

زمان بندی سوپاپ و مکانیزم کنترل لیفت سوپاپ برای موتورها

چکیده

یک سیستم کنترل سوپاپ نوع جدید ارائه شده است که در آن لیفت سوپاپ و زمان بندی سوپاپ به طور مستقیم توسط موتورهای الکتریکی کنترل می شوند. یک مکانیزم از سیستم کنترل زمانبندی سوپاپ از چرخ دنده های سیاره ای ساخته شده است. دنده بیرونی، قرقره زمانبندی است که دارای کمر بند زمانبندی هدایت شده توسط میل لنگ یک موتور می باشد. دو چرخ دنده سیاره ای داخل قرقره می باشند. چرخ دنده ها با دنده داخلی از قرقره تعامل پیدا می کنند. مرکز دیسک، که دارای مراکز دنده های سیاره ای است، به میل بادامک متصل می شود. بنابراین، چرخش میل لنگ به میل بادامک منتقل می شود و چرخش های دنده خورشیدی به چرخش های میل بادامک اضافه می شود. این به این معنی است که زمانی که زاویه چرخش دنده خورشیدی کنترل می شود، فاز بین سوپاپ ورودی و سوپاپ دود را می توان کنترل کرد. سیستم کنترل لیفت از نوار لغزنده خطی و پیچ توپ ساخته شده است. شکل بادامک این سیستم سه بعدی است. ارتفاع بادامک در امتداد محور شفت تغییر می کند. هنگامی که پیچ توپ می چرخد، میل بادامک در جهت محوری می لغزد، به طوری که لیفت میل بادامک متغیر است. روش کنترل برای مکانیزم ارائه شده است که در آن فاز سوپاپ و لیفت به طور مداوم کنترل می شوند. آزمون های تجربی برای سیستم انجام می شوند.

کلمات کلیدی: کنترل، سوپاپ، موتور، فاز، لیفت، لیفت متغیر، فاز متغیر، سیستم دریچه هدایت شده

1. مقدمه

زمان بندی سوپاپ متغیر (VVT) در موتورهای اشتعال جرقه خودرو برای بهبود صرفه جویی در سوخت، کاهش گاز NO_x ، و افزایش حداکثر گشتاور و قدرت مورد استفاده قرار می گیرد. تعدادی از مقالات برای اثرات استفاده از میل بادامک زمان متغیر گزارش شده است [1-9]. یک بررسی از مسائل در [1,2]، نوشته شده است، در [3,4]، تاثیرات زمان بندی سوپاپ متغیر در احتراق، مورد بحث قرار گرفت و مکانیزم و طرح های آن در [5-8] گزارش شده است، که در آن کنترل فشار نفت به کار گرفته شد. میل بادامک دوقلوی قابل تغییر در [9] توسعه داده شد. به منظور داشتن سیستم VVT کامل، قطارهای سوپاپ موتور بدون بادامک مورد بحث قرار گرفت [10-25]، که در آن حرکت سوپاپ کاملاً مستقل از حرکت پیستون با استفاده از محرک های الکترومکانیکی بود. در آن مقالات، نویسندگان مکانیزم های موتورهای بدون بادامک نوع جدید [10,11]، مزایای آن در عملیات خودرو [12]، عملیات خفه نشده قوی [13]، و مدل پویا [14] را مورد بحث قرار دادند. روش کنترل نیز در [16,17,21] برای مدل سازی و کنترل آن توسعه داده شد. تجزیه و تحلیل نیز در [17] صورت گرفته است. برای موتورهای بدون بادامک، بزرگترین مشکل این کنترل از سرعت صندلی سوپاپ می آید. باید بسیار آهسته از نوپز و فرسودگی آکوستیک جلوگیری نمود. حل این مسئله، یک روش فرود نرم محرک سوپاپ الکترومکانیکی در [18,20] معرفی شده است. برای کنترل فیدبک، این سیستم به سنسورهای سرعت نیاز دارد، و یک دستگاه سنجش در [22] مورد بحث قرار گرفت. برای داشتن سیستم کنترل ارزان تر، دیسک سوپاپ حسگر نیز گزارش شده است [15,23].

لیفت سوپاپ متغیر نیز نقش مهمی در عملکرد موتور [19,24,25] ایفا می کند. کنترل های لیفت متغیر توسط میل بادامک مایع یا قابل تغییر انجام می شوند. نشان داده شده است که ترکیبی از لیفت سوپاپ متغیر و شارژر اگزوز توربو، پتانسیل قابل توجهی برای بهبود بیشتر گشتاور کم و حداکثر قدرت را در مقالات ارائه می دهد. بنابراین، موتور با زمانبندی متغیر و کنترل لیفت سوپاپ متغیر مطلوب می باشد. با این حال، محرکی که لیفت و زمانبندی را کنترل کند توسعه داده نشده است. موتور بدون بادامک دارای مزایای اشاره شده است، اما دارای معایب زیر می باشد: به

توان الکتریکی بزرگ و سیستم های کنترل پیچیده و گران نیاز دارد. پس از حل این مشکلات، محرک الکترومکانیکی، که لیفت و زمانبندی در موتور های عملی را کنترل می کند، در آینده نزدیک توسعه خواهد یافت.

اگر چه سوپاپ مکانیکی (سیستم سوپاپ-CAM) دارای معایب برای کنترل زمانبندی های سوپاپ می باشد که در آثار قبلی ذکر شده است، همچنین دارای برخی از مزایا در هنگام اجرای کنترل زمان بندی مداوم سوپاپ می باشد. مزایا به شرح زیر است: زمانی که فنرهای مناسب استفاده شوند، لیفت بادامک از پروفیل بادامک پیروی می کند [26]. این بدان معنی است که با استفاده از مشخصات مناسب میل بادامک، حرکت دقیق سوپاپ بدون کنترل که در عملکرد موتور [19] مهم می باشد غیرممکن است. حداکثر لیفت میل بادامک را می توان در مقادیر بزرگ تنظیم نمود (9/5 میلی متر) به دلیل اینکه حرکت سوپاپ توسط مشخصات میل بادامک محدود می شود، سطح نوپز در استفاده عملی است، و حرکت سوپاپ پایدار است. از این منظر، مقاله حاضر، یک سیستم کنترل جدید از نوع زمان بندی سوپاپ نوع جدید و سیستم کنترل لیفت سوپاپ را با استفاده از یک سیستم سوپاپ میل بادامک مرسوم فراهم می کند. همچنین دارای مزایای استفاده از سیستم سوپاپ-بادامک است. علاوه بر این، زمان بندی سوپاپ و لیفت سوپاپ به طور مداوم با استفاده از موتور DC کنترل می شوند. سیستم کنترل ساده است، و اگر چه تلفات اصطکاک وجود دارد، نیاز به هیچ منبع انرژی الکتریکی بزرگی برای کنترل نیست. برای داشتن کنترل دقیق مستمر زمان بندی سوپاپ، مقاله حاضر یک سیستم جدید کنترل زمان بندی سوپاپ مستمر را با استفاده از مکانیزم دنده های سیاره ای ارائه می دهد. در سیستم ما، چون یک موتور الکتریکی زمانبندی سوپاپ را به طور مستقیم کنترل می کند، به پمپ های فشار سیال و سوپاپ های الکترومغناطیسی [1-9] نیاز ندارند. مقاله حاضر نیز یک مکانیزم لیفت سوپاپ متغیر جدید یک موتور الکتریکی کنترل شده را ارائه می دهد که متفاوت سیستم [24,25] است. سیستم لیفت سوپاپ با سیستم کنترل زمان بندی سوپاپ ترکیب شده است. از این رو، سیستم کنونی می تواند لیفت سوپاپ و زمان بندی سوپاپ توسط موتورهای الکتریکی را به طور مستقیم کنترل کند.

2. مکانیسم سیستم کنترل سوپاپ

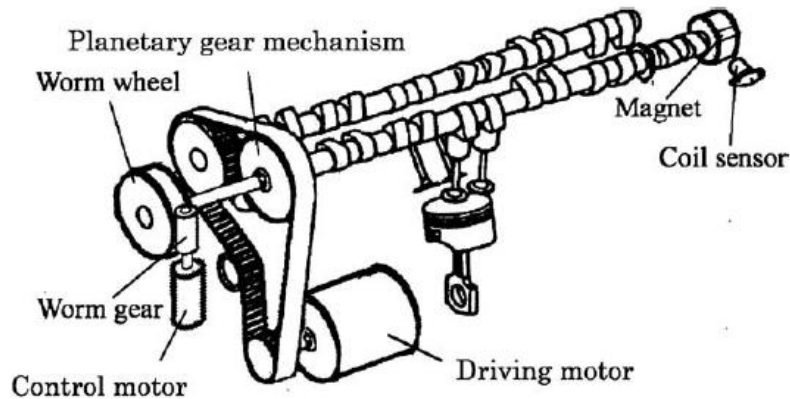
مکانیسم هدایت سوپاپ اساساً همانند یک موتور عرفی با سوپاپ ها و بادامک ها است، اما سیستم کنونی دارای مکانیسم های فاز و کنترل لیفت می باشد. سیستم کنترل سوپاپ کنونی شامل دو بخش می شود که یکی از آنها مکانیزم کنترل زمان بندی سوپاپ است و دیگری مکانیزم لیفت سوپاپ متغیر است.

2.1. مکانیزم کنترل زمان بندی سوپاپ

فاز اول از میل بادامک ها، در این مقاله متغیر است. شکل 1 نشان دهنده هندسه مکانیسم زمان بندی سوپاپ حاضر است. چرخش های میل لنگ یک موتور با استفاده از یک تسمه زمان بندی و قرقره های زمان بندی به هر دو بادامک های ورودی و اگزوز منتقل می شوند. در این آزمایش، یک موتور اینورتر به جای موتور استفاده می شود همانطور که در شکل 1 نشان داده شده است. در موتور بدون بادامک، احتراقات بر عملکرد حرکت سوپاپ تاثیر می گذارند [24]، به دلیل حرکت سوپاپ به طور مستقیم توسط محرک الکترومکانیکی [10-25] کنترل می شود. در موتور بادامک سوپاپ، برای جلوگیری از جهش و پرش، فنر با جابجایی اولیه مناسب (x_0) تنظیم می شود. نیروی بازگرداندن $F = k(x_0 + x)$ است که در آن k ثابت فنر سوپاپ و x ، جابجایی فنر تحت گردش بادامک است. این نیروی باید بیشتر از نیروی اینرسی سوپاپ باشد و با یک ضریب ایمنی خاص تعیین می شود. اثرات احتراق موتور روی حرکت سوپاپ می تواند نادیده گرفته شود، زیرا در ضریب ایمنی خواهد بود. این به این معنی است که حرکت سوپاپ تحت مشخصات میل بادامک در موتورهای عرفی است [26]. بنابراین، موتور به جای یک موتور برای چک کردن عملکرد کنترل قابل اجرا خواهد بود.

در سیستم ما، قرقره زمانبندی دارای مکانیسم دنده سیاره ای در داخل است و چرخش قرقره زمانبندی به میل بادامک عبوری از چرخ دنده سیاره ای منتقل می شود. از آنجا که یک شفت دنده خورشیدی به یک موتور کنترل با استفاده از یک مکانیزم چرخ دنده کرم متصل می شود، موتور کنترل می تواند دنده خورشیدی را بچرخاند، اما گشتاور از میل بادامک به موتور کنترل توسط کرم قفل می شود. موتور کنترل به قاب موتور متصل می شود. از آنجا

که موتور کنترل می تواند زاویه چرخش بادامک را تغییر دهد، زوایای بین سوپاپ ورودی و سوپاپ دود (فاز بین سوپاپ ورودی و سوپاپ دود) می تواند کنترل شود.



شکل 1. هندسه مکانیزم کنترل زمانبندی سوپاپ حاضر.

یک مکانیزم فشرده برای موتورهای مطلوب است. مقاله حاضر، زمان بندی سوپاپ فشرده را فراهم می کند همانطور که در شکل 2 نشان داده شده است و این مکانیزم سیاره ای در بالا ذکر شده است. در این قرقره، دو چرخ دنده سیاره ای با دنده داخلی از قرقره فعل و انفعال پیدا می کنند. شفت های چرخ دنده های سیاره ای به یک صفحه جانبی با شفت (شفت خروجی در شکل 2) متصل می شود، و محور خروجی به میل بادامک متصل می شود. چرخش قرقره زمانبندی به میل بادامک با نسبت دنده های خاص منتقل می شود. داخل دنده سیاره ای با دنده خورشیدی درگیر می شود. دنده خورشیدی دارای یک شفت با دندان چرخ کرم است. دنده چرخ کرم با یک کرم درگیر می کند که شفت آن (ورودی شفت در شکل 2) دارای یک موتور کنترل (در استفاده عملی از موتور) متصل به یک قاب است. از این رو، هنگامی که موتور کنترل می چرخد، چرخش به دنده خورشیدی عبور از طریق چرخ کرم منتقل می شود. چرخش دنده خورشیدی به قرقره اضافه می شود. سپس، فاز بین سوپاپ ورودی و سوپاپ دود می تواند متغیر باشد. در این سیستم، هنگامی که موتور کنترل نمی چرخد، مکانیزم چرخ کرم و کرم، دنده خورشیدی را قفل می کند. در این شرایط، چرخش میل لنگ به میل بادامک به طور مستقیم منتقل می شود. هنگامی که کنترل فاز مورد نیاز است، موتور کنترل راه اندازی می شود و تا زمان بندی سوپاپ را بتوان کنترل کرد.

جدول 1 ابعاد چرخ دنده های سیاره ای را نشان می دهد، که در آن Z_a تعداد دندانه های دنده خورشیدی، Z_b تعداد دنده های سیاره ای B، و Z_c تعداد دنده داخلی است. زمانی که دنده خورشیدی ثابت می شود، نسبت دنده بین دنده داخلی و حامل برابرست با

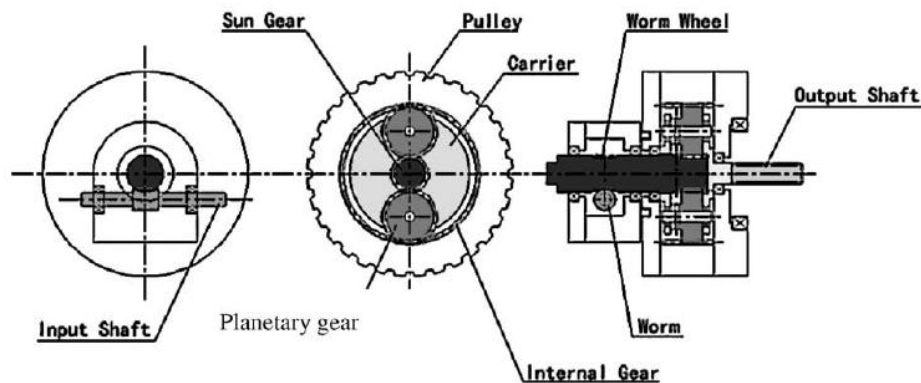
$$i_1 = 1/(Z_a/Z_c + 1) = 0.8$$

هنگامی که قرقره زمانبندی یک دور می چرخد میل بادامک 0.8 دور می چرخد. نسبت بین سرعت میل بادامک و سرعت میل لنگ باید 1/2 در موتور، و تعداد زمان بندی قرقره موتور راه اندازی 30 است. از آنجا که سیستم ما دارای مکانیسم کاهش دنده های سیاره ای فشرده است، این اندازه در مقایسه با موتورهای معمولی کوچک است.

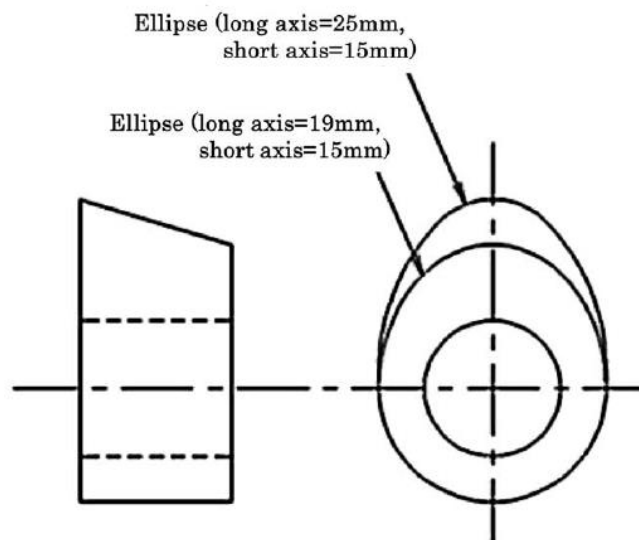
هنگامی که دنده داخلی قرقره تثبیت می شود، نسبت چرخش بین دنده خورشیدی و حامل برابرست با

$$i_2 = 1/(Z_c/Z_a + 1) = 1/5$$

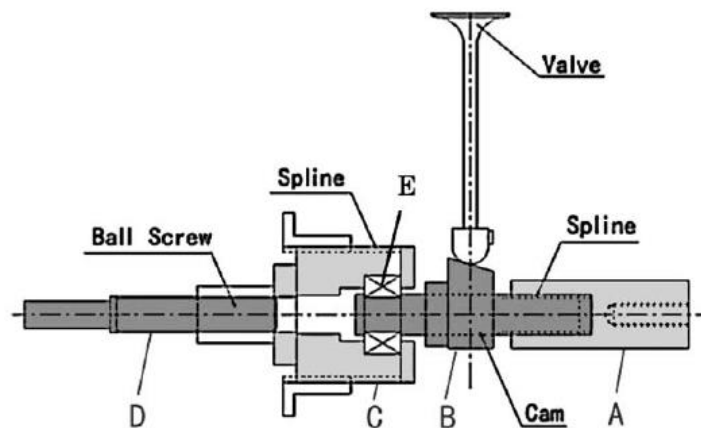
یک موتور فشرده در موتورها، مطلوب است، و حرکت دنده های سیاره ای باید در موتور کنترل قفل شود. نسبت دنده کرم و چرخ کرم با در نظر گرفتن شرایط ذکر شده و سرعت کنترل 1/30 انتخاب می شود. هنگامی که محور کنترل متصل به چرخ دنده ی خورشید 150 دور می چرخد ، میل بادامک یک دور می چرخد.



شکل 2. قرقره کنونی با مکانیزم چرخ دنده سیاره ای.



شکل 3. مشخصات بادامک (B در شکل 4).



شکل 4. سیستم لیفت سوپاپ متغیر کنونی.

جدول 1 ابعاد چرخ دنده های سیاره ای

قرقره	دنده داخلی C, Z_c	دنده سیاره B, Z_b	دنده خورشیدی A, Z_a	
نوع XL	عادی	عادی	عادی	نوع دنده
	1	1	1	واحد
	20	20	20	زاویه فشار ($^{\circ}$)
48	64	24	16	تعداد دندانه
77.62	64	24	16	زمین قطر دایره (میلی متر)

2.2. مکانیزم لیفت سوپاپ متغیر

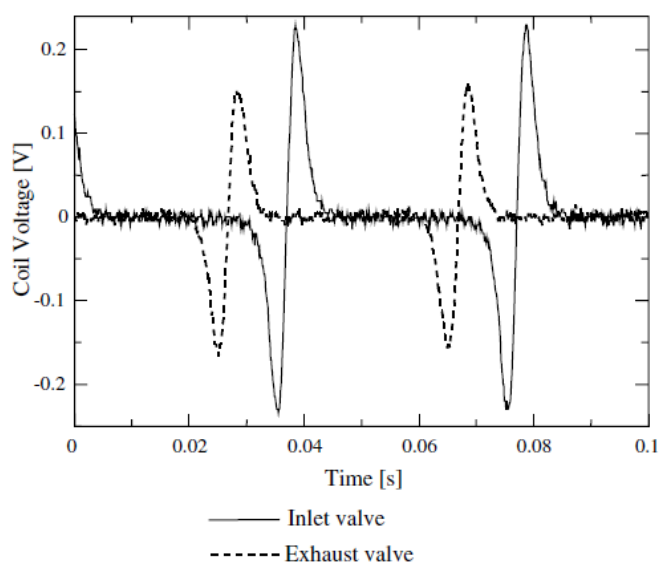
یک میل بادامک با شیب در جهت محوری ارائه شده است همانطور که در شکل 3 نشان داده شده است. با استفاده از میل بادامک، لیفت سوپاپ در هنگام حرکت میل بادامک در جهت محوری متغیر است. برای نشان دادن این مکانیسم، یک مدل از میل بادامک ساخته شد (نگاه کنید به شکل 4)، که در آن میل بادامک متشکل از شفت A و B است. شفت خروجی ذکر شده مکانیسم زمان بندی سوپاپ در بالا به سمت راست شفت A توسط یک پیچ متصل می شود. حرکت چرخشی میل لنگ موتور منتقل به شفت عبوری A از مکانیسم زمان بندی سوپاپ در بالا منتقل می شود. شفت B دارای بادامک است و به همین ترتیب چرخش شفت A به محور B منتقل می شود، زیرا شفت A به محور B با استفاده از خط نقطه گذرهای خطی متصل می شود، اما حرکت شفت B در جهت محوری به طور مستقل صورت می گیرد. شفت B دارای یاتاقان E در پایان شفت C است که دارای خط نقطه گذرهای درجه دوم حداقل در اطراف سطح خارجی است و چرخش آن محدود می شود، چرا که خط نقطه گذرهای درجه دوم با شفت C که به قاب تثبیت شده است درگیر می شود. از این رو، چرخش شفت B به شفت C منتقل نمی شود. شفت C دارای یک پیچ توپ در پایانه دیگر است که با مهره توپ درگیر می شود. مهره توپ به پایانه شفت D متصل می شود، و دارای موتور کنترل در پایانه دیگر است. سپس، هنگامی که چرخش به شفت D با استفاده از موتور اضافه می شود، شفت C در امتداد خط نقطه گذرهای در جهت محوری لغزش می کند. شفت C و B زمانی لغزش می کند که شفت C نیز لغزش می نماید. پس از آن، میل بادامک متصل به شفت B در جهت محوری با چرخش توسط شفت A حرکت می کند. از آنجا که میل بادامک دارای یک شیب است، لیفت سوپاپ در هنگام حرکت بادامک در جهت محوری تغییر می کند. از آنجا که نسبت دنده پیچ توپی بزرگ است، یک موتور DC فشرده می تواند حرکت محوری را به طور مستقیم کنترل کند. در این آزمایش، گام پیچ توپی رو 3 میلی متر است و طیف وسیعی از لیفت بادامک 4 میلی متر تا 10 میلی متر است که در موتورهای عملی به اندازه کافی خواهد بود.

2.3. سنسورها

2.3.1. سنسور زاویه چرخش میل بادامک

سیستم ذکر شده در بالا به یک زاویه چرخشی اندازه گیری سنسور در کنترل نیاز دارد. در این مقاله، یک حسگر سیم پیچ ارزان با یک تراشه آهنربا توسعه داده شده است. یک تراشه آهنربای دائم در سطح میل بادامک چسبانده می شود و یک حسگر سیم پیچ ثابت روی سطح شفت با فاصله هوایی کوچک قرار می گیرد همانطور که در شکل 1 نشان داده شده است. در سنسور، زمانی که شفت می چرخد، ولتاژهای الکتریکی زمانی القا می شوند که تراشه آهنربا از طریق سیم پیچ عبور می کند. ولتاژ القا شده، ورودی برای یک کامپیوتر کنترل است و زوایای چرخش و فاز بین سوپاپ ورودی و سوپاپ دود محاسبه می شود. ابعاد سیم پیچ مورد استفاده در این آزمایش به شرح زیر است: شعاع بیرونی سیم پیچ = 20 میلی متر، شعاع داخلی سیم پیچ = 6 میلی متر، طول = 20 میلی متر، مقاومت الکتریکی = 1 Ω ، به نوبه خود سیم پیچ = 500، و شکاف هوا بین سیم پیچ و شفت = 1 میلی متر.

شکل 5 نشان می دهد که ولتاژ سیم پیچ در مقابل زمانی که سنسور سیم پیچ استفاده می شود. فاز بین سوپاپ ورودی و سوپاپ دود با اندازه گیری زمان بین قله های هر دو منحنی به دست می آید.

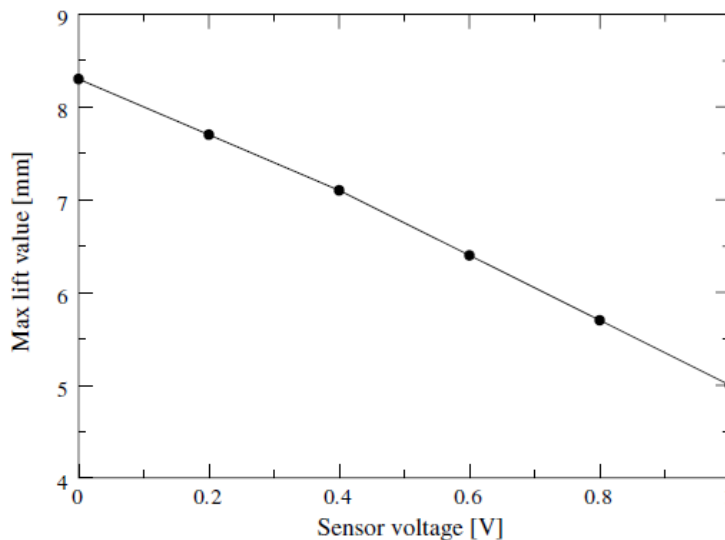


شکل 5. پاسخ سیم پیچ حسگر (فاز = 90°).

2.3.2. سنسور لیفت سوپاپ

پشته بندی حسگر جابجایی سوپاپ در موتور دشوار است، اما سنسور جابجایی می تواند در خارج از سر موتور برای حرکت در جهت محوری تنظیم شود. با استفاده از جابه جایی شفت D در جهت محوری بدون استفاده از سنسور جابجایی سوپاپ، کنترل لیفت سوپاپ را انجام می دهد. از آنجا که مشخصات میل بادامک در این سیستم سه بعدی است و مشخصات دارای خطاهای تولید است، برای محاسبه رابطه دقیق بین لیفت سوپاپ و جابه جایی شفت D در جهت محوری پیچیده است. از این رو، رابطه بین لیفت سوپاپ و جابه جایی شفت در جهت محوری اندازه گیری شد. یک سنسور شکاف لیزر، جابه جایی سوپاپ را اندازه گیری نمود و حرکت شفت توسط سنسور نوع جریان گردابی اندازه گیری شد. شکل 6، رابطه بین ولتاژهای ناشی از V در سنسور جریان گردابی و سوپاپ لیفت L (میلی متر) در یک چرخش را نشان می دهد. منحنی به شکل زیر با استفاده از روش حداقل مربعات نوشته شده است:

$$L = -0.37V^2 - 2.93V + 8.30 \quad (1)$$



شکل 6. حداکثر لیفت سوپاپ در یک چرخش در مقابل ولتاژ سنسور جریان گردابی.

با استفاده از معادله (1)، کنترل را می توان تنها با استفاده از سنسور جریان گردابی انجام داد.

3. زمانبندی سوپاپ و کنترل های لیفت سوپاپ

شکل 7 عکس دستگاه تجربی ما را نشان می دهد. یک موتور اینورتر با قدرت 15 کیلو وات به جای یک موتور استفاده می شود. موتور، قرقره مکانیسم زمان بندی سوپاپ را با استفاده از یک تسمه زمان بندی راه اندازی می کند، و بنابراین میل بادامک ذکر شده در بالا برای سوپاپ ورودی می چرخد. موتور نیز میل بادامک را برای سوپاپ خروجی بدون مکانیزم در همان زمان با استفاده از یک تسمه زمانبندی راه اندازی می کند. یک تراشه مغناطیسی در هر میل بادامک برای تشخیص زوایای چرخشی چسبیده می شود. یک سوپاپ از موتور مرسوم استفاده می شود که 48 گرم و سوپاپ ثابت فنر است توده $N 12.3$ / میلی متر می باشد استفاده می شود.

همانند سیستم کنترل لیفت سوپاپ، یک موتور DC دارای ابعادی به شرح زیر استفاده می شود: ولتاژ نامی = $V 12$ ، توان = $W150$ ، سرعت چرخش نامی = 6440 دور در دقیقه و گشتاور امتیاز = 2030 میلی نیوتن. ابعاد موتور برای کنترل زمان بندی سوپاپ به شرح زیر است: ولتاژ نامی = $V 48$ ، توان = $W 140$ ، سرعت نامی = 7160 دور در دقیقه و گشتاور نامی = 2640 میلی نیوتن.

3.1. کنترل زمان بندی سوپاپ

با تغییر مراحل چرخشی بین بادامک ورودی و بادامک اگزوز، کنترل زمان بندی سوپاپ انجام می شود. میل بادامک اگزوز با فاز ثابت می چرخد، اما فاز میل بادامک ورودی در این سیستم متغیر است. کنترل برای تغییر تنها فاز، و کنترل سوپاپ پاسخ لازم نیست، چرا که میل بادامک حرکات سوپاپ را ایجاد می کند. کنترل باید با اقدام شتاب و یا کاهش سرعت موتور راننده متناظر باشد. از آنجا که سرعت عمل تا حدودی کند است، سرعت کنترل نسبتاً کوچک است. از آنجا که سفتی مکانیسم زمان بندی سوپاپ با استفاده از دنده سیاره ای و کرم بزرگ باشد، لرزش های کوچک می باشند. با این حال، سیستم دارای اصطکاک بزرگ است. از آنجا که نیروی اصطکاک با جنبش سوپاپ ها و میل بادامک متفاوت است، معادله حرکت سیستم غیر خطی است، و داشتن پویایی نظری دشوار است. برای سیستم، کنترل PID قابل اجرا است، چرا که در هنگام انتخاب بهره های بازخورد مناسب، به پویایی سیستم نیاز ندارد. از آنجا

که پارامترهای سیستم تغییر نمی کنند، همان بهره ها در همان موتورها قابل کاربرد هستند. انجام چند آزمایش و یا با استفاده از تنظیم کننده PID، بهره ها به راحتی به دست می تواند به دست آید. برای داشتن مقدار تنظیم شده، کنترل انتگرالی (I-کنترل) معتبر است، اما اغلب ثبات کنترل را تحت تاثیر قرار می دهد و نیاز به یک تقویت کننده بزرگ دارد. در کنترل حال حاضر، چون اصطکاک (میرایی) بزرگ است، از حد خارج شدن به طور قابل توجهی کوچک، و منطقه با ثبات بزرگ خواهد شد. این بدان معنی است که کنترل با استفاده از کنترل P- برای موقعیت ذکر شده زیر ممکن است. در این شرایط، بهره زیاد کنترل P- قابل اجرا است که مربوط به تقویت کننده قدرت می باشد. بنابراین، کنترل بازخورد PD برای داشتن موقعیت تنظیم شده (کنترل P-) و جذب ارتعاش (D-شاهد) انجام می شود.

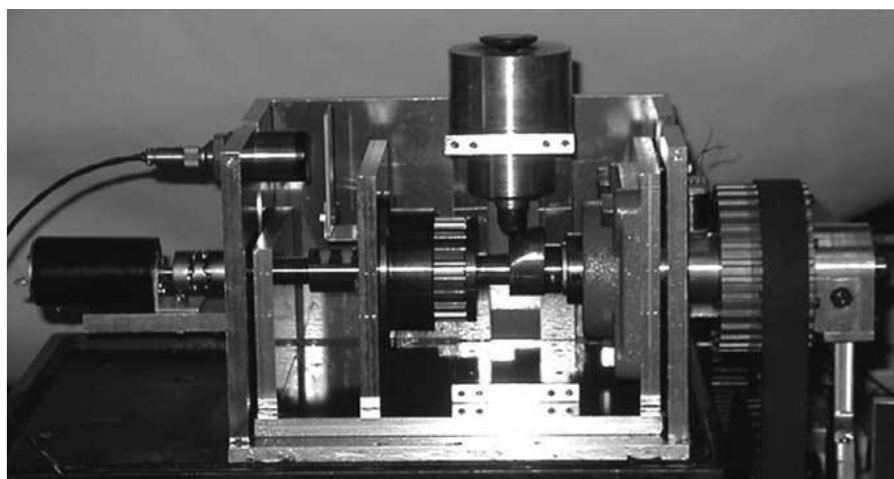
ولتاژهای القا شده در سنسورهای سیم پیچ، ورودی یک پردازنده سیگنال دیجیتال (DSP) هستند. در این آزمایش، کامپیوتر (DSP) نمونه های ولتاژهای القا شده را در سنسورهای سیم پیچ می گیرد و حداکثر مقدار هر سیم پیچ در یک چرخه را پیدا می کند. تعداد دفعات مشاهده شده n_2 از پیک تا پیک در میل بادامک ورودی به معنی تعداد شمارش کلی در یک چرخش است. در نظر بگیرید که تعداد شمارش بین اوج میل بادامک ورودی و میل بادامک اگزوز n_1 باشد. زاویه تغییر زاویه فاز (درجه) بین بادامک ورودی و بادامک اگزوز $C = (n_1/n_2) \times 360 = \gamma$ آغاز می شود. هنگامی که نمونه برداری در یک چرخه به پایان رسیده باشد، شمارنده در صفر تنظیم می شود، آنگاه شمارش بعدی شروع می شود. چرخش فرکانس (RPS) توسط $f = f_s/n_1$ ارائه می شود که در آن f_s فرکانس نمونه برداری است.

تفریق فاز هدف و فاز اندازه گیری شده، ورودی به موتور کنترل پس از ضرب بهره های بازخورد مناسب است:

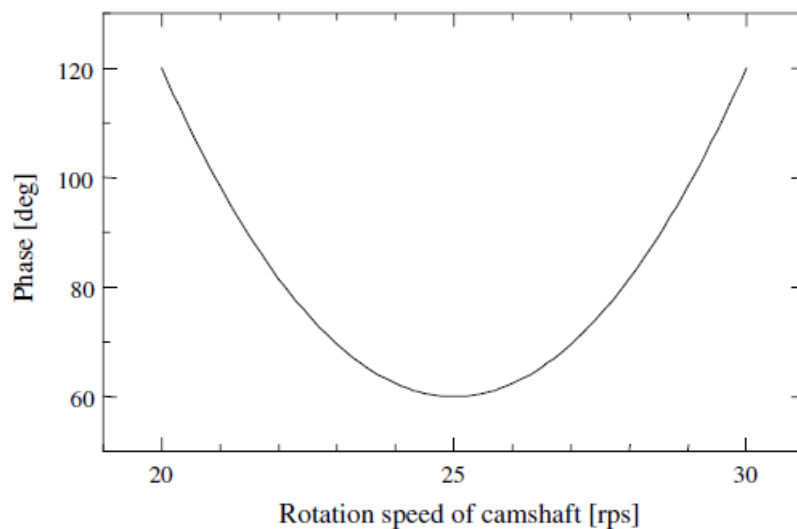
$$V_{d1} = k_1\{g_1(f) - \gamma\} + k_2 \frac{d}{dt} \{g_1(f) - \gamma\} \quad (2)$$

که در آن V_{d1} ولتاژ ورودی موتور، k_1 و k_2 بهره های بازخورد، f فرکانس چرخش و $g_1(f)$ مرحله هدف است.

این مرحله باید در سرعت های پایین و بالا موتور بزرگ باشد، اما در سرعت های متوسط باید کوچک باشد. با ساخت این کنترل، ضرایب انرژی افزایش می یابند و NO_x در گاز خروجی کاهش می یابد. از این رو، تصور می شود که مرحله هدف منحنی در شکل 8 باشد. با استفاده از سرعت میل بادامک اندازه گیری شده، فاز هدف از شکل 8 محاسبه می شود.



شکل 7. زمان بندی سوپاپ متغیر و سیستم لیفت.



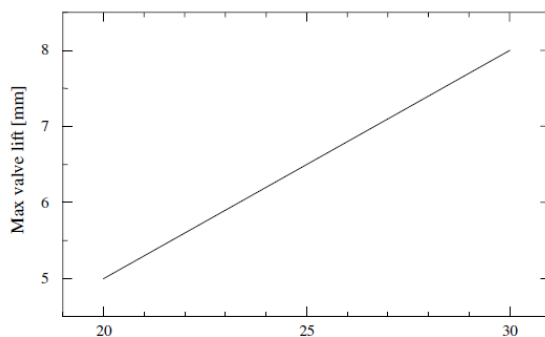
شکل 8. مقادیر هدف برای فاز.

3.2. کنترل لیفت سوپاپ

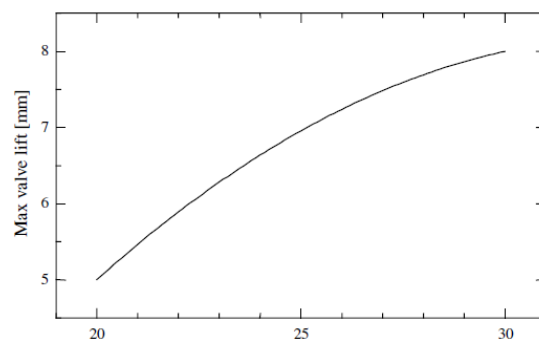
در این سیستم، با حرکت میل بادامک در جهت محوری، کنترل مداوم می تواند ایجاد شود. لیفت سوپاپ با استفاده از فرمول ذکر شده در بالا محاسبه می شود و کنترل بازخورد PD ممکن است:

$$V_{d2} = \alpha_1 \{H(f) - h\} + \alpha_2 \frac{d}{dt} \{H(f) - h\} \quad (3)$$

که در آن V_{d2} ولتاژ ورودی به موتور کنترل لیفت سوپاپ، α_1 و α_2 بهره های بازخورد، $H(f)$ لیفت هدف سوپاپ با توجه به فرکانس چرخش بادامک f و h حداکثر لیفت سوپاپ در یک چرخش میل بادامک است. سیستم لیفت سوپاپ متغیر مطلوب است که با میل بادامک سرعت چرخش افزایش می یابد. سپس، دو لیفت سوپاپ هدف $H(f)$ در نظر گرفته می شوند که یکی از آنها به طور خطی افزایش می یابد (شکل 9 الف))، و دیگری افزایش می یابد، پس از آن اشباع می شود همانطور که در شکل 9 ب) نشان داده شده است. با استفاده از سرعت میل بادامک اندازه گیری شده، لیفت سوپاپ هدف از شکل 9 محاسبه می شود.

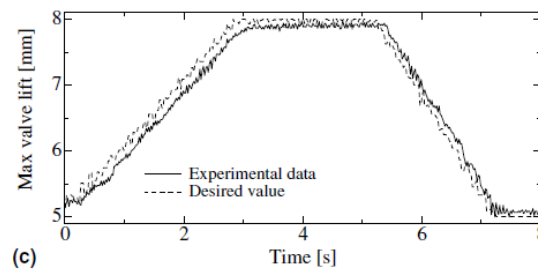
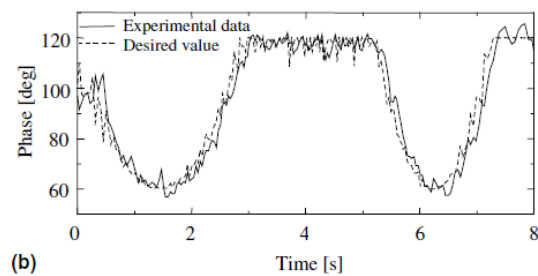
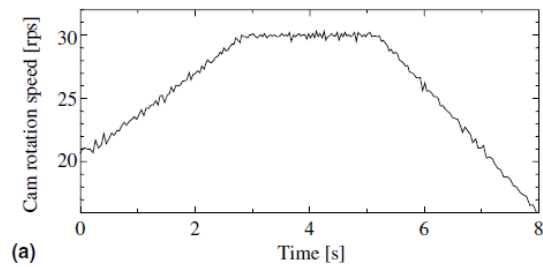


(a)



(b)

شکل 9. مقادیر هدف برای لیفت میل بادامک.



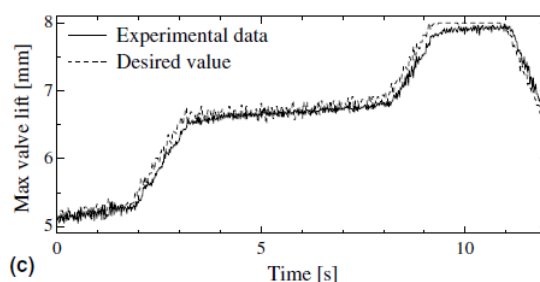
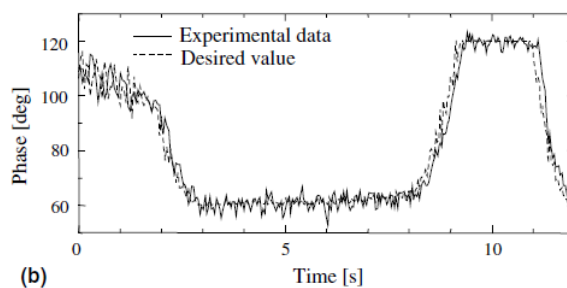
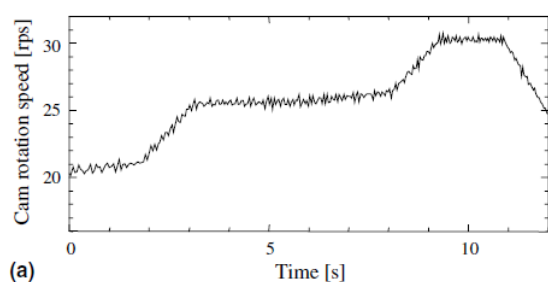
شکل 10. نتایج تحت کنترل فاز و لیفت: (الف) سرعت میل بادامک، (ب) فاز و (ج) حداکثر لیفت سوپاپ.

4. نتایج تحت کنترل

از آنجا که رانندگان شتاب و کاهش سرعت موتور را صورت می دهند، الگوها متفاوت هستند. بنابراین کنترل های زمان واقعی با توجه به سرعت های موتور صورت می گیرد. کنترلی را در نظر بگیرید که در آن فاز و لیفت میل بادامک با منحنی هدف متناظر هستند، همانطور که در شکل 8 و 9 نشان داده شده است. مقادیر مورد نظر با اشاره به منحنی های هدف (شکل 8 و 9) مربوط به سرعت های چرخش میل بادامک تعیین می شوند. ما در ابتدا پاسخ پله برای فاز و لیفت را با استفاده از هر دو کنترل P - و D بررسی می نماییم. تفاوت ها بین نتیجه در کنترل P - و کنترل PD به رغم جریان کنترل کوچک در کنترل PD افزایش می یابد. از آنجا که اصطکاک ها در این سیستم

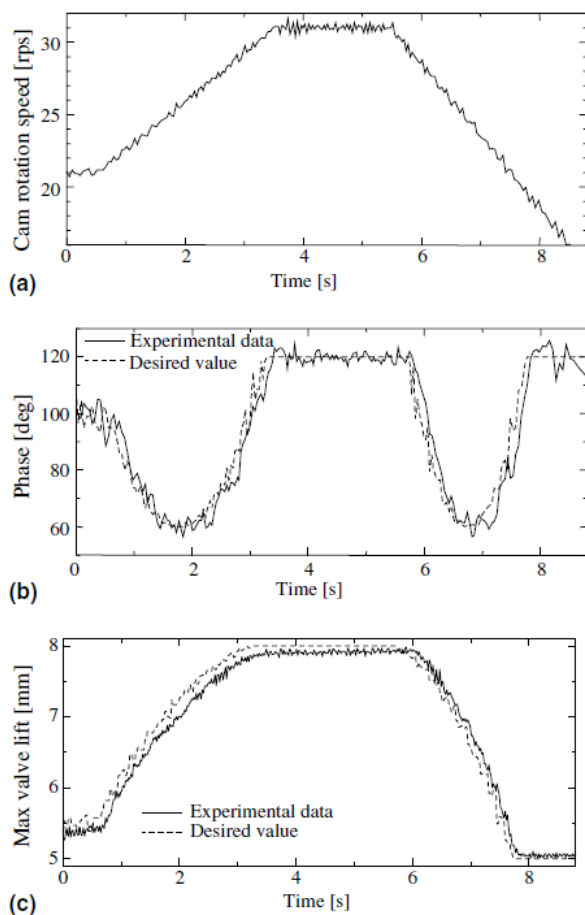
بزرگ هستند، و میرایی به اندازه کافی است، اثر کنترل D کوچک است. از این رو، کنترل P - برای کنترل آنها ($k_2 = \alpha_2 = 0$) کافی است.

در کنترل فازها و لیفت ها، ما یک الگوی سرعت عادی را در نظر می گیریم که در آن سرعت موتور به طور خطی افزایش می یابد، تخت می شود، سپس کاهش می دهد. شکل 10 (a) الگوی سرعت را نشان می دهد که توسط عملیات دستی یک کنترل کننده موتور ایجاد می شود. مقادیر مورد نظر برای فاز و لیفت با استفاده از اشکال 8 و 9 (a) محاسبه می شود. خطوط منقطع در شکل 10 (b) و (c) دلالت بر آنها دارند. خطوط توپر مقادیر اندازه گیری شده تحت کنترل می باشند. اگر چه چند تاخیر کنترل مشاهده می شود (حدود 0.2 بازدید کنندگان)، مقادیر اندازه گیری با مقادیر مورد نظر برای هر دو فاز و لیفت مطابقت دارد. شکل 11 نتایج را در زمانی نشان می دهد که منحنی سرعت دارای گام های نشان داده شده در شکل 11 (a) برای منحنی هدف در شکل 9 (a) است.

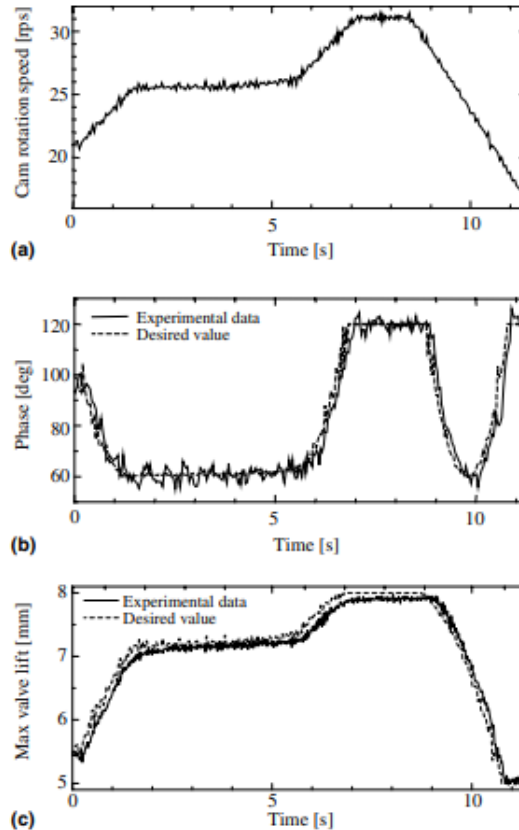


شکل 11. نتایج تحت کنترل فاز و لیفت: (a) سرعت میل بادامک، (b) فاز و (c) حداکثر لیفت سوپاپ.

اشکال 12 و 13 نشان دهنده نتایج در مورد منحنی هدف شکل 9 (b) هستند. هر دوی فاز و لیفت متناظر با منحنی مورد نظر است. فاز کنترل در شکل 10 (b) یک شکل مشابه از منحنی در شکل 12 (b) دارد. منحنی های دیگر در شکل 10 و 11 نیز اشکال مشابه منحنی مربوطه در شکل 12 و 13 دارند. از این رو، هر دو منحنی هدف در شکل 9 برای این کنترل در دسترس خواهند بود. یک نویز کم در هر دو مقدار مورد نظر و مقادیر اندازه گیری وجود دارد. این امر به دلیل خطاهای سرعت چرخش اندازه گیری شده می باشد. هنگامیکه خطاهایی در به دست آوردن سرعت چرخش وجود دارد، مقدار مورد نظر نیز دارای اشتباهات هستند، اما اثرات اشتباهات کوچک هستند. استفاده از کنترل- I می تواند تفاوت بین نتایج کنترل و مقدار مورد نظر را کاهش دهد. با این حال، در این اشکال، تفاوت ها کوچک هستند، و مقادیر آنها در جهت خطا در سنسور سرعت می باشد. علاوه بر این، آن موارد در طیف وسیعی از استفاده عملی خواهند بود. بنابراین، کنترل- P برای کنترل سیستم موجود کافی است.



شکل 12. نتایج تحت کنترل فاز و لیفت: (a) سرعت میل بادامک، (b) فاز و (c) حداکثر لیفت سوپاپ.



شکل 13. نتایج تحت کنترل فاز و لیفت: (a) سرعت میل بادامک، (b) فاز و (c) حداکثر لیفت سوپاپ.

همانند پاسخ سوپاپ در این سیستم، حرکت سوپاپ از مشخصات بادامک پیروی می کند، و هیچ جستن زمانی که طراحی مناسب آن با مشخصات میل بادامک و فنر سوپاپ ساخته شده است وجود ندارد. این به این معنی است که نویز صدا و سایش کم به داخل موتورهای مرسوم محدود شده است. از آنجا که، میل بادامک به میل لنگ موتور از نظر مکانیکی با استفاده از یک تسمه زمان بندی متصل می شود، زمانبندی این میل بادامک کاملاً از موتور پیروی می کند. از این رو، هنگامی که فاز بین بادامک ورودی و خروجی میل بادامک با استفاده از دنده های سیاره ای داده می شود، میل بادامک برای هر سیلندر دارای همان فاز است. این به این معنی است که دنده سیاره ای ما و سیستم لیفت متغیر می توانند هر مخزن را با استفاده از دو موتور DC فشرده تحت روش ساده مانند کنترل-P کنترل نمایند. از این رو، سیستم ارزان تر است، و وزن آن در مقایسه با سیستم سوپاپ الکترومکانیکی کوچک است. هیچ افت کنترلی در زمان پایدار شدن سرعت موتور وجود ندارد، چرا که تغییرات فاز و لیفت سوپاپ در طیف وسیعی از افزایش و یا کاهش سرعت مورد نیاز می شوند، و آنها با سرعت ثابت موتور مورد نیاز نیستند. در محدوده تغییرات

سرعت کوچک، عملیات کنترل کوچک است، یا هیچ کنترلی مورد نیاز نیست. این مزیت سیستم در مقایسه با موتور بدون بادامک است که در آن کنترل ها به طور مداوم انجام می شوند. در با این حال، سیستم ما، یک نقطه ضعف از تلفات اصطکاک، شبیه موتورهای مرسوم وجود دارد.

5. نتیجه گیری

یک سیستم کنترل سوپاپ جدید برای موتورهای احتراق داخلی ارائه می شود که در آن زمان بندی سوپاپ و لیفت به طور مداوم کنترل می شوند. سیستم کنترل زمان بندی سوپاپ متشکل از یک موتور چرخ دنده های سیاره ای، مکانیزم کرم و کنترل می باشد. سیستم کنترل لیفت سوپاپ متشکل از میل بادامک دارای یک شیب است که در آن میل بادامک در جهت محوری با استفاده از موتور کنترل می لغزد. روش کنترل برای داشتن زمان مناسب و سوپاپ لیفت سوپاپ توسعه داده شد. برای اعتبارسنجی آن، آزمایش های تجربی برای یک مدل ساخته شده در این مقاله انجام شده است. نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

- (1) سیستم ارائه شده می تواند زمان بندی سوپاپ و سوپاپ لیفت را به طور مداوم کنترل کند.
- (2) نتایج کنترل شده متناظر با منحنی های هدف هستند، حتی زمانی که مقادیر هدف از زمان بندی سوپاپ و سوپاپ لیفت به طور مداوم تغییر می کنند. زمان تاخیر در این مورد کمتر از 0.3 بود که در استفاده عملی خواهد بود.
- (3) اگر چه تلفات اصطکاک برای میل بادامک ها وجود دارد، سیستم حاضر دارای برخی از مزیت ها در مورد ثبات پاسخ سوپاپ، نویز صدا، انرژی کنترل، قیمت، وزن، و کنترل می باشد.

References

- [1] Ahmad T, Thobald MA. A survey of variable valve actuation technology, SAE, New York, SAE paper 89, 674, 1989.
- [2] Gray C. A review of variable engine valve timing, SAE, New York, SAE paper, 880 386, 1988.
- [3] Shiga S, Yagi S, Morita M, Matsumoto T, Karasawa T, Nakamura T. Effects on valve close timing for internal combustion engines. *Trans Jpn Soc Mech Eng Ser B* 1996;62(596):1659–65.
- [4] Klein F, Kuehn M, Welimann H-J, Wolpers F, Kraemer M, Abthoff J. The influence of the valve stroke design in variable valve timing systems on load cycle, Mixture formation and the combustion processes in conjunction with Throttle-free load governing. *SAE Tech Paper Ser*, SAE-981030, 1998. p. 143–58.
- [5] Jankovic M, Magner SW. Variable cam timing consequences to automotive engine control design. In: *IFAC 15th Triennial World Congress*, Barcelona, Spain, 2002. p. 271–6.
- [6] Kreuter P, Heuser P, Reinicke-Murmann J. The Meta VVH system—a continuously variable valve-timing system. *Spec Publ Soc Automot Eng*, No. SP-1346, 1998. p. 1–9.
- [7] Moria Y, Watanabe A, Uda H, Kawamura H, Yoshioka M. A newly developed intelligent variable valve timing system—Continuously controlled cam phasing as applied to a new 3 liter inline 6 engines. *SAE New York*, SAE paper 960579, 1996.
- [8] Titoro A. The variable timing system—application on a V8 engine. *SAE, New York*, SAE paper 910009, 1991.
- [9] Kramer U, Philips P. Phasing strategy for an engine with twin variable cam timing. *SAE Paper*, 2002-01-1101, 2002. p. 1–9.
- [10] Schechter, M, Levin MB. Camless engine. *SAE New York*, SAE paper 860 581, 1966.
- [11] Hatano K, Ida K, Higashi H, Murata S. Development of a new multi-mode variable valve timing engine. *SAE, New York*, SAE paper 930878, 1993.
- [12] Pischinger M, Salber W, van del Staay F, Baungarten H, Kemper H. Benefits of electromechanical valve train in vehicle operation. *SAE, New York*, SAE paper 2000-01-1223, 2000.
- [13] Ashhab MS, Stefanopoulou AG, Cook JA, Levin M. Camless engine control for robust unthrottled operation. *SAE, New York*, SAE Paper 960581, 1996.
- [14] Kim D, Anderson M, Tsao T, Levin M. A dynamic model of a springless electrohydraulic camless valvetrain system. *SAE, New York*, SAE paper 970248, 1997.
- [15] Butzmann S, Melbert J, Koch A. Sensorless control of electromagnetic actuators for variable valve train. *SAE, New York*, SAE paper 2001-01-1225, 2000.
- [16] Wang Y, Stefanopoulou A, Peterson K, Megli T, Haghgooei. Modeling and control of electromechanical valve actuator. *SAE, New York*, SAE paper 2000-01-1225, 2000.
- [17] Giglio V, Iorio B, Policee G. Analysis of advantages and problems of electromechanical valve actuators. *SAE papers* 2002-01-1105, 2002. p. 1768–79.
- [18] Peterson K, Stefanopoulou A, Wang Y, Haghgooei M. Nonlinear self-timing control for soft landing of an electromechanical valve actuator. In: *Proceedings of the 2nd IFAC conference on Mechatronics Systems*, Berkeley, CA, 2002.
- [19] Diana S, Iorio B, Giglio V, Policee G. The effects of valve lift shape and timing on air motion and mixture formation of DISI engines adopting different VVA actuators, *SAE paper* 2001-01-3553, 2001. p. 75–3.
- [20] Hoffmann W, Peterson K, Stefanopoulou G. Iterative learning control for soft landing of electromechanical valve actuator in camless engines. *IEEE Trans Control Syst Technol* 2003;11(2): 174–84.
- [21] Tai C, Stubbs A, Tao T. Modeling and controller design of an electromagnetic engine valve. In: *Proceedings of the American Control Conference*, vol. 4, Arlington, VA, 2001. p. 2890–5.
- [22] Ronchi F, Rossei C, Tillis A. Sensing device for camless engine electromagnetic actuators. In: *Proceedings of the IEEE IECON'02*, vol. 2, Seville, Spain, 2002. p. 1669–74.
- [23] Montanari M, Ronchi F, Tonielli A. Control of a camless engine electromechanical actuator: position reconstruction and dynamic performance analysis. *IEEE Trans Ind Electron* 2004;51(2):299–311.
- [24] Anderson MD, Tsu-Chin Tso, Levin MB. Adaptive lift control of an electrohydraulic camless valvetrain system. In: *Proceedings of the American Control Conference*, Philadelphia, PA, 1998. p. 955–6.
- [25] Kreuter P, Heuser P, Reinicke-Murmann J, Erz R, Peter U, Bocker O. Variable valve actuation—Switchable and continuously variable valve lifts. *SAE Paper*, 2003-01-0026, 2003.
- [26] Nagaya K. Nonlinear transient response of a high speed driven valve system and stresses in valve spring for internal combustion engines. *Trans ASME J Vib, Acoust, Stress, Reliab Des* 1989;111:264–71.