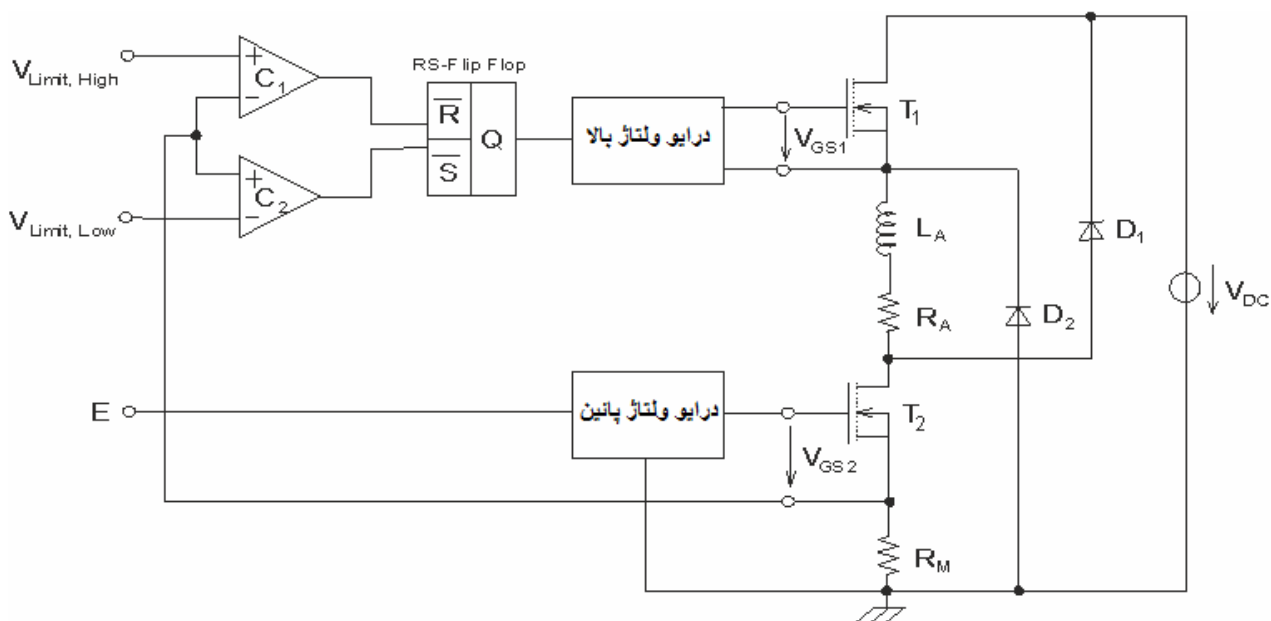
جریان عبوری از سلف سوپاپ و از طریق مقاومت R_A ، ترانزیستور T_2 ، مقاومت R_M و دیود D_2 دوباره به سلف سوپاپ برمی‌گردد. از آنجائیکه اتلاف انرژی در این حالت ناچیز است، جریان الکتریکی به طور آهسته کاهش پیدا می‌کند.

گیرد و ترانزیستور T_1 به وسیله Flip - Flop خاموش می‌شود. اگر جریان سوپاپ کوچکتر از حد آستانه پائینی باشد، در این صورت مقایسه‌کننده C_2 روی مقدار کمینه قرار می‌گیرد و ترانزیستور T_1 دوباره روشن می‌شود. به وسیله روشن - و خاموش کردن متناوب ترانزیستور T_1 و در حالی که ترانزیستور T_2 روشن است، ولتاژ سوپاپ مغناطیسی چنان تنظیم می‌شود که مقدار حد وسط جریان موردنظر موجود باشد. در واقع می‌توان گفت که برای محاسبات پارامترهای الکتریکی، مدار معادل شکل ۷ استنتاج شده است.

مدار شکل ۷ به‌طور کلی می‌تواند 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 پائین یعنی ترانزیستور T_1 ، اندوکتانس L_A ، مقاومت R_M و ترانزیستور T_2 داریم. هنگام روشن شدن مدار، جریان به‌وسیله L_A افزایش می‌یابد. شیب افزایش جریان $\left(\frac{dI(t)}{dt}\right)$ با توجه به ناچیز بودن مقاومت R_M مشخص می‌شود با:



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

افزایش می‌یابد. همین که جریان الکتریکی از حد مجاز بالایی تجاوز کند، حالت (ب) یعنی کاهش جریان اتفاق می‌افتد. جریان الکتریکی در حالت ایده‌آل مقدار لحظه‌ای خود را حفظ می‌کند که به علت اتلاف انرژی الکتریکی در این حالت به صورت نمایی با ثابت زمانی بزرگ کاهش می‌یابد. بعد از تغییر کاهش جریان، مدت زمانی سپری خواهد شد تا جریان الکتریکی به حد مجاز پائینی خود برسد. در این هنگام ترانزیستور T_1 دوباره روشن می‌شود. ترانزیستور T_2 همیشه روشن است و فقط وقتی خاموش می‌شود که جریان عبوری از سلف سوپاپ و دیودهای D_1 و D_2 سریع کاهش پیدا کنند. ولتاژ

پ) اگر هیچ کدام از ترانزیستورهای T_1 و T_2 روشن نباشند. جریان عبوری از سلف به‌وسیله دیودهای D_1 و D_2 به منبع ولتاژ V_{DC} برمی‌گردد؛ به عبارت دیگر انرژی ذخیره شده در سلف سوپاپ به منبع ولتاژ برمی‌گردد و در نتیجه جریان الکتریکی خیلی سریع کاهش می‌یابد.

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 می‌دهد. برای تنظیم جریان الکتریکی، ابتدا هر دو ترانزیستور روشن‌اند. شیب جریان الکتریکی در ابتدا بطور خطی

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 می‌شود. به عبارت دیگر مدار از شبکه هیچ توانی دریافت نمی‌کند. از این رو 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 می‌دهد. بعد از پردازش آنالوگ سیگنال‌های ورودی، آنها به واحد میکروکنترلر عرضه می‌شوند. واحد میکروکنترلر سپس سیگنال‌های موردنظر را بر طبق الگوریتم کنترل درخواستی تولید می‌کند که به کمک درایور به ترانزیستورهای قدرت (و جهت روشن- و خاموش کردن آنها) عرضه می‌شود و بدین ترتیب سیگنال‌های جریان موردنظر در سوپاپ الکترومغناطیسی تولید می‌شود.

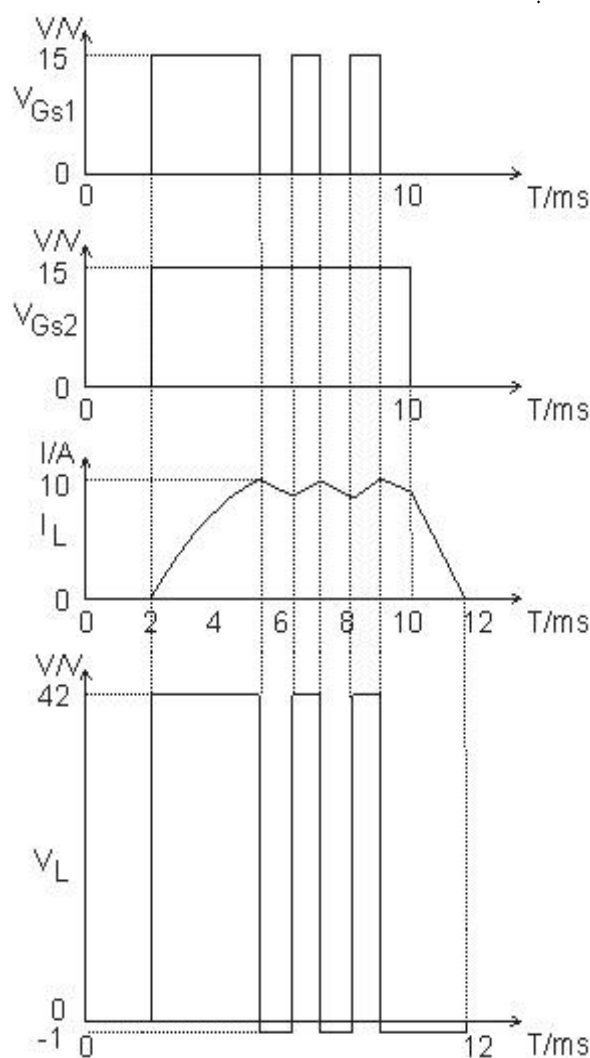
شکل ۱۰ مدار تغذیه کننده به واحد مدار کنترل کننده الکترونیکی را جهت روشن- و خاموش کردن ترانزیستورهای قدرت نشان می‌دهد که در آن از یک درایور ولتاژ بالا استفاده شده است. همان طوری که در شکل ۱۰ می‌بینیم در اینجا از یک خازن کمکی C_H برای تولید ولتاژ بالای دینامیکی استفاده شده است.

در مواقع خاموش بودن ترانزیستور T_1 خازن کمکی C_H پر می‌شود، به طوری که در هنگام روشن شدن ترانزیستور T_1 به کمک همین خازن از لحاظ دینامیکی ولتاژی تولید می‌شود که بیشتر از ولتاژ منبع V_{DC} است. کنترل درایور ولتاژ بالا از جریان آئینه ای با ترانزیستورهای T_4 و T_5 نتیجه می‌شود که با تغذیه جریان الکتریکی و روشن بودن ترانزیستور T_3 انجام می‌گیرد. سپس جریان تولید شده در ترانزیستور T_4 در مقاومت R_1 جاری می‌شود که از افت ولتاژ حاصله به عنوان سیگنال محرک در درایور ولتاژ بالا استفاده می‌شود.

۵- مدارهای اندازه گیری

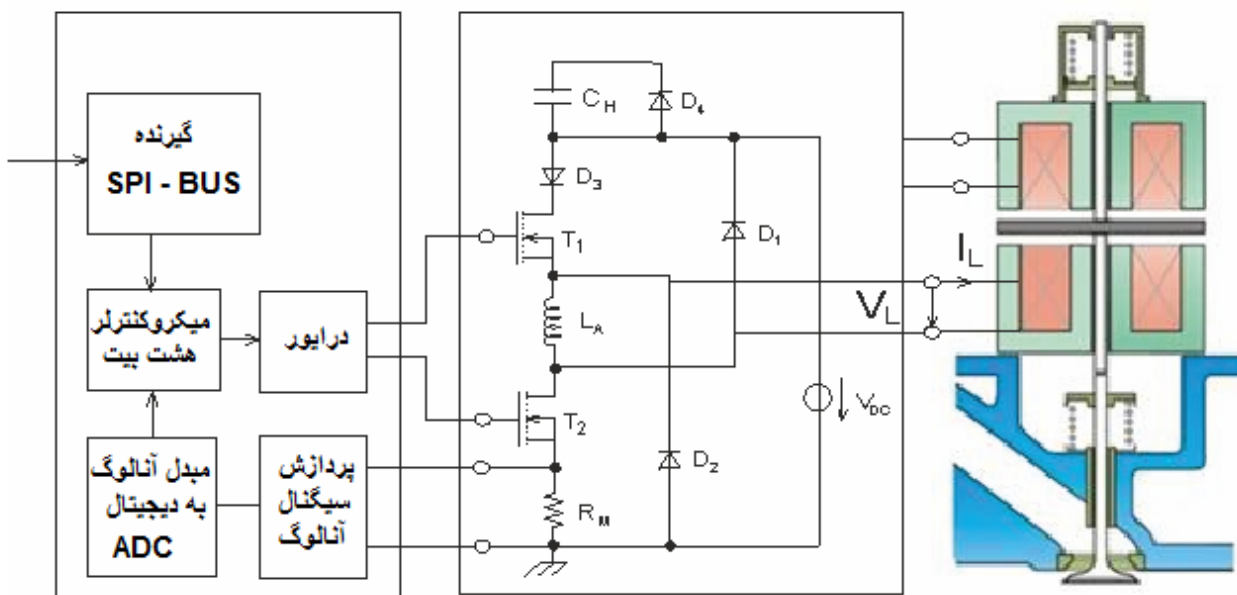
روش‌های مختلفی برای تحقق مراحل کنترلی سوپاپ الکترومغناطیسی وجود دارد که هر کدام پیچیده گی خاص خود را دارد؛ به عنوان مثال دیجیتالی کردن سیگنال مشتق جریان سلف که فقط با نمونه برداری زیاد امکان پذیر است و یا تطبیق کامل قسمت‌های مختلف مدار در قسمت آنالوگ. لذا جهت سادگی کار، ترکیبی از هر دو روش آنالوگ و دیجیتال 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 دیجیتال استفاده می‌شود.

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 می‌باشد (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 آنجائیکه ترانزیستور T_1 در فواصل معین روشن و خاموش می‌شود، جریان و در نتیجه ولتاژ الکتریکی سلف سوپاپ بین دو مقدار مجاز بالایی و پائینی موردنظر بطور ثابت نگه داشته می‌شود. به عبارت دیگر مدار بین دو حالت بیشینه و کمینه جریان، تغییر وضعیت می‌دهد تا جریان و ولتاژ الکتریکی سلف در محدوده مجاز حدوسط باقی بمانند. جریان الکتریکی از زمان تغذیه انرژی افزایش می‌یابد، از این زمان به بعد صفحه فلزی شروع به حرکت می‌کند. در ابتدا شیب جریان الکتریکی مثبت است. اتلاف انرژی الکتریکی نیز در این حالت مثبت است.

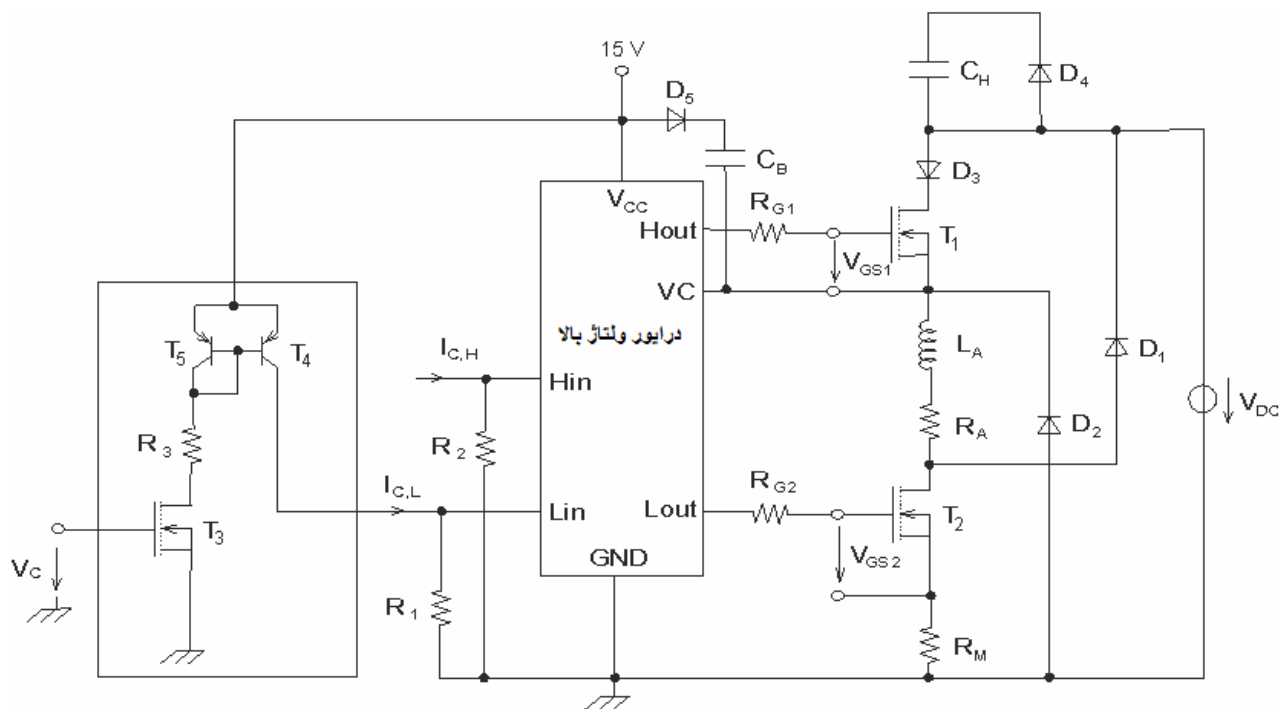


شکل (۸): نمودار جریان و ولتاژ سلف و سیگنال‌های هدایت کننده ترانزیستورهای T_1 و T_2

میکروپروسسورهای قسمت دیجیتال مدار به کمک درایورهای ولتاژ بالا، سیگنال‌های موردنظر به ترانزیستورهای قدرت T_1 و T_2 را



شکل (۹): ساختار کلی واحد کنترل

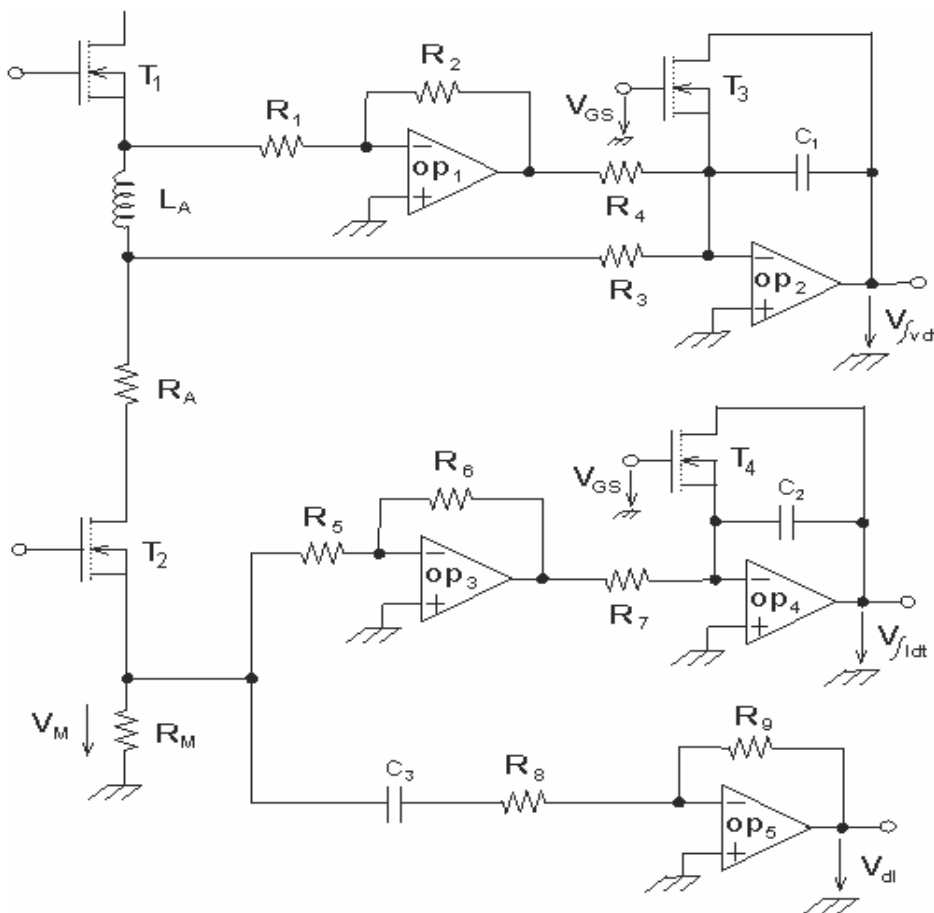


شکل (۱۰): نحوه تغذیه ترانزیستورهای قدرت استفاده شده توسط درایور ولتاژ بالا

محاسبه اختلاف پتانسیل‌های دو سر سلف در سر منفی ورودی تقویت‌کننده عملیاتی معکوس OP_2 انجام می‌گیرد. جهت تنظیم انتگرال‌گیر از ترانزیستور T_3 استفاده می‌شود. برای انتگرال‌گیری و مشتق‌گیری جریان نیز از ولتاژ الکتریکی استفاده می‌کنیم (یعنی

مطابق الگوریتم انتخاب‌شده، تولید می‌کنند تا با روشن- و خاموش کردن این ترانزیستورها، رفتار حرکتی سوپاپ ایجاد شود. در تشکیل سیگنال‌های آنالوگ، باید از سیگنال‌های اندازه‌گیری شده جریان و ولتاژ الکتریکی سلف L_A مشتق‌گیری و انتگرال‌گیری شود تا موقعیت صفحه فلزی سوپاپ الکترومغناطیسی تعیین شود. این کار توسط مدار شکل ۱۱ انجام می‌گیرد. انتگرال‌گیری ولتاژ سلف L_A با

محاسبه افت ولتاژ ایجادشده در دو سر مقاومت R_M به‌واسطه جریان عبوری از سلف L_A .

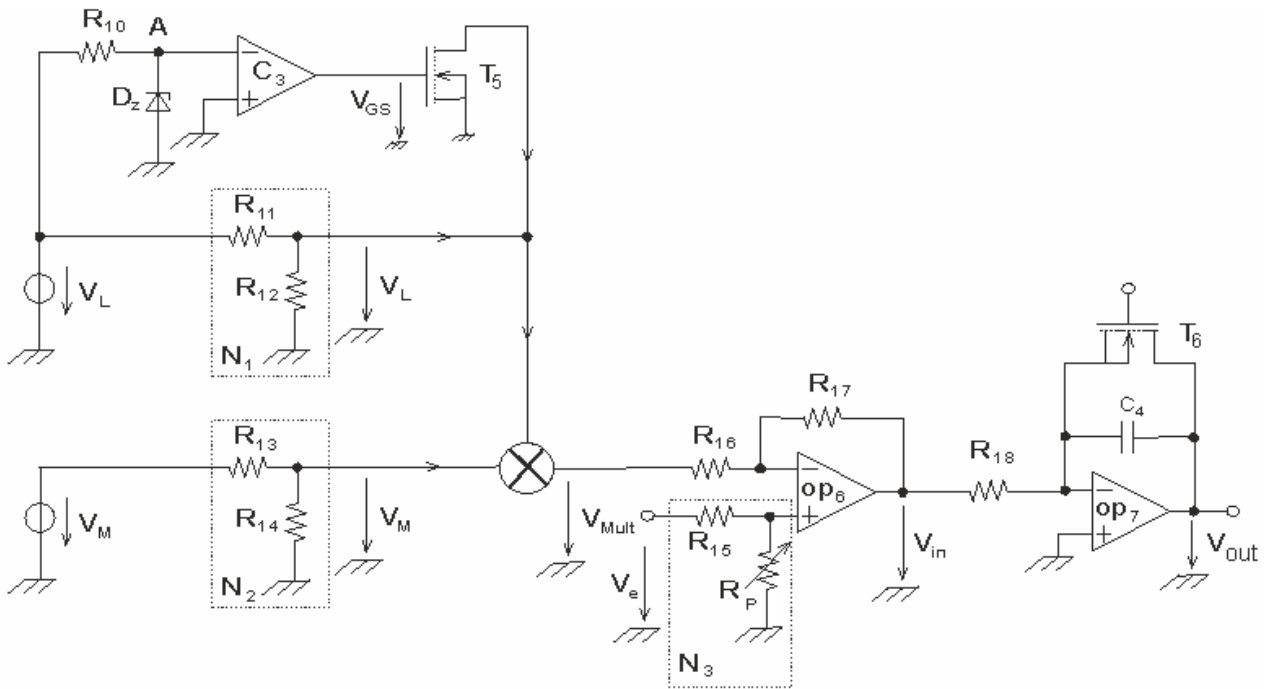


شکل (۱۱): مدارهای مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر

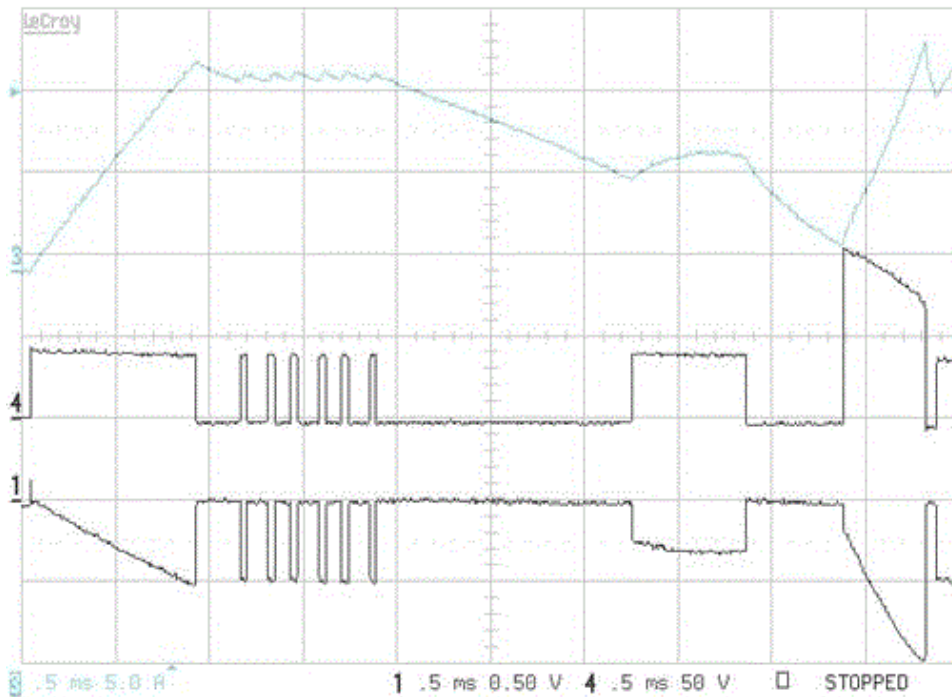
محرك آن بدست می‌آید. ولتاژ دو سر سلف V_L به ورودی سر منفی مقایسه‌کننده C_3 و تقسیم‌کننده ولتاژ N_1 (با مقاومت‌های R_{11} و R_{12}) متصل می‌گردد. ولتاژ V_M (افت ولتاژ دو سر مقاومت R_M) تقسیم‌کننده ولتاژ N_2 با مقاومت‌های R_{13} و R_{14} را تغذیه می‌کند. از دو تقسیم‌کننده ولتاژ N_1 و N_2 به علت تطبیق به ورودی‌های ضرب‌کننده استفاده شده است. مقایسه‌کننده C_3 به ترانزیستور T_5 متصل می‌گردد. شاخه درین ترانزیستور T_5 به خروجی اولین تقسیم‌کننده ولتاژ N_1 متصل می‌گردد که هر دو اینها اولین شاخه ورودی ضرب‌کننده را تشکیل می‌دهند. خروجی دومین تقسیم‌کننده ولتاژ N_2 نیز دومین شاخه ورودی ضرب‌کننده را تشکیل می‌دهد. به سر منفی مقایسه‌کننده C_3 مقاومت R_{10} و دیود زنر D_Z متصل می‌گردد (مقاومت R_{10} جهت تامین جریان الکتریکی دیود زنر است). ولتاژ دیود زنر نقش ولتاژ دیود D_2 در حالت کاهش جریان را بازی می‌کند. برای مقادیر مثبت V_L ولتاژ نقطه A همان ولتاژ دیود زنر است. به عبارت دیگر وقتی دیود زنر هدایت می‌کند، ولتاژ خروجی مقایسه‌کننده C_3 منفی می‌شود. برای مقادیر منفی V_L ولتاژ نقطه A منفی است و در نتیجه ولتاژ خروجی مقایسه‌کننده C_3 مثبت می‌شود.

ولتاژ دو سر مقاومت R_M توسط یک تقویت‌کننده تفاضلی و یک مبدل جریان به ولتاژ بدست می‌آید. بدین وسیله می‌توان به پهنای باند و $CMRR$ (common mode rejection ratio) بزرگتری برای فرکانس‌های بالا دست یافت. برای انتگرال‌گیری جریان الکتریکی از تقویت‌کننده عملیاتی معکوس OP_4 استفاده می‌شود. خازن C_2 با هدایت ترانزیستور T_4 جهت تنظیم مجدد انتگرال‌گیر خالی می‌شود. برای مشتق‌گیری جریان الکتریکی نیز تقویت‌کننده عملیاتی معکوس OP_5 و خازن C_3 نقش ایفا می‌کنند.

در شکل ۱۲ مدار اندازه‌گیری انرژی مصرفی نشان داده شده است. این مدار انرژی داده شده به هر سلف واحد محرك سوپاپ الکترومغناطیسی (سلف بالایی و پائینی شکل ۱) را به‌طور جداگانه و از طریق تعیین توان مصرف‌شده (که از حاصل ضرب ولتاژ و جریان مصرف‌شده در سلف حاصل می‌شود) محاسبه می‌کند. برای محاسبه توان مصرفی سلف 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). خروجی‌های V_{in} و V_{out} شکل ۱۲ به ترتیب توان و انرژی مصرفی معادل را نشان می‌دهند. انرژی مصرفی هر سوپاپ از مجموع انرژی مصرفی سلف‌های بالایی و پائینی واحد



شکل (۱۲): مدار اندازه‌گیری انرژی مصرفی



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

هدایت می‌کند (ولتاژ گیت ترانزیستور T_5 مثبت است)، در نتیجه ولتاژ درین - سورس ترانزیستور T_5 خیلی کوچک و نزدیک به صفر می‌شود. یعنی ولتاژ اولین شاخه ورودی ضرب‌کننده تقریباً صفر است. پس برای مقادیر منفی V_L ($V_L \approx -1V$) ضرب‌کننده دو ولتاژ ورودی V_M و صفر را ضرب می‌کند. بدین ترتیب می‌توان

وقتی ولتاژ خروجی مقایسه‌کننده C_3 منفی است، ترانزیستور T_5 هدایت نمی‌کند (ولتاژ گیت ترانزیستور T_5 منفی است). پس ولتاژ اولین شاخه ورودی ضرب‌کننده V_L است. یعنی برای مقادیر مثبت V_L ضرب‌کننده دو ولتاژ ورودی V_M و V_L را ضرب می‌کند. وقتی ولتاژ خروجی مقایسه‌کننده C_3 مثبت است، ترانزیستور T_5

در شکل ۱۴ تغییرات زمانی جریان، ولتاژ و انرژی مصرفی نیز رسم شده است. نمودار بالایی، تغییرات جریان، نمودار پائینی تغییرات ولتاژ و نمودار وسطی تغییرات انرژی مصرفی را نشان می‌دهد. در اندازه‌گیری‌های عملی $R_M = 20\text{ m}\Omega$ انتخاب شده است و بیشینه توان مصرف شده هم

$$P_{max} = V_L \cdot I_L = 110\text{ V} \cdot 40\text{ A} = 4400\text{ W}$$

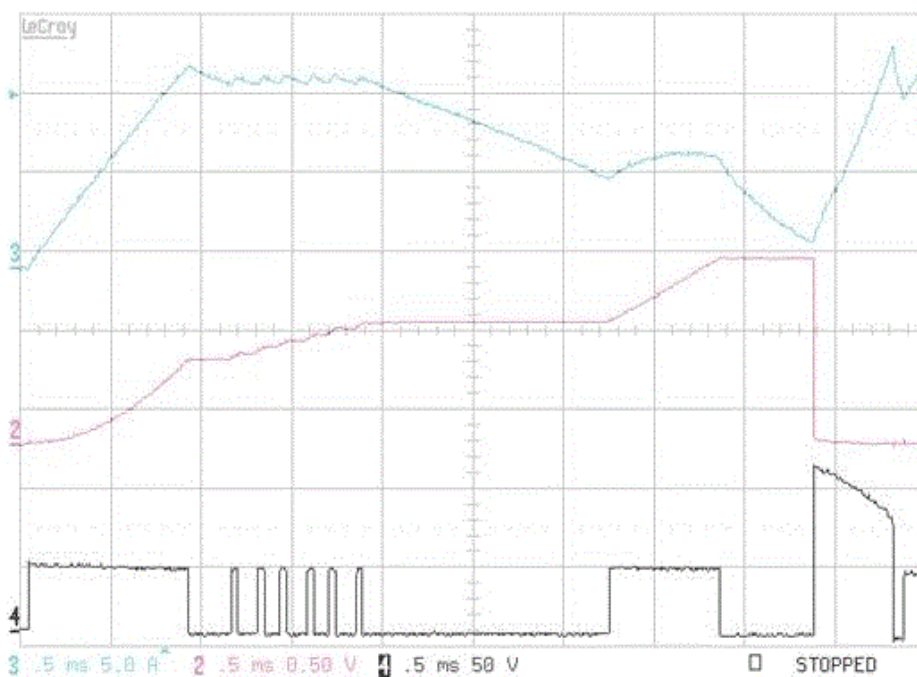
اندازه‌گیری شده است. این مقدار توان، معادل با ولتاژ خروجی تقویت کننده عملیاتی معکوس OP_6 (و یا ولتاژ ورودی انتگرال‌گیر OP_7) که $V_{in} = R_{17}/R_{16} = -5\text{ V}$ است، انتخاب می‌شود: $4400\text{ W} \equiv -5\text{ V}$. برای محاسبه بیشینه انرژی مصرف شده نیز بایستی حداکثر زمان انتگرال‌گیری مشخص باشد. با توجه به زمان نوسان سوپاپ الکترومغناطیسی

($\approx 4\text{ ms}$)، حداکثر زمان انتگرال‌گیری $T_{max} = 454 \cdot 10^{-6}\text{ s}$ اندازه‌گیری شده است. بنابراین بیشینه انرژی داده شده $E_{max} = P_{max} \cdot T_{max} = 2\text{ J}$ می‌شود که این مقدار انرژی، معادل با 5 V انتخاب شده است: $2\text{ J} \equiv 5\text{ V}$. بدین ترتیب حداکثر توان و انرژی مصرفی برای یک سلف به ترتیب حدود 440 W و 0.6 J بدست آمده است (یعنی 880 W و 0.6 J برای یک سوپاپ الکترومغناطیسی).

محاسباتی را برای مقادیر منفی V_L بر روی صفر تنظیم کرد. ولتاژ خروجی ضرب کننده V_{Mult} توسط تقویت کننده عملیاتی OP_6 با مقاومت‌های R_{16} و R_{17} تقویت می‌شود. برای خنثی کردن ولتاژ افست تقویت کننده عملیاتی OP_6 از یک تقسیم کننده ولتاژ N_3 (مشکل از مقاومت R_{15} و پتانسیومتر R_p) استفاده می‌شود. جهت محاسبه انرژی مصرفی از توان خروجی P_{in} (به عبارتی از ولتاژ خروجی V_{in}) توسط تقویت کننده عملیاتی OP_7 (با مقاومت R_{18} و خازن C_4) انتگرال‌گیری می‌شود. از ترانزیستور T_6 برای تنظیم مجدد انتگرال‌گیر OP_7 استفاده می‌گردد.

۶- نتایج اندازه‌گیری

در شکل ۱۳ تغییرات زمانی جریان، ولتاژ و توان مصرفی سلف سوپاپ الکترومغناطیسی نشان داده شده است. نمودار بالایی، تغییرات جریان، نمودار وسطی تغییرات ولتاژ و نمودار پائینی ضرب این دو (توان) را نشان می‌دهد. منبع جریان مستقیم DC به کمک واحد کنترل کننده، ولتاژ ۴۲ ولت و جریان عبوری ۱۲ آمپر را تولید می‌کند که این ولتاژ به کمک چندین تقویت کننده DC/DC تولید می‌شود.



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

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله کنترل‌کننده الکترونیکی سوپاپ‌های سیلندر برای خودروها و یا هر موتور مکانیکی دیگر طراحی و ساخته شده است. این کنترل‌کننده با یک محرک الکترومغناطیسی و بر اساس قانون القای الکترومغناطیسی، یک سیستم رزونانس الکتریکی-مکانیکی تولید می‌کند. دو سلف مقابل یکدیگر که بر روی یک هسته فرومغناطیسی سیم‌پیچی شده‌اند، این محرک الکترومغناطیسی را تشکیل می‌دهند. هنگام عبور جریان الکتریکی از یکی از سلف‌ها، شار الکترومغناطیسی عبورکننده و در نتیجه نیروی مغناطیسی بوجود آمده، باعث کشاندن صفحه فلزی و میله 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 بوسیله جریان و ولتاژ الکتریکی انجام می‌گیرد. کنترل‌کننده الکترونیکی با نصب بر روی یک موتور با منبع ولتاژ مستقیم DC تست شد و توانست خواسته‌های مورد انتظار را برآورده سازد.

مراجع

- course of various electrical parameters". DE 102012 205 573 A1, Continental Automotive GmbH, Germany, 2013
- [10] A. Dukart, "Einspritzventil", DE10 2009 055 045 A 1, Robert Bosch GmbH, 2009.
- [11] W. Imoehl, "Fuel Injection System Trends and Emissions Implications", Continental Automotive Systems Newport News, SAE Technical Paper, 2013
- [12] K.Reif, Bosch, "Car electrics and car electronics", Robert Bosch GmbH, Teubner, Germany, 2011
- [13] A.Schultz, "Simulation-based design of electromagnetic linear actuators for fluidic valves", Dissertation, university of Aachen, Germany, 2006
- [14] V. Konev, "Foundations and Applications Electromagnetic actuators" Mechatronics, May 27, 2006
- [۱۵] حمید محمد حسین، میلاد نظامی، طندوست، حمید رادمنش، "طراحی ماشین شار محوری مغناطیس دائم با استفاده از الگوریتم بهینه سازی تجمع ذرات بهبودیافته"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک، جلد ۱۵، شماره ۱، صفحه ۱۲۳-۱۳۱، ۱۳۹۷
- [16] Y.Wang, X. Liu, "The Optimal Drive Current of Solenoid Valve and its Effect on Fuel Injection Characteristics", IEEE, 2010
- [17] S. Staples, "Transfer Report Using Magneto striation and the Villard Effect to detect Anomalies in Steel Materials", 2012
- [18] M. Sunwoo, J. Kang, "Nadelhub- Abschätzvorrichtung einer Kraftstoffein spritzdüse mit gemeinsamer Druckleitung", Patent DE 102 20 388 A1, Hyundai Motor Company, Germany 2002
- [19] S. Rosenbaum, "Design of electromagnetic actuators taking into account hysteresis", university Ilmenau Germany, 2011
- [۲۰] کریم عباس زاده، فایمه صفار، "مدل سازی عددی و تحلیل نیروهای الکترومغناطیسی ترانسفورماتور اُوال و مقایسه آن با ترانسفورماتور سیلندری با استفاده از روش اجزای المان محدود"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک، جلد ۱۳، شماره ۱، صفحه ۱۲۳-۱۳۴، ۱۳۹۵
- [۲۱] سیدمحمدجواد جعفریان امیری، جلال نظرزاده دینار، "مدلسازی و تحلیل دینامیک حرکت ارتعاشی رتور در ماشین های القایی با سه درجه آزادی"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک، جلد ۱۷، شماره ۲، صفحه ۸۷-۹۷، ۱۳۹۹
- [22] P. Schneider, "FEM-gestützte Ableitung von Magnet kreismodellen für elektromagnetische Aktoren im Graf-Zeppelin"-Haus Friedrichshafe, Fraunhofer Institute, Germany, 2000

- [1] R. Flierl, M. Kluting, "New Fully Variable Valve trains for Throttle", Free Load Control, The Third Generation of Valve trains, SAE Special Publication, 2000
- [2] F. Staay, Variable Valve Timing, "A new Dimension of Engine Controls", European Automotive, Congress, Barcelona, 1999
- [۳] محمدتقی نوده، حسین قلی زاده نرم، امین حاجی زاده، "استراتژی کنترل پیشبین برای مدیریت توان در خودروی الکتریکی هیبرید موازی"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک، جلد ۱۳، شماره ۳، صفحه ۴۹-۵۶، ۱۳۹۵
- [4] M. Pischinger, "Benefits of the Electromechanical Valve Train in Vehicle Operation", SAE Special Publication", 2000
- [۵] سجاد قنادی، عباس شیری، "طراحی و بهینه سازی موتور القایی خطی جهت بهبود شرایط راه اندازی"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک، جلد ۱۶، شماره ۳، صفحه ۲۵-۹۴، ۱۳۹۸
- [6] F. Denk, "Electromagnetic Injectors for Otto - motor", A contribution to the characterization and system integration of fast switching actuators, university ilmenau, Germany, 2018
- [7] M.Herrmann, "Design, calculation and regulation of magnetic reluctance actuators", Dissertation, University Munich, Germany 2008
- [8] 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
- [9] G. Rösel, F Denk, "Determining the temporal movement behavior of a fuel injector based on an evaluation of the time