بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی
بخش مهندسی مکانیک

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

بهینه سازی رفتار ارتعاشی چرخدنده‌های خورشیدی

مؤلف:
فرشاد شاکری اسکی

استاد راهنما:
دکتر فرهاد شیخ‌سامانی

استاد مشاور:
دکتر محمد علی حاج عباسی

بهمن ۱۳۹۱

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط درجه کارشناسی ارشد به

بخش مهندسی مکانیک

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچ‌گونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی‌شود.

دانشجو : فرشاد شاکری اسکی

استاد راهنما : آقای دکتر فرهاد شیخ‌سامانی

استاد مشاور : آقای دکتر محمدعلی حاج عباسی

داور ۱ :

داور۲ :

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده :

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است.

تقدیم به:

پدر و مادر مهربانم

به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند.

تشکر و قدردانی:

سپاسگذار خداوندی هستم که توفیق قدم گذاشتن در راه علم را به بنده‌ی خویش عطا فرمود.

لازم می دانم از راهنمایی های مدبرانه ی استاد ارجمندم جناب آقای دکتر شیخ‌سامانی و استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر حاج عباسی کمال تشکر و سپاسگذاری را داشته باشم که همواره با متانت و بزرگواری خود، مرا در این تحقیق یاری و راهنمایی نموده اند.

چکیده

در این پایان نامه، تأثیر اصلاح پروفیل سردنده بر رفتار ارتعاشی و اثر افزایش سختی تکیه‌گاه خورشید در سیستم چرخدنده‌ی خورشیدی سه سیاره‌ای مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. مجموعه خورشیدی مشتمل بر پنج چرخدنده است که عبارتند از: یک چرخدنده‌ی خورشید، سه چرخدنده‌ی سیاره و یک چرخدنده‌ی رینگ، و همچنین سیستم شامل یک بازو می‌باشد. سیستم مزبور به صورت یک سیستم ارتعاشی هجده درجه آزادی مدل شده است که در این مدل گسسته هر چرخدنده دارای سه درجه آزادی شامل درجات آزادی در راستای عمودی، افقی و چرخشی می‌باشد. درگیری بین دندانه‌ها و تماس بین چرخدنده‌ها و نگهدارنده‌ها با استفاده از فنرهای غیرخطی و دمپرها مدلسازی شده‌اند. با استفاده از اصل تعادل دینامیکی معادلات به دست آورده شده‌اند و با استفاده از روش عددی رانج‌کوتا مرتبه چهار مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهند اصلاح شکل دندانه‌ی چرخدنده موجب کاهش ارتعاشات آشوبناک می‌شود. این مطالعه با نتایج تحقیقات قبلی که شامل مدل شش درجه آزادی فقط در راستای چرخش می‌باشد اعتبارسنجی شده است.

کلمات کلیدی: چرخدنده‌ی خورشیدی، فنر غیرخطی، اصلاح سر دندانه، ارتعاشات متناوب، ارتعاشات آشوبناک.

فهرست مطالب

عنوان		صفحه
فصل اول: مقدمه، مروری بر تحقیقات گذشته		۱
۱-۱	مقدمه	۲
۱-۲	مروری بر تحقیقات گذشته	۳
۱-۳	بیان مسئله و هدف از انجام پایان نامه	۵
فصل دوم: انواع چرخدنده‌ها		۷
۲-۱	مقدمه	۸
۲-۲	چرخدنده‌های داخلی و خارجی	۹
۲-۳	چرخدنده‌ی ساده	۹
۲-۴	چرخدنده‌ی مارپیچی	۱۰
۲-۵	چرخدنده‌ی خورشیدی	۱۱
۲-۶	چرخدنده‌ی خورشیدی مرکب	۱۴
۲-۷	محاسبه‌ی خروجی از ورودی	۱۵
۲-۸	مزایا و معایب چرخدنده‌های خورشیدی	۱۵
فصل سوم: دینامیک جفت چرخدنده‌ی ساده		۱۷
۳-۱	مقدمه	۱۸
۳-۲	هندسه‌ی پایه‌ی چرخدنده‌ی ساده(منحنی اینوولوت)	۱۸
۳-۳	پارامترهای طراحی چرخدنده‌ی ساده	۲۲
۳-۴	فرکانس درگیری دندانه‌ها	۲۳
۳-۵	دینامیک چرخدنده‌های ساده	۲۴

۳-۵-۱ معادله‌ی حرکت ۲۴

۳-۶ مدلسازی لقی: تکنیک هموارسازی ۲۷

۳-۷ اصلاح شکل دندانه ۲۸

فصل چهارم: استاتیک و دینامیک چرخدنده‌های خورشیدی ۳۱

۴-۱ مقدمه ۳۲

۴-۲ اختلاف فاز سیاره ۳۳

۴-۳ معادلات تعادل کلی ۳۷

۴-۴ معادلات استاتیکی ۳۸

۴-۴-۱ معادله‌ی حرکت چرخدنده‌ی خورشید ۳۹

۴-۴-۲ معادله‌ی حرکت چرخدنده‌ی رینگ ۴۰

۴-۴-۳ معادله‌ی حرکت چرخدنده‌ی سیاره ۴۰

۴-۴-۴ معادله‌ی حرکت بازو ۴۱

۴-۵ معادلات دینامیکی تعادل ۴۲

۴-۵-۱ معادله‌ی حرکت چرخدنده‌ی خورشید ۴۲

۴-۵-۲ معادله‌ی حرکت چرخدنده‌ی رینگ ۴۳

۴-۵-۳ معادله‌ی حرکت چرخدنده‌ی سیاره ۴۴

۴-۵-۴ معادله‌ی حرکت بازو ۴۵

۴-۶ مدلسازی دینامیکی چرخدنده‌های خورشیدی با وجود لقی ۴۵

۴-۶-۱ سختی درگیری متغیر ۴۷

۴-۶-۲ معادلات حرکت خورشید ۴۷

۴-۶-۳ معادلات حرکت رینگ ۴۹

۴-۶-۴ معادلات حرکت سیاره‌ها ۵۰

۴-۶-۵ معادلات حرکت بازو ۵۱

فصل پنجم: نتایج عددی ۵۴

۵-۱	مقدمه	۵۵
۵-۲	اعتبارسنجی	۵۵
۵-۲-۱	مدل چرخشی برای چرخ‌دنده‌های خورشیدی: مقایسه اول	۵۵
۵-۲-۲	مدل‌سازی چرخشی و جابجایی : مقایسه‌ی دوم	۵۸
۵-۳	اطلاعات ورودی	۶۰
۵-۳-۱	نرم‌افزار طراحی چرخدنده	۶۱
۵-۴	نتایج	۶۴
۵-۴-۱	منحنی‌های دو شاخگی: اثر اصلاح شکل دندانه بر ارتعاشات	۶۴
۵-۴-۲	منحنی‌های جذر متوسط مربع در حالت اصلاح شکل دندانه	۶۹
۵-۴-۳	منحنی‌های پوآنکاره : اثر اصلاح شکل دندانه	۷۰
۵-۴-۴	اثر افزایش مقدار تکیه‌گاه خورشید	۷۴

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادها ۸۰

۶-۱	جمع بندی نتایج	۸۱
۶-۲	پیشنهادها	۸۲

فصل هفتم:پیوست ۸۳

۷-۱	فضای حالت	۸۴
۷-۲	منحنی پوآنکاره	۸۴
۷-۳	منحنی دو شاخگی	۸۵
۷-۴	روش بهینه‌سازی جستجوی جامع	۸۶
۷-۵	جذر متوسط مربع	۸۶
۷-۶	نرم‌افزار طراحی چرخدنده و نرم‌افزار مارک	۸۷
	منابع	۸۹

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱ چرخدنده‌ی ساده‌ی از نوع خارجی ۹

شکل ۲-۲ چرخدنده‌ی ساده‌ی از نوع داخلی ۹

شکل ۲-۳ یک نوع چرخدنده‌ی مارپیچی ۱۱

شکل ۲-۴ چرخدنده‌ی خورشیدی جعبه دنده‌ی توربین باد ۱۲

شکل ۲-۵ چرخدنده‌ی خورشیدی مرکب ۱۴

شکل ۳-۱ ایجاد منحنی اینولوت ۱۹

شکل ۳-۲ پارامتر تابع اینولوت ۲۰

شکل ۳-۳ پارامترهای طراحی جفت چرخدنده‌ی ساده ۲۳

شکل ۳-۴ مدل دینامیکی جفت چرخدنده‌ی ساده ۲۵

شکل ۳-۵ خطاهای ساخت، فقدان ماده در طول خط اثر ۲۵

شکل ۳-۶ مدل دینامیکی چرخدنده‌ی ساده با حضور لقی ۲۷

شکل ۳-۷ تنش هرتز درگیری دو دندانه ۲۹

شکل ۳-۸ اصلاح شکل دندانه در سر و ریشه ۲۹

شکل ۳-۹ اصلاح شکل دندانه در سر و ریشه با استفاده از اصلاح سهمی‌گون ۳۰

شکل ۳-۱۰ اصلاح شکل دندانه از پهنا ۳۰

شکل ۴-۱ مدل گسسته‌ی مجموعه چرخدنده‌ی خورشیدی ۳۲

شکل ۴-۲ مجموعه چرخدنده‌ی خورشیدی، u_s ,u_c , u_r , $u_{1,2,3}$ مشخص کننده‌ی تعداد درجه آزادی ارتعاشات ۳۳

شکل ۴-۳ مدل دینامیکی چرخدنده‌ی خورشیدی ۴۶

شکل ۵-۱ مقایسه‌ی نمودار جذر متوسط مربع مدل چرخشی و مدل باهک و پارکر ۵۸

شکل ۵-۲ اعتبارسنجی جذر متوسط مربع چرخش خورشید برحسب فرکانس ۵۹

شکل ۵-۳ اعتبارسنجی جذر متوسط مربع چرخش سیاره‌ی اول برحسب فرکانس ۶۰

شکل ۵-۴ اصلاح تابع سختی به دست آمده از طراحی چرخدنده برای درگیری خورشید-سیاره در حالت بدون اصلاح شکل دندانه ۶۱

شکل ۵-۵ اصلاح تابع سختی به دست آمده از طراحی چرخدنده برای درگیری سیاره-رینگ در حالت بدون اصلاح شکل دندانه ۶۲

شکل ۵-۶ تابع سختی در حالت اصلاح شکل سر دندانه برای درگیری خورشید-سیاره ۶۳

شکل ۵-۷ تابع سختی در حالت اصلاح شکل سر دندانه برای درگیری رینگ-سیاره ۶۴

شکل ۵-۸ منحنی دو شاخگی جابجایی خورشید در راستای افقی ۶۵

شکل ۵-۹ منحنی دو شاخگی جابجایی خورشید در راستای عمودی ۶۵

شکل ۵-۱۰ منحنی دو شاخگی جابجایی خورشید در راستای چرخش ۶۶

شکل ۵-۱۱ منحنی دو شاخگی سرعت خورشید در راستای چرخش ۶۶

شکل ۵-۱۲ منحنی دو شاخگی جابجایی سیاره‌ی یک در راستای افقی ۶۷

شکل ۵-۱۳ منحنی دو شاخگی جابجایی سیاره‌ی یک در راستای عمود ۶۸

شکل ۵-۱۴ منحنی دو شاخگی جابجایی سیاره‌ی یک در راستای چرخش ۶۸

شکل ۵-۱۵ منحنی جذر متوسط مربع جابجایی خورشید در راستای افقی ۶۹

شکل ۵-۱۶ منحنی جذر متوسط مربع جابجایی خورشید در راستای چرخش ۶۹

شکل ۵-۱۷ منحنی پوآنکاره خورشید در راستای چرخش در حالت بدون اصلاح در فرکانس ۸۰۰هرتز ۷۰

شکل ۵-۱۸ منحنی پوآنکاره خورشید در راستای چرخش در حالت اصلاح در فرکانس ۸۰۰هرتز ۷۰

شکل ۵-۱۹ منحنی پوآنکاره خورشید در راستای چرخش در حالت بدون اصلاح در فرکانس ۱۴۴۰هرتز ۷۱

شکل ۵-۲۰ منحنی پوآنکاره خورشید در راستای چرخش در حالت با اصلاح در فرکانس ۱۴۴۰هرتز ۷۲

شکل ۵-۲۱ منحنی پوآنکاره خورشید در راستای چرخش در حالت بدون اصلاح در فرکانس ۲۷۲۰هرتز ۷۲

شکل ۵-۲۲ منحنی پوآنکاره خورشید در راستای چرخش در حالت با اصلاح در فرکانس ۲۷۲۰هرتز ۷۳

شکل ۵-۲۳ منحنی پوآنکاره خورشید در راستای چرخش در حالت بدون اصلاح در فرکانس ۳۳۶۰هرتز ۷۳

شکل ۵-۲۴ منحنی پوآنکاره خورشید در راستای چرخش در حالت با اصلاح در فرکانس ۳۳۶۰هرتز ۷۴
شکل ۵-۲۵ مقایسه‌ی منحنی دو شاخگی جابجایی در دو مقدار تکیه‌گاه خورشید در راستای افقی خورشید ۷۵
شکل ۵-۲۶ مقایسه‌ی منحنی دو شاخگی جابجایی در دو مقدار تکیه‌گاه خورشید در راستای عمودی خورشید ۷۵
شکل ۵-۲۷ مقایسه‌ی منحنی دو شاخگی جابجایی در دو مقدار تکیه‌گاه خورشید در راستای چرخش خورشید ۷۶
شکل ۵-۲۸ مقایسه‌ی منحنی دو شاخگی جابجایی در دو مقدار تکیه‌گاه خورشید در راستای افقی سیاره‌ی یک ۷۶
شکل ۵-۲۹ مقایسه‌ی منحنی دو شاخگی جابجایی در دو مقدار تکیه‌گاه خورشید در راستای عمودی سیاره‌ی یک ۷۷
شکل ۵-۳۰ مقایسه‌ی منحنی دو شاخگی جابجایی در دو مقدار تکیه‌گاه خورشید در راستای چرخش سیاره‌ی یک ۷۷
شکل ۵-۳۱ مقایسه‌ی منحنی دو شاخگی سرعت در دو مقدار تکیه‌گاه خورشید در راستای افقی خورشید ۷۸
شکل ۵-۳۲ مقایسه‌ی منحنی دو شاخگی سرعت در دو مقدار تکیه‌گاه خورشید در راستای افقی خورشید ۷۸
شکل ۷-۱ نمودار فضای حالت ۸۴
شکل ۷-۲ نمودار پوآنکاره ۸۵
شکل ۷-۳ نمودار دو شاخگی ۸۷
شکل ۷-۴ المان‌بندی چرخدنده در نرم‌افزار مارک ۸۸
شکل ۷-۵ المان‌بندی چرخدنده در نرم‌افزار مارک ۸۸

شکل ۷-۶ المان‌بندی چرخدنده در نرم‌افزار مارک ۸۶

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۵-۱ پارامترهای چرخدنده‌ی خورشیدی باهک و پارکر ۵۶

جدول ۵-۲ نسبت میرایی ۵۶

جدول ۵-۳ ضرایب فوریه سختی درگیری خورشید-سیاره و رینگ-سیاره ۵۶

جدول ۵-۴ مقایسه‌ی فرکانس طبیعی مدل چرخشی و مدل باهک و پارکر ۵۷

جدول ۵-۵ مقایسه‌ی فرکانس طبیعی برای سیستم دارای حرکت چرخشی و انتقالی ۵۹

جدول ۵-۶ پارامترهای طراحی چرخدنده‌ی خورشیدی مورد مطالعه ۶۰

جدول ۵-۷ شعاع و دامنه‌ی بهینه‌ی اصلاح شکل سر دندانه ۶۲

جدول ۵-۸ دامنه‌ی نوسان قبل و بعد از اصلاح شکل دندانه ۶۳

فهرست علائم

x_s راستای افقی خورشید $[\mathrm{m}]$

k_s سختی انتقالی تکیه‌گاه خورشید (برابر در راستای افقی و عمودی) $[\mathrm{N/m}]$

Ψ_n	موقعیت زاویه ای nامین سیاره‌ای نسبت به محور افقی [Rad]
α_s	زاویه فشار برای خورشید-سیاره (در حال کار) [Rad]
α_r	زاویه فشار برای سیاره-رینگ (در حال کار) [Rad]
r_{bs}, r_{bn}, r_{br}	شعاع دایره‌ی پایه (خورشید، سیاره، رینگ) [m]
k_{sn}	سختی درگیری خورشید-سیاره‌ی nام [N/m]
k_{su}	سختی چرخشی تکیه‌گاه خورشید [N.m/rad]
k_r	سختی انتقالی تکیه‌گاه رینگ (برابر در راستای افقی و عمودی) [N/m]
k_{rn}	سختی درگیری رینگ-سیاره‌ی nام [N/m]
r_c	شعاع بازو (فاصله‌ی مراکز خورشید-سیاره) [m]
k_p	سختی انتقالی تکیه‌گاه سیاره (برابر در راستای افقی و عمودی) [N/m]
k_{pu}	سختی چرخشی تکیه‌گاه سیاره [N.m/rad]
k_c	سختی انتقالی تکیه‌گاه بازو (برابر در راستای افقی و عمودی) [N/m]
k_{cu}	سختی چرخشی تکیه‌گاه بازو [N.m/rad]
M_s	جرم خورشید [Kg]
θ_s	راستای چرخش خورشید [Rad]
C_s	میرایی انتقالی تکیه‌گاه خورشید (برابر در راستای افقی و عمودی) [N.sec/m]
C_{sn}	میرایی درگیری خورشید-سیاره‌ی nام [N.sec/m]
b_s	لقی خورشید-سیاره [m]
I_s	ممان اینرسی خورشید [$Kg.m^2$]
C_{su}	میرایی پیچشی تکیه‌گاه خورشید [N.m.sec/rad]
M_r	جرم رینگ [Kg]
θ_r	راستای چرخش رینگ [Rad]

C_r میرایی انتقالی تکیه‌گاه رینگ (برابر در راستای افقی و عمودی) [N.sec/m]

C_{rn} میرایی درگیری رینگ-سیاره‌ی nام [N.sec/m]

b_r لقی رینگ-سیاره [m]

I_r ممان اینرسی رینگ [$Kg.m^2$]

C_{ru} میرایی پیچشی تکیه‌گاه رینگ [N.m.sec/rad]

فصل اول

مقدمه،مروری بر تحقیقات گذشته

۱-۱ مقدمه

چرخ‌دنده‌ها به طور گسترده در بسیاری از ماشین‌ها کاربرد دارند، مهمترین آن‌ها کاهش سرعت زیادی در ماشین‌ها می‌باشد، یک موتور نخ‌ریسی کوچک خیلی سریع می‌تواند قدرت کافی برای یک دستگاه فراهم کند، اما نمی‌تواند گشتاور کافی ایجاد کند. به عنوان یک مثال دیگر یک پیچ‌گوشتی الکتریکی کاهش زیاد سرعت ایجاد می‌کند چون به گشتاور زیادی برای چرخاندن پیچ نیاز دارد، اما موتور فقط مقدار کوچکی گشتاور در سرعت بالا تولید می‌کند. با کاهش سرعت به وسیله‌ی چرخ‌دنده سرعت خروجی می‌تواند کم شود وقتی که گشتاور افزایش یافته است[۱].

فایده‌ی دیگر چرخ‌دنده‌ها این است که راستای چرخش در آن‌ها تنظیم شده است. به عنوان مثال در دیفرانسیل ماشین بین چرخ‌های عقب اتومبیل، قدرت به وسیله‌ی یک محور که حول مرکز اتومبیل می‌چرخد منتقل می‌شود[۱].

وسایل چرخ‌دنده‌ای می‌توانند سرعت گشتاور و راستای قدرت را تغییر دهند. متداول‌ترین حالت برای چرخ‌دنده در ارتباط با چرخ‌دنده‌های دیگر چرخش می‌باشد اگرچه چرخ‌دنده می‌تواند دندانه‌های بدون چرخش داشته باشد که به آن شانه گفته می‌شود، در این حالت حرکت انتقالی به جای چرخش صورت می‌گیرد.

چرخ‌دنده‌ها مشابه چرخ‌ها در قرقره‌ها هستند، یک مزیت چرخ‌دنده‌ها نسبت به قرقره این است که دندانه‌ها از لغزش جلوگیری می‌کنند. وقتی دو چرخ‌دنده با تعداد دندانه‌های نابرابر در یک ماشین ترکیب می‌شوند دارای مزیتی می‌باشند، که سرعت چرخش و گشتاور بین آن‌ها در یک نسبت ساده متفاوت است. در انتقال چرخ‌دنده‌ها نسبت سرعت‌ها به نسبت دندانه‌ها بستگی دارد که در چرخ‌دنده‌های چندگانه این نسبت‌ها از ورودی تا خروجی درهم اعمال می‌شوند[۲].

اولین چرخ‌دنده‌ی شناخته شده به ۵۰ سال بعد از میلاد مسیح(ع) برمی‌گردد که به وسیله‌ی هروالکساندریا[1][۳]، به کار گرفته شد. البته ردپای چرخ‌دنده به ماشین‌های یونانی در سه قرن قبل از میلاد برمی‌گردد[۲].

[1] Hero Alexandria

۱-۲ مروری بر تحقیقات گذشته

مشکل سروصدای چرخدنده درگذشته بسیار زیاد مطالعه شده است. اخیراً مطالعه‌ی این مسئله به خاطر محدود کردن سروصدا در رقابت‌های بین‌المللی در صنعت افزایش پیدا کرده است. یکی از مهم‌ترین منابع ارتعاشات و سروصدا خطای انتقال[1] می‌باشد، که موجب برآشفتن جعبه دنده، سطح جعبه دنده و عناصردرگیر می‌شود. کنش متقابل بسیار زیاد، بین سروصدا و خطای استاتیکی انتقال به وسیله‌ی چانگ[2] و همکارانش[۴] ثابت شده است. آزمایشات متعدد روی سیستم‌های چرخ‌دنده نشان می‌دهد که چندین پدیده‌ی غیرخطی وقتی که خطای انتقال دینامیکی وجود دارد، اتفاق می‌افتد. به عنوان مثال حرکت همزیستی مضاعف پایدار[3]، ساب هارمونیک[4] و سوپرهارمونیک[5]، دو شاخگی[6]، ساب‌هارمونیک متناوب طولانی و حرکات آشوبناک[7]، که به طورواضح به صورت آزمایشگاهی توسط کهرمان و بلنکن‌شیپ[8] بررسی شده است[۵]. اگرچه توافق درباره‌ی پدیده‌های طبیعی وجود دارد، ولی فهم درست ارتعاشات چرخ‌دنده‌ها ناقص باقی مانده است.

در تحلیل دینامیکی سیستم چرخ‌دنده‌ها شرایط بار نقش مهمی را بازی می‌کند. دو پدیده‌ی اصلی که در نوشته‌ها آمده است رتل و واین[9] می‌باشد، که تاونسند[10] آن را بررسی کرده است[۶]. پدیده‌ی رتل در شرایط بار و سرعت کم و پدیده‌ی واین در بار و سرعت بالا اتفاق می‌افتد.

در مقالات مدل‌های متفاوتی در شصت سال گذشته پیشنهاد شده است، که درحال پیشرفت می‌باشند. جرم- فنر اولیه برای مدلسازی دینامیکی چرخ‌دنده‌ها توسط تاپلین[11] در سال **۱۹۵۳** صورت گرفته است[۷و۸]. مطالعات بیشتری توسط هریس[12][۹]، مونرو[13][۱۰-۱۲] و گرگوری[14] و همکاران[۱۳] انجام شده است. در پژوهش‌های گذشته ازگوون و هوسر[15] نیز کارهایی انجام داده‌اند[۱۴]. آن‌ها مدل ریاضی را در دینامیک چرخ‌دنده‌ها با درنظر گرفتن موارد

---

[1] Transmission error
[2] Chung
[3] Multiple coexisting stable
[4] Sub harmonic
[5] Super harmonic
[6] Bifurcation
[7] Chaotic motions
[8] Kahraman and Blankenship
[9] Rattle and Whine
[10] Townsend
[11] Tuplin
[12] Harris
[13] Munro
[14] Gregory
[15] Ozguven and Houser

زیر طبقه‌بندی کرده‌اند: پارامتر دینامیک ساده، تسلیم دندانه‌ها، دینامیک چرخ‌دنده‌ها و ارتعاشات پیچشی. مقاله‌ی قبل نشان می‌دهد که چگونه بررسی ارتعاشات چرخ‌دندها از دهه‌ی هفتاد افزایش یافته است.

مقالات مهمی توسط سو و چنگ[1] [۱۵]، بنتو وسیرگ[2] [۱۶] و مارک[3] [۱۷-۱۹]، به چاپ رسیده است. دو مقاله‌ی اول بر روی پاسخ‌های پایدار سیستم چرخ‌دنده‌ی ساده برای به دست آوردن اثرات پارامتری تحریک روی پاسخ و ناپایداری، تمرکز کرده است. از طرف دیگر، مارک مولفه‌های هارمونیک خطای انتقال استاتیکی را مورد بررسی قرار داده است. ونگ و رکی[4] ارتعاشات چرخشی چرخ‌دنده‌های ساده با وجود لقی را مطالعه کرده‌اند[۲۰-۲۲]. در بیست سال گذشته، بیشترین مدل‌های دینامیکی چرخدنده روی جنبه‌ی غیرخطی آن تمرکز کرده‌اند. کهرمان و سینگ[5] [۲۳-۲۶]، اثرات لقی و سفتی متغیر با زمان را با استفاده از روش توازن هارمونیک و شبیه‌سازی دیجیتال بررسی کرده‌اند. ازگوون[۲۷]، یک تقریب خطی برای جفت چرخ‌دنده‌ی ساده پیشنهاد کرد و حل تحلیلی را با نتایج محاسبات عددی به وسیله معادلات غیرخطی مقایسه کرد. امبیلی و ریولا[6] [۲۸]، حل بسته پیوسته برای هر سرعت چرخش به دست آورد و منحنی‌گذرا منحنی‌گذرا ناحیه‌ی پایدار و ناپایدار را به وسیله‌ی دترمینان نامحدود هیل[7] تخمین زدند. فاجونی[8] و و همکاران با اصلاح شکل دندانه، ارتعاشات جفت چرخدنده‌ی ساده را بهینه کرده‌اند، و نواحی آشوبناک ارتعاشات را تعیین نمودند[۲۹]. پارکر[9] و گاؤو[10] مدل چرخشی و مودهای ارتعاشی چرخدنده‌های خورشیدی مرکب و همچنین اختلاف فاز را در این نوع چرخدنده‌ها مورد بررسی قرار داده‌اند[۳۰و۳۱]. بعضی از منابع مفید درباره‌ی ارتعاشات چرخ‌دنده‌ی ساده درمراجع [۳۲-۳۸] آمده است.

همه‌ی منابع منتشر شده با درنظرگرفتن منبع ارتعاشات زیر برای سیستم چرخ‌دنده هم عقیده هستند: تشدید پیچشی، تکانش یا افت و خیز تناوبی در گشتاور محرک، خطای انتقال چرخ‌دنده، پاسخ ارتعاشی مولفه‌های موضعی و افت و خیز در گشتاور خروجی. ارتعاش سیستم چرخ‌دنده‌ی ساده شامل دو چرخ‌دنده به طور کلی از طریق دو چرخ مرتبط با سفتی مدلسازی می‌شود. این مدل،

[1] Hsu and Cheng
[2] Benton and Seireg
[3] Mark
[4] Wang and Cai
[5] Kahraman and Singh
[6] Amabili and Rivola
[7] Hill
[8] Faggioni
[9] parker
[10] Guo