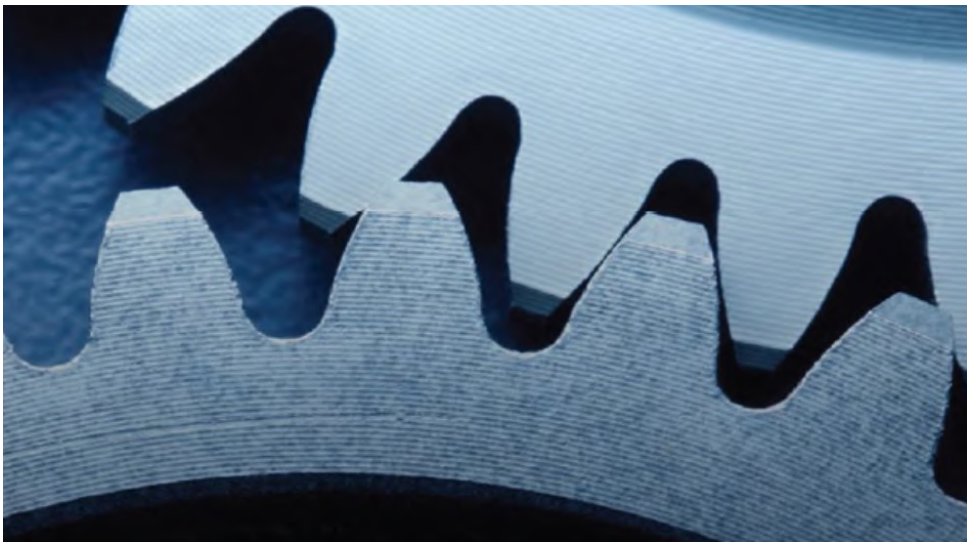
نکته شماه ۶
مولفه های فرکانسی طیف جعبه دنده



در این مقاله ۵ مولفه فرکانسی که توسط یک جفت دندانه درگیر می تواند بوجود آید مورد بررسی قرار می گیرد. علاوه بـراین دو مولفه فرکانسی کمتر شناخته شده تحت عنوان فرکانس گذر فاز مونتاژ[1] و فرکانس تکرار دندانه با جزئیات بیشتر مورد بحث قرار خواهد گرفت.

سیستم های محرک های چرخ دنده ای می توانند بسیار متنوع باشند، از یک چرخ دنده پینیون ساده تا جعبه دنده های چنـد محوره ای که در سیستم محرکه کشتی ها پیدا می شود. افزایش قدرت در ماشین های محرک و سرعت های بالایی که دارنـد باعث شده تا جعبه دنده های پرسرعت و پرقدرت در صنعت متداول شود. محرک های جعبه دنده دار معمولاً همراه بـا ماشـین های محرک کمپرسورها، فن ها و پمپ ها پیدا می شود. این محرک ها می توانند موتورهای الکتریکی و یا موتورهای احتراقـی باشند. بسیاری از محرک ها قادرند عملکـرد قابـل اطمینـانی بـا سـرعت خطـی (~10000m/min) 35000 ft/min، سـرعت چرخشی تا 40000 rpm و قدرتی تا (22.4 MW) 30000 HP را فراهم کنند. برای دستیابی به چنـین حـدی از پیچیـدگی لازم است پارامترهای عملیاتی این ماشین ها را بصورت دائمی تحت پـایش قـرار داد تـا بتـوان عملکـرد طـولانی مـدت قابـل اطمینانی از آنها بدست آورد، پارمتر هایی همچون درجه حرارت، فشار و ارتعاش.

بررسی جزئیات ملاحظات طراحی محرک های چرخ دنده ای معمول در صنعت و روشهای خاصی که برخی طرح ها می تواننـد بر رفتار ارتعاشی تاثیر گذارند فرا تر از دیدگاه و اهداف این مقاله است. هدف ایـن مقالـه ارائـه یـک روش سیسـتماتیک بـرای

[1] Gear Assembly Phase Passage Frequency(GAPF)

محاسبه ۵ فرکانس مجزای تولید شده در یک جفت چرخ دنده درگیر است و به همراه آن نحوه تولید این فرکانس ها بصورت اصولی شرح داده خواهد شد.

چرخ دنده اصلی

در این مقاله ابتدا برای نمونه از یک جفت چرخ دندانه دار ساده استفاده شده، سپس می توان از فرمول های بدست آمده برای هر نوع چرخ دنده ساده، مارپیچ و مخروطی استفاده نمود. این نمونه از یک پینیون و یک چرخ دنده درگیر با آن تشکیل شده است. مطابق با آنچه که در صنعت معمول شده است، از عنوان پینیون برای چرخ دنده کوچک و عنوان چرخ دنده برای چرخ دنده بزرگتر استفاده می شود. برای تعیین ۵ فرکانس مورد نظر لازم است ۵ آیتم زیر برای هر جفت دندانه درگیر مشخص باشد:

- Np: تعداد دندانه های پینیون
- Rp: سرعت پینیون (rpm)
- Ng: تعداد دندانه های چرخ دنده
- Rg: سرعت چرخ دنده(rpm)
- Mg: نسبت Ng/Np یا Rp/Rg

کاربرد مناسب این پنج آیتم به پنج فرکانس زیر منتهی می شود. هر کدام از این فرکانس ها بصورت جداگانه مورد بحث قرار خواهد گرفت:

- frg: فرکانس چرخش چرخ دنده Hz
- frp: فرکانس چرخش پینیون Hz
- fm: فرکانس درگیری Hz
- ftr: فرکانس تکرار دندانه Hz
- fa: فرکانس گذر فاز مونتاژ Hz

فرکانس چرخش چرخ دنده

همان تعریف ساده سرعت چرخشی چرخ دنده برحسب دور بر ثانیه یا هرتز Hz است. بخاطر داشته باشید که این همان فرکانسی است که یک دنده مشخص در چرخ دنده درگیر می شود و از آن خارج می شود. تمیز دادن آن مهم است. بدون تجهیزات مناسب اندازه گیری، یک چرخ دنده نابالانس و یک چرخ دنده با دندانه تکی معیوب می تواند طیفی کاملاً مشابه ایجاد کند. بصورت ریاضی، فرکانس چرخش چرخ دنده برابر است با:

$$f_g = \frac{R_g}{60} \quad Hz$$

فرکانس چرخش پینیون

همان مطالبی که برای چرخ دنده گفته شد برای پینیون نیز صادق است، بصورت ریاضی این فرکانس بصورت زیر تعریف می شود:

$$f_{rp} = \frac{R_p}{60} \quad Hz$$

فرکانس درگیری

فرکانس درگیری فرکانسی است که جفت دندانه ها با همدیگر درگیر می شوند و بر حسب Hz بیان می گـردد. در بسـیاری از کاربردهای چرخ دنده ها در صنایع پتروشیمی، فرکانس درگیری در محدوده کیلو هرتز قرار می گیرد. بصـورت ریاضـی تعریـف فرکانس درگیری تابعی است از تعداد دندانه های پینیون یا چرخ دنده و سرعت روتور مربوطه:

$$f_m = f_{rp} \times N_P = f_{rg} \times N_g \qquad Hz$$

بعنوان مثال، یک چرخ دنده با ۱۰۰ دندانه و سرعت چرخشی 1800 rpm فرکانس درگیری 3000 Hz ایجاد خواهد کرد:

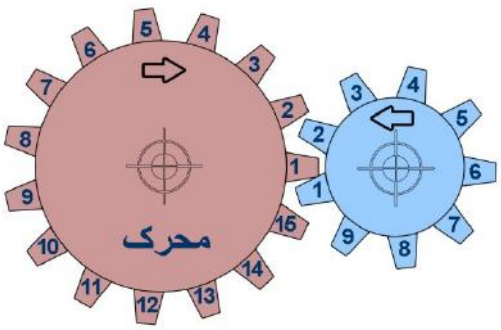
$$f_m = 30 \times 100 = 3000 \qquad Hz$$

فرکانس گذر فاز مونتاژ

یک جفت دندانه درگیر (توجه کنید، دندانه درگیر نه چرخ دنده درگیر) می تواند چند حالت یـا فـاز منفـرد از درگیـری را بـه نمایش بگذارد. مفهوم "فاز مونتاژ" را شاید با یک مثال بهتر بتوان شرح داد. یک جفت چرخ دنده با چرخ دنده ۱۵ دندانـه ای و پینیون ۹ دندانه ای را در نظر بگیرید. از نقطه نظر طراحی چرخ دنده، این ترکیب ویژه از تعداد دندانه می تواند مشخصه هـای ارتعاشی خاصی را ایجاد کند. اما از نقطه نظر اهداف این مثال، ترکیب ۱۵ و ۹ مناسب است.

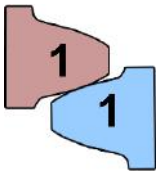
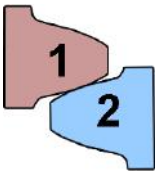
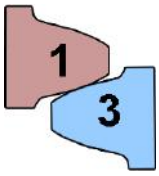
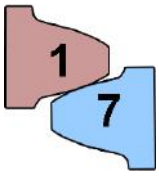
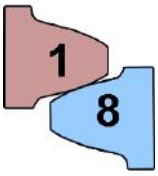
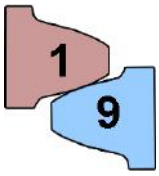
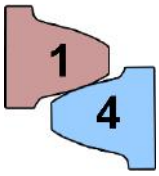
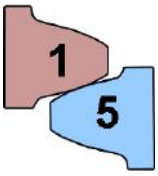
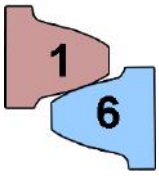
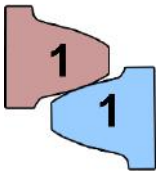
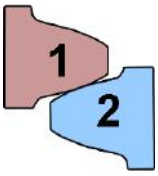
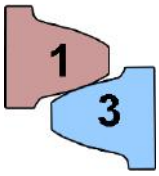
فرض کنید دندانه های چرخ دنده های ۱۵ و ۹ دنده ما به ترتیب شماره گذاری شده است و در اولین مونتاژ دو چرخ دنده (فاز ۱)، دنده ۱ از چرخ دنده با دنده ۱ از پینیون با هم درگیر شوند. در این فاز مونتاژ، دندانه شماره ۱ چرخ دنده ***فقـط*** بـا دندانـه های شماره ۱ و ۷ و ۴ پینیون درگیر می شود. دندانه شماره ۱ چرخ دنده با ۶ دندانه باقیمانده از پینیون هیچگونه تماسی پیدا نخواهد کرد! مگر اینکه مونتاژ بگونه ای دیگر انجام شود و هنگام مونتاژ، دندانه ۱ از چرخ دنده بـا دندانـه ۱ از پینیـون درگیـر نشود.

حالت دیگری از مونتاژ می تواند به این صورت باشد که دندانه شماره ۱ از چرخ دنده با دندانه شماره ۲ از پینیون درگیـر شـود که فاز مونتاژ دوم را بوجود می آورد. در این حالت دندانه های شماره ۲و ۸ و ۵ از پینیون با دندانه شماره ۱ از چرخ دنده تماس خواهند داشت. سومین و آخرین فاز مونتاژ حالتی است که دندانه ۱ از چرخ دنده با دندانه های شماره ۳ و ۹ و ۶ درگیر شـوند. بنابراین برای یک جفت چرخ دنده با ترکیب ۱۵ و ۹ دندانه می تواند ۳ فاز مونتاژ مستقل وجود داشـته باشـد. ایـن فـاز هـا در تصاویر جدول شماره ۱ نمایش داده شده است.



تصویر ۱

جدول ۱ – سناریوهای مختلفی (Phase1, 2, 3) که هنگام مونتاژ یک جفت چرخ دنده با تعداد دندانه ۱۵ و ۹ ممکن است ایجاد شود.

Phase 1	Phase 2	Phase 3	
			هنگام مونتاژ
			بعد از یک دور چرخش محرک
			بعد از دو دور چرخش محرک
			بعد از سه دور چرخش محرک که به وضعیت هنگام مونتاژ (ردیف ۱) برمی گردد.

"بروش ریاضی، تعداد فازهای منفردی که می توان برای یک جفت چرخ دنده در نظر گرفت Na برابر است با حاصلضرب مضرب مشترک های تعداد دندانه پینیون و تعداد دندانه محرک."

اعداد ۱۵ و ۹ دارای یک مضرب مشترک برابر با ۳ هستند. بنابراین تعداد فاز های مونتاژ برابر است با ۳، همانطور که در جدول ۱ نیز مشاهده می شود.

تعداد فازهای مونتاژ تعیین کننده توزیع سایش بین دندانه های چرخ دنده و پینیون است. در مثال جفت چرخ دنده ما نشان داده شد که ***هر دندانه منفرد در چرخ دنده فقط با سه دندانه از پینیون درگیر و تماس پیدا خواهد کرد***. به روش مشابه می توان نشان داد که هر دندانه منفرد از پینیون فقط می تواند با ۵ دندانه از چرخ دنده درگیری داشته باشد. بعد از مدتی کار کردن جفت چرخ دنده با هم، در سایش هر کدام از آنها، عیوب موضعی هر دندانه هرچند کوچک بر روی دندانه مقابل تاثیر می گذارد. در ترکیب ۱۵ و ۹ دندانه، پینیون ۳ الگوی سایش مجزا می تواند داشته باشد. به جدول زیر نگاه کنید:

دندانه های پینیون شماره		دندانه های چرخ دنده شماره
1 - 7 – 4	در گیر خواهند شد با	**1 - 10 – 4 – 13 - 7**
2 - 8 - 5		**2 - 11 – 5 – 14 - 8**
3 - 9 - 6		**3 - 12 – 6 – 15 - 9**

توجه داشته باشید دندانه های شماره ۱و ۷و ۴ از پینیون تنها با دندانه های شماره ۱و۱۰و ۴و ۱۳ و ۷ تماس پیدا خواهند کرد و بنابراین الگوی سایش این دندانه های پینیون به دندانه های مذکور از چرخ دنده بستگی خواهد داشت. از دو فاز مونتاژ باقیمانده دیگر نیز می توان دو الگوی سایش دیگر بدست آورد. اثر این الگوهای سایش ایجاد مولفه فرکانسی 3X در هر روتور می باشد. در حالت کلی، تعداد Ng/Na دندانه در چرخ دنده با تعداد Np/Na دندانه در پینیون درگیر می شود و تعداد Na الگوی سایش ایجاد خواهد کرد. دامنه نسبی مولفه های فرکانسی مرتبه های بالاتر (هارمونیک های بالاتر) نسبت به دامنه مولفه 1X تابعی است از میزان سایش، وسعت تغییرات سایش، فاصله دندانه ها و دقت پروفیل دندانه.

اثر دیگری که "فاز مونتاژ" ممکمن است ایجاد کند، هنگامی است که چرخ دنده های مونتاژ شده برای بازرسی و یا تعویض یاتاقان از یکدیگر جدا می شوند. در مثال جفت چرخ دنده ۱۵ و ۹ دندانه، هنگام مونتاژ چرخ دنده، دندانه شماره ۱ چرخ دنده با دندانه شماره ۱ پینیون در تماس بود. اگر هنگام مونتاژ مجدد، دندانه شماره ۱ چرخ دنده با دندانه شماره ۲ پینیون در تماس باشد، لازم است که الگوی سایش جدیدی ایجاد شود. در طول کارکرد این فاز جدید، علاوه بر فرکانس درگیری معمول، مولفه فرکانسی 1/3 برابر فرکانس درگیری نیز مشاهده خواهد شد. این مولفه فرکانسی بدلیل ایجاد یک درگیری پیچیده بین دندانه ها در اثر ترکیب الگوی سایش جدید با الگوی سایش قدیم باقیمانده از فاز قبلی روی سطح دندانه ها است. ممکن است این تنها مولفه فرکانسی آشکار در طیف نباشد. فرآیند درگیری دندانه ها در چنین وضعیتی می تواند باعث ایجاد مدولاسیون دامنه و مدولاسیون فرکانس گردد. مدولاسیون فرکانس درگیری با بسیاری از مجموع و تفاضل های فرکانس های دیگر در طیف ممکن است آشکار شود.

بطور خلاصه، فرکانس گذر فاز مونتاژ را می توان بصورت زیر بیان نمود:

$$f_a = \frac{f_m}{N_a} \quad Hz$$

حالا اگر مفهوم فرکانس گذر فاز مونتاژ را درک کرده باشید، می فهمید که چرا تعداد دندانه های یک جفت چرخ دنده را ***نباید*** بگونه ای انتخاب نمود که مضرب مشترک داشته باشند. در این حالت، هنگام کار چرخ دنده هر دندانه مشخص از چرخ دنده با تمامی دندانه های پینیون تماس و در گیری پیدا خواهد کرد. به این ترکیب، ترکیب "دندانه طعمه[2]" گفته می شود که معمولاً در اغلب محرک های چرخ دنده ای دقیق پیدا می شود.

--- مترجم: دندانه طعمه به این خاطر گفته می شود که یک دندانه اضافی (بعنوان طعمه شکار) به دندانه های محاسبه شده در طراحی اضافه می شود تا نسبت های صحیح را از بین ببرد ---

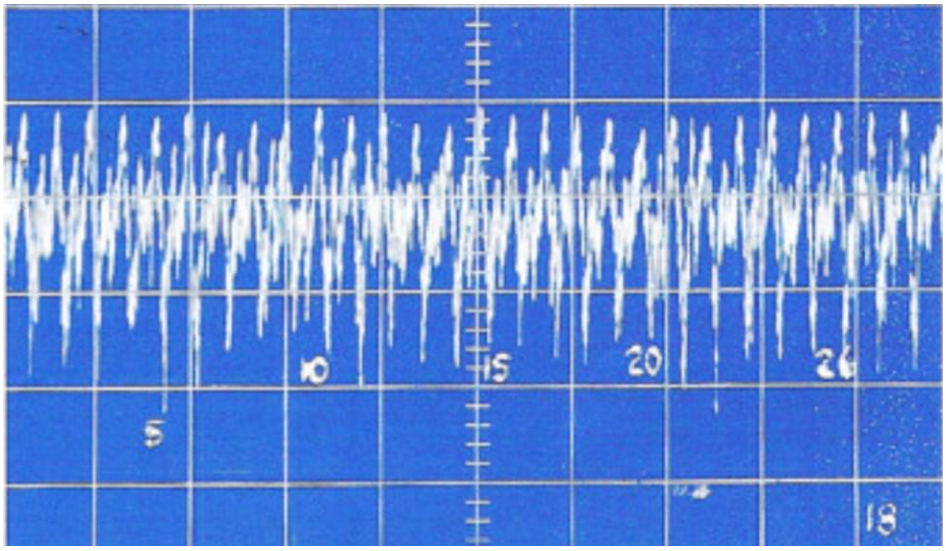
برای جلوگیری از اثر های مخرب فرکانس گذر فاز مونتاژ، روش جالبی هنگام مونتاژ مجدد چرخ دنده ها استفاده می گردد. در این روش قبل از جدا کردن دو چرخ دنده از یکدیگر، نقطه تماس دندانه درگیر را علامت گذاری می کنند و هنگام مونتاژ مجدد، همین دو دندانه علامت گذاری شده را درگیر کرده و چرخ دنده را جا می زنند. بدین ترتیب فاز مونتاژ عوض نشده و مشکلات اشاره شده در بالا را ایجاد نخواهد کرد. برای انجام این کار معمولاً دو دندانه مجاور را روی یک چرخ دنده با علامت X حک کرده و دندانه درگیر بین این دو دندانه را با علامت O حک می کنند.

[2] Hunting Tooth

فرکانس تکرار دندانه

به مثال جفت چرخ دنده ۱۵ و ۹ دندانه و جدول ۱ باز می گردیم. توجه فرمایید که بعد از سه دور گردش چرخ دنـده، دوبـاره همان دندانه های اولیه با هم درگیر می شوند. اگر اشکالی روی ***هر دو دندانه*** چرخ دنده و پینیون وجود داشته باشد، هنگـامی که این دو دندانه به هم می رسند بیشترین اثر ارتعاشی را ایجاد خواهند کرد. این خرابی می تواند ناشی از فرآینـد تولیـد و یـا اشکال در حمل و نقل و انتقال ایجاد شده باشد.

این مولفه دارای فرکانس بسیار پایینی است. معمولاً زیر محدوده شنوایی (<20 Hz) است، اما بدلیل طبیعت ضربانی[3] که دارد معمولاً با شنیدن نیز می توان آن را آشکار کرد. شناسایی این مولفه در طیف های FFT معمولی مشکل است، اما خوشـبختانه می توان آن را در سیگنال های زمانی که توسط سنسورهای نوع بدنی[4] اندازه گیری می شوند مشاهده نمود. بعضی افراد که بـا چنین پدیده هایی مواجه می شوند از اصطلاح "زوزه کشیدن" چرخ دنده برای شرح آن استفاده می کنند. این فرکـانس را مـی توان با استفاده از سنسورهای بدنی تعیین نمود. البته در بسیاری از حالت ها این فرکـانس آنقـدر پـایین هسـت کـه بتـوان بـا استفاده از یک ساعت مچی ثانیه شمار دار با شنیدن صدای ضربان ها و شمردن تعداد آنها ، این فرکانس را تعیین نمود.



تصویر ۲- سیگنال زمانی

تصویر ۲ سیگنال زمانی بدست آمده از یک صوت سنج دقیق را نشان می دهد. یک محرک چـرخ دنـده ای بـا سـرعت ورودی 5528 rpm و سرعت خروجی 8334 rpm و خارج از مرکزی بیش از حد دایره گـام هـر دو چـرخ دنـده ۹۸ و ۶۵ دندانـه ای. مشکل چرخ دنده به وضوح بصورت صدای قابل شنوایی بصورت نوسانات صدا آشکار بود. بین 6-8 dB نوسان نسبت بـه مقـدار دامنه فشار صدای متوسط تقریباً برابر با 88 dB. فرکانس با یک ساعت مچی برابر با 85 cpm اندازه گیری شد. سیگنال زمانی نیز بعنوان سند قابل ثبت اندازه گیری شد. به روش ریاضی فرکانس تکرار دندانه عبارت است از:

$$f_{tr} = \frac{f_m \times N_a}{N_g \times N_p} \qquad Hz$$

[3] Beat
[4] Seismic

در این مورد چرخ دنده خاص که سیگنال زمانی آن بدست آمد، فرکانس تکرار دندانه به مقدار 1.42 Hz یا 85 cpm محاسبه گردید. با استفاده از یک اسیلوسکپ و نمایش سیگنال زمانی (تصویر ۲) فرکانس مورد نظر تقریباً برابر با 88 cpm بدست می آید. (26.3/18 x 60 ≈ 88 cpm)

از آنجایی که Na برای یک چرخ دنده با دندانه طعمه برابر با واحد است، فرکانس تکرار دندانه را می توان به روش ریاضی برای یک جفت چرخ دنده با دندانه طعمه بصورت زیر بیان نمود:

$$f_{tr} = \frac{f_{rg}}{N_p} \qquad Hz$$

توجه داشته باشید که این رابطه را برای یک جفت چرخ دنده با فاز مونتاژ های متعدد نمی توان استفاده کرد.

رابطه بین فرکانس های چرخ دنده

فرم جدول ۲ تحت عنوان "فرکانس های اصلی چرخ دنده" برای چرخ دنده مثال ما با ترکیب ۱۵ و ۹ دندانه تکمیل شده است. این فرم یا فرم مشابه آن باید قسمتی از مستندات شناسنامه ارتعاشی یک مجموعه چرخ دنده باشد.

عبارت $f_{tr} \leq f_{rg} \leq f_{rp} \leq f_a \leq f_m$ در انتهای سمت چپ جدول ۲ قرار دارد. این عبارت برای هر زوج چرخ دنده ای گزاره درستی می باشد. بنابراین می توان گفت بین تمامی این فرکانس ها یک رابطه وجود دارد. جدول ۲ خلاصه ای از کلیه روابط بین فرکانس های یک زوج چرخ دنده درگیر را در بر گرفته است.

جدول ۲- فرکانس های اصلی چرخ دنده (نمونه)

داده های اولیه					
ر		نام	مقدار	(6,7) ضرایب	(8) حاصلضرب ضرایب مشترک Na
1	Np	تعداد دندانه پینیون	9	1 , 3 , 3 , 9	1 x 3 x __ x __ = 3
2	Ng	تعداد دندانه چرخ دنده	15	1 , 3 , 5 , 15	
3	Rp	سرعت rpm پینیون	3000		
4	Rg	سرعت rpm چرخ دنده	1800		
5	Mg	Rp/Rg یا Ng/Np	1.667		

محاسبه فرکانس ها					
ر		نام	مقدار	رابطه	رابطه بین فرکانس ها
9	f_{rp}	فرکانس پینیون Hz	50	Rp / 60	$f_{tr} \leq f_{rg} \leq f_{rp} \leq f_a \leq f_m$
10	f_{rg}	فرکانس چرخ دنده Hz	30	Rg / 60	
11	f_m	فرکانس درگیری Hz	450	$f_{rp} \times N_P = f_{rg} \times N_g$	$10 \leq 30 \leq 50 \leq 150 \leq 450$
12	f_{tr}	فرکانس تکرار دندانه Hz	10	$\frac{f_m \times N_a}{N_g \times N_p}$	
13	f_a	فرکانس گذر فاز مونتاژ Hz	150	$\frac{f_m}{N_a}$	

نتیجه گیری

اثرات اجزاء دوار و شناسایی آنها معمولاً توسط کارشناسان آنالیز ارتعاشات قابل فهم است. شناسایی درگیری عملی چرخ دنـده ها و مولفه های فرکانسی ارتعاش مربوط به آنها ممکن است مشکل باشد. دینامیک درگیری دندانه ها رفتاری غیر خطی داشته و تاثیر پذیری سنگینی از بسیاری از متغییر ها دارد. احتمال وقوع فرکانس های جمع و تفریق (ساید باندها) بسیار زیـاد اسـت. امید است این مقاله حداقل کمکی در شناسایی فرکانس های اصلی که در حین عملکرد یک محرک چرخ دنده ای بوجـود مـی آید داشته باشد.

منابع:

۱- "طراحی مهندسی مکانیک" جوزف شیگلی

۲- "طراحی اجزاء ماشین" اسپات

۳- "محرک های چرخ دنده ای خاص در صنایع نفت" API

مقاله اصلی:

“Machinery Message Case History: Component identification of gear-generated spectra”

By: John G Winterton, P.E.

Nourtheast District Manager.

Machinery Diagnosis Services

Bently Nevada Co.

Orbit Magazine June 1991

http://www.ge-mcs.com/download/orbit-archives/1991-1995/June%201991/691_gear_spectra.pdf

ترجمه و باز سازی تصاویر و جداول:

علی اکبر وکیلی

مدیر عامل شرکت مهندسی تواتر سپاهان

نوروز ۱۳۹۵

اصفهان - بلوار دانشگاه صنعتی اصفهان، شهرک علمی و تحقیقاتی اصفهان، پارک علم و فن آوری شیخ بهایی، خیابان ۱۲، پلاک A308

تلفن : ۰۳۱ ۳۹۳۲۰۸۰ دور نگار: ۰۳۱ ۳۹۳۲۰۷۹

vakili@tavator.com

www.tavator.com