مقاله

اثر چرخ‌طیار دو جرمی در ارتعاشات خط انتقال قدرت

هادی محمدی بیدهندی، کارشناس ارشد طراحی و ساخت خودرو، دانشگاه صنعتی مالک اشتر
h.mohamadipost@yahoo.com

سید مسعود هاشمی، استادیار دانشکدهٔ خودرو، دانشگاه صنعتی مالک اشتر
smhash2@gmail.com

چکیده

معمولاً رفتار نامناسب ارتعاشی چرخ‌طیارهای معمولی - که از نوسانات پیچشی[1] میل‌لنگ و قرارگرفتن فرکانس طبیعی جعبه‌دنده در محدودهٔ فرکانس موتور ناشی می‌شود - سبب ایجاد حرکت غیریکنواخت خط انتقال قدرت، سروصدای اضافی در چرخ‌دنده‌های خلاص جعبه‌دنده و کاهش راحتی در رانندگی می‌شود. با استفاده از طرح جدیدی از چرخ‌طیار به نام چرخ‌طیار دو جرمی، این اشکالات تا حد زیادی برطرف و باعث یکنواخت‌تر شدن حرکت زاویه‌ای اجزای خط انتقال قدرت می‌شود. در این مقاله پس از ذکر ایرادهای چرخ‌طیارهای معمولی، چرخ‌طیار دو جرمی، نحوهٔ عملکرد و مزایای آن نسبت به چرخ‌طیار معمولی بیان و وظایف اجزاء این دستگاه تشریح می‌شود.

واژگان کلیدی: چرخ‌طیار[2]، چرخ‌طیار دو جرمی[3]، نایکنواختی سرعت میل‌لنگ، خط انتقال قدرت[4]

مقدمه

امروزه در بیشتر خودروهای دنیا موتورهای پیستونی نصب می‌شود که یکی از عوامل ایجاد ارتعاشات در خودرو به‌شمار می‌رود. این ارتعاشات به‌همراه سروصدای ناشی از آن، منجر به خستگی جسمی و ذهنی راننده می‌شود و در راحتی سرنشینان، ایمنی وسیلهٔ نقلیه و عمر آن تأثیر می‌گذارد. در حال حاضر، گرایش تحقیقات در راستای بهینه‌سازی موتور خودروها به این سمت می‌رود که توان و سرعت آنها افزایش و سروصدای آنها کاهش پیدا کند و ارتعاشات ایجادشده از مرز تعریف‌شده در استانداردها تجاوز نکند. این روند به‌گونه‌ای موضوعیت پیدا کرده که کاهش ارتعاش موتور و خط انتقال قدرت به یک اولویت مبدل شده است [۱]. برای تحقق این امر، طی سال‌های گذشته تلاش‌هایی صورت گرفته تا براساس مبانی نظری بتوان چرخ‌طیار دو جرمی را جایگزین چرخ‌طیار تک‌جرمی کرد. در این راستا نخستین‌بار درکسل[5] پیشنهاد کرد که با توجه به کم‌هزینه بودن چرخ‌طیار دو جرمی نسبت به سیستم‌های پیچیده و پرهزینه، از نصب آن در خط انتقال قدرت خودروهای سواری استفاده شود [۲]. وی در تحقیق دیگری نشان داد که نصب چرخ‌طیار دو جرمی در خط انتقال قدرت سبب کمترشدن فرکانس طبیعی جعبه‌دنده از دور آرام موتور و در نتیجه کاهش سروصدای چرخ‌دنده‌ها و ارتعاش بدنه

می‌شود. علاوه بر این چرخطیار دو جرمی صدای بدنهٔ جعبه‌دنده را در دور بالاتر از ۱۰۰۰ دور در دقیقه کاهش می‌دهد [۳]. نتایج این تحقیقات و تلاش‌های مستمر در نهایت به بار نشست و نخستین چرخطیار دو جرمی بیش از ۲۵ سال پیش به‌وسیلهٔ شرکت ال. یو. کی.[۶] ساخته شد [۴]. نتایج مقایسه‌ای در تحلیل دیگری نشان داد که چرخطیار دو جرمی و میراکننده‌های هیدرولیکی تأثیر به‌سزایی در کاهش سروصدای چرخدنده‌های جعبه‌دنده دارند [۵]. در ادامهٔ تحقیقات، نوع جدیدی از چرخطیار دو جرمی معرفی و نشان داده شده است که عملکرد ارتعاشی خط انتقال قدرت در موقع تغییر حالت رانندگی از حالت خلاص به رانندگی و یا در موقع شتابگیری ناگهانی بهینه می‌شود و دامنهٔ ارتعاشات و نایکنواختی‌های جعبه‌دنده کاهش می‌یابد [۶]. در تحقیق دیگری نشان داده شده است که چرخطیار دو جرمی یکی از مؤثرترین روش‌ها برای کاهش نایکنواختی سرعت جعبه‌دنده است و نسبت به سایر سیستم‌های مشابه، نظیر جداسازی فعال ارتعاشات، کلاچ لغزشی هیدرودینامیکی و جز این‌ها از هزینهٔ کمتری برخوردار است [۷].

لاسچت[۷] تأثیر چرخطیار دو جرمی را در جداسازی ارتعاشات موتور از خط انتقال قدرت، همراه با در نظر گرفتن لقی چرخدنده‌ها و اصطکاک کلاچ بررسی کرده و نشان داده است که دامنهٔ ارتعاشات و نایکنواختی سرعت زاویه‌ای خط انتقال قدرت در بازهٔ فرکانسی ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ دور در دقیقه کاهش می‌یابد [۸].

در تحقیق دیگری نوع جدیدتری از چرخطیار دو جرمی، که دارای فنر چندمرحله‌ای می‌باشد، بررسی شده است [۹]. خط انتقال قدرتی که مجهز به این چرخطیار بوده، در دور آرام موتور مدل شده و اثر آن در ارتعاشات جعبه‌دنده ارزیابی شده است. چرخطیار دو جرمی با فنر شعاعی، که در آن اثر سختی غیرخطی پیچشی از اهمیت زیادی برخوردار است، در مرجع [۱۰] بررسی شده است. در این تحقیق یک مدل ارتعاشی برای تحلیل پاسخ دینامیکی چرخطیار دو جرمی به تحریک موتور در دور آرام ارائه شده است. پاسخ ارتعاشی چرخطیار دو جرمی، نتایج بهتری را نسبت به پاسخ ارتعاشی کلاچ معمولی نشان می‌دهد.

جداسازی ارتعاشات پیچشی موتور از خط انتقال قدرت به‌وسیلهٔ چرخطیار دو جرمی، که در آن از جاذب ارتعاشی آونگی استفاده شده، در مرجع [۱۱] مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق مشخصه‌های ارتعاشی جاذب آونگی محاسبه و نشان داده شده که اثر ارتعاشات ناشی از احتراق گسستهٔ موتور در خط انتقال قدرت به‌صورت بهینه کاهش یافته است. همچنین اثر این جاذب ارتعاشی در چرخطیار دو جرمی در دور آرام موتور بررسی شده است. نتایج با مدل شبیه‌سازی شده، انطباق قابل قبولی دارد. در تحقیق دیگری دستیابی به راحتی در رانندگی و کاهش مصرف سوخت به‌وسیلهٔ چرخطیار دو جرمی که دارای جاذب ارتعاشی آونگی می‌باشد، بررسی شده است [۱۲]. نتایج نشان می‌دهد که چرخطیار دو جرمی با جاذب ارتعاشی آونگی می‌تواند به‌دلیل رانندگی در دورهای پایین موتور، مصرف سوخت را کاهش و به‌دلیل کاهش ارتعاشات پیچشی خط انتقال قدرت، راحتی را افزایش دهد.

در این مقاله، ابتدا عملکرد چرخطیار دو جرمی و تأثیر آن در کاهش ارتعاشات پیچشی خط انتقال قدرت، نسبت به چرخطیار معمولی با صفحه کلاچ مجهز به سیستم فنر - میراکننده بررسی می‌شود. سپس اجزای چرخطیار دو جرمی، وظایف آنها و در انتها مزایای استفاده از چرخطیار دو جرمی در خط انتقال قدرت بیان می‌شود.

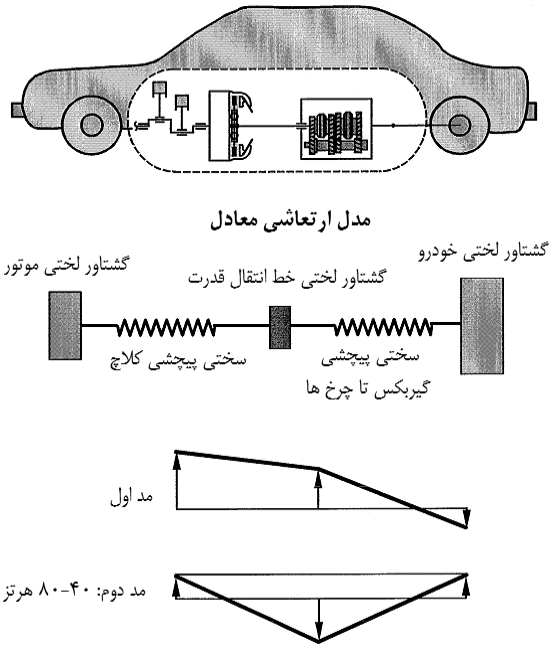
بررسی رفتار ارتعاشی خط انتقال قدرت با چرخطیار معمولی مجهز به سیستم فنر - میراکننده و چرخطیار دو جرمی

برای ورود به مبحث چرخطیار دو جرمی، ابتدا به روش معمولی کاهش نوسانات پیچشی موتور که از طریق نصب فنر و میراکننده در کلاچ انجام می‌گیرد می‌پردازیم. سیستم کلاچ در خودرو دو عمل اصلی انجام می‌دهد:

۱. انقطاع توان و تلفیق موتور و خط انتقال قدرت

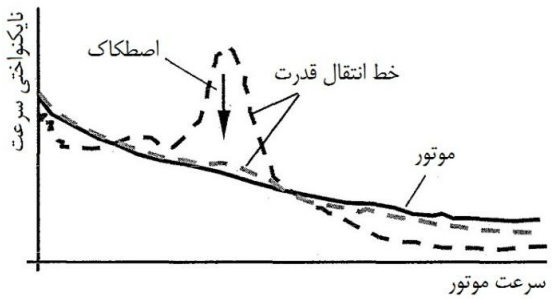
۲. کاهش ارتعاشات پیچشی ایجادشده به‌وسیلهٔ نایکنواختی حرکات موتور در خط انتقال قدرت

ارتعاشات پیچشی تأثیر مداومی در خط انتقال قدرت می‌گذارد و باعث تق‌تق چرخ‌دنده‌ها، ضربه به بدنه و نوسان قطعات گوناگون می‌شود. این عوامل، صدای اضافی و تلفات قابل ملاحظه‌ای در راحتی سرنشینان ایجاد می‌کنند [۱۳]. واحد انتقال قدرت، خود یک سیستم ارتعاشی است. شکل ۱ مدلی ساده از خط انتقال قدرت را به‌منظور شبیه‌سازی رفتار بنیادی نوسان نمایش می‌دهد [۱۳].



شکل ۱. سیستم انتقال قدرت خودرو و مدهای ارتعاشی آن [۱۳]

اندازه مستطیل‌ها به‌ترتیب متناظر با گشتاور لختی است. گشتاور لختی خط انتقال قدرت (جعبه‌دنده) به‌وضوح ناچیز است [۱۳]. مد دوم این مدل ارتعاشی، فرکانسی بین ۴۰ و ۸۰ هرتز (۲۴۰۰ و ۴۸۰۰ دور در دقیقه) دارد که سبب تشدید جرم خط انتقال قدرت می‌شود. این مد معمولاً باعث تق‌تق چرخدنده‌ها می‌شود [۱۴]. شکل ۲ نوسان حرکت دورانی خط انتقال قدرت یک خودرو و منحنی ارتعاشات موتور آن را به‌صورت نمادین هنگامی‌که در کلاچ میراکننده‌هایی با ضریب میرایی کم و زیاد نصب شده باشد نشان می‌دهد. در این حالت تشدید در دور حدود ۱۷۰۰ دور در دقیقه قرار دارد. با زیادشدن ضریب میرایی، دامنهٔ نوسان در محل تشدید کاهش پیدا می‌کند، اما در عوض در محدودهٔ بالاتر از محل تشدید، افزایش دامنه را به‌دنبال خواهد داشت [۱۴].



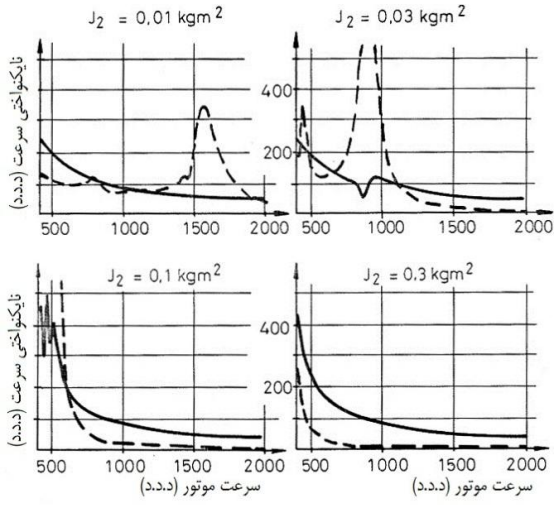
شکل ۲. جداسازی ارتعاشات پیچشی از طریق کلاچ با دو ضریب میرایی کم و زیاد [۱۴]

هدف از نصب فنر لول و میراکنندهٔ پیچشی (میراکنندهٔ اصطکاکی) در کلاچ خودروها و گسترش روزافزون آنها، جلوگیری از انتقال غیریکنواختی‌های موتور به خط انتقال قدرت و در نتیجه حذف ارتعاشات است. یک سیستم معمولی تنها موقعی که سرعت موتور بالاست این هدف را برآورده می‌کند؛ زیرا فرکانس طبیعی که بر اثر فنریت فنر نصب‌شده و یا قابل نصب در کلاچ ظاهر می‌شود همیشه در بازهٔ رانندگی معمولی قرار دارد [۱۳].

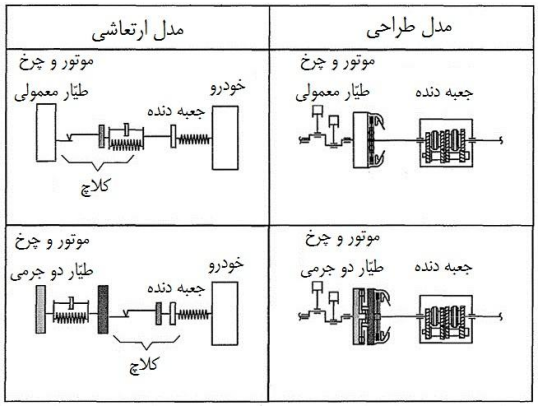
در حالت نظری می‌توان از یک فنر و میراکننده با ضریب فنریت و ضریب میرایی مناسب استفاده کرد، اما در عمل این‌طور نیست؛ زیرا حجم پوستهٔ کلاچ را نمی‌توان متناسب با اندازه‌های فنر و میراکننده افزایش داد. از طرفی، نصب یک سیستم فنر - میراکننده با ابعاد و اندازهٔ مورد نظر، در محور ورودی خط انتقال قدرت، خود گشتاور لختی دارد که از نظر زمانی تطبیق آن با خط انتقال قدرت مشکل است [۱۳]. رابطهٔ سادهٔ فرکانس طبیعی $f = \sqrt{k/J}$ برای یک جرم تنها، نشان می‌دهد که افزایش گشتاور لختی J، اگر ضریب فنریت k تغییر نکند، منجر به کاهش فرکانس طبیعی f می‌شود. بنابراین اگر بتوان به اندازهٔ کافی گشتاور

لختی خط انتقال قدرت J_2 را با اضافه‌کردن جرم افزایش داد، فرکانس طبیعی کاهش می‌یابد (شکل ۳). البته این موضوع فقط زمانی درست است که مسئله همگام‌سازی زمانی این جرم هنگام تعویض دنده‌ها وجود نداشته باشد [۱۳].

مشکل همگام‌سازی زمانی جرم اضافه‌شده با خط انتقال قدرت، منجر به گسترش نوع جدیدی از میراکنندهٔ پیچشی به نام چرخ‌طیار دو جرمی شده است. این طرح قسمتی از جرم چرخ‌طیار (جرم ثانویه) را از طریق درگیری کلاچ با آن، به محور ورودی خط انتقال قدرت اضافه می‌کند و ضریب فنریت پیچشی فنر را به‌وسیلهٔ معرفی طرح جدیدی از فنر به‌شدت کم می‌کند. در شکل ۴ مدل ارتعاشی و مدل طراحی خط انتقال قدرت هنگامی‌که از چرخ‌طیار معمولی و دو جرمی استفاده شده و در شکل ۵ نمونه‌ای از چرخ‌طیار دو جرمی نمایش داده شده است. همان‌طور که اشاره شد و در ادامه نیز توضیح داده می‌شود، چرخ‌طیار دو جرمی سبب می‌شود که پدیدهٔ تشدید در سرعت‌های خیلی پایین موتور ظاهر می‌شود [۱۳].



شکل ۳. تأثیر لختی خط انتقال قدرت در فرکانس طبیعی [۱۳]



شکل ۴. چرخ‌طیار دو جرمی به‌صورت نمادین در مقایسه با چرخ‌طیارمعمولی [۱۴]

شکل ۵. چرخ‌طیار دو جرمی [۱۴]

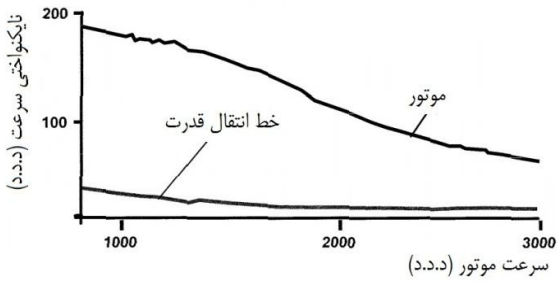
شکل ۶ جداسازی ارتعاشات پیچشی موتور را هنگامی‌که از یک چرخ‌طیار دو جرمی استفاده شده است نمایش می‌دهد [۱۳].

چرخ‌طیار معمولی به دو چرخ‌طیار اولیه و ثانویه تقسیم می‌شود، به‌گونه‌ای‌که مجموع گشتاور لختی دو چرخ‌طیار مساوی گشتاور لختی چرخ‌طیار معمولی است. چرخ‌طیار اولیه به میل‌لنگ متصل است و چرخ‌طیار ثانویه که از یک یاتاقان ساچمه‌ای برای هدایت و قرارگیری آن روی چرخ‌طیار اولیه استفاده می‌شود، به‌وسیلهٔ یک سیستم فنر - میراکننده به چرخ‌طیار اولیه متصل می‌شود [۱۴].

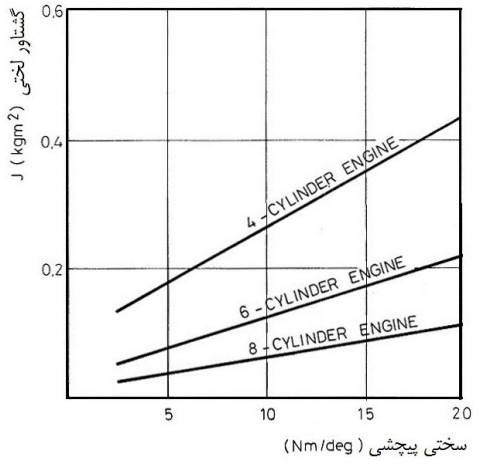
کلاچ در روش‌های معمول در چرخ‌طیار دو جرمی، روی چرخ‌طیار ثانویه قرار می‌گیرد. چون یک سیستم فنر - میراکنندهٔ پیچشی بین چرخ‌طیار اولیه و ثانویه واقع می‌شود، وجود یک دیسک کلاچ بدون سیستم میراکنندگی پیچشی برای انتقال بار به خط انتقال قدرت کافی است. در ساختار چرخ‌طیار دو جرمی، نیاز به همگام‌سازی زمانی جرم اضافه‌شده به خط انتقال قدرت (جرم چرخ‌طیار ثانویه) وجود ندارد. چرخ‌طیار دو جرمی یک راه‌حل مناسب برای حل مشکل همگام‌سازی زمانی اتصال یک جرم به محور ورودی خط انتقال قدرت است. همگام‌سازی زمانی به‌خوبی اصلاح می‌شود؛ زیرا میراکنندهٔ نوسان پیچشی، از دیسک کلاچ به‌داخل چرخ‌طیار دو جرمی انتقال یافته است و دیسک کلاچ گشتاور لختی کمتری دارد [۱۳].

جرم کمتر چرخ‌طیار اولیه، غیریکنواختی حرکت دورانی موتور را افزایش می‌دهد؛ زیرا غیریکنواختی، فقط با جرمی که مستقیماً به میل‌لنگ وصل شده است، یعنی با جرم چرخ‌طیار اولیه، نسبت عکس دارد. این موضوع مشکلی برای چرخ‌طیار دو جرمی ایجاد نمی‌کند، اما می‌تواند منجر به آسیب‌دیدن ضمائم میل‌لنگ شود [۱۳].

براساس شکل ۷، هنگامی‌که نرخ فنریت پیچشی یکسان است، برای کنترل نوسان پیچشی در موتور چهارسیلندر، به گشتاور لختی بیشتری نسبت به موتور هشت‌سیلندر نیاز است. این موضوع به این دلیل است که کنترل پیچش موتور هشت‌سیلندر و حتی شش‌سیلندر ساده‌تر است. به‌عبارت دیگر، در موتور چهارسیلندر برای کنترل نوسان به فنریت پیچشی کمتر یا جرم بیشتری نسبت به موتور شش‌سیلندر احتیاج است. در نتیجه مشکلات بیشتری در طراحی موتور چهارسیلندر وجود دارد.



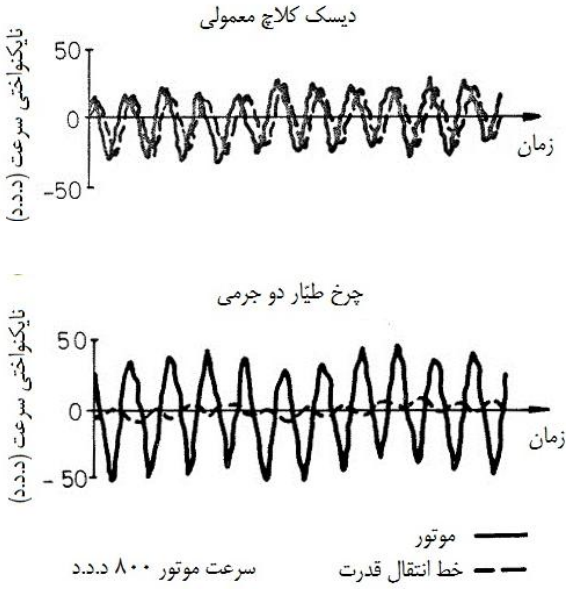
شکل ۶. جداسازی ارتعاشات پیچشی با چرخ‌طیار دو جرمی [۱۴]



شکل ۷. گشتاور لختی مورد نیاز برای کنترل نوسانات میل‌لنگ [۱۳]

شکل ۸ نوسان اندازه‌گیری‌شده در موتور شش‌سیلندر را نشان می‌دهد. موتور در حالت رانندگی با سرعت ۸۰۰ دور در دقیقه قرار دارد. یک کلاچ معمولی، که به سیستم فنر - میراکننده مجهز شده است، با یک چرخ‌طیار دو جرمی مقایسه می‌شود. هنگامی‌که ارتعاشات پیچشی هر دور میل‌لنگ و محور ورودی خط انتقال قدرت تقریباً مشخص

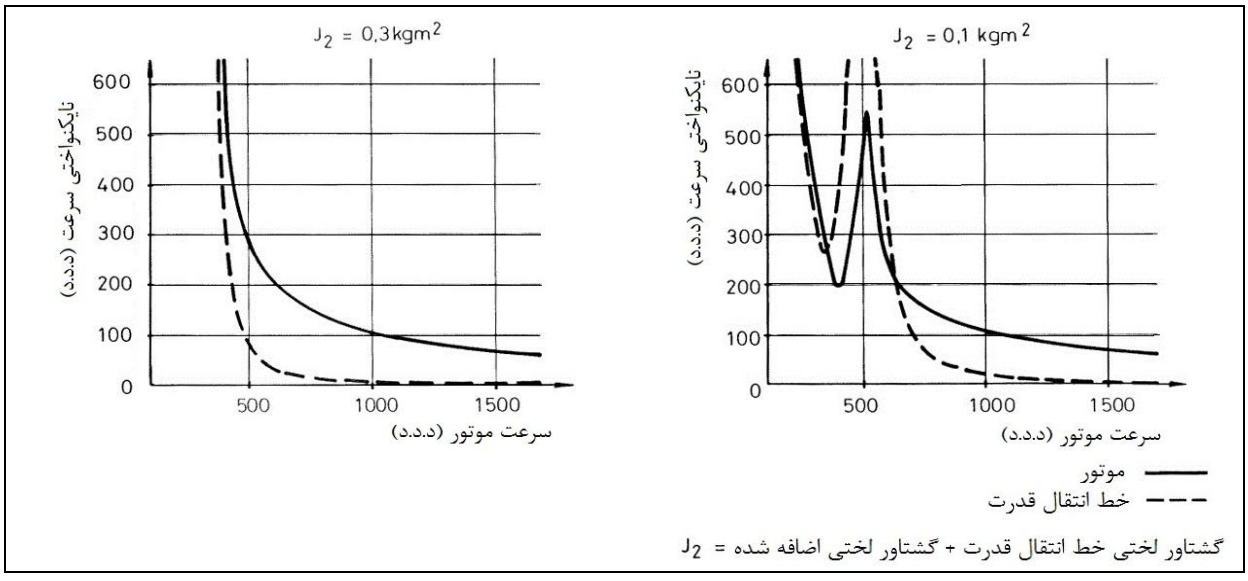
هستند، چرخ‌طیار دو جرمی ارتعاش کنترل‌شدهٔ بسیار خوبی را نشان می‌دهد؛ زیرا فرکانس طبیعی کاملاً از سرعت عملکرد پایین‌تر است. در این حالت غیریکنواختی موتور در چرخ‌طیار دو جرمی، به این دلیل که گشتاور لختی چرخ‌طیار اولیه کمتر از چرخ‌طیار معمولی با کلاچ است، بیشتر است [۱۳].



شکل ۸ ارتعاشات پیچشی اندازه‌گیری‌شده در رانندگی [۱۳]

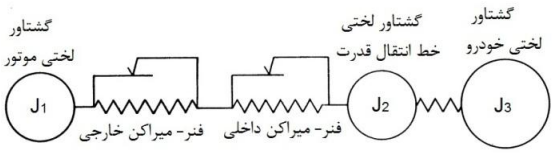
با میراکننده‌های پیچشی معمولی، به چرخ طیاری بزرگ‌تر از چرخ‌طیار معمولی برای کاهش غیریکنواختی موتور و حذف سروصدای خط انتقال قدرت در حد قابل قبول نیاز است. این مشکل در چرخ‌طیار دو جرمی برطرف شده است؛ زیرا به‌گونه‌ای عمل می‌کند که سروصدا در حد قابل قبول است و می‌توان جرم چرخ‌طیار اولیه را کوچک‌تر از جرم چرخ‌طیار معمولی انتخاب کرد. اگر از چرخ‌طیار دو جرمی استفاده شود و جرم و نرخ میرائی پیچشی میراکننده نیز مناسب انتخاب شود، همان‌طور که در شکل ۹ آمده است، فرکانس طبیعی خط انتقال قدرت پایین‌تر از سرعت عملکرد خواهد شد، اما در هر صورت سرعت موتور، هنگامی‌که روشن و خاموش می‌شود، باید از فرکانس طبیعی عبور کند.

این موضوع همچنین می‌تواند هنگامی‌که خودرو در سرعت‌های کاری کم رانده می‌شود اتفاق بیافتد. نقطهٔ اوج بزرگسازی تشدید و گشتاور وابسته به آن، به‌طور مستقیم متناسب با گشتاور لختی جرم نوسان‌کننده تغییر می‌کند. در نتیجه با چرخ‌طیار دو جرمی هنگامی‌که موتور روشن یا خاموش می‌شود تشدید نسبت به وقتی‌که چرخ‌طیار معمولی وجود دارد قوی‌تر خواهد بود [۱۳].



شکل ۹. تشدید خط انتقال قدرت [۱۳]

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، یک سیستم فنر - میراکـنندۀ اضـافی را به‌طـور سـری با سیـسـتـم فنر - میراکنندۀ پیچشی واقعی نصب می‌کنند. سیستم فنر - میراکنندۀ واقعی به‌دلیل سـاختار طـراحـی آن، سیستم فنر - میراکنندۀ داخلی نامیده می‌شود. هدف از میراکنندۀ اضافی، مصرف بیشتر انرژی نوسان در نقطۀ اوج گشتاور است. این میراکننده، که می‌تواند همچون یک میراکنندۀ پیچشی اضافی با قابلیت اصطکاک بالا عمل کند، سیستم فنر - میراکنندۀ پیچشی خارجی نامیده می‌شود [۱۳].



شکل ۱۰. ترتیب قرارگیری فنر – میراکننده در چرخ‌طیار دو جرمی [۱۳]

نوسان برانگیخته به‌ترتیب از موتور با چرخ‌طیار اولیه و میراکنندۀ خارجی عبور می‌کند. فنر - میراکنندۀ خارجی به‌دلیل سختی بالای فنر، کمتر از گشتاور معمولی، تقریباً صلب باقی می‌ماند و ارتعاشات بدون تغییر به میراکنندۀ داخلی می‌رسد. فنر - میراکنندۀ خارجی فقط در نقاط اوج گشتاور تأثیر می‌گذارد. در شکل ۱۱ نوسان سرعت دورانی اندازه‌گیری شدۀ یک چرخ‌طیار دو جرمی، با و بدون میراکنندۀ خارجی در سرعت ۴۰۰ دور در دقیقه نمایش داده شده است. این سرعتی است که موتور در سرعتی کمتر از آن خاموش می‌شود. بدون فنر – میراکنندۀ خارجی، جرم اولیه و مخصوصاً جرم ثانویه، دامنۀ نوسان خیلی زیادی را نشان می‌دهد که مطلوب نیست. وجود فنر – میراکنندۀ خارجی، قادر به کاهش دامنه‌های زیاد تا حد قابل قبول است. در نمودار با فنر - میراکنندۀ خارجی، دامنۀ ارتعاش موتور و به‌ویژه خط انتقال قدرت به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد [۱۳]. شکل ۱۲ اندازه‌گیری نوسان چرخۀ راه‌اندازی موتور را نشان می‌دهد. بدون فنر - میراکنندۀ خارجی، تشدید با دامنه و سروصدای بالا رخ می‌دهد. با فنر - میراکنندۀ خارجی، تشدید به اندازۀ زیادی فرو نشانده شده و حد سروصدا با حد صدای چرخۀ راه‌اندازی یک چرخ‌طیار معمولی متناظر شده است [۱۳]. قسمت الف از شکل ۱۳، نمودار چرخۀ خاموش‌شدن موتور را با بازه‌ای از سروصدای کوتاه نشان می‌دهد. برای کاهش بیشتر دامنۀ نسبتاً کم نوسان، می‌توان یک دستگاه اصطکاکی وابسته به سرعت را به‌صورت موازی با فنر - میراکنندۀ پیچشی داخلی نصب کرد. این اصطکاک اضافی فقط در پایین‌تر از سرعت غیرکاری، هنگام چرخۀ خاموش‌شدن خودرو مؤثر است. قسمت ب از شکل ۱۳، نوسان اندازه‌گیری‌شده را با اصطکاک اضافی نمایش می‌دهد. نمودار به‌وضوح کاهش دامنۀ نوسان و حذف بیشتر سروصدای چرخدنده‌ها، هنگام خاموش‌شدن موتور را نشان می‌دهد [۱۳].

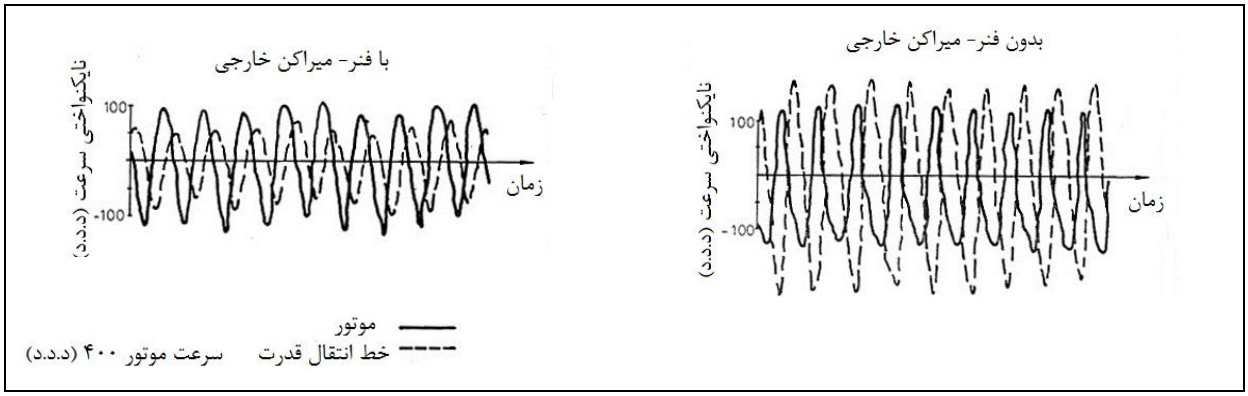
اجزای چرخ‌طیار دو جرمی

چرخ‌طیار اولیه

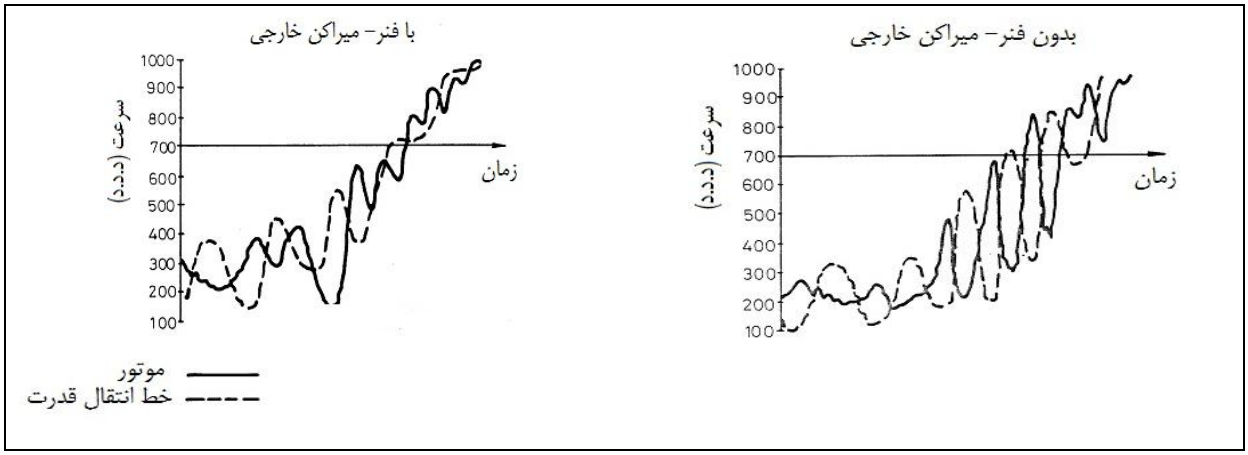
چرخ‌طیار اولیه به میل‌لنگ موتور متصل می‌شود و لختی آن با میل‌لنگ، با هم مؤثر واقع می‌شوند. در مقایسه با چرخ‌طیار معمولی، چرخ‌طیار اولیه به‌طور قابل توجهی انعطاف‌پذیرتر است که به کاهش بار میل‌لنگ کمک می‌کند. همان‌طور که در شکل ۱۴ نمایش داده شده است، شکل‌دهی به‌همراه پوشش آن به‌گونه‌ای است که راهگاه مناسبی برای فنر کمانی ایجاد می‌گردد. این راهگاه به‌طور معمول به دو بخش تقسیم می‌شود و به‌وسیلۀ ضامن فنر کمانی از هم جدا می‌شود (شکل۱۵) [۱۵]. چرخدندۀ رینگی راه‌انداز (استارتر) موتور طبق شکل ۱۶، روی چرخ‌طیار اولیه واقع می‌شود و با توجه به نوع چرخ‌طیار دو جرمی، از طریق جوش یا جازنی انقباضی روی آن نصب می‌شود [۱۵].

چرخ‌طیار ثانویه

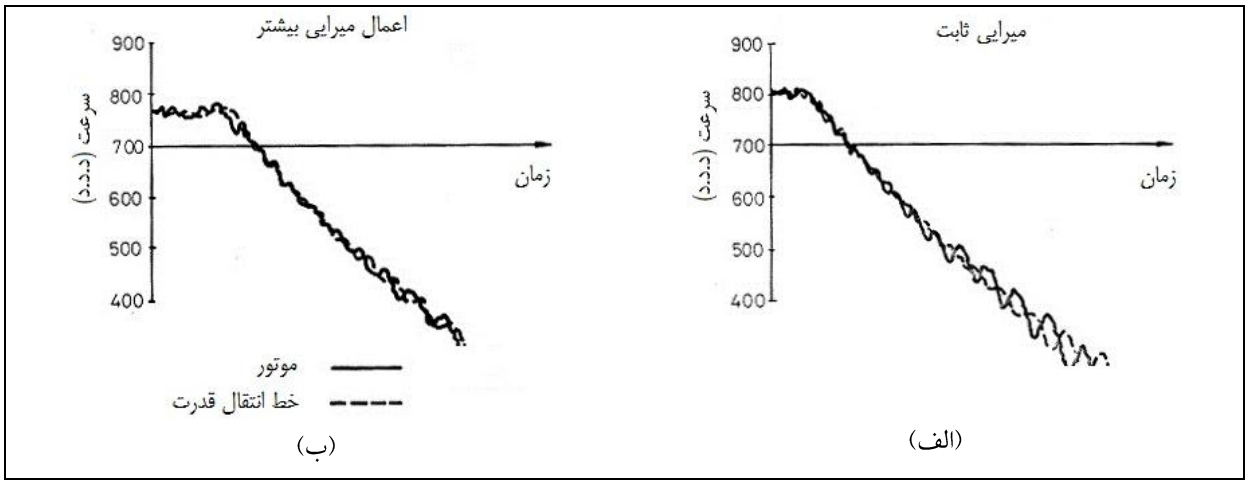
لبۀ خارجی چرخ‌طیار ثانویه در چرخ‌طیار دو جرمی به پوستۀ کلاچ پیچ می‌شود (شکل ۱۷).



شکل ۱۱. نوسان اندازه‌گیری شده در چرخ‌طیار دو جرمی [۱۳]



شکل ۱۲. نوسان اندازه‌گیری شده هنگام راه‌اندازی موتور با چرخ‌طیار دو جرمی [۱۳]



شکل ۱۳. نوسان اندازه‌گیری شده هنگام خاموش‌شدن موتور با چرخ‌طیار دو جرمی [۱۳]

چرخ‌طیار ثانویه در تعامل با کلاچ، گشتاور تعدیل‌شده را از چرخ‌طیار دو جرمی به جعبه‌دنده انتقال می‌دهد. سازوکار فنر کلاچ در موقع درگیری کلاچ، صفحهٔ متحرک را به‌سمت صفحه اصطکاکی چرخ‌طیار ثانویه هدایت می‌کند. گشتاور از طریق درگیری اصطکاکی انتقال داده می‌شود. جرم چرخ‌طیار ثانویه در کل شامل جرم ثانویه و فلانژ است.

گشتاور از طریق بالک‌های فلانژ که بین دو فنر واقع شده انتقال می‌یابد [۱۵].

یاتاقان

یاتاقان در چرخ‌طیار اولیه قرار می‌گیرد. اتصال چرخ‌طیار اولیه با چرخ‌طیار ثانویه از طریق این یاتاقان انجام می‌گیرد

شکل ۱۴. چرخ‌طیار اولیه [۱۵]

شکل ۱۵. ضامن فنر کمانی [۱۵]

از دو نوع یاتاقان گوناگون می‌توان در چرخ‌طیار دو جرمی استفاده کرد. در ابتدا از یاتاقان ساچمه‌ای استفاده می‌شده است. طول عمر و دوام این یاتاقان در مسیر تکامل به حد اطمینان خوب و مطلوبی رسیده است.

با ارتقاء روزافزون فناوری، یاتاقان‌هایی با اندازهٔ کوچک‌تر و سپس یاتاقان‌های تخت نیز تولید و برای به‌کارگیری در چرخ طیارهای دو جرمی معرفی شدند که هم‌اکنون استفاده آنها در چرخ‌طیار دو جرمی به‌صورت استاندارد درآمده است. شکل ۱۹ نصب یاتاقان ساچمه‌ای و یاتاقان تخت را در چرخ‌طیار دو جرمی نشان می‌دهد [۱۵].

یاتاقان ساچمه‌ای بزرگ

همان‌گونه که در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود، در چرخ‌طیار اولیه، نشیمنگاهی در اطراف توپی تعبیه می‌شود تا یاتاقان ساچمه‌ای بزرگ در آن قرار گیرد [۱۵].

که نیروی وزن چرخ‌طیار ثانویه و صفحهٔ فشار کلاچ را تحمل می‌کند (شکل ۱۸). همچنین نیرویی را که در موقع آزادبودن کلاچ به چرخ‌طیار دو جرمی وارد می‌شود نیز تحمل می‌کند. یاتاقان به هر دو چرخ‌طیار امکان دوران نسبی می‌دهد، همچنین این امکان را فراهم می‌کند که نسبت به‌هم حرکت نوسانی داشته باشند [۱۵].

یاتاقان ساچمه‌ای کوچک

طبق شکل ۲۱، فلانژ توپی‌شکل به‌همراه جایگاه یاتاقان، روی چرخ‌طیار اولیه، که از ورق فلزی ساخته شده است، قرار می‌گیرد. جایگاه یاتاقان به‌گونه‌ای است که می‌توان آن را برای نصب یک یاتاقان ساچمه‌ای کوچک و یا یک یاتاقان صفحه‌ای تنظیم کرد [۱۵].

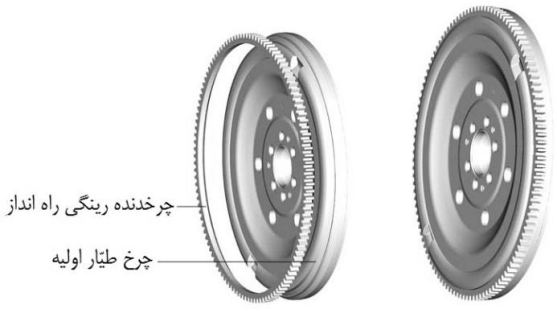
یاتاقان تخت

با انجام تحقیقات بیشتر، دامنهٔ پیشرفت‌ها در زمینه یاتاقان‌ها منجر به طراحی و ساخت یاتاقان تخت گردید که در شکل ۲۲ نمونه‌ای از آن نمایش داده شده است [۱۵].

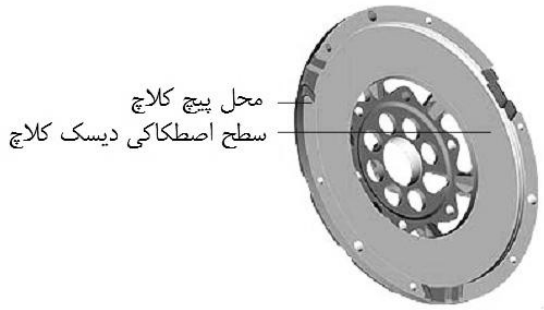
فلانژ

وظیفهٔ فلانژ، انتقال گشتاور از چرخ‌طیار اولیه، که فنرهای کمانی در آن قرار می‌گیرند، به چرخ‌طیار ثانویه، یا به‌عبارت دیگر از موتور به کلاچ است. فلانژ طوری به چرخ‌طیار

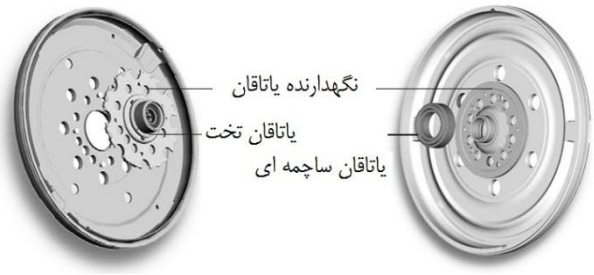
ثانویه پرچ می‌شود که بالک‌های آن بین راهگاه فنر در چرخ‌طیار اولیه قرار می‌گیرد (شکل ۲۳). فضای بین ضامن فنر کمانی به اندازهٔ کافی بزرگ است تا فلانژ قادر به چرخش در آنجا باشد [۱۵].



شکل ۱۶. چرخ‌دندهٔ رینگی راه‌انداز [۱۵]



شکل ۱۷. چرخ‌طیار ثانویه به‌همراه پوسته کلاچ [۱۵]



شکل ۱۸. محل قرارگیری یاتاقان در چرخ‌طیار اولیه [۱۵]

شکل ۱۹. نصب یاتاقان ساچمه‌ای و تخت در چرخ‌طیار دو جرمی

فلانژ صلب

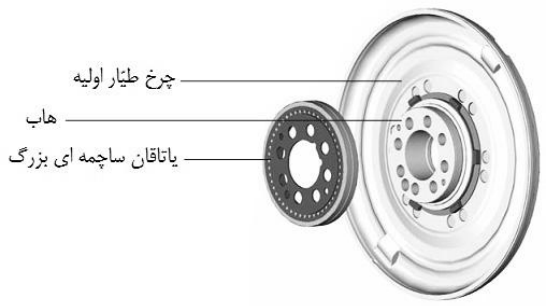
شکل ۲۴ نمونه‌ای از فلانژ صلب را نشان می‌دهد که به چرخ‌طیار ثانویه پرچ می‌شود. برای بهبود میرایی ارتعاشات، بالک‌های فلانژ با شکل‌های متقارن مختلف طراحی می‌شوند. ساده‌ترین شکل فلانژ متقارنی است که طرف کشش و فشار آن یکسان باشد و در نتیجه بار از طریق حلقه انتهایی فنر کمانی به آن اعمال شود [۱۵].

فلانژ با فنر داخلی

یک وظیفهٔ چرخ‌طیار دو جرمی، جلوگیری از انتقال ارتعاشات ناشی از موتور به خط انتقال قدرت است. با توجه به اینکه فنر کمانی خارجی فضای حرکت ثابتی در راهگاه خود دارد، برای تحمل گشتاورهای بالای موتور باید دارای سختی بیشتری باشد. این امر سبب می‌شود که ظرفیت میرایی ارتعاشات آن بدتر شود. استفاده از فنر داخلی غیر اصطکاکی، به بهبود حذف ارتعاشات هنگام شتاب‌گیری کمک می‌کند (شکل ۲۵). فلانژ و شکل راهگاه فنر داخلی در آن با توجه به شکل فنرهای فشاری که به‌صورت خطی هستند طراحی شده‌اند. ویژگی‌های بسیار خوب نوسان در چرخ‌طیار دو جرمی که در آن فنر داخلی وجود دارد، حتی در بالاترین بازهٔ گشتاور، تضمین شده است [۱۵].

در سرعت‌های بالای موتور، نیروی گریز از مرکز منتج از حرکت دورانی، فنر کمانی را به بیرون علیه راهنماها می‌فشارد و باعث می‌شود حلقه‌های فنر غیرفعال شوند. در نتیجه سختی فنر کمانی و عمل فنر تا حدی از دست می‌رود. به‌همین دلیل و به‌منظور حفظ عمل مناسب فنر،

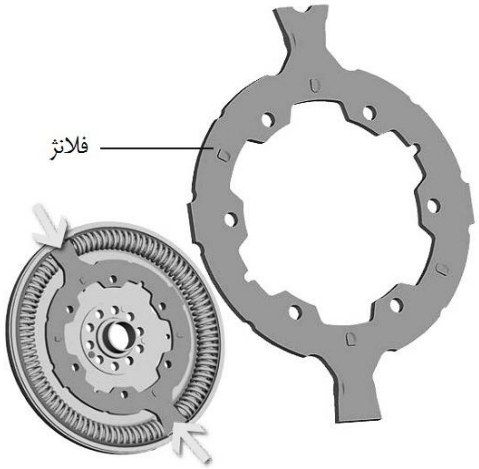
فنرهای فشاری خطی در فلانژ قرار داده شده‌اند. این فنرها با توجه به جرم کمترشان و قرارگیری آنها در شعاع کوچک‌تر، تحت نیروی گریز از مرکز کمتری قرار می‌گیرند. به‌علاوه شکل محدب لبهٔ کناری راهگاه فنر، به حداقل رساندن اصطکاک کمک می‌کند و تضمین می‌کند که اصطکاک و نرخ مؤثر فنر با زیاد شدن سرعت موتور افزایش نیابد [۱۵].



شکل ۲۰. یاتاقان ساچمه‌ای بزرگ [۱۵]

شکل ۲۱. یاتاقان ساچمه‌ای کوچک [۱۵]

شکل ۲۲. یاتاقان تخت [۱۵]



شکل ۲۳. فلانژ [۱۵]

فلانژ با کلاچ اصطکاکی

برخلاف فلانژ صلب، این نوع فلانژ به چرخ‌طیار ثانویه پرچ نشده است. فلانژ به‌شکل یک فنر غشایی طراحی شده است. فنر غشایی در محل لبهٔ خود، از طریق دو پنل نگه‌دارنده نگه داشته شده است. به این ترتیب یک بست چنگالی شکل که در شکل ۲۶ نشان داده شده، شکل گرفته است. این امر سبب می‌شود که گشتاور قابل اطمینان از طریق اصطکاک بین بست و فنر غشایی به خط انتقال قدرت منتقل شود. کلاچ اصطکاکی به‌طور همزمان از گرم‌شدن بیش از حد چرخ‌طیار دو جرمی جلوگیری می‌کند [۱۵].

دیسک کنترل اصطکاک

مطابق شکل ۲۷، در بعضی از مدل‌های چرخ‌طیار دو جرمی، یک وسیلهٔ اضافی به نام دیسک کنترل اصطکاک وجود دارد. دیسک کنترل اصطکاک از زاویهٔ لقی α برخوردار است که به‌منظور اعمال اصطکاک اضافی، آن هم در زاویه‌های پیچشی بالا به‌کار می‌رود. این کار میرایی

فوق‌العاده‌ای را در طی عملکرد موتور به‌ویژه هنگام راه‌اندازی یا تعویض بار فراهم می‌کند.

فنرهای کمانی

چرخ‌طیار دو جرمی رفتار ارتعاشی خط انتقال قدرت را با استفاده از طرح خاصی از فنر که در عین حال دارای خاصیت میرایی هم می‌باشد، بهبود می‌بخشد. این فنر در شکل ۲۸ نمایش داده شده است. نتیجهٔ مستقیم این طرح، کاهش سروصدا و مصرف سوخت کمتر است. در این طرح، به‌منظور استفاده مناسب از فضای موجود، یک فنر مارپیچ با تعداد زیادی حلقه، در موقعیتی به‌شکل نیم‌دایره قرار می‌گیرند. این نوع فنر، که فنر کمانی نامیده می‌شود، در راهگاه فنر در چرخ‌طیار دو جرمی قرار می‌گیرد و از طریق یک راهنما هدایت می‌شود (شکل ۲۹).

هنگام اعمال بار، حلقه‌های فنر کمانی در طول راهنما می‌لغزند و بنابراین اصطکاک و میرایی ایجاد می‌کنند. برای جلوگیری از سایش فنر کمانی، سطح تماس لغزشی روانکاری می‌شود [۱۵].

مزایای فنر کمانی

مزایای استفاده از فنرهای کمانی به‌ترتیب عبارت است از:

۱. اصطکاک بالا در زاویهٔ پیچشی زیاد (هنگام راه‌اندازی) و اصطکاک کم در زاویهٔ پیچشی کم (هنگام شتاب‌گیری)
۲. نرخ کم فنر به‌دلیل استفاده خوب و پویای فضای موجود
۳. امکان دفع ضربه

با توجه به تنوع طرح‌های فنر کمانی، سیستم چرخ‌طیار دو جرمی را می‌توان دقیقاً با بارهای مشخصه از هر خودرویی منطبق کرد [۱۵]. طرح‌های پرکاربرد عبارت‌اند از:

۱. فنر یک‌مرحله‌ای
۲. فنر دو مرحله‌ای، با دو آرایش مختلف (آرایش موازی با ترکیبات مختلف یا آرایش خطی)
۳. فنر سه‌مرحله‌ای

در عمل انواع فنرها در ترکیب‌های متنوعی به‌کار می‌روند.

فنر یک‌مرحله‌ای تکی

ساده‌ترین شکل فنر کمانی، فنر تکی است که در شکل ۳۰ نمایش داده شده است.

فنر یک‌مرحله‌ای موازی

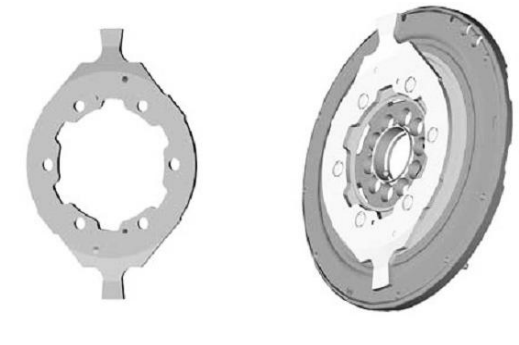
امروزه طرح استاندارد فنر یک‌مرحله‌ای، فنری کمانی است که شامل یک فنر خارجی و یک فنر داخلی با طول تقریباً یکسان است (شکل ۳۱). هر دو فنر در آرایش موازی قرار می‌گیرند. مشخصهٔ بار یا جابه‌جایی، به کل مجموعه فنر اعمال می‌شود [۱۵].

فنر دو مرحله‌ای موازی

همچنین در فنر موازی دو مرحله‌ای، دو فنر کمانی داخل هم قرار می‌گیرند. همان‌گونه که در شکل ۳۲ مشهود است، فنر داخلی کوتاه‌تر است؛ پس دیرتر درگیر می‌شود. شکل نهایی فنر خارجی مطابق با شرایط راه‌اندازی موتور است. بار در این حالت فقط بر فنر خارجی، که نرم‌تر است، وارد می‌شود و سیستم را قادر می‌سازد تا سریع‌تر از سرعت تشدید بحرانی عبور کند. همچنین در محدودهٔ گشتاورهای بالاتر، بار به فنر داخلی هم اعمال می‌شود. هر دو فنر داخلی و خارجی در مرحله دوم با هم کار می‌کنند. واکنش هر دو فنر، میرایی خوبی را در تمام بازهٔ سرعت موتور فراهم می‌کند.

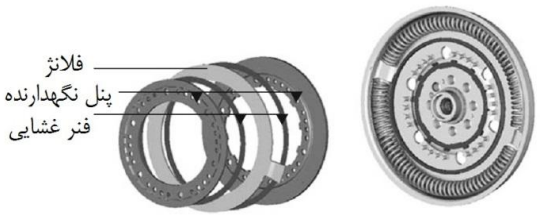
فنر سه‌مرحله‌ای

این نوع فنر کمانی، که در شکل ۳۳ نمایش داده شده است، شامل یک فنر خارجی و دو فنر داخلی با طول‌های متفاوت و پشت سرهم است. این طرح مزایای آرایش موازی و سری را با هم ترکیب می‌کند، بنابراین یک میرایی پیچشی بهینه را برای موتور به وجود می‌آورد [۱۵].

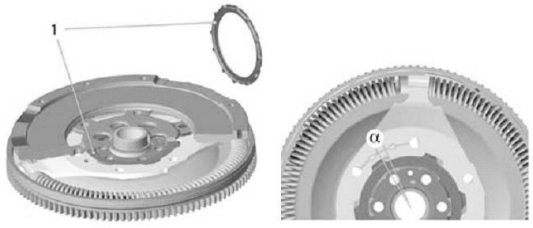


شکل ۲۴. فلانژ صلب [۱۵]

شکل ۲۵. فلانژ با فنر داخلی [۱۵]

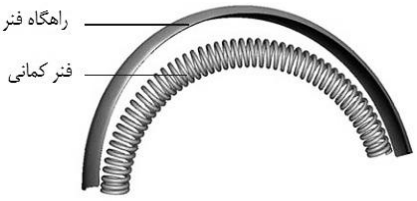


شکل ۲۶. فلانژ با کلاچ اصطکاکی [۱۵]

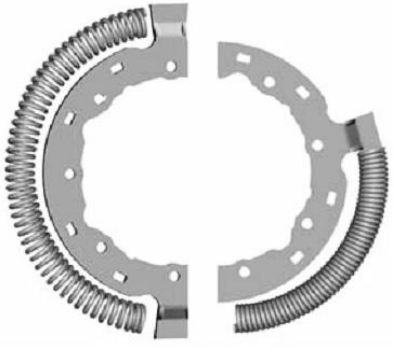


شکل ۲۷. دیسک کنترل اصطکاک [۱۵]

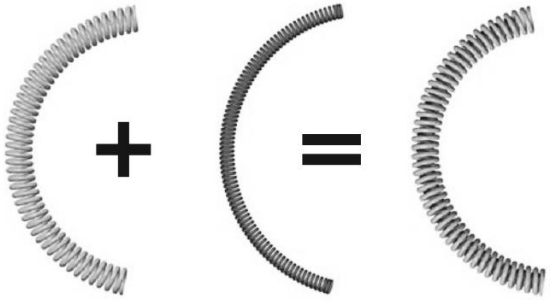
شکل ۲۸. فنرهای کمانی [۱۵]



شکل ۲۹. فنر کمانی و راهگاه فنر [۱۵]



شکل ۳۰. فنر یک‌مرحله‌ای تکی [۱۵]



شکل ۳۱. فنر یک‌مرحله‌ای موازی [۱۵]

نتیجه‌گیری

چرخطیار دو جرمی تقریباً راه‌حلی بهینه برای حذف نوسانات پیچشی میل‌لنگ است. با چرخطیار دو جرمی می‌توان سروصدای خط انتقال قدرت را ، هنگامی‌که کلاچ درگیر یا خلاص است، به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. همچنین تشدید خط انتقال قدرت در موقع راه‌اندازی موتور و همچنین کاهش سرعت به حداقل مقدار ممکن رساند. هماهنگی سریع میان خط انتقال قدرت با تغییرات گشتاور موتور ایجاد کرد و نهایتاً دنده را، به‌دلیل کاهش ارتعاشات پیچشی در خط انتقال قدرت، راحت‌تر تعویض کرد. باید توجه داشت که چرخطیار دو جرمی سبب کاهش مصرف سوخت می‌شود، اگر نکات کارخانهٔ تولیدکنندهٔ خودرو، بازهٔ سرعت کاری موتور را کاهش دهد؛ یعنی موتور بتواند در دورهای پایین‌تری توان مورد نظر را ارائه کند. همچنن راننده در دنده‌های بالاتر و در نتیجه دورهای پایین‌تر موتور، رانندگی کند.

شکل ۳۲. فنر دو مرحله‌ای موازی [۱۵]

شکل ۳۳. فنر کمانی سه‌مرحله‌ای [۱۵]

مآخذ

[1] Z. Bin, J.Zhengfeng, Z.Guangming, Torsional vibration signal simulation and analysis of Dual-mass Flywheel based on LabVIEW, International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2010

[2] H.J. Drexl, Torsional dampers and alternative systems to reduce driveline vibrations, SAE paper, 870393, 1987

[3] H.J. Drexl, Truck clutches for the 90s-higher torques, efficient torsional dampening end eletronic control, SAE paper, 892475, 1989

[4] G.P. Littlefair, Arc spring sliding friction within the dual mass flywheel, MSc Thesis, Loughborough University, Loughbrough, UK, 2004

[5] H.Petri, D.Heldingfeld, The hyraulic torsion damper-a new concept for vibration damping in powertrains, SAE paper, 892447, 1989

[6] M.Schnurr, Development of the super-long-travel dual mass flywheel, In Proceedings of 4th LUK International Symposium, Baden-Baden, Germany, pp. 55-80,1990

[7] W.Reik, Torsional vibration isolation in the drive-train. An evaluative study, In Proceedings of 4th LUK International Symposium, Baden-Baden, Germany, pp. 125-146, 1990

[8] A.Laschet, Computer simulation of vibrations in vehicle powertrains considering nonlinear effects in clutches

and manual transmissions, SAE paper, 941011, 1994

[9] Z. Y. Changji, Staudy on multistage non-linear dual mass flywheel damper, Journal of Vibration and Shock, Vol. 28, No. 5, pp. 92-96, 2009

[10] W. Sun, Y. Li, J. Huang, Nonlinear characteristics study and parameter optimization of DMF-RS, SAE Int. J. Passeng. Cars-Mech. Syst,Vol. 4, No. 2, pp. 1050-1057, 2011

[11] W. Li, W. Shi, Study and simulation of isolation performance of torsional vibration of DMF-CS with centrfugal pendulu-type absorber, SAE-China and FISITA, Proceedings of the FISITA 2012 world automotive congress, 2013

[12] A. Kooy, J. Kroll, Drive train vibration solving the conflict between efficiency and drivability, SAE-China and FISITA, Proceedings of the FISITA 2012 world automotive congress, 2013

[13] Schulte,L,F. The Dual Mass Flywheel, Kupplungen Clutches Embrayages Embragues, 1986

[14] Albers,A. Advanced Development of Dual Mass Flywheel (DMFW) Design - Noise Control for Today's Automobiles , LUK's Brochure, 1993

[15] Dual Mass Flywheel, Technology, Failure Diagnosis, LUK's Brochure, 2008

پی‌نوشت

1. torsional oscillations
2. flywheel
3. dual mass
4. powertrain
5. Drexl
6. LUK Company, http://www.luk.de/content.luk.de/de/index.jsp (accessed Jul 10, 2013)
7. Laschet