دستور کار ازمایشگاه ارتعاشات

بسم الله الرحمن الرحیم

شماره آزمایش	فهرست مطالب	صفحه
	مقدمه	۴
۱	سرعت های بحرانی محورهای دوار	۵
۲	پاندول ساده، پاندول مرکب، مرکز ضربه پاندول کارتر، آویزش بایفیلار	۱۶
۳	ارتعاشات آزاد با استهلاک ویسکوزی، ارتعاشات اجباری با استهلاک ویسکوزی	۲۹
۴	ارتعاشات پیچشی یک رتور، ارتعاشات پیچشی با دو رتور، ارتعاشات پیچشی آزاد با استهلاک ویسکوزی	۴۰
۵	فرکانس طبیعی یک تیر با چندین جرم-جاذب ارتعاشات بدون مستهلک کننده ویسکوزی، ارتعاشات عرضی تیرها همراه با مستهلک کننده ویسکوزی	۴۹
۶	ارتعاشات پیچشی نوسانگر دو جرمی، سه جرمی، چهار جرمی	۵۵
۷	پدیده ی خود مرتعش	۸۹

۸	ژیروسکوپ	۹۳
۹	بالانس استاتیکی و دینامیکی	۱۰۰
۱۰	چرخ دنده های خورشیدی	۱۱۹
۱۱	آنالیز پیرو و بادامک	۱۳۰
-	پیوست ۱و۲و۳	۱۴۶

بسم الله الرحمن الرحیم

اهمیت آزمایشگاه در تفهیم مسایل نظری دروس مختلف، مطلبی نیست که نیاز به تأکید مجدد داشته باشد. اما نکته ای که در خور توجه است چگونگی برخورد با این موضوع می باشد. سوالی که مطرح می شود این است که آیا صرفا حضور در آزمایشگاه و انجام یک و یا چند آزمایش و بعد از آن هم نوشتن یک و یا چند گزارش با اکراه به خواسته مزبور جامه عمل می پوشاند یا خیر؟ طبیعی است که جواب منفی باشد.

اعتقاد بر این است که وقتی دانشجو درآزمایشگاه حضور می‌یابد نه تنها باید آزمایشات را به طور دقیق انجام دهد و تطابقی بین داده‌های ذهنی قبلی و آنچه می‌گذرد برقرار کند، بلکه با نظر پرسشگرانه و انتقادی به تجربه‌های انجام شده نگاه کند، چه بسا ایده‌های نویی در او تجلی کند. علاوه بر آن در صدد تعمیم داده‌های ذهنی قبلی و پدیده‌های مورد آزمایش که در قالب خاصی در آزمایشگاه انجام گرفته است در بیرون از آزمایشگاه و در مسائل عملی و صنعتی باشد.این امر بخشی از اهدافی است که دانشگاه بایستی در نظر داشته باشد و بدان جامه عمل بپوشاند.

در مورد آزمایشگاه ارتعاشات و دینامیک ماشین باید گفت که سعی شده است آزمایشاتی ترتیب داده شود که قاعدتاً تئوری آنها در درس ارتعاشات گفته شده و عمدتاً آشنایی با مفاهیم اولیه در ارتعاشات و دینامیک ماشین است. در تهیه این دستور کار یک روال طبیعی که عبارت است از هدف، مقدمه، تئوری، شرح دستگاه، وسایل آزمایش، روش آزمایش و خواسته‌های آزمایش آمده است. ضمناً از کاتالوگ‌های سازنده‌ی دستگاه‌ها و وسایل مانند$Drritron, Tecquipment, Cussons$ کتاب‌های ارتعاشات و دینامیک ماشین استفاده شده است .اخیرا با خرید دستگاه‌هایی در زمینه ی آنالیز مودال و پایش و نگه داری ماشین آلات اقدام به تجهیز بیشتر آزمایشگاه شده است که امید است فهم و درک بهتر از مسائل صنعتی برای دانشجویان حاصل شود.

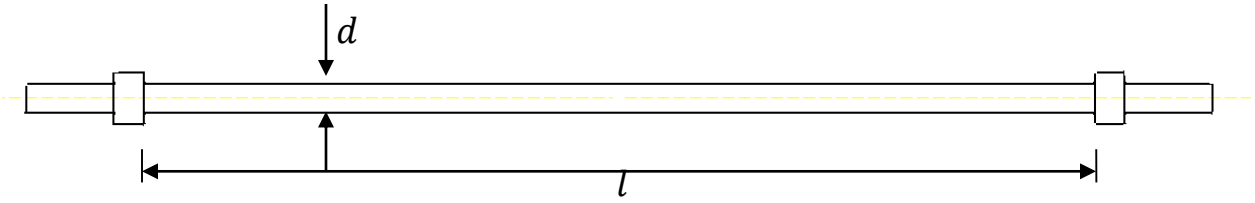
امید است دانشجویان عزیز در ساعاتی که در آزمایشگاه حضور دارند نهایت استفاده را در حد امکانات موجود آزمایشگاه ببرند. ضمناً با انتقادات سازنده‌ی خویش ما را در بهبود آزمایشات یاری دهند. همچنین در حفظ و نگه داری وسایل و تجهیزات کوشا باشند.

در اینجا لازم می دانم از دانشجویان گرامی آقای مهندس محمد جعفری تهرانی و خانم مهندس زهرا قلمزن که در تایپ و ویرایش متن و صفحه آرایی گزارش کار، اینجانب را یاری کرده اند قدردانی نمایم و توفیق روز افزون این عزیزان در آینده را خواستار باشم.

دانشکده مهندسی مکانیک

دکترمصطفی غیور

آزمایش شماره ۱: سرعت های بحرانی محورهای دوار $(Whirling\ of\ Shafts)$



۱-۱- هدف آزمایش :

مشاهدهٔ پدیده سرعت بحرانی محورهای داور تحت اثر شرایط انتهایی مختلف و مقایسه نتایج تجربی با نتایج تئوری

۱-۲- مقدمه :

در سرعت های مخصوص محورهای داور یا رتورها به طرزشدیدی درعرض ارتعاش می نمایند .این سرعت ها، سرعت های بحرانی نامید می شوند.این پدیده به علت نامتعادل بودن سیستم داور بوجود می آید ومی‌توان نشان داد که سرعت های بحرانی با فرکانس های طبیعی محوربرای ارتعاشات عرضی مطابقت می نماید.اثرات این پدیده درعمل بسیارمهم بوده و بارها خسارت فراوانی به بار آورده است. نه تنها امکان دارد که خود محور دوار دراثرسرعت های بحرانی از کار بیافتد بلکه نیروهایی که به یاتاقان ها وارد میشود فوق‌العاده زیاد بوده و امکان شکستن آنها وجود دارد .همچنین امکان دارد که در سرعت های بحرانی، انحراف محور دوار از حد الاستیک گذشته و در نتیجه حتی درسرعت هایی که با سرعت های بحرانی مطابقت نمی کند، محور در حالت خمیده دوران کند. همچنین در ژنراتور و توربینها فاصلهٔ بین قسمتهای داور و ساکن بسیار کم بوده و امکان دارد که به علت انحراف محور های دوا ر این قسمتها با یکدیگر تماس پیدا کرده و خساراتی به بار آورند .پدیدهٔ سرعت های بحرانی، حتی در مورد رتورهایی که دقیقا بالانس شده اند نیزممکن است اتفاق بیفتد و درنتیجه هیچگونه محوردواری نباید برای لحظه‌ای نیز در نزدیکی سرعت بحرانی دوران کند.

۱-۳- بررسی های تئوریک:

الف : محور دوار ساده

هنگامی که یک محور دوران می کند محور بخاطر وزنش مقداری انحراف پیدا می‌کند که این انحراف درسرعت های مخصوص به حد اکثر خود می‌رسد که حالت خطرناکی است وباید سریعا سرعت دورانی محور را تغییر داد .می‌توان نشان داد که فرکانس ارتعاشات درسرعت های بحرانی در مد های مختلف از رابطهٔ زیر به دست میاید:

۱-۱- الف

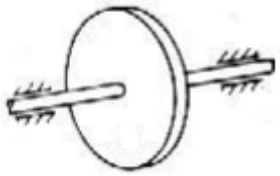
$$f_i = c_i \sqrt{\frac{EIg}{wl^4}}$$

c_i : ثابتی که به شرایط انتهایی بستگی دارد — w : وزن واحد طول

E : مدول یانگ — g : شتاب ثقل

I : ممان دوم سطح مقطع — f_i : فرکانس بحرانی

جدول ۱-۱ مقدار c_i را برای شرایط انتهایی مختلف و مد های اول و دوم میدهد .



محور M_1

دیسک M_2

جدول ۱-۱ مقادیر c_i

شرایط انتهایی محور	مقدار c_i	
	مد اول	مد دوم
دو سر مفصل	۱/۵۷	۶/۳
یک سر مفصل – یک سردرگیر	۲/۴۵	۷/۹۶
دو سر در گیر	۳/۵۳	۹/۸۲

$f_i = c_i\sqrt{\frac{EI}{l^3 m_e}}$ جرم معادل: m_e ۱-۱- ب

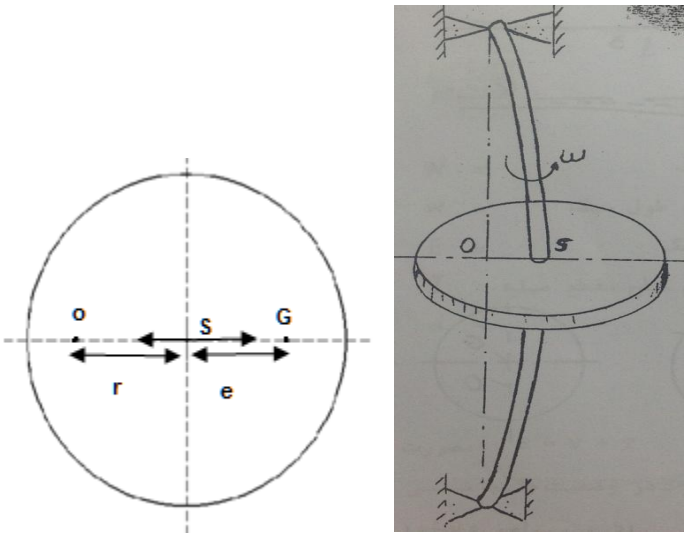
ب :محور دوار با دیسک متجانس دروسط آن

هرگاه به محور دوار حالت پیش یک دیسک کاملا متجانس دروسط آن اضافه شود در این صورت فرمول ۱-۱- ب برقرار است.

ج :محوردوار با دیسک غیر متجانس در وسط آن

اگردیسکی با جرم m که روی محور قرار گرفته و بین دو یاتاقان با سرعت ثابت $\omega(\frac{rad}{s})$ دوران می کند درنظر گرفته شود، چون مرکز هندسی دیسک از مرکز ثقل به اندازهٔ e فاصله دارد لذا دو نیروی مختلف بر روی دیسک عمل می‌کند :

اول نیروی خارج از مرکز در جهت so وارد میشود (شکل۱) ، دوم نیروی پایدار کننده یا نیروی باز گرداننده محورکه همان نیروی مقاومت میله در مقابل خمش است .برای تعادل اولا این دو نیروباید با هم برابر و ثانیا روی یک راستا عمل کنند .



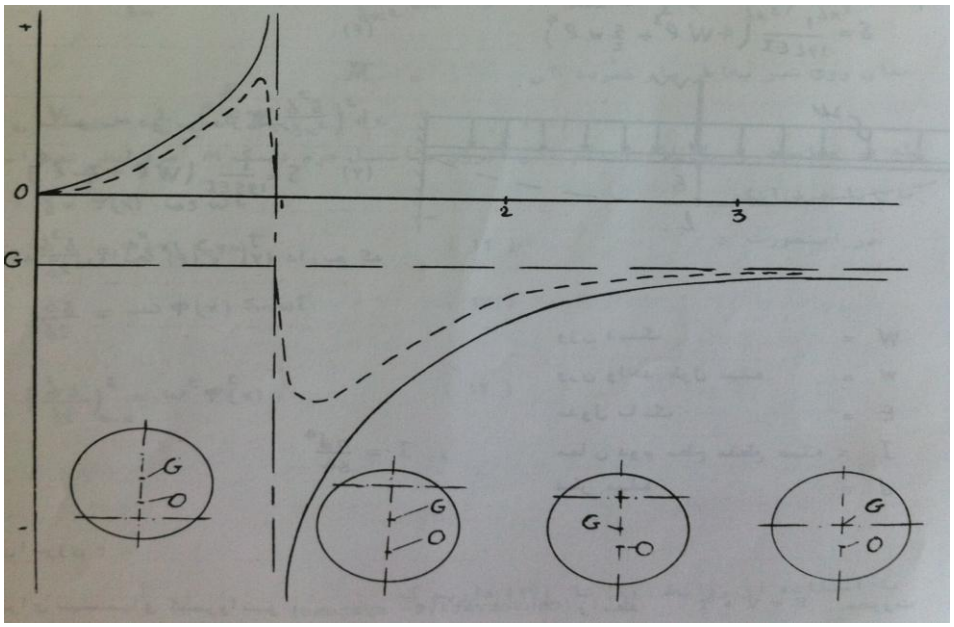
شکل۱- ۱ تصویر خارج از مرکز از روبرو و بالا

$$k.r = m\omega^2(r+e) \qquad ۲-۱$$

k : ضریب ارتجاعی عرضی محور ω_n : سرعت بحرانی

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad , \quad r = \frac{(\frac{\omega}{\omega_n})^2}{1-(\frac{\omega}{\omega_n})^2} \qquad ۳-۱$$

شکل زیر چگونگی وضعیت قرار گرفتن "o"(محل تلاقی خط مرکزی یاتاقان ها با صفحهٔ دیسک) را نسبت به هم به ازای مقادیر مختلف $\frac{\omega}{\omega_n}$ نشان میدهد .درعمل به دلیل وجود مقاومت هوا منحنی واقعی به صورت خط چین خواهد بود.



شکل ۱-۲ نمودار دامنه برحسب نسبت فرکانس برای دیسک با خارج از مرکز

روش های محاسبهٔ فرکانس طبیعی میله :

الف : روش تغییر مکان δ

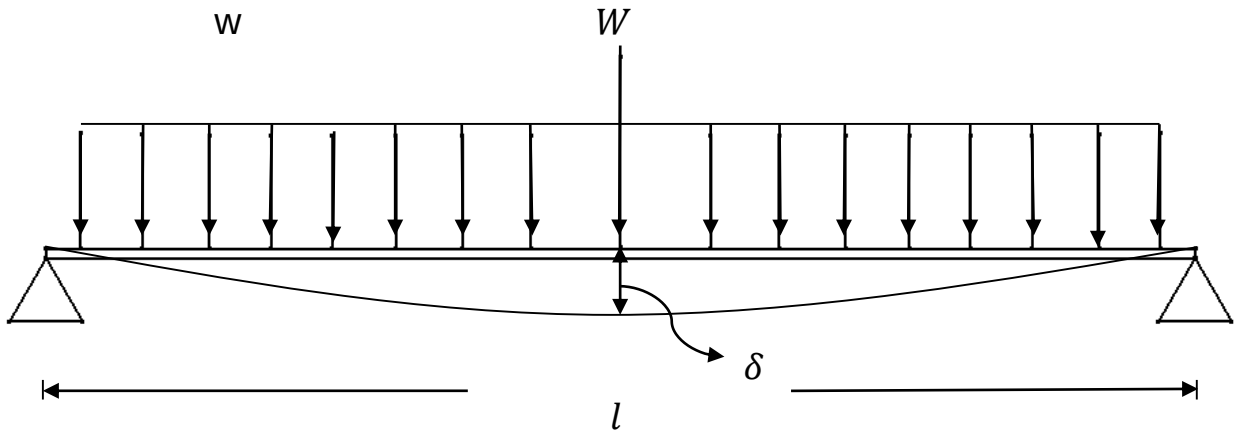
بطور کلی داریم:

$$k = \frac{w_e}{\delta} \qquad ۴ - ۱$$

w_e : وزن کل معادل δ : ماکزیمم انحراف در وسط میله k : ضریب ارتجاعی میله

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m_e}} = \sqrt{\frac{kg}{w_e}} = \sqrt{\frac{kg}{k\delta}} = \sqrt{\frac{g}{\delta}} \qquad ۵-۱$$

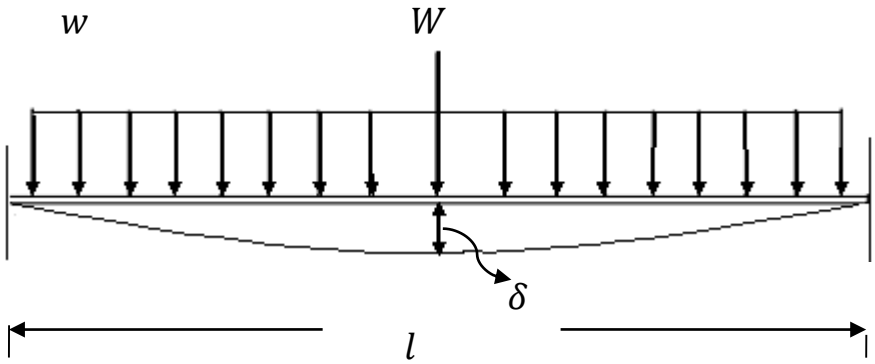
الف : تغییر مکان برای میله با دو سر مفصل



شکل ۱-۳ تیر دوسر لولا

$$\delta = \frac{1}{192EI}(4Wl^3 + 2.5wl^4) \qquad ۶ - ۱$$

ب : تغییر مکان برای میله با دو سر در گیر



شکل ۱-٤ تیر دو سر درگیر

$$\delta = \frac{1}{192EI}(Wl^3 + 0.5wl^4) \qquad ۷ - ۱$$

که در دو رابطهٔ قبل داریم :

W : وزن دیسک $\qquad$ w : وزن واحد طول میله

E : مدول یانگ $\qquad$ d : قطر میله

I : ممان دوم سطح مقطع میله $\qquad$ $I = \frac{\pi d^4}{64}$

ب : روش انرژی

برای سیستمهای کانسرواتیو رابطهٔ $E = V + T$ به صورت زیر وجود دارد که در وضعیت تعادل استاتیکی $V = 0$, $E = T_{max}$

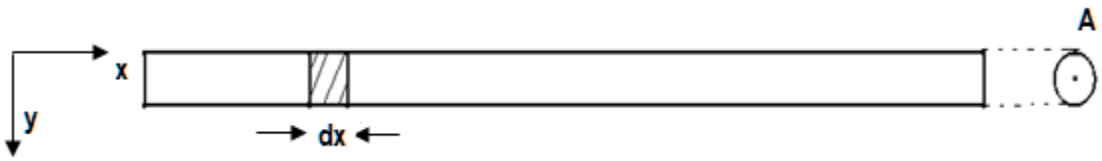
و در وضعیت جابجایی ماکزیمم $E = V_{max}$, $T = 0$ پس :

$$T_{max} = V_{max} \qquad ۸ - ۱$$

T_{max} = ماکزیمم انرژی جنبشی

V_{max}= ماکزیمم انرژی پتانسیل

برای میله با سطح مقطع Aو طول lو جرم مخصوص ρ خواهیم داشت :



شکل ۱-۵ میله و مقطع آن

برای المان dxاز میله δ :

$$\delta T_{\max 1} = 0.5(\rho\, A\, dx)(\frac{\partial y}{\partial t})^2_{\ max}$$

برای میله :

$$T_{\max 1} = 0.5 \int_0^l \rho A(\frac{\partial y}{\partial t})^2_{\ max} dx \qquad ۹-۱$$

برای دیسک :

$$\begin{cases} T_{\max 2} = 0.5M(\frac{\partial y}{\partial t})_{max} \\ \qquad x = 0.5l \end{cases} \qquad ۱۰-۱$$

$$\begin{cases} \theta = \frac{\partial y}{\partial x} \\ \delta\theta = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\ \delta x \qquad\qquad \delta V_{max} = 0.5\left(EI\ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\right)\left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\right)\delta x \\ \delta V_{max} = 0.5\bar{M}\ \delta\theta = 0.5EI\ \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\right)\delta\theta \end{cases}$$ ۱۱-۱

ممان روی تیر بخاطر بار گستردهٔ آن : $\bar{M}$

$$V_{max} = 0.5\int_0^l EI(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2})^2\ dx$$ ۱۲-۱

که در محاسبهٔ V_{max} از کم شدن انرژی پتانسیل جرم دیسک M صرف نظر شده است .حال با فرض آنکه $y = \phi(x)\cos\omega t$ در این صورت :

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \phi"(x)\cos\omega t & ۱۳-۱ \\ \frac{\partial y}{\partial t} = -\omega\varphi(x)\sin\omega t & ۱۴-۱ \\ (\frac{\partial y}{\partial t})^2{}_{max} = \omega^2\ \varphi^2(x) & ۱۵-۱ \end{cases}$$

با استفاده از روابط ۱-۸ تا ۱-۱۵ داریم که:

$$0.5\int_0^l \rho A\ \omega^2\varphi^2(x)dx + 0.5M\omega^2\varphi^2(x) = 0.5\ \int_0^l EI\ (\phi"(x))^2 dx$$ ۱۶-۱

با فرض آنکه A و I در تمام مقطع یکسان باشد داریم:

$$\omega^2 = \frac{EI\ \int_0^l(\phi"(x))^2\ dx}{\rho A\ \int_0^l \phi(x)dx + M\ [\phi^2(x)]x=0.5l}$$ ۱۷-۱

برای محاسبهٔ ω باید فرم $\phi(x)$ را حدس زد :

دو سر مفصل:

$$\phi(x) = a\ \sin\frac{\pi x}{l} \quad or \quad \phi(x) = \frac{4a}{l^2}(lx - x^2)$$ ۱۸-۱

دو سر در گیر :

$$\phi(x) = a\ \left(1 - \cos\frac{2\pi x}{l}\right)$$ ۱۹-۱

ج : روش *Rayleigh*

اگر در روی میله ای درنقاط مختلف وزنه های متفاوتی سوار باشند و وزنه ها را w_1 ، w_2 ، ..... بنامیم واضح است که در اثر خمش برای هر یک از وزنها تغییر مکانی حاصل میشود که برابر با y_1 ، y_2 ، .....خواهد بود و لذا :

$$T_{max} = \frac{1}{2g}\left(w_1\dot{y_1}^2 + w_2\dot{y_2}^2 + w_3\dot{y_3}^2 + \cdots\right)$$

$$T_{max} = \frac{\omega^2}{2g}(w_1 {y_1}^2 + w_2 {y_2}^2 + w_3 {y_3}^2 + \cdots) \qquad ۲۰\text{-}۱$$

$$V_{max} = 0.5\,(w_1 y_1 + w_2 y_2 + w_3 y_3 + \cdots) \quad ، T_{max} = V_{max} \qquad ۲۱\text{-}۱$$

$$\omega^2 = \frac{g\sum_{i=1}^{n} w_i y_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i {y_i}^2} \qquad n = \text{تعدادوزنه ها} \qquad ۲۲\text{-}۱$$

د : روش تقریبی دانکرلی

روش تقریبی محاسبه :

مقدارسرعت بحرانی برای محورها با باردربسیاری از کتابهای مربوط به ارتعاشات موجود بوده است و بر اساس فرمول دانکرلی ($Dunkerly$) استوار است.

$$\omega_n = \frac{187.8}{\sqrt{(\delta_1 + \delta_2 + \cdots + \frac{\delta_s}{1.27})}} \qquad ۲۳\text{-}۱$$

که در آن :

ω_n : سرعت بحرانی (rpm) δ_i :جابه جایی ناشی‌ازبار متمرکز (in)

δ_s : جا به جایی ناشی از وزن محور

۱-۴ - شرح دستگاه :

دستگاه آزمایش در شکل ۱-۶ نشان داده شده است .هدف ازطرح دستگاه، حذف نیروهایی بوده است که از طرف موتورو یاتاقان ها به میله وارد می شوند .کوپلینگ (c)چنان طراحی و نصب شده است که به هنگام رسیدن دور میله به دور بحرانی هیچگونه نیرویی از طرف موتور به میله وارد نمی‌شود. گیرهٔ لغزنده (واقع در یاتاقان N) نیزچنان طراحی شده که میتواند به آزادی در امتداد طول یاتاقان بلغزد. به این ترتیب میلهٔ دوار، فارغ از هرگونه نیروی خارجی ، آزاد است تا به هنگام رسیدن به دوربحرانی وضعیت هندسی را که به آن تحمیل میشود را بپذیرد .با استفاده از یاتاقان N و مجموعهٔ یاتاقان های بهم پیوسته (E, F) می‌توان هرشرایطی را در دو انتهای محور فراهم کرد. برای مثال دو سر میله را درگیر کرد. (میله دو سر درگیر)

چنانچه یاتاقان(E)را از یاتاقان (F)جدا کنیم ، یک سرمفصل (سری که در طرف موتوراست) میشود و در این صورت میله، یک سرمفصل –یک سردرگیر خواهد بود. در این حالت چنانچه یاتاقان Nرا برداشته و یاتاقان T را به جای آن قرار دهیم، میله دوسرمفصل میشود .

پایه های محصورکننده (حفاظ (G)) را می‌توان در امتداد میله درهر نقطه دلخواهی ثابت کرد .یک موتور $D.C$ با حداکثر $۶۰۰۰\ rpm$ برای دوران محور به کار میرود .سرعت موتور با دستگاه کنترل سرعت، تنظیم و کنترل میشود .برای اندازه گیری سرعت محور و مشاهدهٔ نقاط گره $(nodal\ points)$ از یک استروبوسکوپ استفاده می شود.

۱-۵- وسایل مورد نیاز

دستگاه اصلی ، دو محور ، یک دیسک متعادل ، یک دیسک غیر متعادل ، استروبوسکوپ ، متر نواری یا فلزی ، کولیس

۱-۶- روش آزمایش

۱-ابتدا یک محور بلند (فولادی یا برنجی) را روی دستگاه سوار کرده و اولین و دومین "مد" سرعت بحرانی را با (افزایش تدریجی سرعت موتور) برای سه حالت زیر با استفاده از استروبوسکوپ اندازه بگیرید .

الف : میلهٔ یک سر مفصل -یک سردرگیر

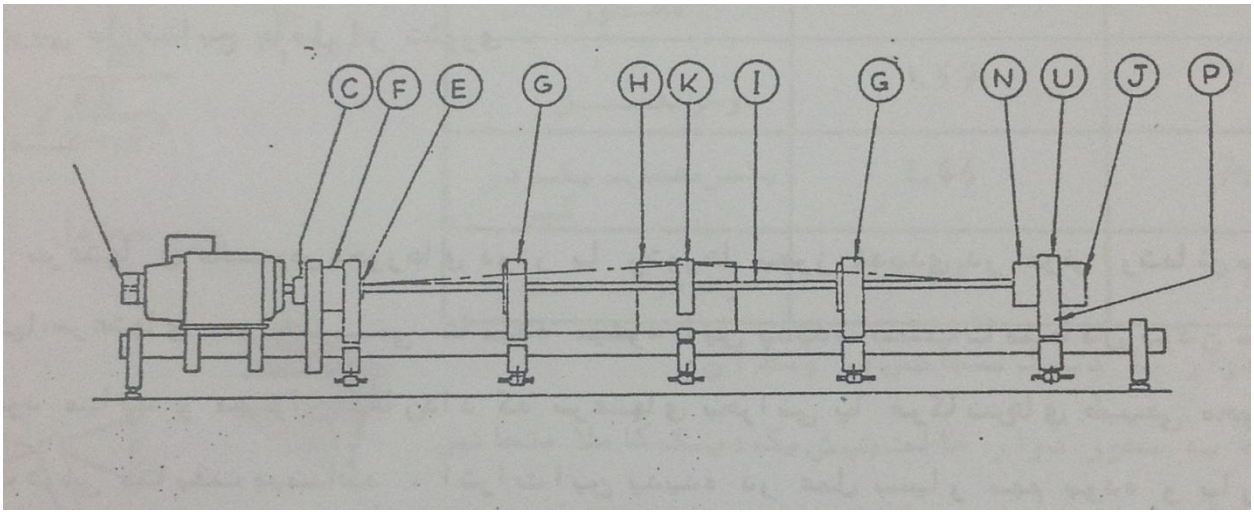
ب : میلهٔ دو سر مفصل

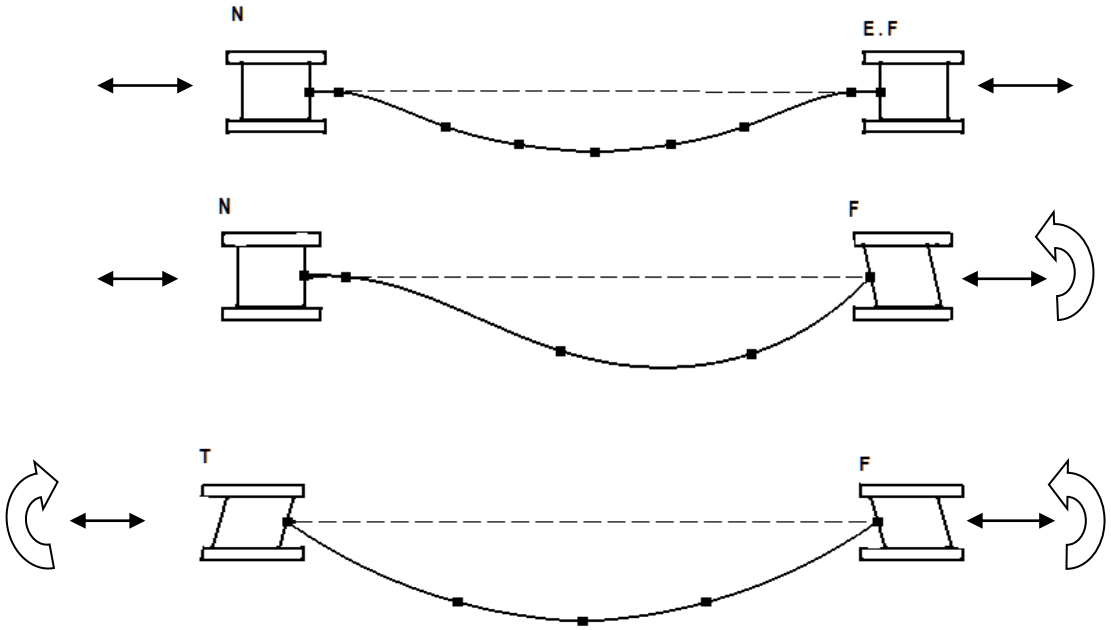
ج : میلهٔ دو سر در گیر

انحراف میله را می‌توان از جداول ویا از روش های قبلی گفته شده بدست آورد. جدول زیر این انحراف ها را ارائه میدهد:

جدول ۱-۲ مقادیر انحراف استاتیکی

مقدار انحراف استاتیکی	شرایط انتهایی محور
$\delta_s = \frac{5\,wl^4}{384\,EI}$	محور دو سر مفصل با بار گستردهٔ w
$\delta_s = \frac{wl^4}{384\,EI}$	محور دو سر در گیر با بار گستردهٔ w
$\delta_s = \frac{wl^4}{192\,EI}$	محور یک سر مفصل-یک سر درگیر با بار گستردهٔ w
$\delta_1 = \frac{w_1 l^3}{48EI}$	محور بدون بار گسترده با بار متمرکز w_1
$\delta_1 = \frac{w_1 {a_1}^2 {b_1}^2}{3\,EIl}$ $\delta_2 = \frac{w_2 {a_2}^2 {b_2}^2}{3\,EIl}$	محور بدون بار گسترده با بار های متمرکز w_1 و w_2 در فاصله های a_1 و a_2 ازسمت چپ و b_1 و b_2 از سمت راست





شکل۱-٦ شرایط مرزی متفاوت

تذکر اول :

۱- در حالت سرعت بحرانی ، انحراف محور دوار ماکزیمم می‌باشد.

۲- حفاظ های (G)را چنان قرار دهید که محور را تقریبا به فواصل مساوی تقسیم کنید.

۳- برای اندازه گیری سرعت بحرانی با استفاده ازاستروبوسکوپ، آن را ابتداروی درجهٔ انتهایی(ماکزیمم فلش در دقیقه)قرار داده و با کاهش تعداد فلاش در دقیقه به سرعت بحرانی محور برسید (چرا؟)

۴- دیسک متقارن را دقیقا در وسعت محور دوم (با طول کم) قرارداده وفقط اولین مد (سرعت بحرانی) را برای سه حالت مختلف در گیری دو سر میله انجام دهید .

۵- همان محور را (محوربا طول کم) را مجددا سوار کرده و آزمایش را برای سه حالت مختلف درگیری انجام دهید.

تذکر دوم :

قطر ، طول ، جنس محور را یادداشت کنید .

۱-۷- خواسته های آزمایش :

۱- روابط ۱-۶ و ۱-۷ رابدست آورید.

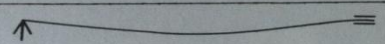
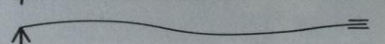
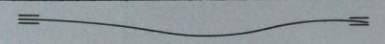
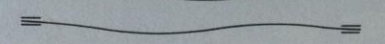
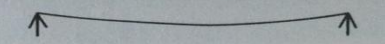
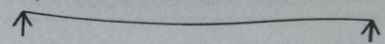
۲- نتایج حاصل از آزمایش را با تئوری مقایسه کرده و بحث کنید .

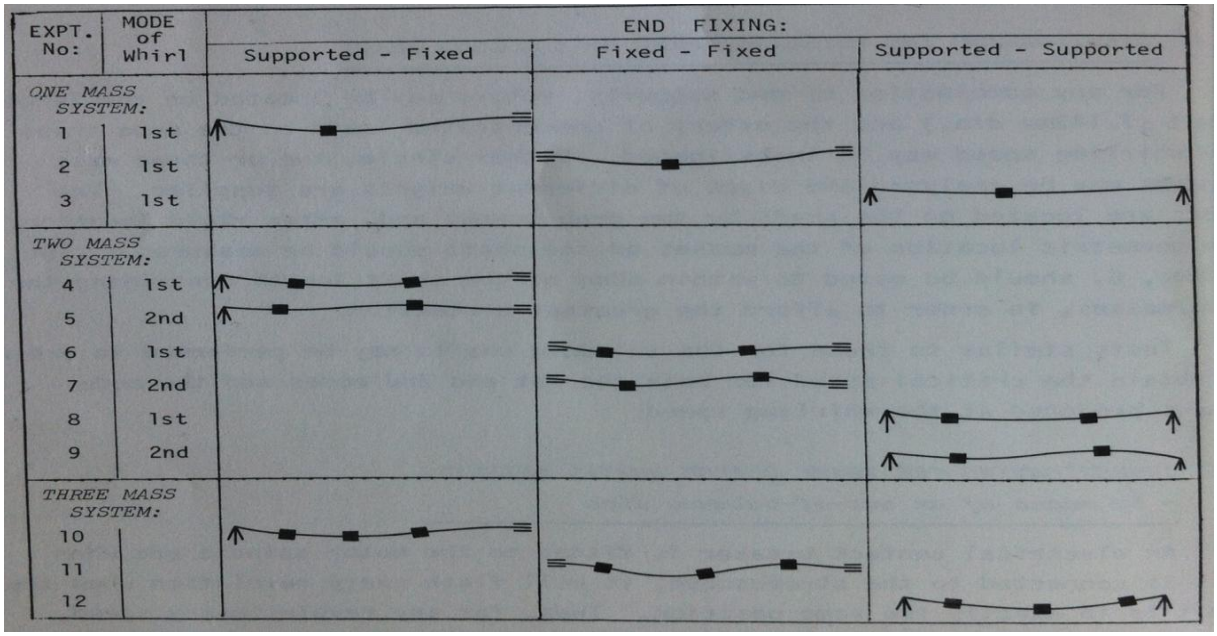
۳- اثر پارامترهای مختلف از قبیل طول محور، قطر محور ، تعداد جرم ها ومحل آنها را روی سرعت بحرانی برسی کنید .

۴- بیان کنید کدام یک از روش های محاسبهٔ فرکانس صحیح تر است .

۵- چه نکات و یا مشاهداتی دراین آزمایش مورد توجه شما قرار گرفته است و برای بهبود آزمایش چه راه حلی را پیشنهاد می‌کنید .

جدول ۱-۳ مدهای مختلف تیر با توجه به شرایط مرزی گوناگون

EXPT. No:	END FIXINGS	MODE OF WHIRL	
1	Supported - Fixed	1st	
2		2nd	
3	Fixed - Fixed	1st	
4		2nd	
5	Supported - Supported	1st	
6		2nd	



آزمایش شماره ۲: پاندول ساده ، پاندول مرکب ، مرکز ضربه ، پاندول کاتر، اویزش بایفیلار، سیستم جرم و فنر

SIMPLE PENDLUM

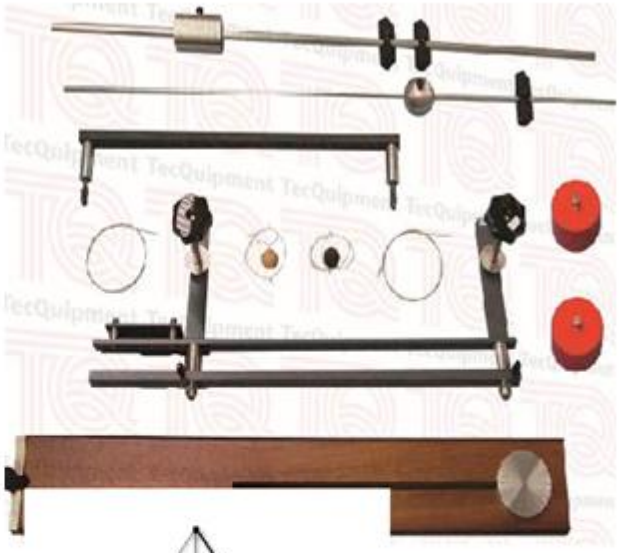
COMPOUND PENDULUM

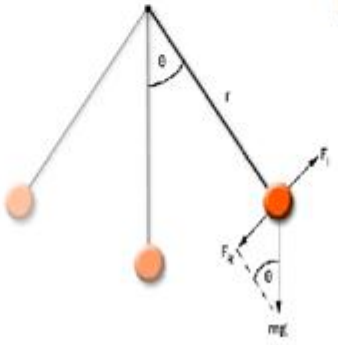
CENTER OF PERCUSSION

KATTER PENDULUM

BIFILAR SUSPENSION

MASS-SPRING SYSTEM





۲-۱- پاندول ساده

۲-۱-۱- هدف:

بررسی حرکت هارمونیک پاندول ساده

۲-۱-۲- تئوری :

یکی از ساده ترین مثالهای ارتعاشات آزاد بدون میرایی ، پاندول ساده است که یک حرکت هارمونیک ساده را نشان میدهد در این حرکت شتاب به سمت نقطه ثابت (لولا) متناسب با فاصله آن است برای زوایای کوچک انحراف ، نیروی اعمالی در جهتt(مماس بر مسیر حرکت) برابر است با :

قانون نیوتن :

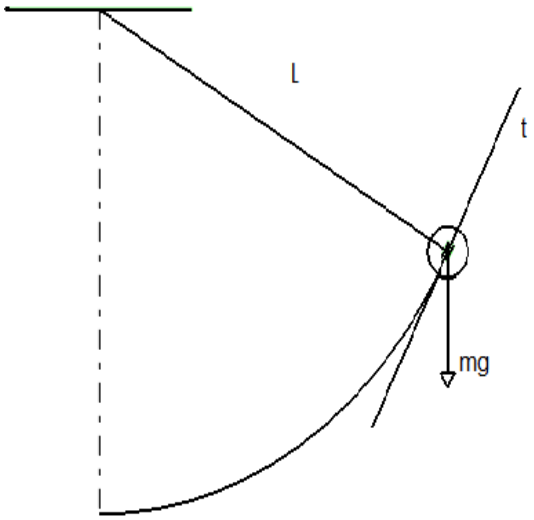
$$F_t = m\, a_t \qquad ۲\text{-}۱\text{-}۱$$

$$F_t = mgsin\,\theta \qquad ۲\text{-}۱\text{-}۲$$

$$mgsin\,\theta = -ml\ddot{\theta} \qquad ۲\text{-}۱\text{-}۳$$

$$l\,\ddot{\theta} + g\,sin\,\theta = 0 \qquad ۲\text{-}۱\text{-}٤$$

$$l\,\ddot{\theta} + \theta = 0 \qquad ۲\text{-}۱\text{-}٥$$

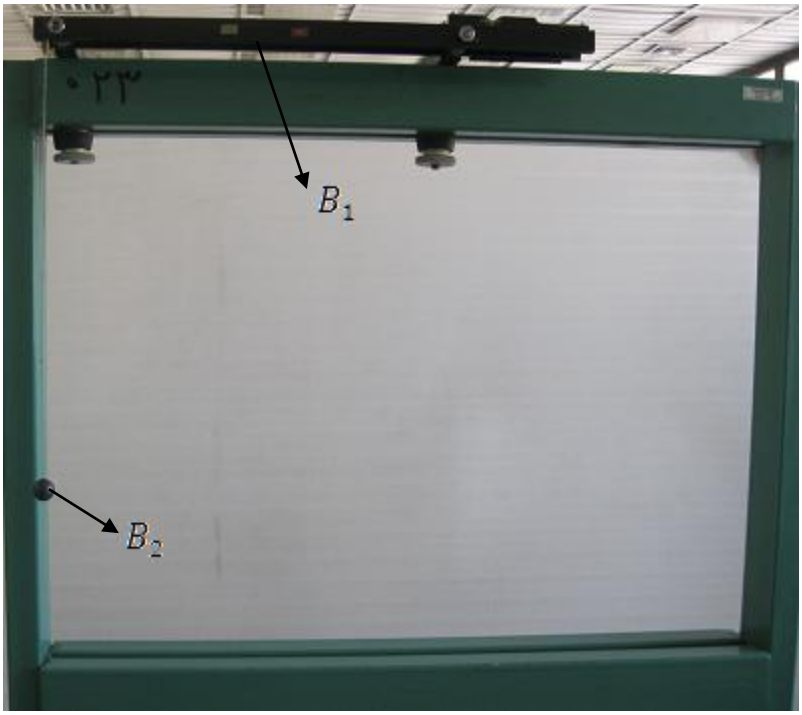


شکل ۲-۱-۱ بررسی نیرویی پاندول

لذا معادله حرکت برای زوایای کوچک به فرم ۲-۱-٥ است که T پریود نوسان است

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \qquad ۲\text{-}۱\text{-}٦$$

در این آزمایش هدف بررسی تغییرات زمانهای پریود برای طول های متفاوت است



شکل ۲-۱-۲ دستگاه پاندول ساده

۲-۱-۳- دستگاه آزمایش و روش آن:

دستگاه آزمایش مطابق شکل۲-۱-۲ از بدنه اصلی ، تیر B_1 پاندول فولادی B_2 تشکیل شده است وسایل آزمایش عبارت ان از : نخ ، کرنو متر، متر فلزی
ابتدا پاندول را حد اکثر ۱۰ درجه از حالت تعادل منحرف کرده و سپس رها کنید و زمان ۱۰ تا ۱۵ نوسان آن را اندازه بگیرید ، سپس طول پاندول را تغییر دهید و حداقل این عمل را برای ۶ طول متفاوت تکرار نمائید

۲-۱-۴- خواسته های آزمایش :

۱- منحنی T^2 بر حسب l را راسم کنید و از روی شیب آن مقدار g را بدست آورید .

۲- چنانچه آزمایش فوق را با همان طول ها با یک پاندول چوبی انجام دهیم نتایج حاصل شده آیا تغییری خواهند کرد؟ علت آن را توضیح دهید .

۲-۲- پاندول مرکب

۲-۲-۱- هدف :

بررسی حرکت پاندول مرکب

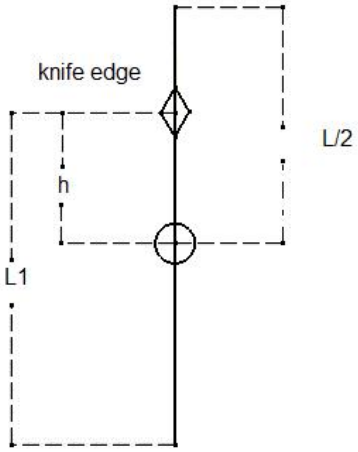
۲-۲-۲- تئوری :

برای یک جسم صلب که حول لولا یش خود از حالت تعادل خارج شده و انحراف پیدا کرده است و رها شده است می‌توان نوشت

$$-mgh\,sin\,\theta = I\ddot{\theta} \qquad ۱-۲-۲$$

جرم میله $= m$ فاصله ی مرکز ثقل میله $= h$ فاصله ی انتها ی میله از مرکز تعلق $= L_1$

ممان اینرسی میله حول مرکز تعلیق$= I$ شتاب زاویه ی میله $= \ddot{\theta}$



شکل ۲-۲-۱ پاندول مرکب

با فرض کوچک بودن زاویه انحراف داریم :

$$I\ddot{\theta} + mgh\theta = 0 \qquad ۲-۲-۲$$

و پریود زمانی از رابطه ی ۲-۲-۳ به دست می آید .

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mgh}} \qquad ۳-۲-۲$$

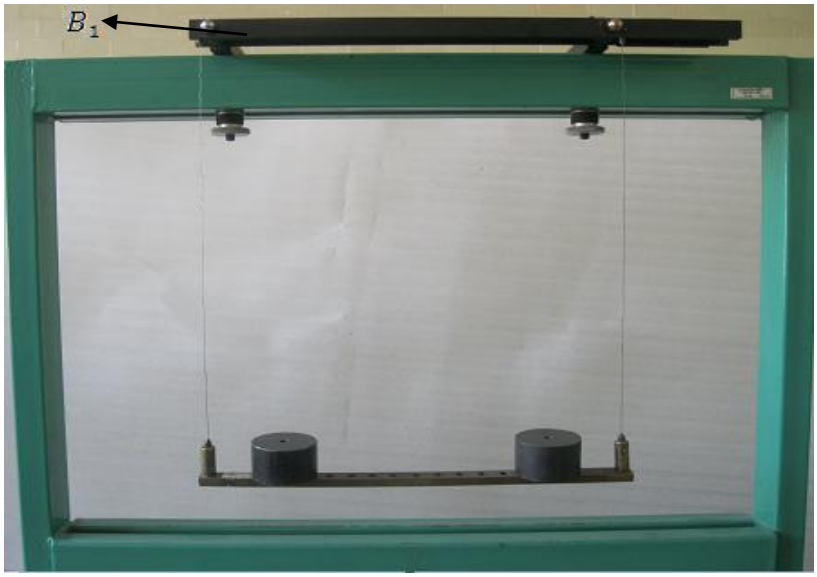
اگر k شعاع ژیراسیون باشد آنگاه پریود زمانی از رابطه ی ۲-۲-۴ به دست می آید.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{k^2+h^2}{gh}}$$ ۴-۲-۲

۲-۲-۳- دستگاه آزمایش و روش آن :

ابتدا لبه کروی شکل را در نقطه ای از میله ای به طول m ۰/۷۶۲ و قطر m۱۲/۸ تثبیت کرده و روی عضو تکیه داده شود و میله را حداکثر حدود ۱۵ تا ۲۰ درجه منحرف نموده و رها کنید و زمان ۱۵ تا ۲۰ نوسان آنرا اندازه گیری کنید ، مقدار را تغییر دهید و آزمایش را حداقل برای ۶ بار انجام دهید .

وسایل آزمایش عبارت اند از: میله ی فولادی دارای لبه ی کردی شکل ، کرنو متر ، مترفلزی



شکل ۲-۲-۲ بایفیلار

۲-۲-۴- خواسته های آزمایش :

۱- منحنی T^2h را برحسبh^2 را رسم کنید .

۲- از روی منحنی قبل مقادیر g و k را بیابید و مقدار k حاصل شده را با مقدار تئوری آن مقایسه کنید.

۳- طول پاندول ساده ی معادل با این پاندول را از رابطه $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ بیابید.$(L_1 = ۰/۶)$

۴- برای طول معادل فوق مقدار دومی برای h بیابید

۲-۳- مرکز ضربه

۲-۳-۱- هدف :

پیدا کردن مرکز ضربه یک جسم و ارتباط آن با مرکز نوسان

۲-۳-۲- تئوری :

چنانچه یک پاندول مرکب به وسیله ی یک لولا افقی نگاه داشته شود و ضربه ای به آن وارد گردد در حالت کلی ، عکس العملی افقی در تکیه گاه وجود خواهد آمد مثل راکت بیسبال.
اصولا نقطه ای در طول پاندول وجود دارد که هرگاه ضربه ای در آن نقطه اعمال گردد ،هیچ نیروی عکس العمل افقی ای به وجود نخواهد آمد بدین نقطه ،مرکز ضربه گوییم. این نقطه همان طول معادل پاندول مرکب است که در آزمایش قبل نحو محاسبه آنرا اموخته شد، داریم :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{AK^2}{gh}} \qquad ۲-۳-۱$$

$$k_A{}^2 = k^2 + h^2 \qquad ۲-۳-۲$$

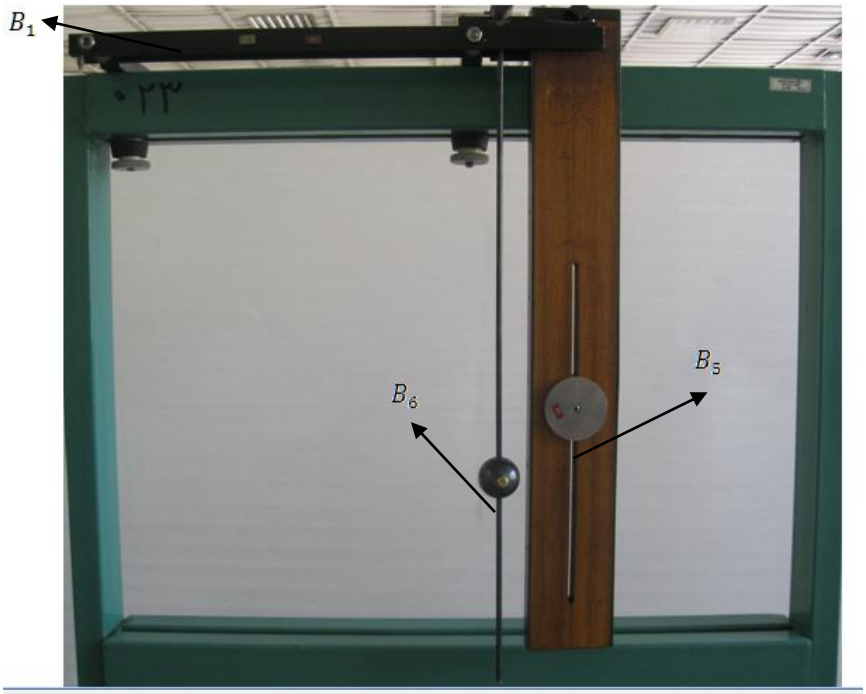
که در آن :

شعاع ژیراسیون حول نقطه ی تعلیق : k_A شعاع ژیراسیون حول مرکز جرم :k

فاصله مرکز ثقل سیستم تا نقطه ی تعلیق : h

۲-۳-۳- دستگاه آزمایش و روش آن :

دستگاه آزمایش شامل پاندول مرکب چوبی(B_5) با وزنه ی قابل جابجایی است که با تکیه به عضو (B_1) روی قاب اصلی قرار می‌گیرد در کنار آن پاندول مرکب (B_6)است که حکم ضربه زننده را دارد و لبه کاردی شکل آن در شیار V شکل عضو (B_1) قرار گرفته است. لبه کاردی شکل پاندول مرکب در روی قسمت افقی عضو (B_1) تکیه می‌کند. ابتدا تنها پاندول چوبی (B_5) را حدود ۱۰ درجه منحرف کرده و رها کنید و زمان ۱۵ تا ۲۰ نوسان آن را اندازه گرفته یادداشت کنید سپس آزمایش را برای ٦ طول دیگر y نیز تکرار کنید.



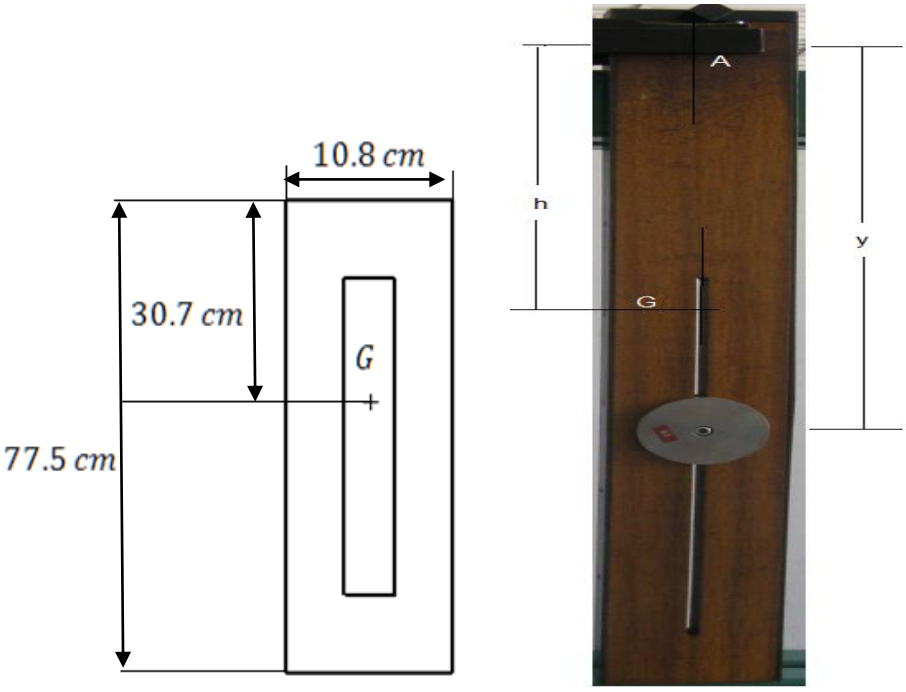
شکل ۲-۳-۱ مرکز ضربه

پس از آن پاندول فولادی (B_6) را درکنار پاندول چوبی در جای مربوطه قرار دهید و با جابجا کردن گلوله ی پاندول فولادی به پاندول چوبی در نقاط مختلف ضربه بزنید تا نیروی افقی در تکیه گاه پاندول چوبی ایجاد نگردد .نقطه ای از پاندول چوبی که در آن نقطه این پدیده رخ داده مرکز ضربه است فاصله آنرا تا لبه ی کاردی شکل اندازه بگیرید. این آزمایش را برای تمام طول های y آزمایش قبل تکرار کنید.

۲-۳-۴- خواسته های آزمایش :

۱- توضیح دهید به چه علت اعمال ضربه به مرکز ضربه باعث ایجاد نیروی افقی در تکیه گاه پاندول چوبی نمیگردد.

۲- طول های معادلی که از راه به نوسان در آوردن پاندول مرکب چوبی حاصل میشود را با فاصله مرکز ضربه تا لبه کاردی شکل مقایسه کرده، اگر تفاوتی وجود دارد آن را توجیه کنید.



شکل ۲-۳-۲ پارامترهای مرکز ضربه و مشخصات آویز اصلی

جدول ۲-۳-۱ جدول مشخصات آزمایش مرکز ضربه

$Test\ No$	$Time\ for\ 20\ oscillation$	$Period\ \tau\ (s)$	$y\ (m)$	$h\ (m)$	$K_A\ (m)$	$K\ (m)$
۱						
۲						
۳						
۴						
۵						

۲-٤- پاندول $Katter$:

۲-٤-۱- هدف:

اندازگیری شتاب ثقل از راه آزمایش پاندول $Katter$

۲-٤-۲- تئوری :

پاندول $katter$ برای تعیین دقیق مقدار شتاب ثقل بکار میرود این پاندول شامل دو لبه کاردی شکل و یک استونه ی لغزنده ی قابل تنظیم است با تنظیم موقعیت استوانه می‌توان زمان های نوسان تقریبا مساوی ایجاد کرد و سپس مقدار g را محاسبه نمود.بدین ترتیب که :

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{{h_1}^2+k^2}{gh_1}} \qquad ۲-٤-۱$$

$${h_1}^2 + k^2 = \frac{{T_1}^2 g h_1}{4\pi^2} \qquad ۲-٤-۲$$

$$T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{{h_2}^2+k^2}{gh_2}} \qquad ۲-٤-۳$$

$${h_2}^2 + k^2 = \frac{{T_2}^2 g h_2}{4\pi^2} \qquad ۲-٤-٤$$

$$h_1 + h_2 = l \qquad ۲-٤-٥$$

$$\frac{8\pi^2}{g} = \frac{{T_1}^2+{T_2}^2}{h_1+h_2} + \frac{{T_1}^2-{T_2}^2}{h_1-h_2} \qquad ۲-٤-٦$$

۲-٤-۳- دستگاه آزمایش و روش آن :

تیغه های کاردی شکل را به فاصله ی مساوی از ابتدا و انتهای میله تثبیت کرده و با تکیه بر تیر بر روی قاب اصلی قرار میگیرند ابتدا زمان پریود رابرای حدود ۱۵ تا ۲۰ نوسان اندازه بگیرید (T_1) و سپس پاندول را معکوس قرار داده و با تنظیم استوانه لغزنده زمان پریود ۱۵ تا ۲۰ نوسان را پیدا کنید (T_1) و آنقدر جا به جا کنید تا $T_1=T_2$ گردد .

۲-٤-۴- خواسته های آزمایش :

۱- دو مقدار خیلی نزدیک به همT_1 و T_2 را برای دومقدار h_1 و h_2 متفاوت بدست آورید .

۲- با توجه به اینکه $h_1 + h_2 = l$ از روی فرمول فوق مقدار g را بیابید .

۳- علت آنکه این آزمایش مقدار دقیق g را مشخص می‌کند را توضیح دهید.

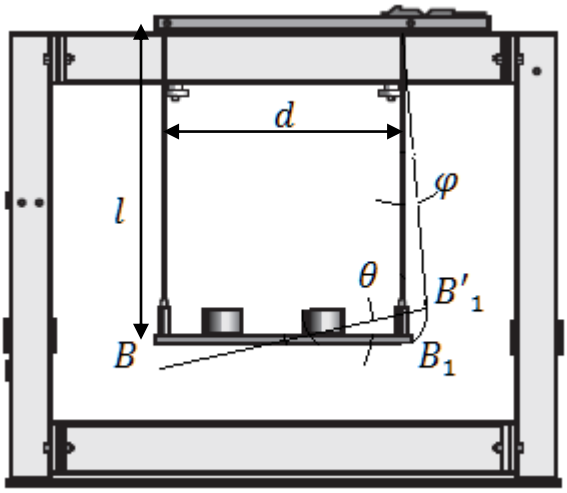
۲-۵- آویزش بایفیلار:

۲-۵-۱- هدف:

تعیین ممان اینرسی جسم از طریق آویزش بایفیلار

۲-۵-۲ تئوری :

آزمایش بایفیلار برای تعیین ممان اینرسی جسمی بکار میرود که به توان به وسیله نخ از مکانی آویزان نمود البته ممان اینرسی حول محوری که از مرکز جرم جسم می‌گذرد و به موازات نخ ها است به دست میاید طبق شکل ۲-۵-۱ میله به وسیله دو نخ از سقف آویزان شده در این حالت کشش هر یک از نخ ها برابر با $\frac{mg}{2}$ می‌باشد هرگاه میله را در صفحه افقی به اندازه ی $\boldsymbol{\theta}$ تغییرمکان داده شود در این صورت مولفه ی نیروی وارد شده در نقطه B_1 در راستای مماس بر مسیر $B_1B'_1$ برابر است با $\frac{mg\sin\theta}{2}$



شکل ۲-۵-۱ دستگاه و مشخصات بایفیلار

از طرف دیگر می‌توان نوشت:

$$l\phi = \theta\frac{d}{2} \qquad ۲\text{-}۵\text{-}۱$$

کوپل نیروی فوق حول o برابر است با:

$$T = \frac{mg\sin\phi}{2}\frac{d}{2} \qquad ۲\text{-}۵\text{-}۲$$

بنابر این کوپل ناشی از دو نیرو در B_1 و B_2 برابراست با :

$$T = \frac{mg}{2}\frac{d}{2}\,2\phi = \frac{mgd^2\theta}{4l} \qquad ۲\text{-}۵\text{-}۳$$

$$-\frac{mgd^2\theta}{4l} = I\ddot{\theta} \qquad ۲\text{-}۵\text{-}۴$$

$$T = \frac{mg\theta d^2}{4l}$$ ۲-۵-۵

پس ممان اینرسی برابر است با :

$$I = \frac{mgT^2 d^4}{16l\pi^2}$$ ۲-۵-۶

۲-۵-۳- دستگاه آزمایش و روش آن :

ابتدا تیر BB_1 به وسیله ی دو سیم نازک آویزان کنید و سپس در صفحه ی افق حدود ۱۰ درجه تیر را منحرف کنید و زمان ۲۰-۱۵ نوسان را اندازه بگیرید این آزمایش را برای ۶ طول مختلف تکرار کنید . همچنین دو وزن اضافی هرکدام به وزن kg ۱/۸۵ به فاصله ۰/ ۳۵ متر قرار داده و آزمایش را برای ۶ طول مختلف دوباره تکرار کنید .
وسایل آزمایش : متر ، کرنو متر ، دو وزنه اضافی
جرم تیر kg ۱/ ۳۹ است .

۲-۵-۴- خواسته های آزمایش :

۱- منحنی T^2 را برحسب l در دو حالت بدون وزنه های اضافی و با وزنه های اضافی رسم کنید .

۲- از روی منحنی فوق و با بدست آوردن شیب آنها مقدار ممان اینرسی I را برای دو حالت فوق بدست آورید .

۳- دو مقدار ممان اینرسی I را از راه تئوری و با مراجعه به جدول به دست آورید و با مقادیر فوق مقایسه کنید . از اثر سوراخ ها و زائده ها صرف نظر کنید .

۴- چگونه می‌توان ممان اینرسی یک جسم غیر مشخص را که امکان آویزان کردن آن وجود ندارد را با این روش محاسبه کرد .

۲-۶- سیستم جرم و فنر :

۲-۶-۱- هدف :

تحقیق در مورد رابطه $T = 2\pi\sqrt{\frac{W}{kg}}$ (پریود نوسانات T ، وزن سیستم W و ضریب ارتجاعی فنر k)

۲-۶-۲- تئوری:

به کتاب های موجود در ارتعاشات مراجعه شود.

۲-۶-۳- شرح دستگاه:

دستگاه تشکیل شده از یک فنر مارپیچ (B) که از بالا به قاب (A) وصل شده و در پائین به میله (C) وصل می شود. حرکت میله (C) بعلت وجود راهنمای (D) فقط دارای یک درجه آزادی است. بر روی میله (C) دو صفحه مدور(E) و (F) تعبیه شده است از صفحه (F) برای افزودن وزنه به دستگاه واز صفحه (E) برای اندازه گیری دقیق طول فنر استفاده می شود.

وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش عبارتنداز:

دستگاه اصلی، یک فنر، یک وزنه یا خط کش، کرونومتر، تعدادی وزنه ۴۰۰ گرمی

۲-۶-۴- روش آزمایش:

۱- ابتدا قاب دستگاه را تراز کنید بطوریکه میله (C) هیچگونه اصطکاکی با راهنمایی (D) نداشته باشد. بهتراست راهنمای را با روغندان روغنکاری کنید.

۲- با افزودن وزنه های مختلف (۴۰۰گرمی) طول فنر را اندازه بگیرید. آزمایش را حداقل برای ۶ وزنه مختلف انجام دهید. جدول ۱

۳- به ازای وزنه ای در حدود $۴kg$ پریود نوسانات را یکبار برای نوسانی با دامنه کوتاه و بار دیگر برای نوسانی با دامنه بلند دقیقاً توسط کرونومتر تعیین کنید.

۴- با افزودن وزنه های مختلف به فنر، تغییر طول آنرا در حالت استاتیک و پریود نوسانات را به ازای هر وزنه در حالت ارتعاش تعیین کرده و در جدولی ثبت کنید (حداقل برای ۶ وزنه و تا آنجا که می توانید از وزنه های بیشتر استفاده کنید تا شمارش تعداد نوسان ها راحتتر باشد) جدول ۲

تذکر۱: برای کاهش خطا در اندازه گیری ها به ازای هر وزنه در صورت امکان چند بار تغییر طول و پریود نوسانات را اندازه گیری کنید.

تذکر۲: وزن میله (C) با ضمائم آن (صفحات (E)و(F) و غیره) برابر $۱۵۰۰gr$ است.

۲-۶-۵- خواسته های آزمایش :

۱- با استفاده از جدول (۱) منحنی نمایش تغییر طول را بر حسب وزن افزوده به فنر رسم کنید و ضریب ارتجاعی فنر را پیدا کنید.

۲- با استفاده از منحنی (۱) و ضریب ارتجاعی فنر (که از روی شیب منحنی (۱) بدست آمده) منحنیT^2 بر حسب وزن افزوده شده به فنر را رسم کنید و از روی آن مقدار وزن موثرفنررا پیدا کنید (قطع منحنی با محور xها)

۳- پریود نوسان را یکبار ازروی فرمول $T = 2\pi\sqrt{\frac{\delta}{g}}$ ویا فرمول$T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{k}}$ وبار دیگر ازراه اندازه گیری مستقیم بدست آورید وباهم مقایسه کنید هرگونه عدم مطابقت را توضیح دهید.

۴- توضیح دهید که آیا دامنه نوسانات بر روی پریود نوسانات تاثیر می گذارد یا خیر؟

۵- در مورد منابع خطا در این آزمایش توضیح داده و اگر پیشنهادی برای رفع آنها دارید ذکر کنید.

آزمایش شماره۳- ارتعاشات آزاد و اجباری جسم صلب

FREE & FORCED VIBRATION OF A RIGID BODY

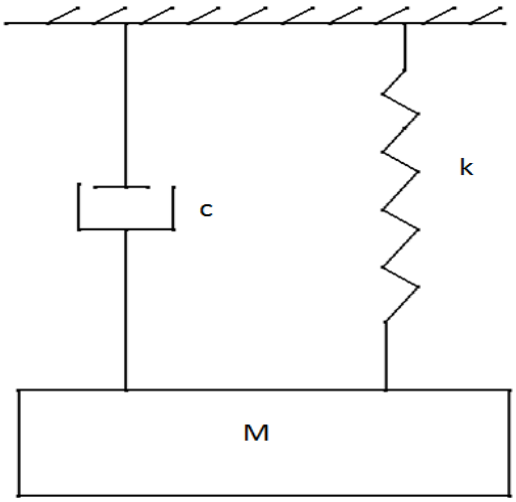
۳-۱- ارتعاشات آزاد با استهلاک ویسکوزی :

۳-۱-۱- هدف :

بررسی اثر استهلاک بر روی یک سیستم ارتعاش کننده و تحقیق در مورد تغییرات مقدار استهلاک نسبت به محل مستهلک کننده.

۳-۱-۲- تئوری:

سیستمی شامل یک جرم و فنر و دمپر مطابق شکل ۳-۱-۱ در نظر گرفته می شود اگر جرم را از حالت تعادل استاتیکی خارج کنیم و سپس رها شود میدانیم که بخاطر وجود دمپر در سیستم دامنه ارتعاشات حاصله بتدریج کاهش یافته و در زمان محدودی به صفر می رسد. علت این امر صرف انرژی ارتعاشی سیستم برای غلبه بر اصطکاک های موجود در سیستم است.



شکل ۳-۱-۱ سیستم جرم فنر دمپر

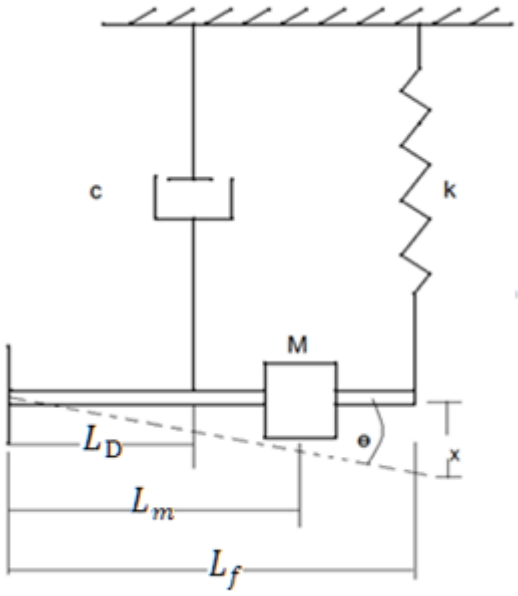
در چنین حالتی ارتعاش حاصله را مستهلک شونده گویند. درسیستمی مانند سیستم فوق عوامل مستهلک کنندگی ارتعاشات عبارتنداز:

الف) ماده ای که در آن ارتعاشات انجام می گیرد (مثلاً هوا)

ب) اصطکاک داخلی (هیسترزیس $Hysteresis$) فنر یا هر ماده ی الاستیک دیگر

ج) اصطکاک خارجی بواسطه تعبیه عمدی مستهلک کننده های خارجی در سیستم (مثلاً "c" dashpot در سیستم فوق)

معمولاً فرض می شود که استهلاک موجود در سیستم، صرف نظر از نوع مستهلک کننده، خطی است یا به عبارت دیگر معمولاً فرض می شود که نیروی مقاوم در مقابل حرکت سیستم مستقیماً متناسب با سرعت حرکت آن است. تحت چنین شرایطی می توان حرکت حاصل سیستم هایی مانند سیستم فوق را تجزیه و تحلیل کرد.



شکل ۳-۱-۲ مشخصات سیستم جرم و فنرو دمپر

شکل (۳-۱-۲) یک سیستم ساده مستهلک شونده را نشان می دهد. می توان تیر را مقداری از حالت تعادل خارج کرد (وضع خط چین) و سپس رها کرد. معادله حرکت ارتعاشی سیستم به شکل زیر نوشته می شود.

$$I\ddot{\theta} + cl_D{}^2\dot{\theta} + kl_f{}^2\theta = 0$$ ۳-۱-۱

$$x = l\theta$$ ۳-۱-۲

$$\ddot{x} + \frac{cl_D{}^2}{I}\dot{x} + \frac{kl_f{}^2}{I}x = 0$$ ۳-۱-۳

$$I = \frac{ml^2}{3} + Ml_m{}^2$$ ۳-۱-۴

$$\frac{kl_f{}^2}{I} = \frac{k_e}{M_e}$$ ۳-۱-۵

$$\frac{cl_D{}^2}{I} = \frac{c_e}{M_e}$$ ۳-۱-۶

$$M_e\ddot{x} + C_e\dot{x} + k_e x = 0$$ ۳-۱-۷

فاصله انتهایی تیر تا لولا : l ضریب استهلاک دمپر : c ضریب استهلاک سیستم معادل : c_e
ضریب ارتجاعی سیستم معادل : k_e جرم سیستم معادل : M_e جرم موتور و دیسکها : M
فاصله موتور تا لولا : l_m جرم تیر : m اینرسی سیستم حول لولا : I
فاصله دمپر تا لولا : l_D

معادله ۳-۱-۷ دارای جواب زیر خواهد بود.

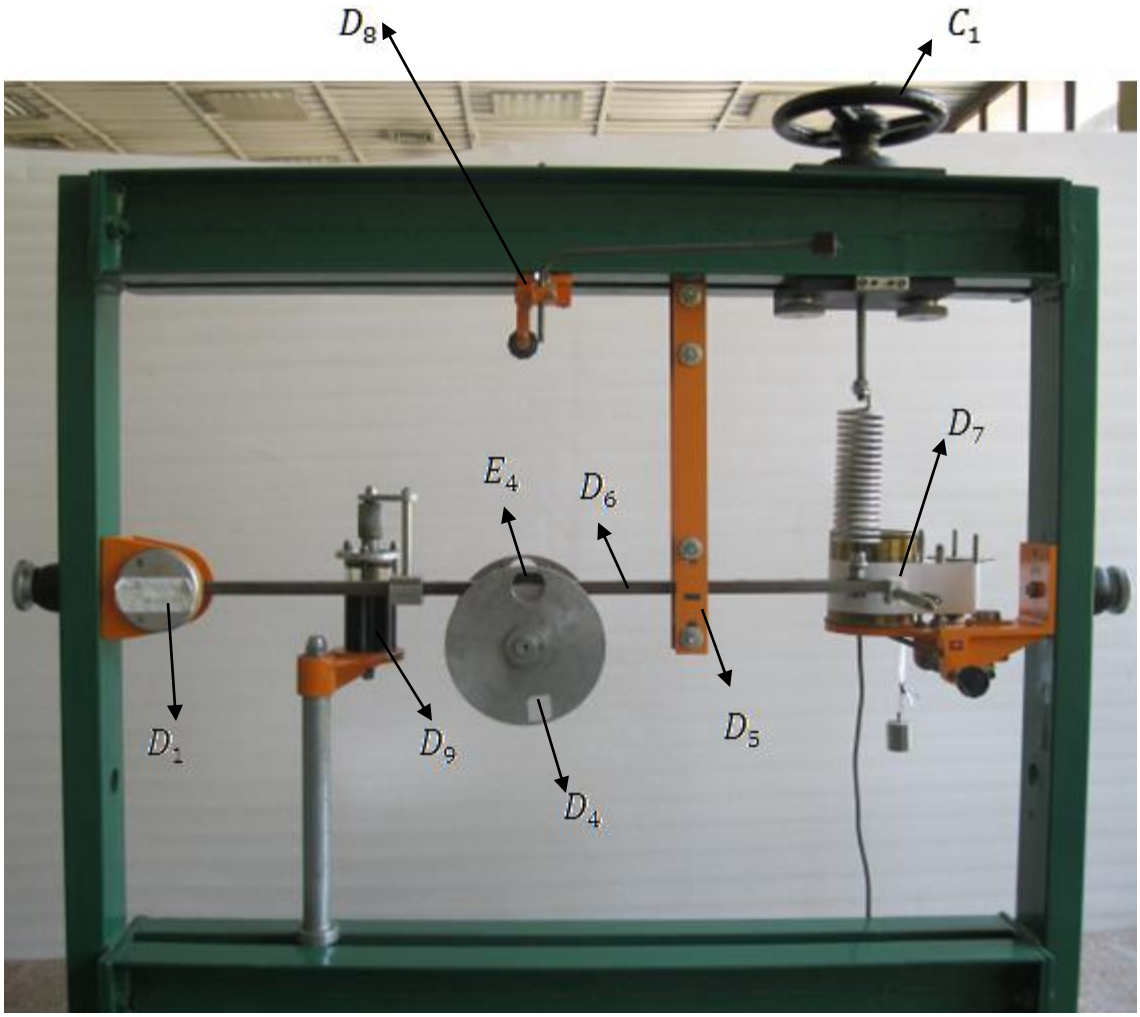
$$x = Ae^{-b\omega_n t}\cos(w_d t + \phi) \qquad ۳-۱-۸$$

که در رابطه بالا داریم:

$$\omega_d = \omega_n\sqrt{1-b^2} \quad ، \quad \omega_n = 2\pi f_n \qquad ۳-۱-۹$$

$$b = \frac{c_e}{2\sqrt{k_e M_e}} \qquad ۳-۱-۱۰$$

$$\frac{x_1}{x_{n+1}} = e^{2\pi n b} \qquad ۳-۱-۱۱$$



شکل ۳-۱-۳ شرح دستگاه سیستم جرم و فنر ودمپر

شرح دستگاه:

دستگاه آزمایش در شکل (۳-۱-۳) نشان داده شده است. سیستم ارتعاش کننده در این آزمایش تشکیل شده است از یک تیر افقی با مقطع مستطیل شکل (D_6) که در انتهای آن در داخل یک گیره لولائی بلبرینگ دار (D_1) درگیر شده و انتهای دیگر آن توسط یک فنربه قاب اصلی متصل می شود. برای تراز کردن (افقی کردن) تیر(D_6)از چرخ فلکه مغزی دار (C_1) می توان استفاده کرد یک موتور محرکه ارتعاشات (در محل E_4) روی تیر(D_6) نصب شده است نیروی محرکه ارتعاشات بوسیله نیروی گریز از مرکز جرم خارج از مرکز دیسک های غیر بالانس(D_4)، روی تیر (D_6) بوجود می آید. فرکانس این نیروی محرکه را می توان با تغییر سرعت دورانی موتور، توسط یک دستگاه کنترل سرعت، تغییر داد برای جلوگیری از ازدیاد بیش از حد دامنه ارتعاشات تیر، حفاظ (D_5) در سیستم تعبیه شده است جرم سیستم را می توان با افزایش یا کاهش تعدادی وزنه معلوم (به زیر موتور) تغییر داد .

نیروی اتسهلاک در سیستم توسط یک مستهلک کننده ویسکوزی $(Dashpot، D_9)$ تامین می شود. این مستهلک کننده چنان طراحی شده که می توان به آسانی آنرا در امتداد تیر جابجا کرد. در داخل مستهلک

کننده، دو صفحه سوراخدار تعبیه شده است که با تغییر سطح موثر سوراخ های آنها میتوان نیروی استهلاک را بسادگی تغییر داد.
با استفاده از سیستم ثبات $(Chart\ Recorder، D_7)$ می توان منحنی نمایش دامنه ارتعاشات را نسبت به زمان روی کاغذ ثبات رسم کرد. تغذیه کاغذ توسط یک موتور سنکرون، با سرعت کم و با دقت زیاد انجام می گیرد. برای تعیین اختلاف فاز بین حرکت ارتعاشی تیرو و نیروی محرکه آن از یک سیستم ثبات دیگر (D_8) استفاده می شود.

وسایل مورد نیاز:
دستگاه اصلی – دستگاه کنترل سرعت – خط کش یا متر نواری – کولیس

۳-۱-۴- روش آزمایش:

۱- ضریب ارتجاعی فنر را تعیین کنید.
۲- تیر را به فنر وصل کرده و تغییر طول فنر (δ) بعلت وزن موتورو سایر وزنه هایی که به آن اضافه شده است را تعیین کنید (برای این کار طول فنر را در دو حالت آزاد و موقعیکه تیر به آن وصل است و در وضع افقی است اندازه بگیرید)
۳- با استفاده از رابطه $f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{\delta}}$ فرکانس طبیعی سیستم را تعیین کنید.(f_{n1})
۴- بدون آنکه مستهلک کننده را به سیستم اضافه کنید، با استفاده از چرخ فلکه مغزی دار C_1 تیر را بصورت افقی تراز کنید.
۵- سیستم را بصورت آزاد و بدون دمپر به ارتعاش در آورده و منحنی ارتعاشی آنرا روی کاغذ ثبات رسم کنید. همچنین با استفاده از کرنومتر پریود (T) ارتعاش سیستم را اندازه بگیرید.
۶- با استفاده از پریود ارتعاشی (T) که در مرحله قبل تعیین کرده اید، فرکانس ارتعاشی سیستم را محاسبه کنید.(f_{n2})
۷- با استفاده از منحنی ارتعاشی که در مرحله (۵) ثبت شده است و با توجه باینکه سرعت خطی حرکت کاغذ برابر با $0.573\ ^{in}/_{sec}$ می باشد، فرکانس ارتعاشی سیستم را محاسبه کنید.(f_{n3})
۸- مستهلک کننده را به سیستم اضافه کنید و صفحه های سوراخدار مستهلک کننده را چنان تنظیم کنید که دارای مینیمم استهلاک باشد. (دراین حالت سوراخ های دو صفحه کاملاً بر هم منطبق خواهند بود)
۹- به ازای پنج مقدار l_D (به شکل ۳-۱-۲ رجوع شود) سیستم را به ارتعاش در آورده و منحنی ارتعاشی آنرا روی کاغذ ثبات رسم کنید. مقادیر l_D را یادداشت کنید.

۱۰- مرحله ۹ را مجدداً برای دمپر زیاد (سوراخ های صفحات سوراخدار روبروی هم نمی باشد) تکرار کنید.
۱۱- با استفاده از منحنی های رسم شده و با توجه به روابط (۳-۱-۱۰) و (۳-۱-۱۱) مقادیر را برای دوحالت دمپرکم و زیاد تعیین کنید.

۳-۱-۵ خواسته های آزمایش:

۱- مقادیر f_{n1}، f_{n2} ، f_{n3} را با هم مقایسه کرده و بحث و نتیجه گیری کنید.

۲- منحنی های نمایش c_e نسبت به ${l_D}^2$ برای دو حالت دمپرکم و زیاد رسم کنید و صحت رابطه (۳-۱-۶) را تحقیق کنید.

۳- مقدار C (ضریب استهلاک دمپر) را بدست آورید.

۴- نشان دهید که وقتی مقدار استهلاک کم باشد داریم: $\omega_d \simeq \omega_n$

۵- نشان دهید که $\delta = L\frac{x_1}{x_{n-1}} = 2n\pi\frac{b}{\sqrt{1-b^2}}$ بود و در حالیکه مقدار استهلاک کم باشد رابطه (۳-۱-۱۱) حاصل می شود.

۶- اشکالات موجود آزمایش را ذکر کنید و چنانچه پیشنهادی وجود دارد بیان کنید.

جرم تیر: $m = 2.13kg$ $\quad l = 0.76\,m \quad$ $l_f = 0.68\,m$

l_m : اندازگیری شود.

جرم موتور و دیسکتها: $k = 0.087\ \frac{kgf}{mm}$ $\quad F_0 = \frac{\omega^2}{630} \quad$ $M = 3.84\,kg$

ωبر حسب $r.p.m$ و F_0 برحسب نیوتن است.

ωبایستی عددی باشد که از روی دستگاه خوانده می شود و سپس در ضریب $\frac{22}{72}$ ضرب گردد.

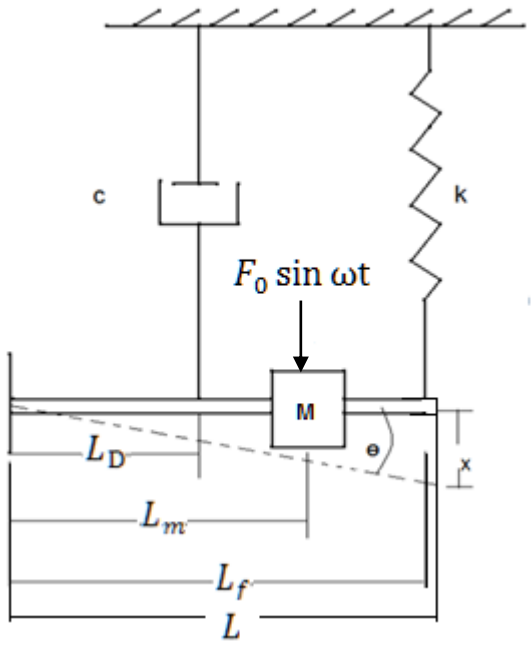
۳-۲- ارتعاشات اجباری با استهلاک ویسکوزی :

۳-۲-۱- هدف :

تحقیق در مورد اثر تغییرات فرکانس و ضریب استهلاک، روی بزرگنمائی دامنه ارتعاشِ($Dynamic\ Magnifier$) و اختلاف فاز سیستم($Lag\ Phase$)

۳-۲-۲- تئوری:

شکل ۳-۲-۱ طرح شماتیک یک سیستم استهلاکی با ارتعاش اجباری را نشان می دهد و در این سیستم می توان نوشت :



شکل ۳-۲-۱ شکل شماتیک سیستم مرتعش با استهلاک ویسکوزی

اگر معادله حرکت سیستم اصلی را بنویسیم خواهیم داشت که :

$$I\ddot{\theta} + c\dot{\theta}{l_D}^2 + k\theta{l_f}^2 = F_0\, l_m \sin\omega t \quad ، \quad x = l\theta \qquad ۳-۲-۱$$

$$M_e\ddot{x} + C_e\dot{x} + k_e x = {(F_0\, M_e\, l\, l_m\, sin\,\omega t)}/{I} \qquad ۳-۲-۲$$

$$\frac{c{l_D}^2}{I} = \frac{c_e}{M_e} \quad ، \quad \frac{k{l_f}^2}{I} = \frac{k_e}{M_e} \qquad ۳-۲-۳$$

دراین سیستم داریم که :

ضریب استهلاک مستهلک کننده : c ضریب ارتجاعی فنر : k

نیروی محرکه سیستم (نیروی حاصل از خارج از مرکز) : F_0

سرعت زاویه دیسک های غیر متوازن : ω

فاصله مستهلک کننده با لولا : l_D فاصله مرکز ثقل موتورتا لولا : l_m

فاصله انتهای تیر تا لولا: l فاصله نقطه اثر فنر تا لولا : l_f

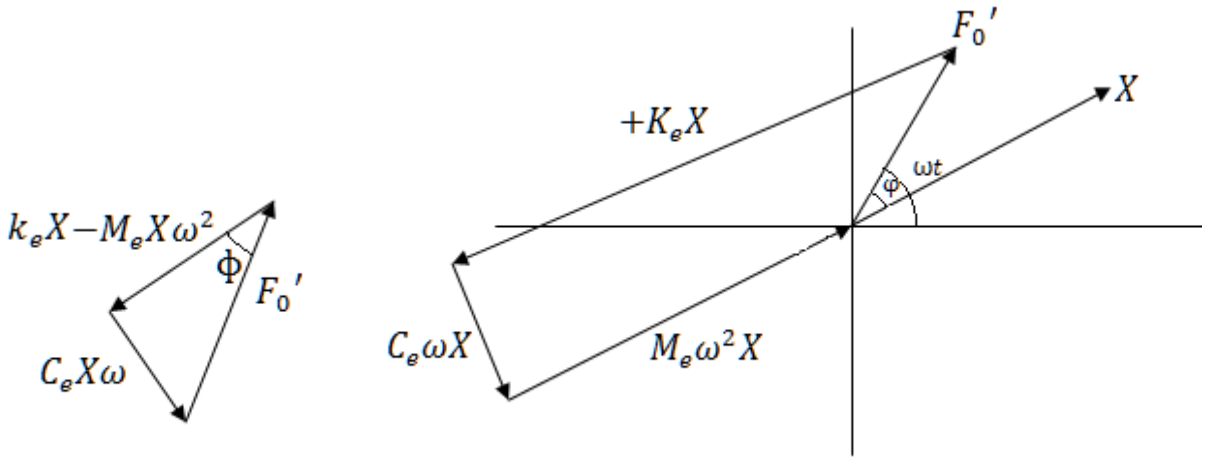
جواب معادله (۳-۲-۲) دارای دو قسمت است جواب خصوصی و جواب عمومی، جواب عمومی این معادله بیانگر ارتعاش آزاد سیستم با فرکانس ارتعاشی $f_d = \frac{1}{2\pi}\omega_d$ می باشد که این ارتعاش بسرعت مستهلک شده و از بین می رود .جواب خصوصی معادله، بیانگر ارتعاش پایدار سیستم با فرکانس نیروی تحریک w می باشد. دراین حالت بردار تغییر مکان (x) نسبت به بردار نیروی محرکه دارای تاخیر فاز (ϕ) خواهد بود.

$$x(t) = X\sin(\omega t - \phi) \qquad ۴\text{-}۲\text{-}۳$$

$$M_e X\omega^2 \sin(\omega t - \phi) - C_e X\omega \sin\left(\omega t - \phi + \frac{\pi}{2}\right) - k_e X \sin(\omega t - \phi) + F_0 M_e l\, l_m \sin\omega t\,/_I = 0 \qquad ۵\text{-}۲\text{-}۳$$

برای پیدا کردن دامنه (X) و زاویه فاز (ϕ)، رابطه (۳-۲-۴) را در (۳-۲-۳) جایگزین کرده و رابطه حاصله را بصورت زیر مرتب می کنیم.

رابطه برداری بالا را می توان بصورت ترسیمی نیز نمایش داد.



شکل ۳-۲-۲ نمایش ترسیمی رابطه بالا

برای تعیین X و ϕ با استفاده از مثلث قائم الزاویه داریم :

$$X = \frac{F_0'}{\sqrt{(K_e - M_e\omega^2)^2 + (C_e\omega)^2}} \qquad ۶-۲-۳ \quad ، \quad \tan\phi = \frac{C_e\omega}{K_e - M_e\omega^2} \qquad ۷\text{-}۲\text{-}۳$$

$$D.M = \frac{1}{\sqrt{\left[1-(\frac{\omega}{\omega_n})^2\right]^2 + \left[2\zeta(\frac{\omega}{\omega_n})\right]^2}} = \frac{X}{X_0} \qquad ۸\text{-}۲\text{-}۳$$

$$\tan\phi = \frac{2\zeta(\frac{\omega}{\omega_n})}{1-(\frac{\omega}{\omega_n})^2} \qquad ۹\text{-}۲\text{-}۳$$

که در روابط بالا داریم:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_e}{M_e}} \qquad ۱۰\text{-}۲\text{-}۳ \quad \text{فرکانس طبیعی بدون استهلاک سیستم :}$$

$$\zeta = \frac{c_e}{c_c} \qquad ۱۱\text{-}۲\text{-}۳ \quad \text{ضریب بی بعد استهلاک :}$$

$$C_c = 2M_e\omega_n \qquad ۱۲\text{-}۲\text{-}۳ \quad \text{ضریب استهلاک بحرانی :}$$

تعیین طول استاتیکی معادل سیستم تحت اثر نیروی

استاتیکی فرضی F_0' (با تغییر طول استاتیکی سیستم اشتباه نشود) : $X_0 = \frac{F_0'}{K_e} \qquad ۱۳-۲-۳$

در رابطه (۳-۲-۸) عبارت $D.M$ را (ضریب بزرگنمائی) می گویند. هرگاه سیستم مستهلک شونده نداشته باشد $\zeta = 0$، ضریب بزرگنمائی بصورت زیر در می آید.

$$D.M. = \frac{X}{X_0} = \frac{1}{1-(\frac{\omega}{\omega_n})^2} \qquad ۱۴\text{-}۲\text{-}۳$$

۳-۲-۳- روش آزمایش :

۱- سیستم را مطابق شکل ۳-۱-۳ سوار کنید.

۲- مستهلک کننده (D_9) را کاملاً نزدیک به لولا (D_1) قرار دهید. دراین حالت مقدار استهلاک بسیار کم است و می توان سیستم را بدون دمپر فرض کرد. علت لزوم مستهلک کننده در این حالت حذف ارتعاشات مقطعی ($Transient\ Vibration$) و استهلاک سریع ارتعاش ازاد سیستم و رسیدن به ارتعاش پایدار ($Steady\ State$)می باشد.

۳- سیستم های ثبات (D_7) و (D_8) را برای ثبت منحنی نمایش دامنه و فاز آماده کنید.

۴- برای روشن کردن دستگاه، ابتدا مدار الکتریکی سیستم را کاملاً کنترل و سپس دقیقاً به این ترتیب عمل کنید:

الف: پیچ تغییر سرعت موتور را کاملاً ببندید.

ب: کلید اصلی جریان برق دستگاه ($Main$) را بزنید.

ج: کلیداصلی آمپلی فایر($Amplifier$) را بزنید و ۳۰ ثانیه منتظر بمانید.

د: کلید میدان ($Field$) را بزنید.

۵- بوسیله پیچ تغییر سرعت موتور، سرعت موتور را بتدریج افزایش داده و در هر سرعت منحنی نمایش دامنه ارتعاش و همچنین زاویه تاخیر فاز را تعیین کنید. توجه داشته باشید که درمجاورت رزونانس (تشدید)

با کوچکترین افزایش سرعت، دامنه ارتعاش بطور قابل توجهی افزایش می یابد. بنابراین در این ناحیه تعداد دفعات بیشتری آزمایش را انجام دهید، سرعت موتور را درهر مورد بوسیله دستگاه کنترل سرعت تعیین کنید. با ضرب این سرعت درنسبت $\frac{22}{72}$ فرکانس زاویه ای دیسک های غیر متوازن حاصل می شود.

۶- به ازای یک مقدار ضریب استهلاک (که از آزمایش شماره قبلی نتیجه گرفته اند) مرحله ۵ را برای ۷ نقطه (۴ نقطه زیر فرکانس رزونانس و ۳ نقطه بالای آن) تکرار کنید.

توجه کنید چنانچه بخواهید اختلاف فاز را برای هر نقطه روی یک کاغذ مدور بدست آورید باید هر بار مرکز سرواخ روی دیسک را روی این کاغذ منتقل کنید. برای اینکار باید جائیکه کمترین فاصله بین سوراخ روی دیسک و لبه دیسک وجود دارد همانجا را روی کاغذ مدور نشان بگذارید و اختلاف فاز را تعیین کنید.

۳-۲-۴- خواسته های آزمایش :

۱- ابتدا فرکانس طبیعی سیستم را (بدون هرگونه دمپر) از راه ایجاد تشدید اندازه بگیرید.

۲- با استفاده از نتایج ثبت شده در مراحل (۵) و (۶) روش آزمایش، منحنی های نمایش اختلاف فاز (ϕ) و ضریب بزرگنمائی دامنه $D.M$ را بر حسب نسبت فرکانس ها $(\frac{\omega}{\omega_n})$ رسم کنید و با منحنی های تئوریک مقایسه کنید.

چنانچه اشکالاتی در آزمایش مشاهده می شود بیان کنید و هرگونه پیشنهادی که مفید می دانید ارائه دهید.

آزمایش شماره ۴: ارتعاشات پیچشی *Torsional Oscilations*

۴-۱- ارتعاشات آزاد پیچشی

۴-۱-۱- هدف آزمایش :

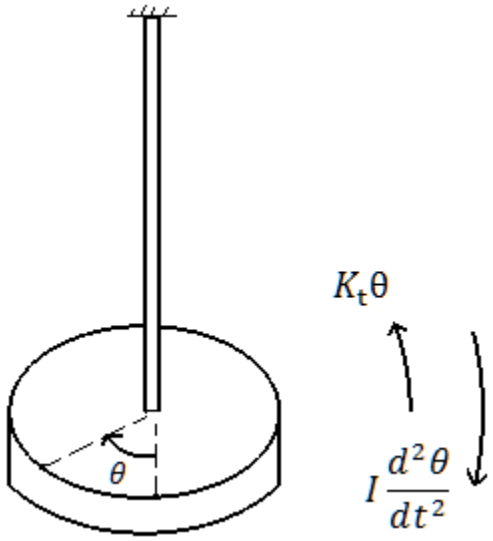
بررسی و تحقیق در مورد صحت رابطه $T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{k_t}}$ (پریود نوسان T= ، مماس اینرسی I=، ضریب ارتجاعی پیچشی=k_t)

۴-۱-۲- تئوری:

مثال دیگر حرکت نوسانی ساده، ارتعاشات پیچشی محورهای الاستیک توسط روتور (دیسک) می باشد گشتاور لازم برای دوران زاویه ای محور که یک انتهای آن ثابت و انتهای دیگر بوسیله روتور پیچیده می شود، با افزایش زاویه دورانی زیاد می شود با فرض مدل فنری برای محور خواهیم داشت.

گشتاور مقاوم : $-K_t\theta$

گشتاور اینرسی : $I\frac{d^2\theta}{dt^2}$



شکل ۴-۱-۱ ارتعاش پیچشی میله ودیسک

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{k_t}{I}\theta = 0 \qquad ۴\text{-}۱\text{-}۱$$

واضح است که حرکت سیستم هارمونیک ساده بوده و داریم که :

جدول ۴-۱-۱ پارامترهای ارتعاش پیچشی

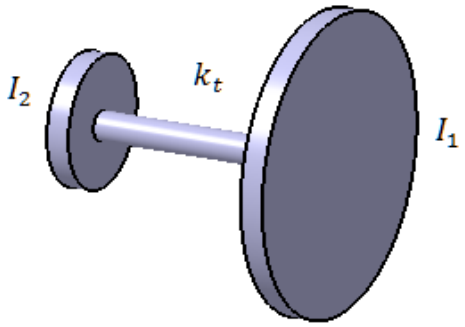
پریود نوسان	T
ممان اینرسی جرمی دیسک یا روتور	I
ضریب ارتجاعی پیچشی	$k_t = \frac{GJ}{l}$
مدول یانگ در پیچشی	G
ممان قطبی سطح مقطع میله	$J = \frac{\pi d^4}{32}$
قطر میله	d

در حالیکه سیستم شامل دو دیسک (روتور) باشد رابطه پریود ارتعاشی آن بصورت زیردرمی آید:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I_e}{k_t}} \qquad ۴-۱-۲$$

که در آن:

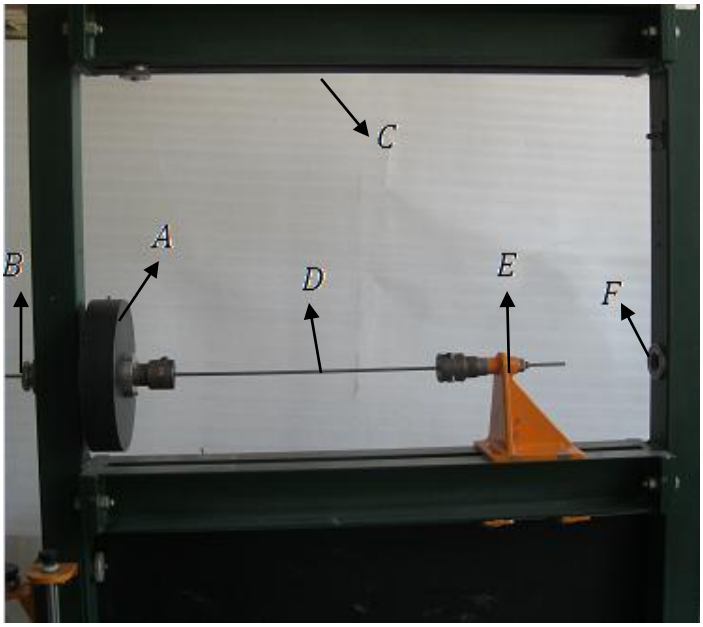
$I_e = \frac{I_1 I_2}{I_1 + I_2}$: ممان اینرسی معادل ۴-۱-۳



شکل۴-۲-۱ اینرسی سیستمی شامل دوجرم

۴-۱-۳- شرح دستگاه:

سیستم پیچشی یا یک روتور، تشکیل شده از یک چرخ طیار سنگین (A) که اینرسی سیستم را تامین می کند و توسط بلبرینگ (B) به قاب (C) متصل شده است. محور (D) که از یک طرف به دیسک (A) متصل شده و از طرف دیگر توسط گیره (E) محکم نگه داشته شده و به قاب (C) وصل می شود. گیره (E) در امتداد پایه پایینی قاب می تواند حرکت کند بدین وسیله طول میله (D) قابل تغییر است در سیستم پیچشی با دو روتور، گیره (E) برداشته شده (سه نظام گیره باز می شود) و انتهای (D) به چرخ طیار (دیسک) دیگر (G) که در یا تاقان (F) قرار می گیرد. وصل می شود در اینصورت طول میله دیگر قابل تغییر نخواهد بود. برای افزایش اینرسی چرخ طیار (A) به آن دو جفت وزنه افزوده می شود.



شکل ۴-۱-۳ دستگاه ارتعاش پیچشی

شکل ۴-۱-۴ چرخ طیار و چگونگی تعیین ممان اینرسی آن

وسایل مورد نیاز:

دو عدد دیسک (دیسک ساده – دیسک بازودار)، دو عدد محور، یک گیره سه نظام دار، خط کش یا متر نواری، کرونومتر، دو جفت وزنه ، کولیس.

۴-۱-۴- روش آزمایش:

۱- ابتدا ممان اینرسی دیسک ها توسط روشی که دربخش بعد آمده تعیین کنید.

۲- ترکیب پیچشی با یک روترو را مطابق شکل (۴-۱-۱) با چرخ طیار (A) ترتیب دهید (با دیسک ساده)

۳- بازای طول های مختلف محور پریود نوسانات، حداقل با ۶ طول برای ۲۰-۱۵ نوسان اندازه گیری نمائید.

۴- ترکیب پیچشی با دوروتور را مطابق شکل (۴-۱-۲) با یکی از محورها ترتیب دهید.

۵- پریود نوسانات را یکبار برای حالتی که به چرخ طیار (G) هیچگونه وزنه ای افزوده نشده و بار دوم برای یک جفت وزنه و بار سوم برای یک جفت وزنه بزرگتر بدست آورید.

۴-۱-۵ خواسته های آزمایش:

۱- با استفاده از مرحله (۳) روش آزمایش و جدول مربوطه منحنی نمایشT^2 بر حسب طول میله l را رسم کرده و از روی شیب منحنی مقدار G را بدست آورده با مقدار تئوری مقایسه کنید.

(مدول یانگ را برای پیچش محورها برابر $12 \times 10^6 \, {}^{lbf}/_{in^2}$ درنظر بگیرید)

۲- نتایج حاصل از مرحله (۵) روش آزمایش را (پریود نوسانات) برای سه حالت انجام شده با نتایج حاصل از تئوری مقایسه کنید.

۳- چه روش های دیگری برای محاسبه ممان اینرسی جرمی دیسک ها وجود دارد.

۴-۱-۵- ضمیمه آزمایش :

۴-۱-۵-۱- هدف: تعیین ممان اینرسی یک روتور

۴-۱-۵-۲- مقدمه:

ممان اینرسی یک روتور و با یک دیسک که در تعیین ممانهای وارد به آن دخالت می کند ممکن است از راه های مختلف بدست اید. یک روش متداول برای تعیین آن در زیر آمده است.

۴-۱-۵-۳- روش آزمایش :

۱- چرخ طیار یا دیسک را در بخش بیرونی قاب (C) قرار داده و توجه کنید که روی هر دیسک یک پین برای آویزان کردن وزنه تعبیه شده است.

۲- یکسر نخ را حلقه کرده و روی پین روتور قرار دهید و سپس نخ را دور دیسک بپیچانید و وزنه را به آن آویزان کنید.

۳- طول نخ را چنان تنظیم کنید که در صورت رها کردن وزنه، در لحظه رسیدن وزنه به زمین نخ از پین روی دیسک جدا شود.

۴- ارتفاعی را که وزنه از آن ارتفاع رها شده و بزمین میرسد دقیقاً اندازه گیری کنید.

۵- وزنه را روی زمین گذاشته در حالیکه نخ کاملاً کشیده شده است دیسک را دوران دهید تا وزنه دقیقاً ارتفاع (h) را بپیماید و در این حالت تعداد دوری را که نخ دور دیسک می پیچد را تعیین کنید. (n_1)

۶- وزنه را از ارتفاع(h) و از حالت سکون رها کرده و کمیت های زیر را اندازه گیری کنید.

الف : زمانی که وزنه ارتفاع h را می پیماید تا به زمین برسد (t_1)
ب : تعداد دوری که چرخ طیار (n) از زمان شروع حرکت تا حالت سکون طی می کند دقیقاً شمارش شود. $(n = n_1 + n_2)$
۷- با استفاده از روابط زیر میتوان ممان اینرسی چرخ طیار را تعیین کرد.
در طی زمان سقوط وزنه:

$$-T_f n_1(2\pi) = \frac{1}{2}m(V^2 - 0) + mg(0 - h) + \frac{1}{2}I(\omega^2 - 0) \qquad ۴\text{-}۱\text{-}۴$$

از زمان سقوط وزنه تا ایستاندن چرخ طیار:

$$-T_f n_2(2\pi) = \frac{1}{2}I(0 - \omega^2) \qquad ۵\text{-}۱\text{-}۴$$

$$mgh = \frac{1}{2}mV^2 + I\omega^2\frac{n_1+n_2}{n_2} \qquad ۶\text{-}۱\text{-}۴$$

در فرمول فوق داریم :
جرم وزنه آویزان شده : $m\ (kg)$ ارتفاع سقوط وزنه : $h\ (m)$
ماکزیمم سرعت وزنه (هنگام برخورد بر زمین) : $V\ (\frac{m}{sec})$
ماکزیمم سرعت زاویه ای چرخ طیار (هنگام برخورد زمین) : $\omega\ (\frac{rad}{s})$
تورک مقاوم بخاطر اصطکاک در یاتاقان دیسک : $T_f(\mathrm{N.m})$
تعداد دور لازم برای آنکه دیسک بچرخد و وزنه از زمین تا نقطه شروع سقوط وزنه بالا آید: $n_1(rev)$
تعداد دوری که دیسک میچرخد از زمان برخورد وزنه زمین تا لحظه ایستادن : $n_2(rev)$
تعداد کل دوری که دیسک از زمان شروع تا لحظه ایستادن میزند : $n(rev)$
شعاع موثر دیسک : $r(m)$

$$\frac{h}{t_1} = \frac{0+V}{2} \longrightarrow V = \frac{2h}{t_1} \quad , \quad \omega = \frac{V}{r} \quad , \quad n_2 = n - n_1 \qquad ۷\text{-}۱\text{-}۴$$

تذکر:
برای تعیین ممان اینرسی چرخ طیار (G) بازودارهمراه با وزنه ها بایستی ابتدا وزنه ها را باز کنید و پارامترهای لازم برای تعیین ممان اینرسی خود چرخ طیار (بدون وزنه) را اندازه بگیرید و با استفاده از فرمول های فوق مقدار آنرا بدست آورید. سپس ممان اینرسی وزنه ها را حساب کرده و با استفاده از فرمول انتقال محورها، ممان اینرسی چرخ طیار همراه با وزنه ها را حساب کنید.

$$I = \bar{I} + Md^2 \qquad ۸\text{-}۱\text{-}۴$$

وزن وزنه دوم (هر کدام) $= ۳۲۵۰gr$ وزن وزنه اول (هر کدام) $= ۱۸۵۰gr$

$d =$ فاصله مرکز وزنه تا مرکز دیسک اندازه گیری شود.

۴-۲- ارتعاشات آزاد پیچشی با استهلاک ویسکوزی :

۴-۲-۱- هدف:

تعیین ضریب استهلاک یک مستهلک کننده در یک سیستم پیچشی

۴-۲-۲- تئوری:

یک سیستم ساده ارتعاش پیچشی مستهلک شونده، مطابق شکل زیر را در نظر می گیریم.

شکل ۴-۲-۱ سیستم ارتعاش پیچشی ویسکوز

معادله حرکت دیفرانسیلی سیستم بصورت زیر است :

$$I\frac{d^2\theta}{dt^2} + C_t\frac{d\theta}{dt} + K_t\theta = 0 \qquad ۴-۲-۱$$

$$\ddot{\theta} + a\dot{\theta} + b\theta = 0 \qquad ۴-۲-۲$$

$$a = \frac{C_t}{I} \quad , \quad b = \frac{K_t}{I}$$

در رابطه فوق داریم که:

در اینصورت می توان مقدار c_t (ضریب استهلاک معادل سیستم) را با استفاده از کاهش لگاریتمی ($Logarithmic\ Decrement$) تعیین کرد. روغن C_t

$$\frac{a}{2}t_p = L\left(\frac{y_1}{y_2}\right) = \delta \qquad ۴-۲-۳$$

در رابطه(۴-۲-۳) داریم که :

جدول ۴-۲-۱ مشخصات سسیستم پیچشی

ممان قطبی سطح مقطع میله	$J = \frac{\pi d^4}{32}$
ممان اینرسی فلایویل مخروطی	I
ضریب استهلاک معادل سیستم	c_t
ضریب ارتجاعی پیچشی میله	k_t
مدول یانگ در پیچش	G
طول موثر میله	l
تغییر مکان زاویه ای از موقعیت تعادل	θ
فرکانس طبیعی سیستم معادل	f_n
پریود نوسانی سیستم معادل	$\mathrm{t_p}$
نسبت دو دامنه متناوب	y_1/y_2
کاهش لگاریتمی	δ

۴-۲-۳- شرح دستگاه :

دستگاه آزمایش در شکل (۴-۲-۱) و(۴-۲-۲) نشان داده شده است. سیستم ارتعاش کننده تشکیل شده است از یک فلاویویل مخروطی سنگین (A) که بوسیله محور (B) و گیره (C) به قاب (D) وصل شده است یک ظرف شفاف محتوی روغن (مستهلک کننده) (E) دقیقاً زیر چرخ طیار نصب شده است و بوسیله پیچ تنظیم های (F) می توان آن را (E) بالا و پائین برد و بدین وسیله مقدار استهلاک را تغییر داد.
راهنمای (G) از حرکت جا بجائی چرخ طیار جلوگیری می کند. در قسمت بالائی چرخ طیار مخروطی یک استوانه تعبیه شده است که می توان دور آن کاغذ پیچید و توسط سیستم (ثبت منحنی نمایش را روی کاغذ ثبت کرد) ثبات (K) چنان طراحی شده است که حکم ثبت کننده دارد و با سرعت آهسته ای ارتفاع استوانه (H) را (بالا به پایین) طی می کند. بر روی چرخ طیارنوارهای سفید رنگی کشیده شده است که برای سنجش مقدار فرو رفتن مخروط چرخ طیار در روغن بکار می روند. شکل (۴-۲-۳)

وسایل مورد نیاز:

قاب اصلی – کرونومتر – کولیس – خط کش

شکل ۴-۲-۲ سیستم ارتعاش پیچشی ویسکوز

۴-۲-۴- روش آزمایش :

تذکرمهم : موقع پایین آوردن ظرف روغن مواظب باشید که مغزی (میله رزوه شده) از زیر ظرف روغن باز نشود و ظرف روغن همواره بین حلقه شکل قرار گیرد.

۱- ابتدا سیستم را بصورت آزاد (بدون استهلاک) به نوسان در آورده و توسط کرونومتر پریود نوسان را اندازه گیری نمائید و مقدار ممان اینرسی چرخ طیار مخروطی را تعیین کنید. (مدول یانگ در پیچش برای محور $G = 12 \times 10^6 \, {}^{lbf}/_{in^2}$ در نظر گرفته شود)

۲- بوسیله مهره تنظیم (F) طرف روغن استوانه ای (E) را آنقدر بالا ببرید تا مخروط چرخ طیار تا اولین نوار سفید رنگ به داخل روغن فرو رود.
۳- سیستم ثبات را برای ثبت منحنی ارتعاشی آماده کنید. (قلم را در بالا نگه دارید)
۴- سیستم را در این حالت به نوسان در آورده و منحنی ارتعاشی آن را ثبت کنید. در عین حال پریود نوسان (t_p) را نیز اندازه گیری کنید.
۵- مراحل (۲) تا (۴) را برای دومین، سومین ، ... و آخرین نوار سفید رنگ تکرار کنید.

۶- برای طول مشخصی از کاغذ تثبیت کننده زمان سقوط قلم ثبت کننده را اندازه بگیرید.

۴-۲-۵- خواسته های آزمایش :

۱- با استفاده از منحنی های ارتعاشی و اندازه گیری های انجام شده برای هر حالت مقادیر C_t را بدست آورده و جدولی تنظیم کنید که ستون اول آن (سطح قسمت دیسک مخروطی فرو رفته در روغن) (A) و ستون دوم آن (شعاع متوسط قسمت مخروطی) (r_m) و ستون سوم آن $A.r_m$ و ستون چهارم آن C_t باشد.

۲- منحنی نمایش C_t را بر حسب $A.r_m$ رسم کنید. (r_m همیشه نصف مقدار r است)

۳- نشان دهید که برای تورک مقاوم بخاطر استهلاک روغن در هر حالت رابطه تشابهی زیر برقرار است.

$$T_d \propto f(\mu, \alpha, h^3, \dot{\theta}) \qquad ۴-۲-۴$$

ضریب ویسکوزینه روغن : μ نصف زاویه راس مخروط : α

ارتفاع مخروط در هر حالت : h

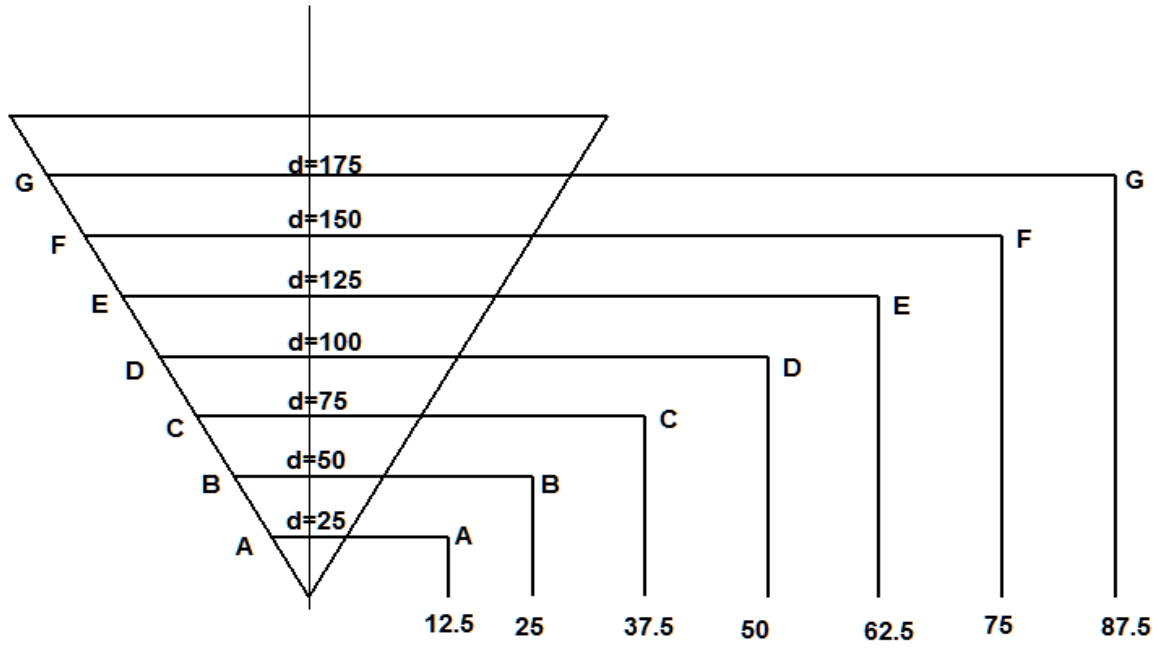
ضمناً از شکل زیر استفاده کنید.

۴- منحنی C_t را بر حسب h^3 رسم کنید.

۵- بر روی نتایج بدست آمده و منحنی ها بحث کنید.

۶- آیا می توان از روی منحنی های ارتعاشی رسم شده پریود ارتعاشات را بدست آورد؟

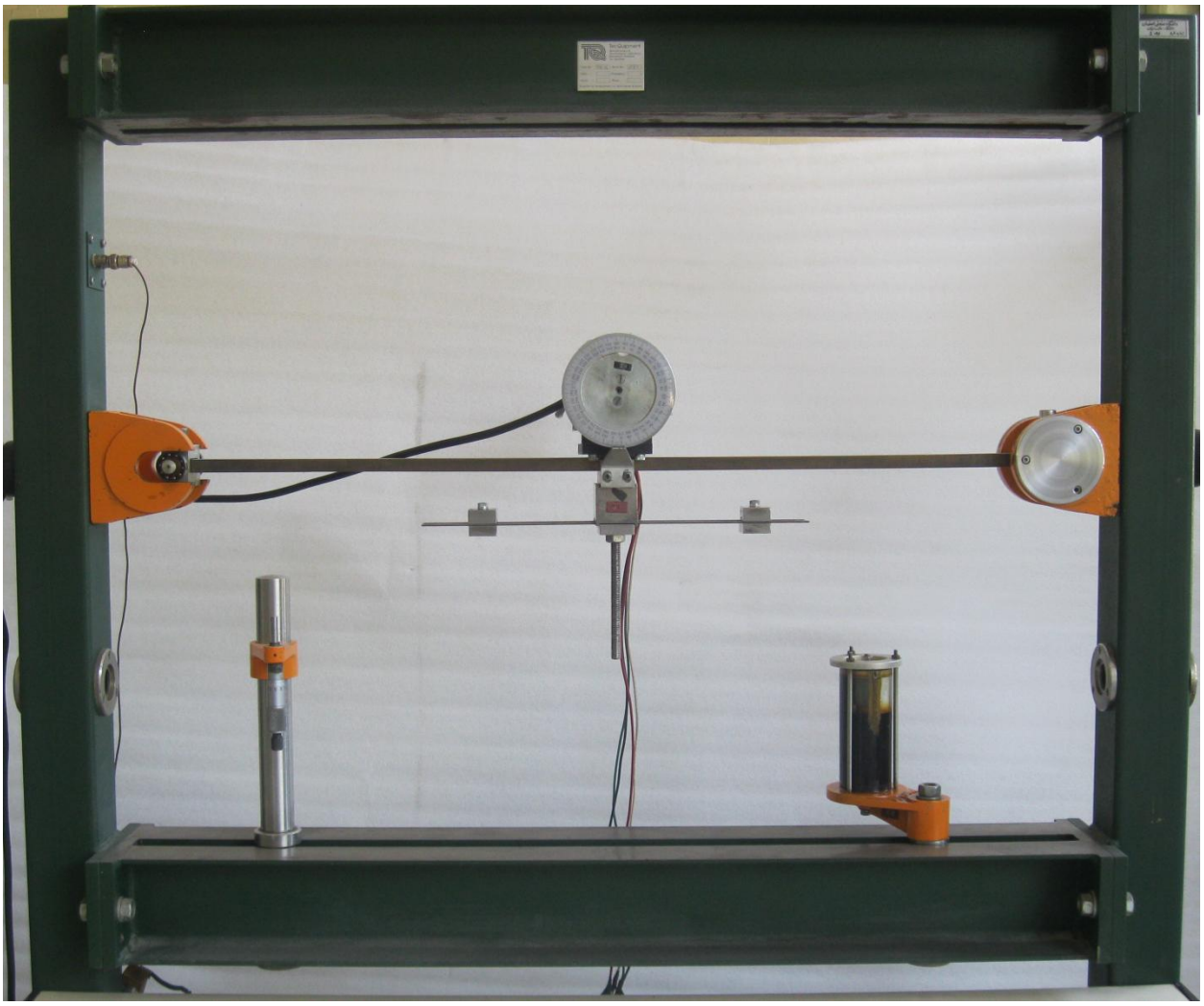
۷- آیا راه بهتری برای ثبت منحنی نمایش ارتعاشی وجود دارد بنظر شما کدام است؟



شکل ۴-۲-۳ چگونگی تعیین مقدار فرورفتگی در روغن

آزمایش شماره ۵ : ارتعاشات عرضی تیرها

Transverse Vibration of a Beam



۵-۱- فرکانس طبیعی یک تیر یا چندین جرم :

۵-۱-۱- هدف:

تحقیق در مورد رابطه دانکرلی $(Dumkerley's\ Rule)$

۵-۱-۲- تئوری:

فرکانس طبیعی یک تیر همراه چندین جرم که ارتعاش عرضی انجام می دهد همانند فرکانس بحرانی یک شافت. با چندین روتور (دیسک) با همان ضریب ارتجاعی است. البته بایستی فرض شود که روتورها (دیسک) دارای ابعاد کوچکی هستند در غیر اینصورت اثرات ژیروسکوپیک وجود خواهد داشت برای حالت ساده ای که تنها یک جرم بر روی تیر قرار گیرد فرکانس طبیعی از رابطه های موجود برای سیستم جرم و فنر قابل محاسبه است. ولی موقعی که دو جرم و بیش از آن بر روی تیر در نقاط مختلف قرار گیرد روش های دیگری از آن جمله (روش دانکرلی) با ید بکار گرفته شود. هرگاه تیری شامل دو جرم M_1 و M_2 در نقاط مختلف باشند فرکانس طبیعی آنرا می توان از رابطه زیر بدست آورد.

$$\frac{1}{f^2}=\frac{1}{{f_b}^2}+\frac{1}{{f_1}^2}+\frac{1}{{f_2}^2} \qquad ۱-۱-۵$$

فرکانس طبیعی سیستم : f فرکانس طبیعی تیر تنها : f_b

فرکانس طبیعی تیر بدون وزن با جرم M_1 : f_1 , فرکانس طبیعی تیر بدون وزن با جرم M_2 : f_2

هرگاه تنها جرم در وسط تیر اضافه شود رابطه زیر برقرار است.

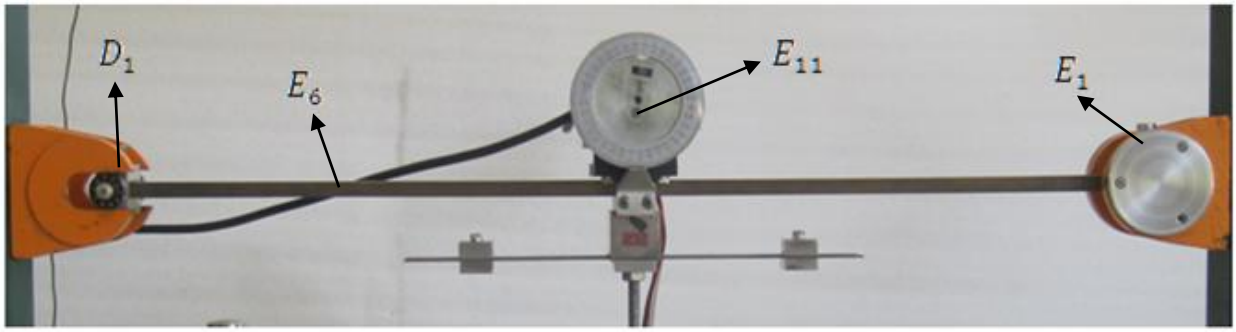
$$\frac{1}{f^2}=\frac{1}{{f_b}^2}+\frac{1}{{f_2}^2} \qquad ۲-۱-۵$$

۵-۱-۳- دستگاه آزمایش و روش آزمایش:

تیر E_6 را به کمک تکیه گاه های D_1 و E_1 نصب شده است تکیه گاه های D_1 و E_1 هر کدام دارای دو بلبرینگ می باشند که امکان دوران تیر E_6 حول تکیه گاه ها در جهت بالا و پایین رفتن را می دهند. تیر در تکیه گاه E_1 می تواند حرکت افقی نیز انجام دهد. موتور E_{11} در وسط تیر با پیچ محکم شده است.کابل موتور را به دستگاه کنترل سرعت وصل نمائید. توسط این دستگاه می توانید نیرویی با فرکانس های مختلف اعمال کنید. با گرداندن دکمه دستگاه کنترل سرعت در جهت عقربه های ساعت سرعت چرخش موتور افزایش یافته و نیروی چرخش غیر بالانس تولید شده توسط دیسک های غیر بالانس زیاد می شود بهمان نسبت که سرعت زیاد می شود تیر شروع به نوسانات عرضی می نماید و دامنه نوسانات تولید شده زیادمی شود تا اینکه به اولین قله در اولین فرکانس می رسد. وزنه های مختلف را از وسط تیر زیر موتور (دو تادوتا) قرار دهید. سرعت را چنان تنظیم کنید که ارتعاش تیر بحالت تشدید برسد. فرکانس تشدید و یا فرکانس طبیعی سیستم (چرا؟) را یادداشت کنید. برای پیدا کردن مقدار دقیق سرعت بحرانی، لازم است دکمه دستگاه کنترل سرعت را به آهستگی تغییر داده و دامنه نوسان را مشاهده کرد و در جائیکه دامنه و صدای حاصله به بیشترین مقدارش رسیده است خوانده شود این آزمایش را برای وزنه های مختلف و حداقل ۶ بار تکرار کنید (ابتدا بدون وزنه و سپس دو وزنه اضافی بعد از آن چهار وزنه اضافی و پس از آن شش وزنه اضافی و الی آخر)

جدول ۵-۱-۱ مشخصات تیر

جرم تیر	جرم تیر+جرم موتور+جرم آویز	h	b	l	E
۲/۰۵ kg	۴/۴ kg	۱/۲۷ cm	۲/۵۴cm	۷۸/۵cm	۲/۱۰۹ × ۱۰^{۶}



شکل ۵-۱-۱ سیستم ارتعاش عرضی تیر

۵-۱-۴- خواسته های آزمایش:

۱- منحنی $\frac{1}{f^2}$ را بر حسب جرم روی تیر رسم کنید.

۲- از روی منحنی فوق فرکانس طبیعی تیر را بدون هر گونه جرم اضافه بدست آورید.

۳- فرکانس طبیعی تیر را با فرکانس طبیعی تیر که از فرمول $\frac{1}{{f_b}^2} = \frac{\pi^2}{2}\sqrt{\frac{EI}{m_0 l^3}}$ بدست می آید و مقایسه کنید. جرم تیر : m_0

۵-۲- جاذب ارتعاشات بدون مستهلک کننده ویسکوزی :

۵-۲-۱- هدف :

بررسی اثر جاذب ارتعاشات روی یک سیستم (تیر) شامل جرم و فنر

۵-۲-۲- تئوری :

چون ارتعاشات در بسیاری از جاها برای سیستم ها مطلوب نیست. لذا می توان در مواردی با اضافه نمودن یک سیستم فرعی ارتعاشی به سیستم اصلی از ارتعاشات زیاد آن کاست این سیستم فرعی می تواند جرم – فنر و یا پاندول باشد. در حقیقت افزودن سیستم فرعی سبب می شود که سیستم درجات آزادیش بیشتر شود و دامنه فرکانسی که در آن محدوده سیستم ارتعاشاتش خطرناک است به عقب و یا به جلو اندازد. تئوری بیشتر آن را می توانید در قسمت های دیگر این دستور کار و یا در کتاب های ارتعاشات پیدا کنید. فرمول زیر در این حالت برقرار است.

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{3EI}{ml^3}} \qquad ۵-۲-۱$$

که در آن:

فرکانس طبیعی سیستم فرعی دا اصلی (تیر و موتورتنها) : f

جرم هر کدام از جرم های سیستم فرعی : m مدول یانگ تیر فنری سیستم فرعی : E

ممان اینرسی سیستم فرعی : I فاصله هر کدام از جرم ها از وسط تیر فنری : l

۵-۲-۳- شرح دستگاه و روش آزمایش:

این آزمایش در جذب ارتعاشی یک تیر یک سر در گیر استفاده می شود. در قسمت پائین موتور، دو جرم مساوی را بیک تیر فنری وصل کرده و بدین ترتیب برای هر فرکانس از موتور (نیروی اعمالی بر روی تیر اصلی) می توان جرم مناسبی انتخاب کرد تا ارتعاش سیستم اصلی از بین برود. برای انجام این آزمایش، تیر اصلی را تحت فرکانسی که موجب تشدید شده است قرار دهید و سپس دو جرم سیستم فرعی را آنقدر بطور همزمان و متقارن جابجا کنید تا تقریباً ارتعاش سیستم اصلی از بین برود (۹۵% ارتعاش را بگیرد) در این صورت فاصله دو جرم سیستم فرعی را اندازه گیری کنید. شکل ۵-۱-۱ طرز قرار گرفتن سیستم فرعی روی تیر را نشان می دهد.

۵-۲-۴- خواسته های آزمایش:

۱- مقدار f را از روی فرمول (۵-۲-۱) بدست آورید و با آنچه از راه آزمایش بدست آمده است مقایسه کنید.

۲- به چه علت در حالیکه ارتعاش سیستم اصلی (تیروموتور) در اولین مود توسط سیستم فرعی (دو جرم و تیر فنری زیر سیستم اصلی) گرفته می شود فرکانس طبیعی آن دو یکی می شوند.

۳- یکی از موارد کاربرد عملی جاذب ارتعاشات را در صنعت ذکر کنید.

۵-۳- ارتعاشات عرضی تیر همراه با مستهلک کننده ویسکوزی :

۵-۳-۱- هدف :

بررسی اثر مستهلک کننده ویسکوزی روی ارتعاشات عرضی و پیدا کردن دامنه و اختلاف فاز ارتعاش حاصل

۵-۳-۲- تئوری :

نیروی غیر بالانس حاص از چرخش دیسک غیر بالانس موتور سبب ارتعاش عرضی تیر می شود که در این حالت مستهلک کننده ویسکوزی تیر روی تیر تعبیه شده است و تیر در اثر اعمال نیروی اجباری شروع به ارتعاش می کند. و می دانیم بعد از مدتی اگر نیروی اجباری از نظر مقدار ثابت باشد حرکت تیر پایدار می شود و در این صورت ارتعاش عرضی تیر تحت فرکانس نیروی اجباری بوده منتها با آن مقداری اختلاف فاز دارد. رابطه های ریاضی این قسمت را می توان در قسمت های دیگر و یا کتاب های ارتعاشات پیدا کرد.

۵-۳-۳ شرح دستگاه و روش آزمایش :

دراین قسمت مستهلک کننده (D_2) را توسط پیچهای مربوط به پایه (E_2) نصب کرده و اتصال دهنده (E_5)رابا میکرومتر در تماس نزدیک قرار دهید تا مدار استروبوسکوپ $(Stroboscobe)$ کامل گردد. خط زمین استروبوسکوپ از طریق قاب اصلی و اتصال دهنده (E_5) قطع گردیده است. درحالتیکه تیر هیچگونه ارتعاشی ندارد میکرومتر را آنقدر بچرخانید تا تماس برقرار شود و در این صورت استروبوسکوپ در اثر بستن خط زمین اش تخلیه الکتریکی می شود و در همین لحظه میکرومتر را بخوانید و اندازه مربوطه را یادداشت کنید. این اندازه مبنای اندازه گیره های بعدی خواهد بود. سپس میکرومتر را پایین بیاورید. آنگاه با چرخش دکمه دستگاه کنترل سرعت تیر را به ارتعاش در آورید. موقعیکه کاملاً ارتعاش تیر پایدار شد، مجدداً میکرومتر را بالا ببرید تا تماس برقرار شود. عدد روی میکرومتر را مجدداً بخوانید. اختلاف این عدد و عدد قبلی همواره مقدار دامنه ارتعاش را نشان می دهد. برای اندازه گیری اختلاف فاز استروبوسکوپ را بالا ببرید و روی صفحه دیسک (E_{11}) نورش را بیاندازید و درجه ای که روبروی علامت وجود دارد بخوانید از روی این عدد می توانید با ($\pm ۹۰^{\circ}$) اختلاف فاز حرکت ارتعاشی را بدست آورید. مراحل فوق را با اعمال فرکانس های مختلف تکرار کنید حداقل ۷-۶ فرکانس باشد (بهتر است برای سه الی چهار فرکانس زیر فرکانس بحرانی و سه الی فرکانس بالای فرکانس سیستم عمل شود.)

آزمایش را برای سه حالت کلی انجام دهید.

۱- بدون هر گونه مستهلک کننده ویسکوزی

۲- با مستهلک کننده کم (سوراخ های صفحات ویسکوز روبروی هم باشند).

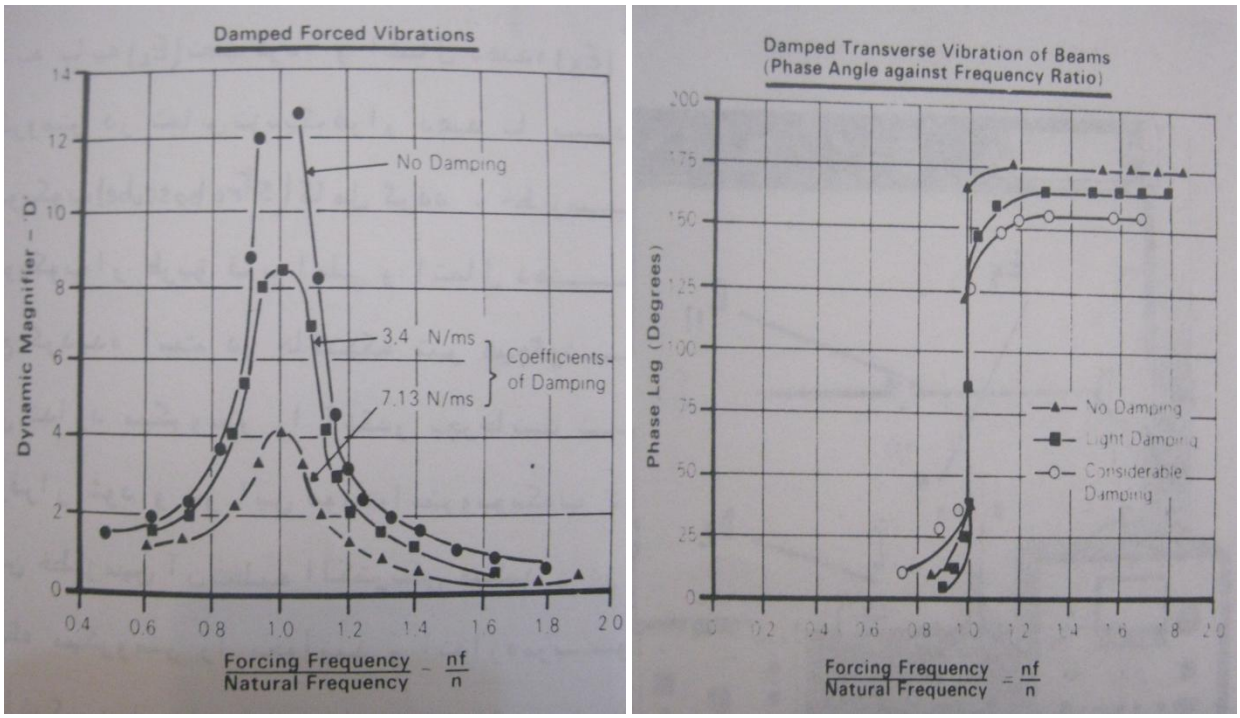
۳- با مستهلک کننده زیاد (سوراخ های صفحات ویسکوز روبروی هم نباشند).

۵-۳-۴- خواسته های آزمایش :

۱- منحنی های دامنه و اختلاف فاز را برای سه حالت کلی روی یک دستگاه مختصات رسم کنید.

($x(mm)$ و $\phi°$ را بر حسب $\frac{\omega}{\omega_n}$ رسم کنید)

۲- منحنی های فوق را با منحنی های تئوریک مقایسه کنید و اگر اختلافی وجود دارد دلیل آنرا ذکر نمائید.



شکل ۵-۳-۱ نمودار فاز و دامنه بر حسب فرکانس

آزمایش شماره ۶ : ارتعاشات پیچشی

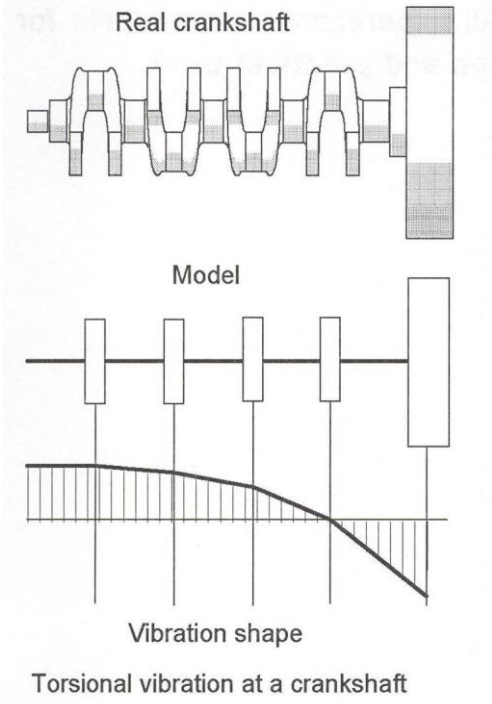
۶-۱- اهداف آموزشی

تئوری ارتعاشات مبحثی پیچیده است که نیاز به معلومات پایه‌ای ریاضیات و فیزیک دارد. با این وجود، فهم پایه‌ای این موضوع یک بخش لازم برای حرفه‌های فنی است. انجام آزمایش‌های واقعی شیوه‌ی بسیار مناسبی برای کمک به دانشجویان جهت آشنایی با این شاخه از فیزیک است. دستگاه ارتعاش پیچشی TM140 برای این منظور طراحی شده که حوزه وسیعی از مباحث مربوط به ارتعاشات پیچشی را در برمی‌گیرد. این آزمایش‌ها شامل موارد زیر است

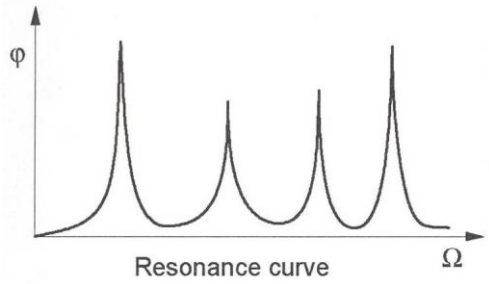
- تعیین سختی پیچشی
- تعیین ممان اینرسی جرمی
- بررسی ارتعاشات پیچشی آزاد و اجباری
- بررسی ارتعاشات پیچشی میرا شده
- مطالعه پدیده تشدید
- مطالعه ارتعاشات پیچشی سیستم چند جرمی

دامنه ارتعاشات توسط حسگر سنجش زاویه اندازه گیری شده و به صورت سیگنال الکتریکی در اسیلوسکوپ یا کامپیوتر نمایش داده می شود.

هر بخش از آزمایش های موجود در این دستورالعمل با یک تئوری مقدماتی شروع می شود که موارد مهم از موضوع مورد نظر مانند معادله حرکت، فرکانس طبیعی، نسبت میرایی، تشدید، شکل مود و غیره را دربر می گیرد که با روش تجربی صحت سنجی می شوند. این موضوع ارتباط بین تئوری و تجربه را فراهم می کند که برای فهم دقیق این شاخه پیچیده مورد نیاز است.



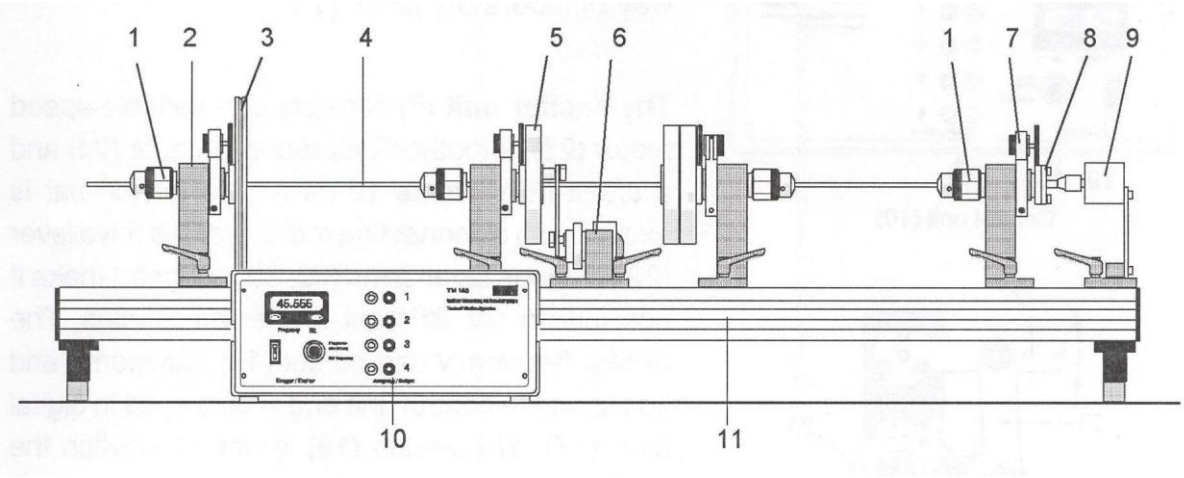
Torsional vibration at a crankshaft



شکل ۶-۱ فاز بر حسب فرکانس

۶-۲- تشریح جزئیات فنی دستگاه

دستگاه شکل ۶-۲ شامل پایه آلومینیمی (۱۱)، لوازم جانبی و واحد کنترل (۱۰) است. به پایه دستگاه کفشک‌های لاستیکی وصل شده است که از انتقال ارتعاش به میز کار جلوگیری می کنند. لوازم جانبی را در هر موقعیتی از دستگاه می توانید قرار دهید. یکی از اجزای مرکزی دستگاه، میله پیچشی (۴) است. این میله روی یاتاقانهای (۲) نصب شده است.



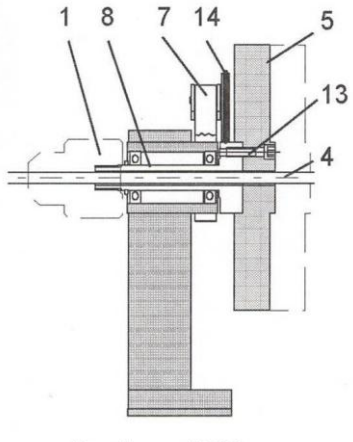
شکل ۶-۲ دستگاه آزمایش

این دستگاه شامل محرک های چرخشی (۸) است که روی بلبرینگ نصب شده و توسط سه نظام میله پیچشی را نگه می دارد. دیسکهایی با اینرسی متفاوت (۵ و ۳)، قرقره ریسمان، دمپر (۹) و واحد تحریک (۶) می تواند به محرک‌های چرخشی متصل شوند.

حسگر سنجش زاویه (۷) متصل شده به یاتاقانها اجازه اندازه گیری زاویه چرخش را می دهد. این حسگرها به صورت یک پتانسیومتر عمل می کنند که از طریق چرخ (۱۴) چرخش محرکها را اندازه می گیرند.شکل ۶-۳

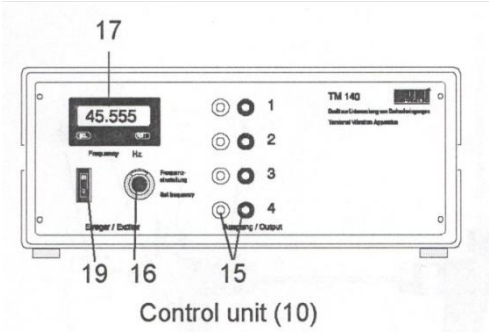
پتانسیومترها به واحد کنترل (۱۰) متصل می شوند تا سیگنالها را اندازه گیری کنند.

واحد تحریک (۶) شامل موتور سرعت متغیر (۲۳)، سیستم کاهش دور (۲۴) و لنگ (۲۰) با کورس 10mm است. میله پیچشی توسط میله رابطه (۲۱) و اهرم محرک (۲۲) تحریک می شود. با تغییر طول بازوی میله رابط (۶۰، ۸۰ و ۱۰۰mm) می‌توان دامنه تحریک را تنظیم کرد. فرکانس تحریک با سوئیچ (۱۶) از ۰ تا ۲۰ Hz روی واحد کنترل قابل تنظیم است و مقدار آن نیز به صورت دیجیتال (۱۷) نمایش داده می‌شود. سوئیچ (۱۹) برای روشن و خاموش کردن دستگاه تحریک می باشد.

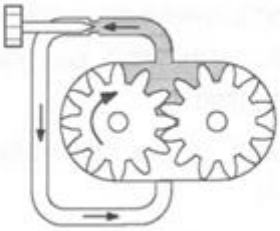


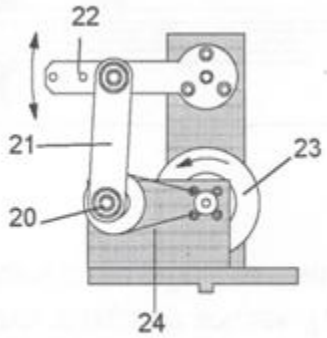
شکل ۶-۳ بلبیرینگ های قسمت دوم

واحد میرا کننده (۹) شامل یک پمپ چرخدنده ای با مقاومت در مقابل برگشت جریان روغن می باشد. پمپ با روغن سیلیکونی با غلطت بالا پر شده است. اثرات میرایی مستقل از جهت چرخش بوده و محدودیتی برای زاویه چرخش ندارد.



Control unit (10)


Damper (9)



Exciter unit (6)

۶-۳- دستورالعمل های راه اندازی

۶-۳-۱- هشدارهای ایمنی

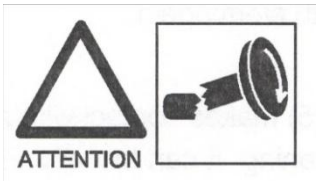
پیش از راه اندازی دستگاه، دستورالعمل های آزمایش را با دقت بخوانید. پیش از انجام آزمایش، دانشجویان باید با روش کار و موارد ایمنی آشنا شده باشند.

خطر

از قسمتهای چرخان دوری کنید. هنگام کار، مکانیزم تحریک آن را لمس نکنید.

خطر برق گرفتگی

قبل از باز کردن واحد کنترل، برق آن را قطع کنید.
تنها افزاد مجاز می توانند واحد کنترل را باز کرده و روی سیستم الکتریکی آن کار کنند.



خطر شکستگی

در حالت تشدید، افزایش دامنه می تواند منجر به شکستن شافت و خرابی قطعات شود. سعی کنید با کمترین دامنه تحریک ممکن کار کنید. در حالت تشدید به دقت به دستگاه نگاه کنید و در صورت وقوع شکستگی آن را خاموش کنید.

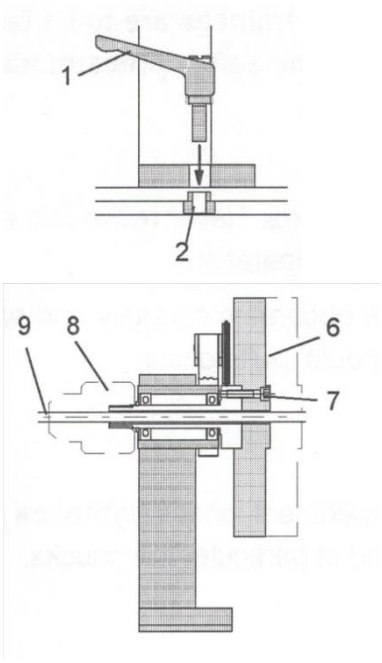
توجه
قبل از انجام آزمایش، از محکم بودن تمام قطعات و پیچ ها، به ویژه سه نظام ها مطمئن شوید.

توجه
هنگام کار کردن دستگاه، محل آزمایش را ترک نکنید.

۶-۳-۲- نکات مورد توجه در بستن دستگاه

۶-۳-۲-۱- بستن پایه یاتاقانها

- پایه یاتاقانها روی بستر دستگاه توسط اهرمهای شماره (۱) بسته می شوند.شکل ۶-۴
- پیچ (۱) را به مهره واقع در شیار بستر دستگاه (۲) ببندید.
- دیسک (۶)، واحد تحریک یا دمپر به طور مستقیم توسط سه پیچ M۵ (۷) به پایه یاتاقانها بسته می شوند. همچنین ترکیبی از دیسکها را می توان استفاده کرد. اتصال میله پیچشی (۹) توسط سه نظام (۸) انجام می گیرد.



شکل ۶-۴ بلبیرینگ ها

۶-۳-۲-۲- بستن واحد تحریک

- اهرم محرک (۱) را با سه پیچ M۵ (۲) به فلنچ محرک (۳) پایه یاتاقان ببندید.
- واحد تحریک (۴) را روی بستر دستگاه در موقعیت مناسب قرار دهید.
- پیچهای پایه (۵) را داخل پایه قرار داده ولی آنها را سفت نکنید.
- میله رابطه (۶) با پیچ (۷) به لنگ و اهرم محرک وصل کنید. در صورت نیاز واحد تحریک را تنظیم کنید. انتخاب نقطه لولا (۸) روی اهرم محرک سه دامنه تحریک مختلف را به صورت زیر به دست می دهد:

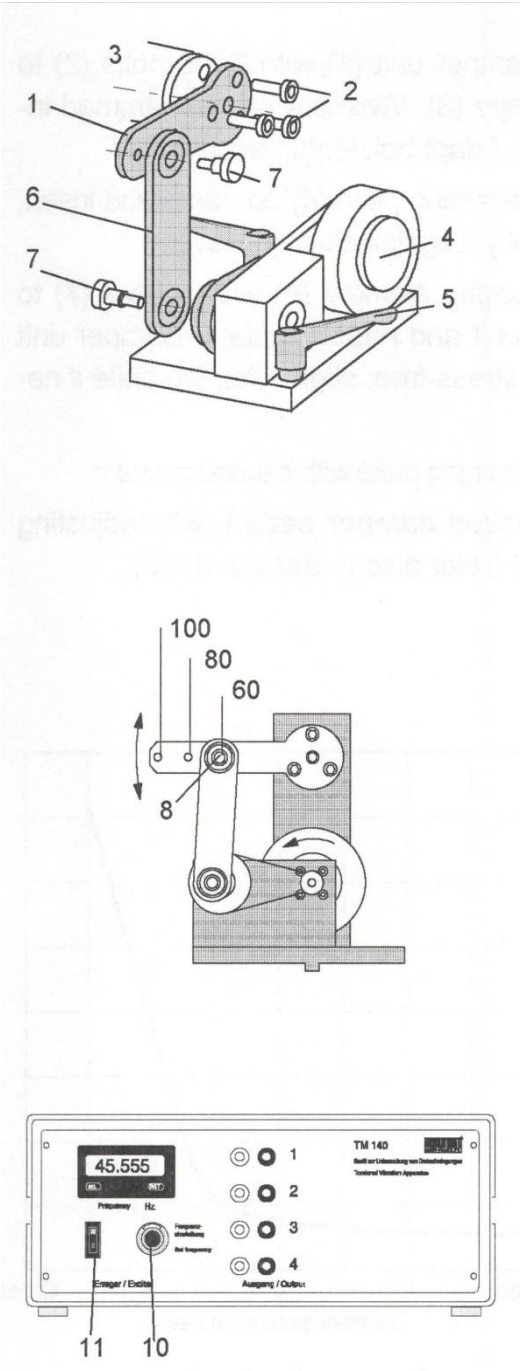
$$\alpha_0 = 2/4^\circ \qquad :60\text{mm}$$

$$\alpha_0 = 1/8^\circ \qquad :80\text{mm}$$

$$\alpha_0 = 1/4^\circ \qquad :100\text{mm}$$

- پیچهای پایه (۵) را محکم کنید.
- واحد تحریک را به دستگاه کنترل وصل کنید.
- کلید تنظیم فرکانس (۱۰) را روی صفر قرار دهید. شکل ۶-۵
- واحد تحریک (۱۱) را روشن کنید.

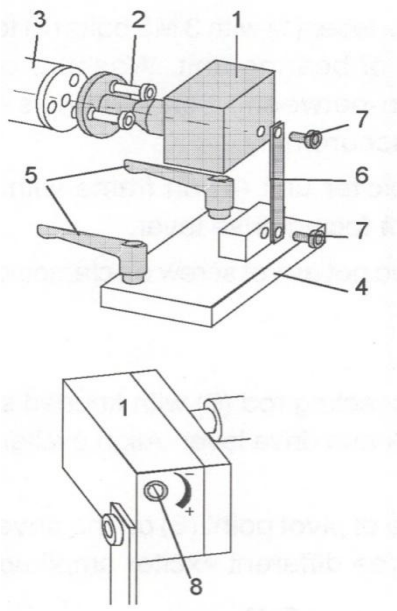
اگر با این آزمایش آشنا نیستید، بهتر است با دامنه های کوچک شروع کنید.



شکل ۶-۵ واحد تحریک

۶-۳-۲-۳- بستن دمپر

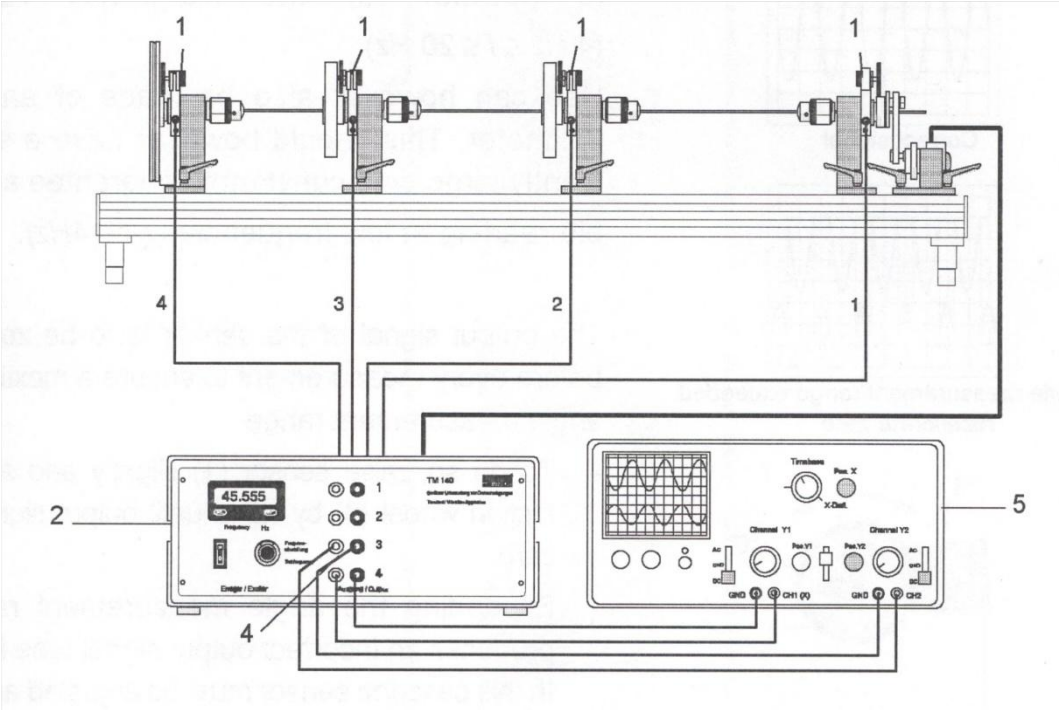
- دمپر (۱) را با سه پیچ M۵ (۲) به فلنچ (۳) وصل کنید
- صفحه نگهدارنده (۴) را روی بستر دستگاه قرار دهید و پیچ‌ها را در محل خودشان بگذارید ولی آنها را سفت نکنید. شکل ۶-۶
- پایه نگهدارنده (۶) را با پیچ (۷) به دمپر و صفحه نگهدارنده (۴) متصل کنید. پایه دمپر باید آزاد باشد، در صورت نیاز آن را تنظیم کنید تا هیچ تنش ناخواسته‌ای به دمپر وارد نشود.
- صفحه و پایه نگهدارنده را محکم کنید.
- مقدار مناسب میرایی را با تنظیم پیچ (۸) انتخاب کنید.



شکل ۶-۶ دمپر و نحوه ی بستن آن

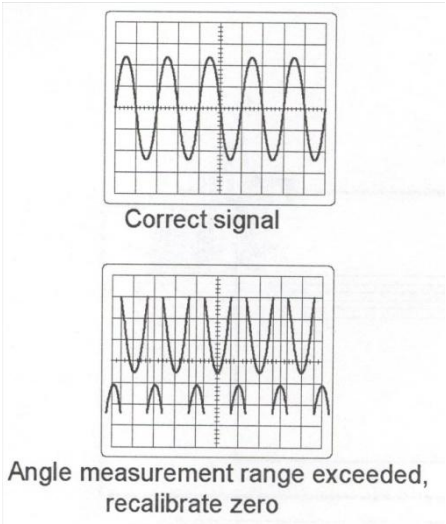
۶-۳-۳- اندازه گیری دامنه و فاز

دامنه ارتعاشات بوسیله حسگرهای سنجش زاویه اندازه‌گیری می‌شوند. این حسگرها (۱) بر روی پایه یاتاقان‌ها نصب شده و مقدار چرخش محرک ها را توسط یک چرخ اصطکاکی اندازه‌گیری می‌کنند. حسگرها از واحد کنترل (۲) تغذیه می شوند.



شکل ۶-۷ سیستم کنترل دستگاه

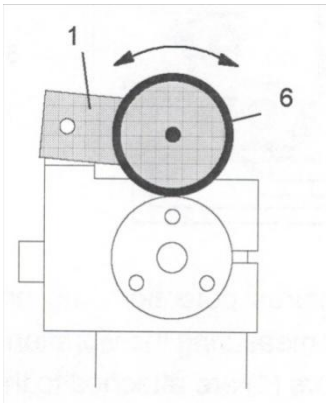
- حسگرها محدودیت زاویه چرخش ندارند. زاویه چرخش مکانیکی 360° و زاویه چرخش الکتریکی 345° است.
- اندازه حساسیت حسگرها $0/03\ V/^\circ$ است.
- دستگاه اندازه گیری به خروجی های (۴) وصل می شوند.
- دستگاه اندازه گیری بایستی حداقل یک امپدانس ورودی $1M\Omega$ داشته باشد.



استفاده از یک اسیلوسکوپ با محدوده فرکانس $(4Hz \le f \le 20Hz)$ مناسب است. شکل ۶-۷

همچنین از یک ولتمتر Ac می توان استفاده کرد. در هر صورت این ولت متر باید دارای ثابت زمانی بزرگی باشد تا بتوان فرکانسهای پایین $(f \le 4Hz)$ را بخواند.

شکل ۶-۸ نمایه صحیح و غلط سیگنال نمایشی



سیگنال خروجی حسگرها قبل از اندازه گیری باید صفر شود تا از حداکثر اندازه گیری اطمینان پیدا کنیم.

- برای انجام این کار، حسگر (۱) را بلند کرده و چرخ اصطکاکی (۶) را توسط دست بچرخانید تا سیگنال خروجی صفر شود.
- گذشتن از محدوده زاویه اندازه گیری باعث ایجاد سیگنال خروجی غلط می شود. در این حالت حسگر باید دوباره تنظیم شود.شکل ۶-۸

تغییر دامنه، فرکانس، بهره و انتقال فاز را می توان در اسیلوسکوپ یا مانیتور خواند. دامنه ارتعاش از مقدار تغییر قله به قله به دست می آید:

$$\hat{\phi} = \frac{\phi_{pp}}{2}$$

فرکانس را از پریود T می توان محاسبه کرد، فاصله T را تقاطع دو نقطه متناظر با محور افقی به دست می‌آید:

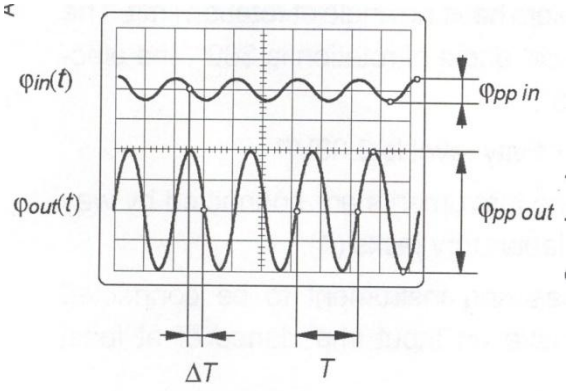
$$f = \frac{1}{T}$$

ضریب بهره به صورت نسبت متغیر خروجی به ورودی تعریف می شود.

$$V = \frac{\hat{\phi}_{out}}{\hat{\phi}_{in}}$$

انتقال (شیفت) فاز، نسبت اختلاف زمانی بین نقاط صفر دو سیگنال است که دارای فرکانس و پریود برابر هستند: شکل ۶-۹

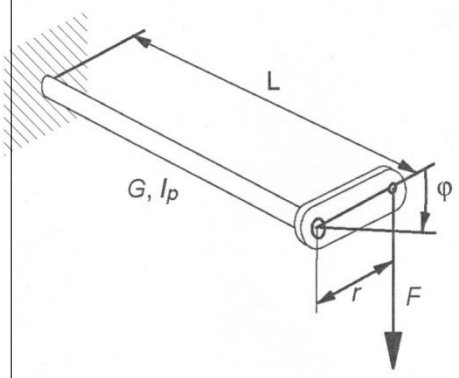
$$\psi = \frac{\Delta T}{T} 2\pi$$



شکل ۶-۹ سیگنال خروجی و مشخصات آن

آزمایش ۶-۱- تعیین سختي پيچشي

۶-۱-۱ اصول مقدماتي



سختي پيچشي يکي از پارامترهاي مهم در ارتعاشات مي‌باشد. اين آزمايش براي تعيين سختي پيچشي يک ميله و مقايسه آن با نتايج تئوري طراحي شده است.

زاويه پيچشي يک ميله گرد عبارت است از:

$$\phi = \frac{M_d L}{G I_p} \qquad ۱-۶$$

که در آن

جدول ۶-۱ پارامتر های فرمول ۶-۱

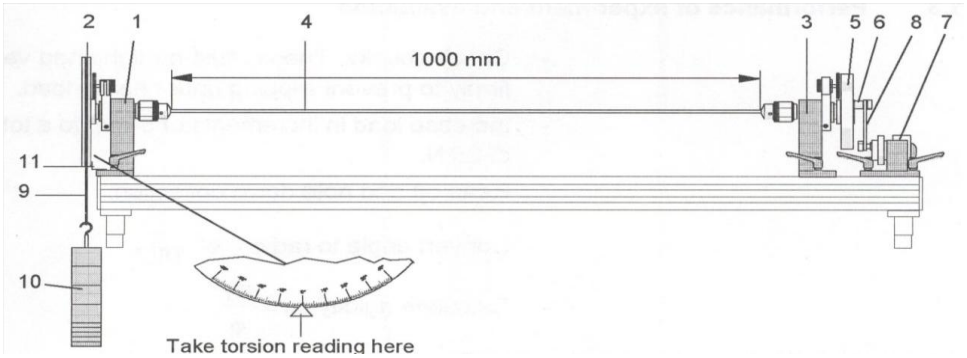
گشتاور	M= f.r
مدول برشي	G
ممان سطح قطبي	$I_p = \frac{D^4 \pi}{32}$
طول ميله	L

بنابراين سختي عبارت است از:

$$c_{\phi} = \frac{M_d}{\phi} = \frac{GI_p}{L} = \frac{GD^4\pi}{32L}$$

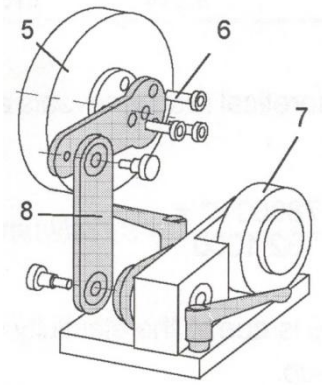
۲-۶

۶-۱-۲ تنظيم دستگاه

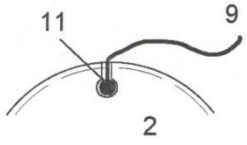


شكل ۶-۱۰ تنظيم كردن دستگاه

۱- تكيه گاه (۱) مطابق شكل۶-۱۰ در انتهاي سمت چپ بستر دستگاه بسته شود.
۲- ديسک بزرگ (۲) را با پيچ هاي مربوطه به فلنج ببنديد. توجه داشته باشيد كه قسمت مدرج مقابل شاخص قرار گيرد.
۳- تكيه گاه (۳) را با فاصله ۱۰۰۰mm بين دو سه نظام در سمت راست ببنديد.
۴- ميله (۴) را درون سه نظام قرار داده و سه نظام سمت راست را محكم نماييد.
۵- ديسک كوچک (۵) و بازوي محرک (۶) را به فلنج سمت راست مطابق شكل مقابل ببنديد.



۶- واحد تحريک (۷) را در انتهاي سمت راست بستر قرار دهيد. لنگ و بازوي محرک (۶) را توسط ميله رابط به هم متصل نماييد. واحد تحريک را در جاي خود محكم كنيد. اين كار باعث گيردار شدن انتهاي سمت راست ميله مي شود و در طي آزمايش موتور محرک خاموش است.
۷- ساچمه انتهاي ريسمان (۱۱) در شيار ديسک بزرگ (۲) قرار دهيد و ريسمان (۹) را در شيار ديسک بپيچيد.



۸- ديسک بزرگ را طوري بچرخانيد كه علام شاخص مقابل عدد صفر ري ديسک قرار گيرد و سه نظام سمت چپ را محكم نماييد.
۹- قلاب وزنه (۱۰) را به انتهاي ديگر ريسمان بياويزيد.

۶-۱-۳ انجام آزمایش

۱- سه نظام ها را چک کنید که کاملاً محکم شده باشند تا میله داخل آنها حرکت نکند.
۲- وزنه ها را از ۵N تا ۲۰N به قلاب آویزان کنید.
۳- هر بار زاویه انحراف را خوانده و جدول ۶-۲ را تکمیل نمایید.

جدول ۶-۲ نتایج حاصل از آزمایش

r = 110 mm, D = 6 mm, G=76000			
Force in N	Angle ϕ in °	Angle ϕ in rad	Rigidity ϕ in N mm/rad
5			
10			
16			
20			

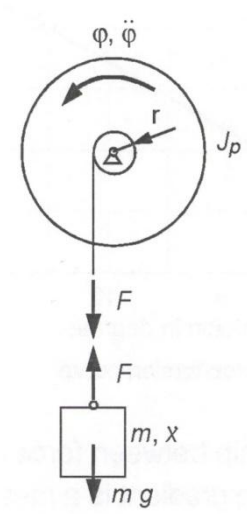
۴- مقدار سختي را از رابطه تئوري محاسبه كرده و با نتيجه آزمايش مقايسه نماييد. دليل اختلاف بين مقدار آزمايش و تئوري چيست؟
۵- نمودار نيرو برحسب زاويه پيچشي را رسم نماييد. شيب نمودار بيانگر چيست؟ آيا رابطه خطي بين نيرو و پيچش برقرار است؟

۶-۲- تعيين ممان اينرسي جرمي ديسک

۶-۲-۱- اصول مقدماتي

يكي ديگر از پارامترهاي مهم در ارتعاشات پيچشي يک سيستم، ممان اينرسي جرمي و يا لختي دوراني است. اين آزمايش براي تعيين لختي دوراني دو ديسک و مقايسه آن با نتايج تئوري طراحي شده است. ممان اينرسي جرمي با انجام آزمايش شتاب‌گرفتن ديسک، تعيين مي‌شود. در اثر نيروي وزن در انتهاي بازوي اهرم، گشتاور محرکی ایجاد می‌شود که باعث شتاب‌گرفتن يكنواخت ديسک مي شود. شكل ۶-۱۱
معادله حرکت دیسک عبارت است از

$$J_p\ddot{\phi} = Fr \qquad ۳-۶$$



شکل ۶-۱۱ نحوه ی محاسبه ی ممان اینرسی

و معادله حرکت جرم آویزان به صورت زیر است

$$m\ddot{x} = mg - F \qquad ٤-٦$$

رابطه سينماتيكي بين حركت جرم و ديسک عبارت است از

$$\ddot{x} = r\ddot{\phi}$$

٥-٦

بنابراين معادله حركت كلي به صورت زير بدست مي‌آيد

$$(J_p + mr^2)\ddot{\phi} = mg\,r$$

٦-٦

در رابطه بالا مقدار mr^2 در مقايسه با ممان اينرسي خيلي كوچک است. بنابراين از آن صرفنظر مي‌شود. پس

$$J_p\ddot{\phi} = mg\,r = Fr \quad \text{يا} \quad \ddot{\phi} = \frac{Fr}{J_p}$$

٧-٦

با دو بار انتگرال گيري داريم

$$\phi = \frac{Frt^2}{2J_p}$$

٨-٦

با جايگذاري فاصله و مرتب كردن رابطه، ممان اينرسي به دست مي آيد

$$J_p = \frac{Fr^2t^2}{2S}$$

٩-٦

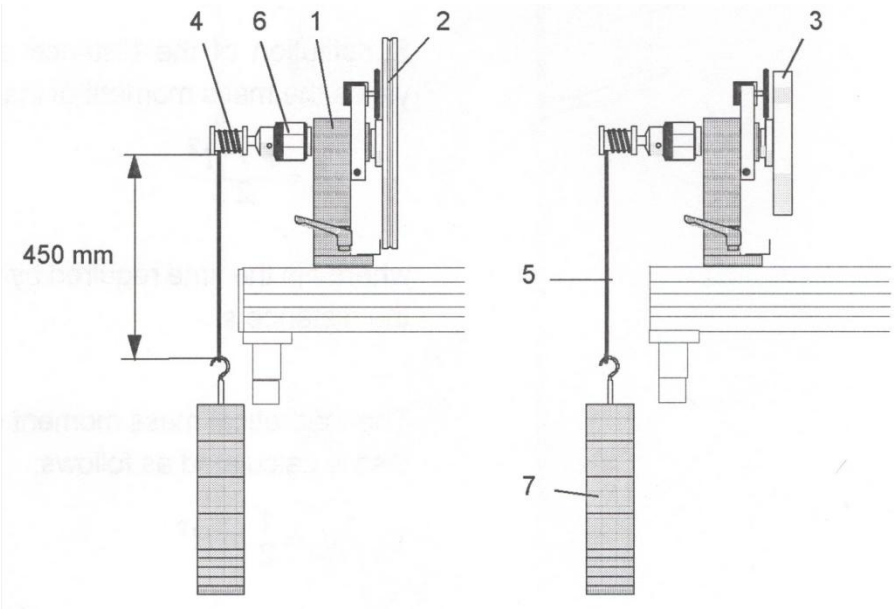
كه t زماني است كه وزنه فاصله S را طي مي كند. رابطه ممان اينرسي تئوري يک ديسک توپر به صورت زير مي‌باشد

$$J_p = \frac{1}{2}mR^2$$

١٠-٦

كه m جرم و R شعاع ديسک است

٦-٢-٢ تنظيم دستگاه



شكل ٦-١٢ نحوه ی تنظيم دستگاه

۱- تکیه گاه (۱) را مطابق شکل ۶-۱۲ در انتهاي سمت چپ بستر ببندید.
۲- دیسک بزرگ (۲) را به فلنچ ببنیدید.
۳- قرقره (۴) را با ریسمان (۵) مطابق شکل به سه نظام ببندید.
۴- نخ را به تعداد ۱۴ دور حول قرقره بپیچید. توجه داشته باشید که نخ روي هم پیچیده نشود.

۶-۲-۳ انجام آزمایش

اولین گام در این آزمایش تعیین نیروي اصطکاک است.
۱- قلاب حامل وزنه ها را از نخ آویزان کنید.
۲- نخ را حول قرقره پیچیده و قلاب را رها کنید و حرکت آن را چک کنید.
۳- اگر قلاب حرکت نکرد وزنه ۱N را اضافه کنید.
با این آزمایش مقدار نیروي مورد نیاز براي حرکت دیسک را مشخص مي‌کنید. این نیرو را باید از نیروي اصلي کم کنید.
۴- سپس وزنه ۵N را اضافه کنید.
۵- نخ را با توجه به مطالب گفته شده قبلي حول قرقره بپیچید و دیسک را نگه دارید.
۶- دیسک را رها کرده و زمان برخورد دیسک به زمین و فاصله نقطه شروع تا برخورد به زمین را اندازه بگیرید.
۷- این آزمایش را براي دیسک کوچک نیز انجام دهید و جدول ۶-۳ را کامل نمایید.

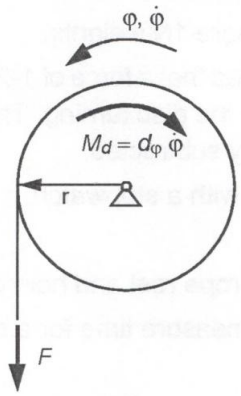
جدول ۶-۳ اندازه گیری ممان اینرسی

اندازه گیري ممان اینرسي جرمي (MMI)						
R = 5 mm S= 450 mm						
Disk	Force F in N	Friction force in N	Corr. Force F in N	Time t is S	MMI Measured $(kgm)^2$	MMI Calculated in $(kgm)^2$
Larg						
Small						

حرکت چرخشي شتابدار را مي توان در رایانه یا اسیلوسکوپ نیز مشاهده کرد. در اینجاست که سیگنالهاي دندانه‌اره‌اي با فرکانس افزایشي دیده مي‌شوند. پریود حرکت بیانگر زمان لازم براي یک دور چرخش است.

۶-۳ تعيين ثابت ميرايي

۶-۳-۱ اصول مقدماتي



اين آزمايش براي تعيين ثابت ميرايي دمپر طراحي شده است. بدين منظور، دمپر با ممان ثابت $F.r$ كار كرده و سرعت چرخشي $\dot{\phi}$ حاصل اندازه‌گيری مي شود. ممان دمپر متناسب با سرعت چرخشي است

$$M_d = d_\phi \dot{\phi} \qquad ۶-۱۱$$

معادله حركت به صورت زير بيان مي شود

$$J_p \ddot{\phi} = -M_d + Fr = -d_\phi \dot{\phi} + Fr \qquad ۶-۱۲$$

از طرفي با فرض سرعت ثابت

$$\ddot{\phi} = 0 \qquad ۶-۱۳$$

بنابراين ثابت ميرايي برابر است با

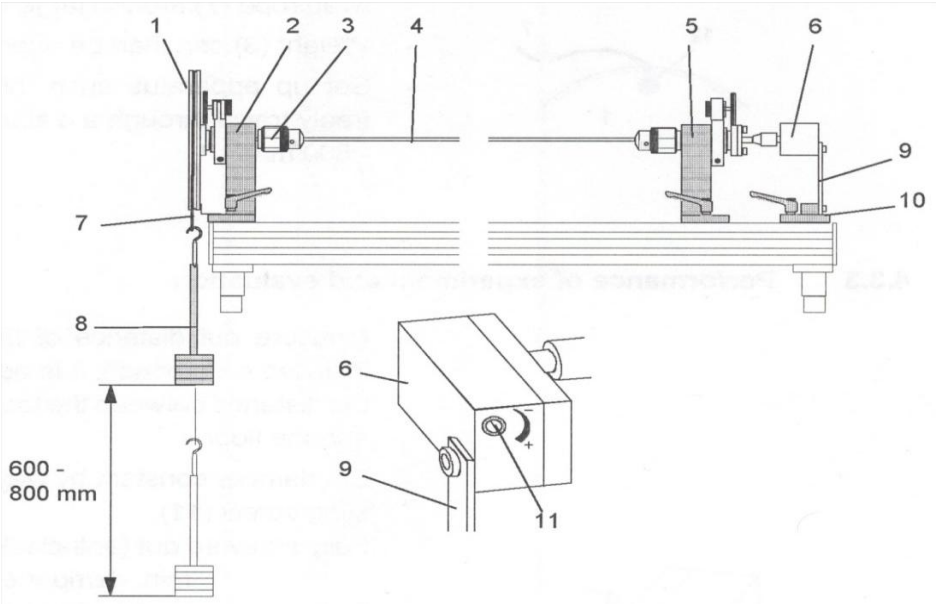
$$d_\phi = \frac{Fr}{\dot{\phi}} \qquad ۶-۱۴$$

بيان سينماتيكي $\dot{\phi} = \frac{s}{tr}$ را به رابطه بالا اعمال مي كنيم

$$d_\phi = \frac{Ft\,r^2}{s} \qquad ۶-۱۵$$

كه s مساوي مسافت طي شده توسط وزنه و t زمان لازم براي حركت آن است.

۶-۳-۲ تنظيم دستگاه



شكل ۶-۱۳ مراحل تنظيم دستگاه

۱- تکیه گاه (۲) را مطابق شکل تنظیم کنید.
۲- دیسک بزرگ (۱) را به تکیه گاه متصل نمایید.
۳- تکیه گاه (۵) را مطابق شکل در فاصله ۱۰۰۰ mm از تکیه گاه سمت چپ قرار دهید. سه نظام‌ها باید مقابل هم قرار گیرند.
۴- میله (۴) را به سه نظام ببندید. میله نباید از تکیه گاه سمت راست بیرون آمده باشد.
۵- دمپر (۶) را به تکیه گاه سمت راست ببندید. نگهدارنده (۹) و صفحه نگهدارنده (۱۰) دمپر را محکم نمایید.
۶- ساچمه انتهايي نخ را در شیار (۱۲) گذاشته و نخ را حول دیسک بزرگ (۱) بپیچید.
۷- دستگاه را طوري تنظيم نماييد كه قلاب وزنه (۸) بتواند فاصله ۶۰۰-۸۰۰ mm را حرکت کند.

۶-۳-۳ انجام آزمایش

۱- فاصله سقوط وزنه ها را اندازه بگیرید. بهتر است فاصله از لبه تا کف زمین را به عنوان فاصله مبناء قرار دهید.
۲- ثابت دمپر با پیچ (۱۱) تنظيم مي شود.
- کاملاً باز (چرخش پادساعتگرد): حداقل میرايي
- کاملاً بسته (چرخش ساعتگرد): حداکثر میرايي

۳- وزنه ۵N را متصل نمایید.
۴- نخ را حول دیسک بپیچید تا وزنه در بالاترین وضعیت اندازه گیري قرار گیرد.
۵- دیسک را رها کرده و زمان حرکت را با کرنومتر اندازه گیري کنید.
۶- پس از زمان کوتاهي وزنه با شتاب قابل صرفنظر و سرعت ثابت سقوط خواهد کرد. نتایج را در جدول زیر یادداشت کنید.
۷- مقادیر اندازه گیري شده را در یک نمودار به صورت ثابت دمپر برحسب تعداد دور پیچ تنظیم دمپر ترسیم کنید.

جدول ۶-۳ مشخصات دمپر

منحني مشخصه دمپر F = 5N, r = 110 mm, S = 700mm		
تعداد دور پیچ تنظیم دمپر	Time T in S	Damper constant d_ϕ in V mJ
کاملاً باز		
1		
1.5		
2		
2.5		
3		
3.5		

۶-۴ آزمایش ارتعاشات آزاد

۶-۴-۱ اصول مقدماتي

اين آزمايش براي بررسی ارتعاشات آزاد يک سيستم شامل ديسک، ميله پيچشي و دمپر پيچشي است. معادله حرکت مجموعه مطابق شکل ۶-۱۴عبارت است از

$$\sum M_0 = J_p\ddot{\phi} = -c_\phi\phi - d_\phi\dot{\phi} \qquad ۱۶\text{-}۶$$

با مرتب کردن معادله بالا خواهيم داشت:

$$\ddot{\phi} + \frac{d_\phi}{J_p}\dot{\phi} + \frac{c_\phi}{J_p}\phi = 0 \qquad ۱۷\text{-}۶$$

يا حالت کلي تر آن

$$\ddot{\phi} + 2D\omega_0\dot{\phi} + \omega_0^2\phi = 0 \qquad ۱۸\text{-}۶$$

که D نسبت ميرايي و ω_0 فرکانس طبيعي زاويه اي است.

$$D = \frac{d_\phi}{2J_p\omega_0} \quad \text{و} \quad \omega_0^2 = \frac{c_\phi}{J_p}$$

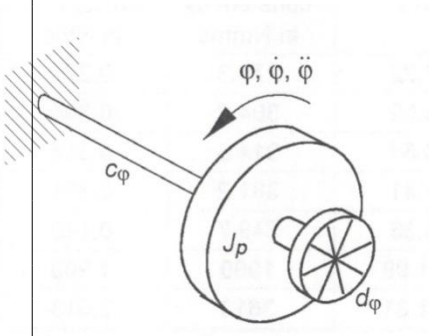
حل معادله بالا نوسانات هارمونيک ميرا شونده با انحراف اوليه ϕ_0 را به دست مي دهد:

$$\phi(t) = \frac{\omega_0}{\omega_d}\phi_0 e^{-D\omega_0 t}[\mathrm{Dsin}(\omega_d t) + \sqrt{1-D^2}\cos(\omega_d t)] \qquad ۱۹\text{-}۶$$

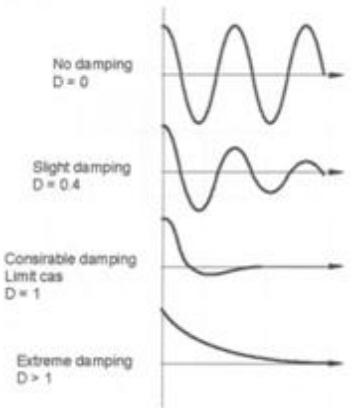
که در آن

$$\omega_d = \omega_0\sqrt{1-D^2} \qquad ۲۰\text{-}۶$$

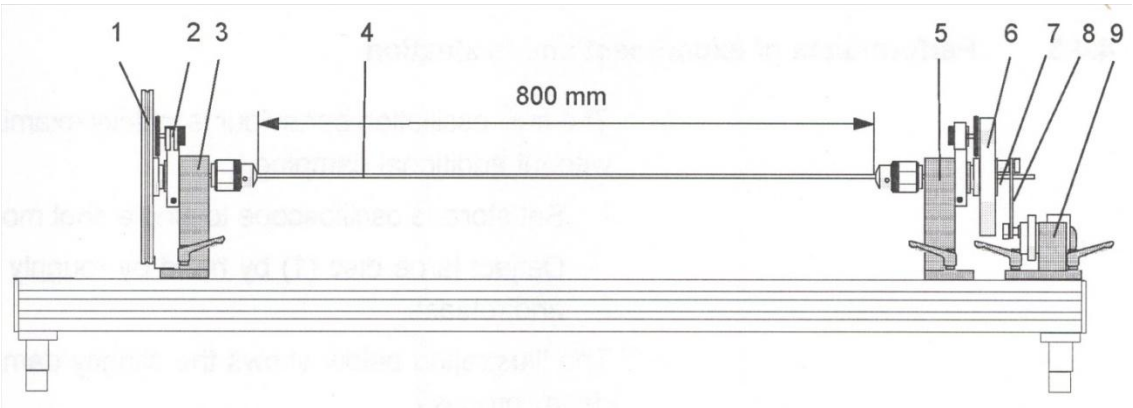
فرکانس طبيعی ميراشده است. در حالت بدون ميرايي ($D=0$)نوسانات ناميرا با $\omega_d = \omega_0$ خواهيم داشت. در عمل نوسانات به دليل ميرايي که هميشه وجود دارد، رو به زوال مي گذارند. همچنين براي ميرايي $D \geq 1$ نوساني وجود ندارد و فرکانس زاويه اي طبيعي ميراشده ω_d صفر مي‌شود.



شکل ۶-۱۴ مدل ديسک دوار



۶-۴-۲ تنظیم دستگاه



شکل ۶-۱۵ مراحل انجام آزمایش

آزمایش در مرحله اول بدون دمپر انجام می‌شود.

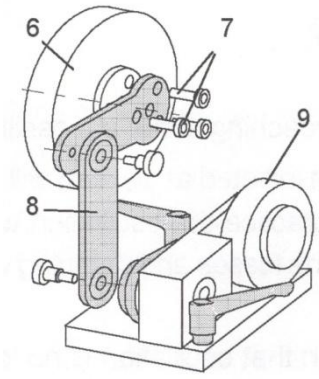
۱- دو تکیه گاه (۵ و ۳) را مطابق شکل به فاصله mm ۸۰۰ از همدیگر قرار دهید. سه نظام‌ها باید مقابل همدیگر قرار گیرند. شکل ۶-۱۵

۲- دیسک بزرگ (۱) را به فلنچ تکیه گاه (۳) متصل نمایید.

۳- دیسک کوچک (۶) و بازوي محرک (۷) را به فلنچ تکیه گاه (۵) متصل نمایید. شکل ۶-۱۶

۴- میله (۴) را بین سه نظام محکم کنید.

۵- مکانیزم تحریک (۹) را به انتهاي راست دستگاه ببندید. لنگ و بازوي محرک را با میله رابط (۸) متصل کنید. پایه مکانیزم تحریک را محکم کنید. با این کار انتهاي راست به صورت گیردار خواهد بود. توجه کنید که در این حالت مکانیزم تحریک پایه باید خاموش باشد.



شکل ۶-۱۶ نحوه ی بستن گیره ها

۶- حسگر سنجش زاویه (۲) را به ورودي (۱) واحد کنترل متصل نمایید.

۷- مجموعه را به کامپیوتر وصل کنید.

۸- زمان نمونه برداري را روي ۰/۵s/div تنظیم کنید.

۶-۴-۳ انجام آزمایش

در بخش اول آزمایش ارتعاشات آزاد بدون میرایي انجام مي‌شود.

۱- اسیلوسکوپ را روي مود single قرار دهید.

۲- دیسک بزرگ (۱) را ۲۰° منحرف کرده و رها کنید.

شکل ۶-۱۷ نشانگر مقداري میرایي در این آزمایش است. با گذشت زمان دامنه نوسانات کاهش مي یابد. زمان لازم براي ۱۰ نوسان کامل را اندازه‌گیری کنید و فرکانس طبیعي ارتعاشات را محاسبه کنید.

حال با استفاده از رابطه سختی پیچشی میله

٦-٢١

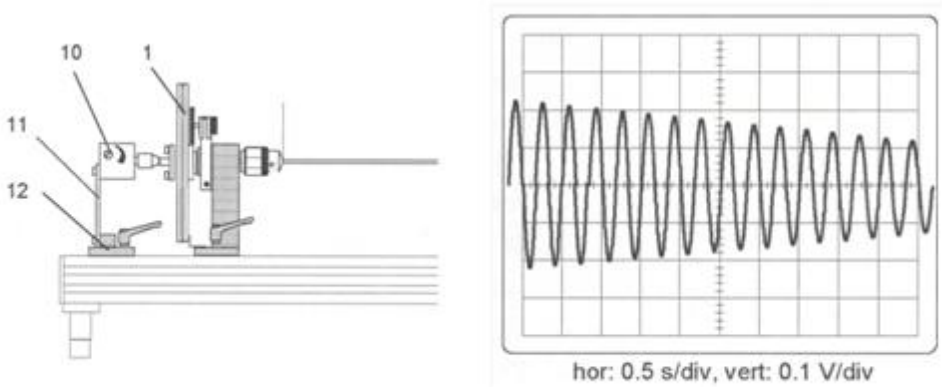
$$c_\phi = \frac{GD^2}{32L} = K$$

و رابطه

٦-٢٢

$$\omega_0^2 = \frac{c_\phi}{J_p}$$

مقدار فرکانس طبیعی ارتعاشات را مجددا محاسبه و نتایج را مقایسه نمایید.
در بخش دوم، آزمایش را با دمپر انجام مي‌دهیم.
٣- دمپر (١٠) را به فلنچ دیسك بزرگ مطابق شكل ٦-١٧ وصل كنید.
٤- بازوي (١١) و صفحه نگهدارنده (١٢) دمپر را محكم كنید.
پس از اتصال دمپر به سیستم مراحل آزمایش قبلي را تكرار كنید. شكل‌هاي قبلی اثر دمپر را در حالت‌هاي مختلف نشان مي‌دهد.

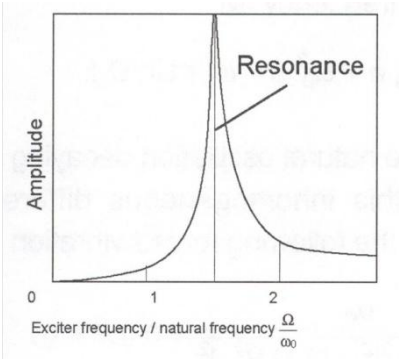


شكل ٦-١٧ نحوه بستن دستگاه با دمپر و پاسخ نوسان آزاد

٦-٤-٥ ارتعاشات اجباري

٦-٤-٥-١ اصول مقدماتي

هنگامي كه يك سیستم ارتعاشي توسط يك تحريك خارجي به ارتعاش درآيد به آن ارتعاش اجباري گفته مي‌شود. با چشم پوشي از پاسخ گذرا، سیستم با فركانس تحريك خارجي ارتعاش مي‌كند. اگر فركانس طبیعي و فركانس تحريك برهم منطبق شوند، تشديد رخ مي‌دهد، در اين حالت دامنه ارتعاشات شروع به افزايش كرده و منجر به خرابي ماشین مي‌شود. محاسبه فركانس طبیعی و دوري از پديده تشديد دو بخش مهم در مهندسي هستند.



شكل ٦-١٨ نمودار دامنه بر حسب نسبت فركانس

بخش اول مربوط به بررسي ارتعاش اجباري در يك سيستم تك جرمي ساده با يك درجه آزادي است. در اين آزمايش از يك مكانيزم لنگ براي ايجاد حركت چرخشي هارمونيك با دامنه و فركانس متغير استفاده شده است.

$$\alpha = \alpha_0 \sin \Omega t$$

۲۳-۶

كه α_0 دامنه تحريك مكانيزم و Ω فركانس يا سرعت تحريك است. مكانيزم تحريك در انتهاي گيردار ميله پيچشي قرار گرفته است. با برقرار كردن تعادل ممان‌ها حول مركز ثقل O داريم :

$$J_p\ddot{\phi} + d_\phi\dot{\phi} + c_\phi\phi = \alpha_0 \sin \Omega t$$

۲٤-٦

يا با دانستن نسبت ميرايي D و فركانس طبيعي زاويه‌اي داريم:

۲۵-۶

$$\ddot{\phi} + 2D\omega_0\dot{\phi} + \omega_0^2\phi = \omega_0^2\alpha = \omega_0^2\ \alpha_0 \sin \Omega t$$

با چشم پوشي از زوال نوسانات طبيعي در طول زمان، حل معادله ديفرانسيل غير همگن بالا پاسخ ارتعاش اجباري زير را به دست مي‌دهد:

$$\phi(t) = \frac{\alpha_0}{\sqrt{[1-(\Omega/\omega_0)^2]^2 + [2D\Omega/\omega_0]^2}}$$

۲۶-۶

زاويه فاز ψ بين تحريك و پاسخ سيستم به صورت زير محاسبه مي‌شود:

$$\psi = \arctan \frac{2D\Omega\omega_0}{\omega_0^2 - \Omega^2}$$

۲۷-۶

براي به دست آوردن رفتار سيستم با ارتعاش اجباري، فرض مي‌شود كه $D = 0$ است. با اين فرض پاسخ سيستم عبارت از:

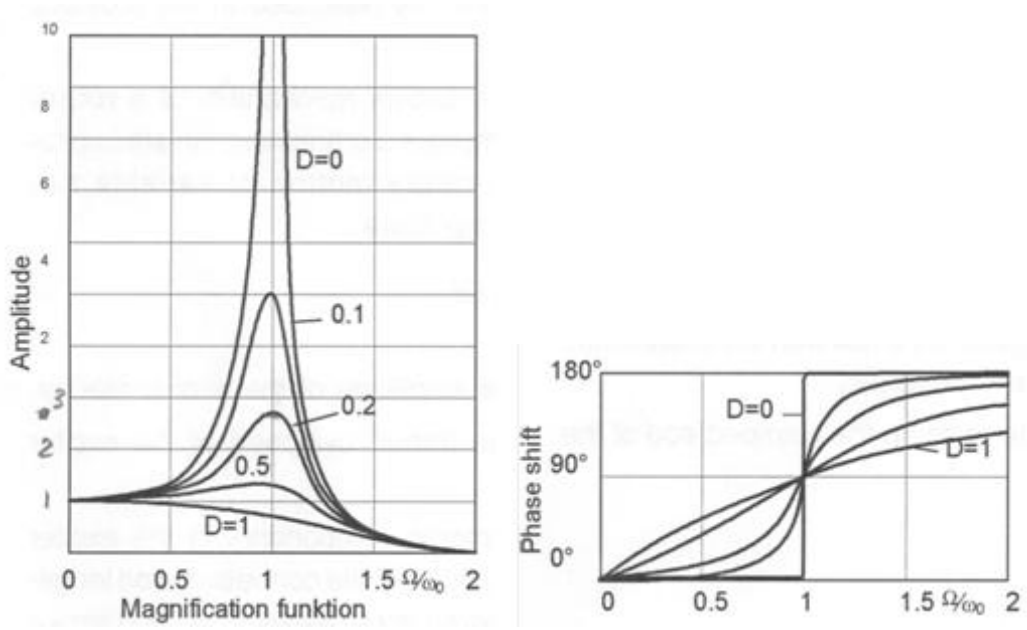
$$\phi(t) = \frac{\alpha_0}{1-(\Omega/\omega_0)^2} \sin(\Omega t + \psi)$$

۲۸-٦

مي‌توان ديد كه مخرج عبارت بالا براي نسبت فركانس $\Omega/\omega_0 = 1$ صفر مي‌شود، به عبارتي پاسخ سيستم به سمت ∞ مي‌رود. اين همان حالت تشديد با دامنه خيلي بزرگ است. با $\Omega = 0$ كسر بالا به مقدار ۱ مي‌رسد و دامنه برابر دامنه تحريك α_0 مي‌شود. مقدار زاويه فاز ψ برابر با صفر است. به عبارت ديگر نوسانگر و تحريك با هم سنكرون هستند. اين حالت در سيستم‌هاي ناميرا براي حالت زير بحراني به كار مي‌رود.

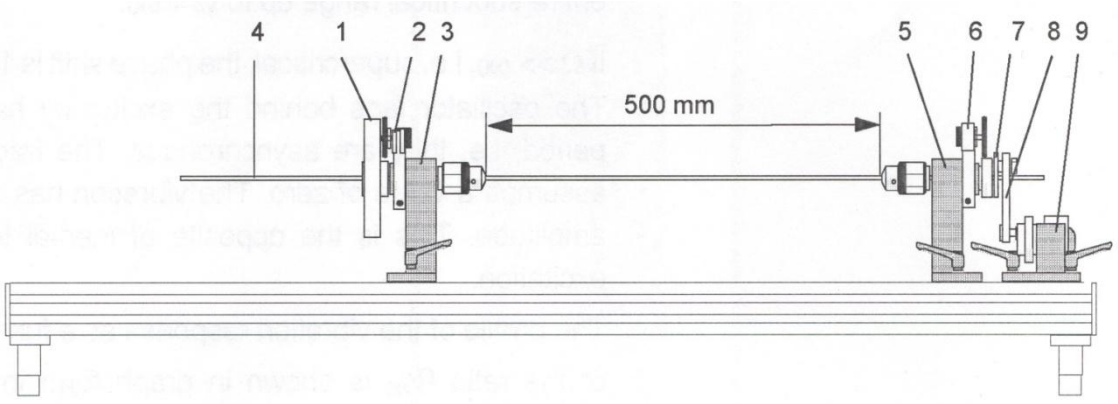
اگر $\Omega >> \omega_0$ باشد حالت فوق بحراني رخ مي‌دهد كه زاويه فاز ۱۸۰° است. نوسانگر به اندازه نيم پريود، از تحريك عقب مي‌افتد، به عبارتي آنها آسنكرون هستند. مقدار كسر در رابطه بالا به صفر مي‌رسد و ارتعاشات داراي دامنه صفر هستند.

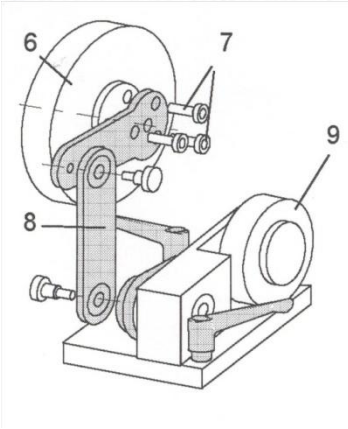
منحني پاسخ ارتعاشي به صورت تابعي از نسبت Ω/ω_0 نشان داده شده است. دامنه با استفاده از مقدار α_0 بي بعد شده است. شكل ۶-۱۹



شکل ۶-۱۹ نمودار فاز و دامنه بر حسب نسبت فرکانس

۶-۵-۲ تنظیم دستگاه



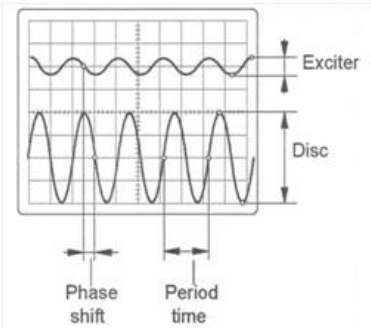


شکل ۶-۲۰ اجزای دستگاه

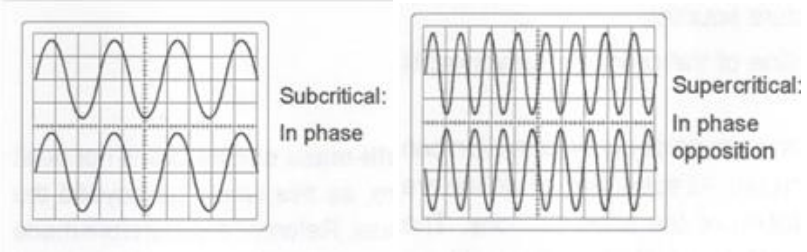
۱- دو تکیه گاه (۵ و ۳) را مطابق شکل به فاصله ۵۰۰mm روي بستر دستگاه ببندید. سه نظام‌ها روبروي هم قرار گیرند. شکل ۶-۲۰
۲- دیسك کوچك (۱) به تکیه گاه سمت چپ (۳) ببندید.
۳- میله محرك (۷) را به فلنچ تکیه گاه سمت راست (۵) ببندید.
۴- میله پیچشي (۴) را بین سه نظام قرار داده و آن را ببندید.
۵- واحد تحریك (۹) را در انتهاي چپ دستگاه ببندید. لنگ را با میله رابط مطابق شکل روبرو محکم کنید. موتور واحد تحریك را به کنترل کننده متصل کنید.
براي اندازه‌گیري دامنه ارتعاشات از کامپیوتر یا اسیلوسکوپ استفاده کنید.
۶- براي اندازه‌گیري سیگنال تحریك حسگر سنجش زاویه (۶) را به ورودي شماره (۱) در قسمت پشت واحد کنترل وصل کنید.
۷- براي اندازه‌گیري سیگنال ارتعاشي دیسك، حسگر سنجش زاویه (۲) را به ورودي ۲ کنترلر وصل کنید.
۸- اسیلوسکوپ را به خروجي‌هاي ۱ و ۲ واحد کنترل وصل کنید.
۹- زمان sweep و حساسیت را تنظیم کنید.

۶-۵-۳ انجام آزمایش

منحني پاسخ را به شرح زیر ثبت کنید.
۱- واحد تحریك را توسط کنترلر روشن کنید.
۲- دستگاه تحریك را توسط پتانسیومتر مربوطه روي فرکانس تحریك مورد نظر تنظیم کرده و مقدار آن را چك کنید.
۳- پس از رسیدن ارتعاشات به حالت پایدار، دامنه تحریك و دیسك را از روي صفحه مانیتور یا اسیلوسکوپ بخوانید. در این حالت مي‌توانید اختلاف فاز دو سیگنال را نیز مشاهده کنید.
۴- فرکانس تحریك را به آرامي از ۱ به ۲ Hz افزایش دهید تا به محدوده تشدید برسد.
۵- بهره بدون بعد V از نسبت دامنه دیسك به تحریك به دست مي‌آید.
تحریك و پاسخ زیر سطح تشدید (Sub critical) هم فاز هستند و بالاي تشدید (Super critical) در فاز مخالف خواهند بود.
۶- با افزایش تدریجی فرکانس تحریک جدول زیر را تکمیل کنید.
۶- نمودار بهره برحسب فرکانس تحریك را ترسیم کنید.
این آزمایش را مي‌توان با دیسك بزرگ یا افزایش میرایي تکرار کرد.



شکل ۶-۲۱ نمودار دامنه تحریک و دیسک



شکل ۶-۲۲ نمودار زیر و بالای سطح تشدید

جدول ۶-۴ داده های محرک و پاسخ

Resonance curve: Single-mass oscillator Small disc, L=500, no damping				
Exciter frequency f in Hz	Exciter amplitude in V	Disc amplitude in V	Phase shift ψ	Gain V
2.0				
4.0				
5.0				
6.0				
6.5				
7.0				
7.5				
8.0				
8.5				
9.0				
10				
12				
14				
16				

۶-۶ سيستم‌هاي ارتعاشي با چند جرم

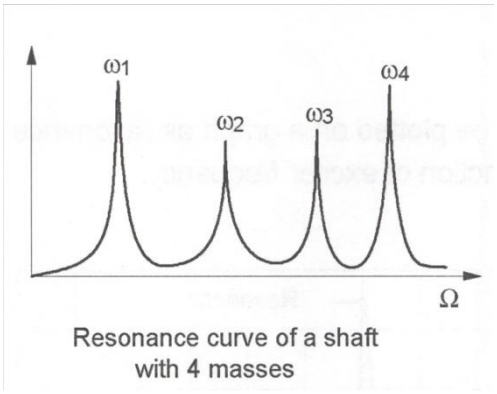
۶-۶-۱ مباني مقدماتي

تئوري نوسانات چند جرمي به صورت كامل در اينجا بررسي نمي‌شود، چون خارج از بحث اين دستور كار است. مطالب كامل را مي‌توان در مراجع مربوطه پيدا كرد. در اينجا تنها اشاره به موضوع شده است. براي سيستم چند جرمي براي هر ديسك مي‌توان يك معادله حركت نوشت. تمام معادلات حركت مربوط به جرم‌ها توسط پيچش مقطع شافت به همديگر مربوط مي‌شوند. نتيجه يك سيستم معادلات ديفرانسيل است كه تعداد آن ها برابر با تعداد جرم‌هاست. اين معادلات را مي‌توان به فرم ماتريسي زير نوشت:

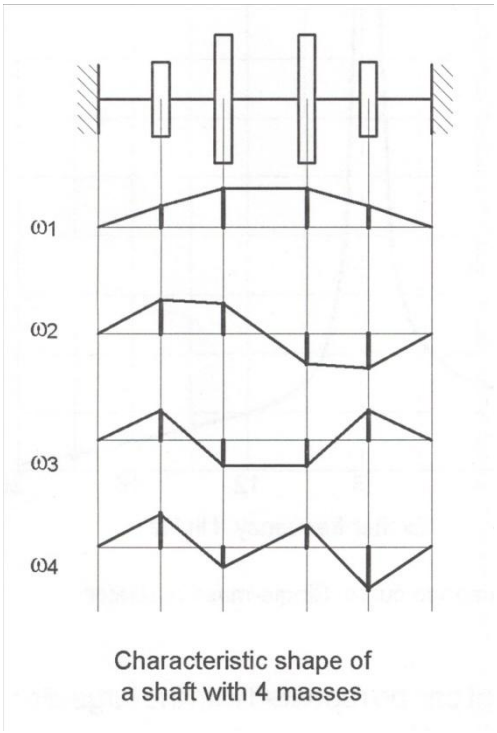
$$\underline{M}.\ddot{\underline{\varphi}} + \underline{D}.\dot{\underline{\varphi}} + \underline{c}.\underline{\varphi} = \underline{\alpha}.e^{i\Omega t} \qquad ۶-۲۹$$

كه $\underline{\varphi}$ بردار جابه‌جايي و $\underline{\alpha}$ بردار تحريك است.

حل اين سيستم معادله ديفرانسيل به يك مسئله مقدار ويژه مي‌انجامد كه فركانس طبيعي ω_i را به دست مي‌دهد. تعداد فركانس‌هاي طبيعي و تعداد نقاط تشديد برابر با تعداد جرم‌هاست.(شكل۶-۲۳) بدين ترتيب كه سيستم دو جرمي دو فركانس طبيعي و سيستم سه جرمي سه فركانس طبيعي دارد. براي هر فركانس يك شكل‌مود وجود دارد كه بيانگر نسبت حركت جرم‌ها نسبت به همديگر در حالت ارتعاش آزاد در فركانس طبيعي است.(شكل۶-۲۴) به عنوان مثال براي سيستم دو جرمي، دو جرم به صورت هم فاز در فركانس طبيعي اول و به صورت غير هم فاز در فركانس طبيعي دوم ارتعاش مي‌كنند. نسبت دامنه‌ها براساس توزيع جرم و سختي به دست مي‌آيد.

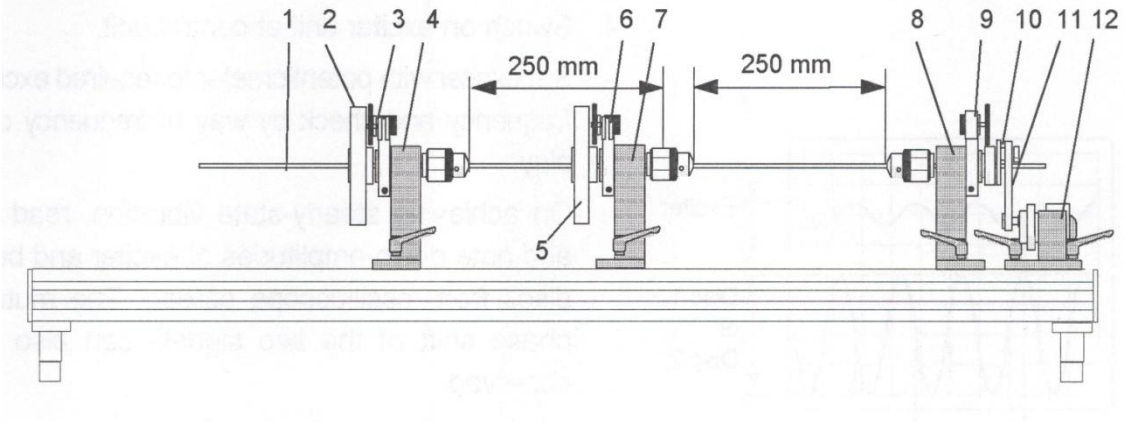


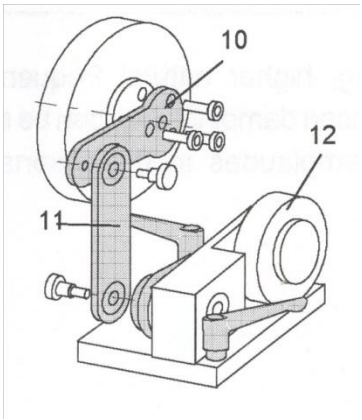
شكل ۶-۲۳ شافت به همراه ۴ جرم در حالت تشديد



شكل ۶-۲۴ مدهای اول تا چهارم شافت

۶-۶-۲ تنظيم دستگاه: نوسان‌گر دو جرمي





شكل ۶-۲۵ نوسان‌گر دو جرمي

۱- تكيه‌گاه‌هاي (۸، ۷ و ۴) را مطابق شكل روي بستر دستگاه با فاصله ۲۵۰mm از همديگر قرار دهيد. سه نظام‌ها مطابق شكل ۶-۲۵بايد قرار داشته باشند.
۲- ديسك‌هاي كوچك (۵ و۲) را به فلنچ پايه نگهدارنده (۷ و ۴) ببنديد.
۳- بازوي محرك (۱۰) را به فلنچ تكيه گاه (۸) ببنديد.
۴- ميله پيچشي (۱) را درون سه نظام‌ها قرار دهيد.
۵- واحد تحريك (۱۲) را در انتهاي راست بستر دستگاه محكم كنيد. لنگ را با ميله رابطه (۱۱) مطابق شكل به بازوي محرك (۱۰) وصل كنيد. واحد تحريك را محكم كرده و موتور تحريك را به واحد كنترل وصل كنيد. براي اندازه‌گيري دامنه ارتعاشات، سه حسگر سنجش زاويه را به كامپيوتر يا اسيلوسكوپ وصل كنيد.

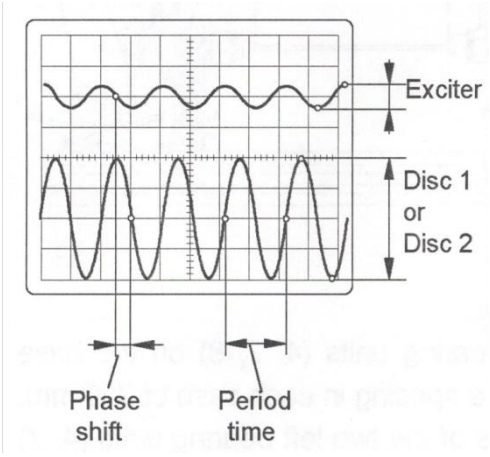
۶-۶-۳ انجام آزمایش: نوسانگر دو جرمی

منحني پاسخ را به صورت زير مي‌توان ثبت كرد

۱- واحد تحريك را توسط دستگاه كنترلر روشن كنيد.

۲- توسط پتانسيومتر روي واحد كنترل، فركانس مورد نياز واحد تحريك را تنظيم كرده و فركانس آن را روي مانيتور كامپيوتر چك كنيد.

۳- پس از رسيدن به ارتعاش حالت پايدار، دامنه‌هاي تحريك هر دو ديسك را روي صفحه مانيتور بررسي كنيد. هم چنين مي‌توانيد اختلاف فازها را ببينيد.



شکل ۶-۲۶ نمودار دامنه تحریک ودیسک

۴- فركانس تحريك را به آرامي افزايش دهيد تا به محدوده تشديد برسد. در اين آزمايش دو فركانس تشديد خواهيد ديد.

۵- جدول ۶-۵ را كامل كنيد.

جدول ۶-۵ داده های نوسان با دو جرم

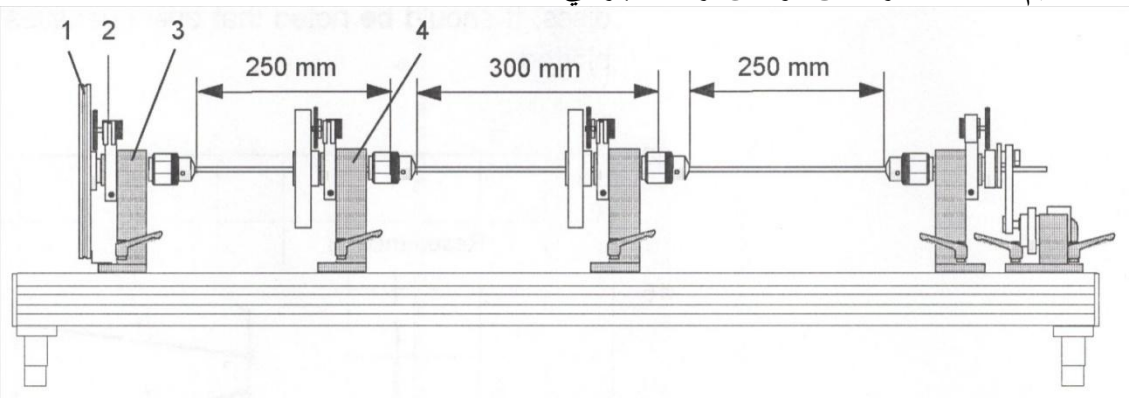
Natural ferequencies: 2- mass oscillator Small discs, L_2=250 mm, L_3=25 mm, no damping						
Resonance No.	Frequency in Hz	Amplitude Exciter	Amplitude Disc 1	Disc 1, normalized V_1	Amplitude Disc 2	Disc 2 normalized V_2
1						
2						

بطور كلی فركانس‌هاي طبيعي بالاتر داراي ميرايي بيشتري هستند. اين مورد را مي‌توان از دامنه‌هاي خيلي كوچك در محدوده تشديد ديد.

نتايج به دست آمده را در يك منحني به صورت ضريب بهره $|V|$ (نسبت دامنه ديسك به دامنه تحريك) برحسب فركانس تحريك رسم كنيد.

ديسك‌ها به صورت هم فاز در فركانس طبيعي اول f_1 و به صورت غير هم فاز در فركانس طبيعي دوم f_2 ارتعاش مي‌كنند. بين دو فركانس طبيعي، ديسك شماره ۱ به صورت كاملاً ساكن خواهد بود كه اين مورد به نقطه quenching معروف است. شكل مودها را هم مي‌توان روي مانيتور مشاهده كرد.

۶-۶-۴ تنظيم دستگاه: ارتعاش نوسان‌گر سه جرمي



شكل ۶-۲۷ نوسان‌گر سه جرمي

تنظيم دستگاه شبيه به حالت دو جرمي است و تنها يك جرم به آن اضافه شده است. شكل ۶-۲۷
۱- پايه نگهدارنده (۴) را به سمت چپ حركت دهيد تا فاصله آن با تكيه گاه بعدي ۳۰۰ mm شود.
۲- پايه نگهدارنده (۳) را به بستر اصلي دستگاه با فاصله ۲۵۰mm اضافه كنيد. سه نظام آن به سمت راست باشد.
۳- ديسك بزرگ (۱) را به فلنچ مربوطه روي تكيه گاه سمت چپ (۳) متصل كنيد.

۶-۶-۵ انجام آزمايش: ارتعاش نوسان‌گر سه جرمي

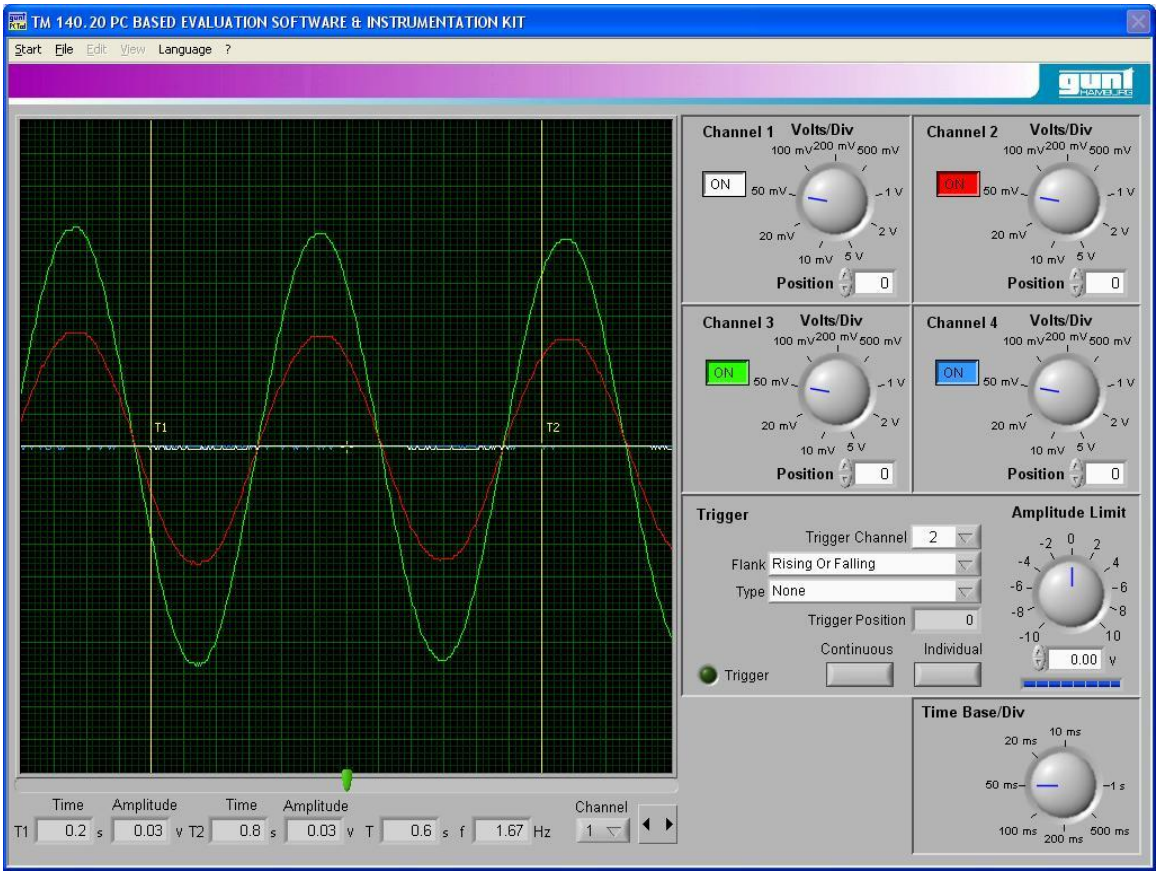
منحني پاسخ را مطابق آزمايش قبلي رسم كنيد. در اين حالت سه فركانس تشديد خواهيم داشت.
جدول ۶-۶ را كامل كنيد.

جدول ۶-۶ داد های نوسان‌گر سه جرمي

Natural ferequency: 3-mass oscillator 1×large disc, 2×small discs, L_1=250 mm, L_2=300 mm, L_3=250 mm, no damper					
No.	Ferequency f_i in Hz	Amplitude exciter	Amplitude disc 1	Amplitude disc 2	Amplitude disc 3
1					
2					
3					

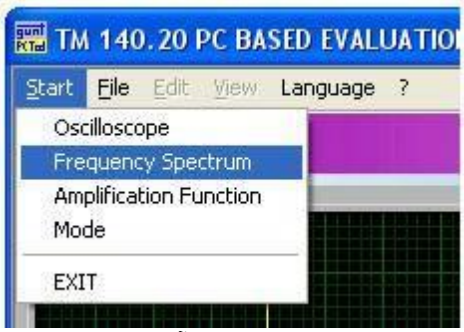
الف- ساختار كلي برنامه

با اجراي برنامه M140-20 پنجره‌ای مطابق شكل زير باز مي‌شود.

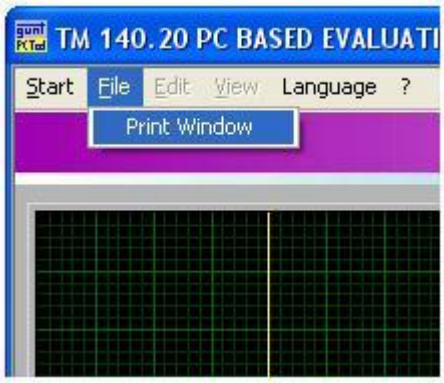


در منوي Start برنامه مي‌توان يكي از حالت‌هاي زير را بري انجام آزمايشات انتخاب نمود:

- اسيلوسكوپ (Oscilloscope)
- طيف فركانس (Frequency Spectrum)
- تابع بزرگنمايي (Amplification Function)
- شكل مود (Mode)



در منوي File مي‌توان اطلاعات و نمودارهاي به دست آمده را به فرمت Xps ذخيره كرد.



پس از انتخاب Print Window از منوی File پنجره‌ای مطابق شکل زیر باز می‌شود که در آن می‌توان توضیحی دلخواه به شکل مورد نظر اضافه نمود.

در ادامه نحوه کار هرکدام از حالت‌های برنامه توضیح داده شده است.

ب- اسیلوسکوپ

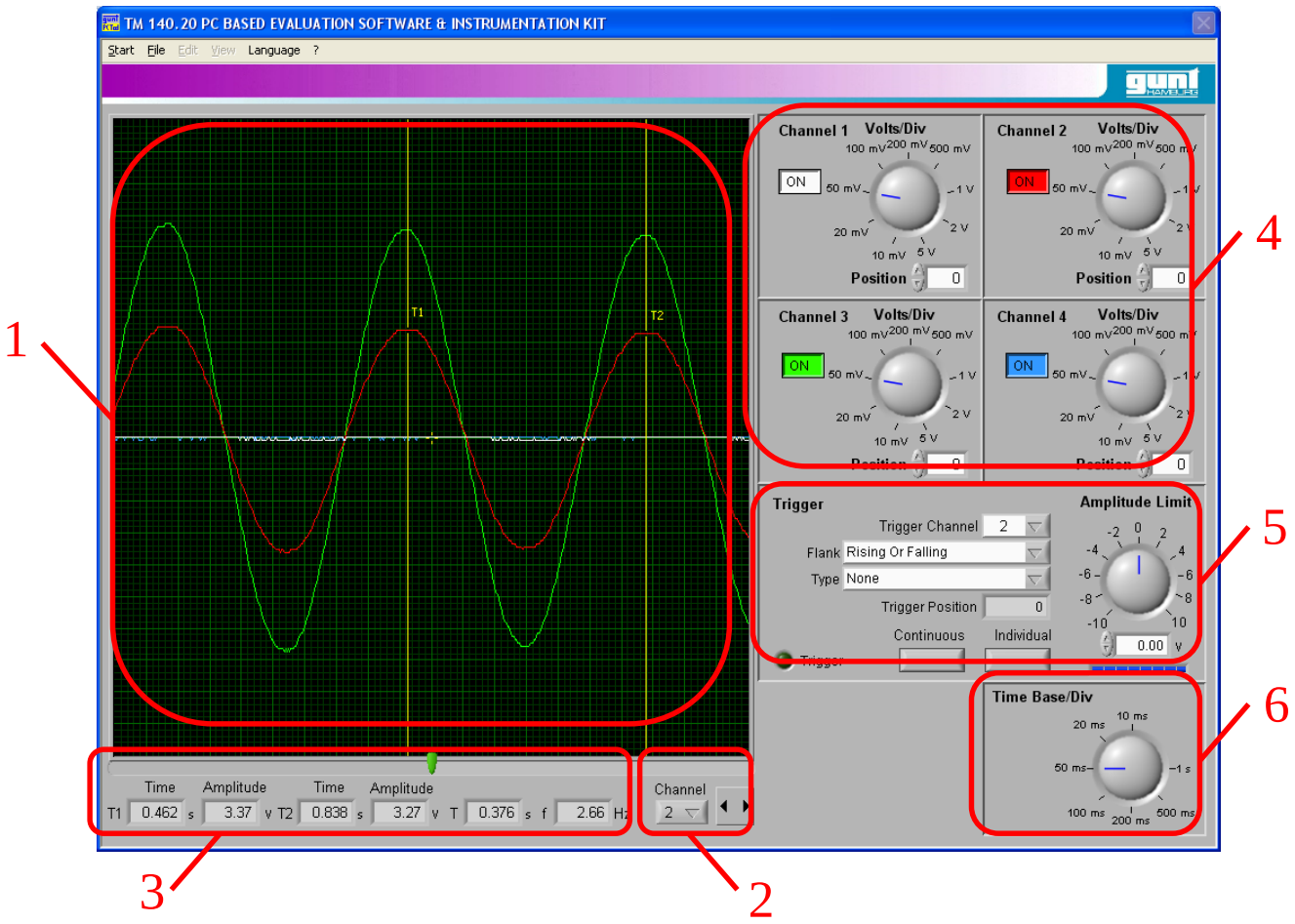
اسيلوسكوپ براي نمايش سيگنال‌هاي اندازه‌گيري شده در كارت الكترونيكي دستگاه به كار مي‌رود. از چهار كانال براي نمايش همزمان سيگنال‌هاي ورودي استفاده مي‌شود. اسيلوسكوپ داراي بخش‌هاي زير مي‌باشد:

۱- نمايشگر سيگنالهاي اندازه گيري شده

در اين قسمت نمودار سيگنالهاي اندازه‌گيري‌شده نمايش داده مي‌شود. دو خط عمود زرد رنگ براي تعيين مقدار و زمان دو نقطه از سيگنال اندازه گيري شده به كار مي رود كه مي توان پريود و فركانس سيگنال را از روي آنها محاسبه كرد. اين كرسورها توسط موس و يا با استفاده از كنترل كرسور قابل تنظيم هستند.

۲- كنترل كرسور

با استفاده از اين كنترل هر كرسور را مي‌توان به سمت چپ و راست حركت داد. براي فعال شده هر كرسور ابتدا روي آن كليك كنيد. كرسورها دامنه و فركانس سيگنال مربوط به كانال انتخاب‌شده در همين قسمت را نشان مي‌دهند.



۳- نمایشگر اطلاعات کرسور

در این قسمت زمان و دامنه مربوط به هر کرسور تحت عناوین T_1 و T_2 نشان داده می‌شود. در صورتی که دو کرسور به فاصله یک سیکل از همدیگر قرار گرفته باشند، T بیانگر پریود برحسب ثانیه و F بیانگر فرکانس سیگنال مورد نظر برحسب هرتز است.

۴- تنظیم کانال‌ها

در این قسمت براي هر يك از چهار كانال يك بخش جداگانه وجود دارد. هر بخش شامل سه كنترل است:

- كليد روشن- خاموش: براي روشن و يا خاموش كردن كانال مربوطه مي‌باشد.
- كليد تنظيم حساسيت : براي تنظيم مقدار تقسيمات عمودي نمودار برحسب ولت بر قسمت (Volts/Div) است.
- تنظيم عمودي (Position): براي تنظيم موقعيت عمودي سيگنال در صفحه نمايش به كار مي‌رود.

هر كانال رنگ مخصوص به خود را دارد كه همان رنگ كليد روشن – خاموش است و سيگنال هر كانال به همان رنگ در صفحه نمايش ديده مي‌شود.

۵- تریگر (Trigger)

كنترل‌هاي بخش تريگر عبارت اند از:

- كانال تريگر: كانالي كه براساس آن شروع اندازه‌گيري مشخص مي‌شود.

- Flank : نوع سيگنالي كه اندازه‌گيري بر مبناي آن انجام مي‌شود. بهتر است روي حالت Rising or Falling تنظيم شود.
- نوع (Type) : در اين بخش مي‌توان شروع اندازه‌گيري براساس حد دامنه و يا عدم استفاده از تريگر را انتخاب نمود.
- كليد Continous : با فعال كردن اين كليد سيگنال بصورت پيوسته و خودكار اندازه‌گيری می‌شود.
- كليد Indivitual : با فشار دادن اين كليد اندازه‌گيري سيگنال فقط يك بار بر اساس تنظيم قسمت (Time Base/Div) انجام مي‌گيرد.

۶- تنظيم معيار زماني براى تريگر و ثبت دستي (Time Base/Div)

توسط اين كليد مقدار تقسيمات زماني محور افقي نمودارها تنظيم مي‌شود. به عنوان مثال اگر اين كليد روي 200ms باشد، هر قسمت نشان دهنده 200ms بوده و كل محور افقي نمودار، چهار ثانيه را نشان مي‌دهد و با زدن كليد Indivitual سيگنال به اندازه چهار ثانيه ثبت مي‌شود.

ج- طيف فركانس

در اين قسمت سيگنال كانال انتخابي حوزه زمان به حوزه فركانس تبديل مي‌شود.

۱- سيگنال در حوزه زمان

نمودار سيگنال كانال انتخابي در حوزه زمان در اين قسمت نمايش داده مي‌شود.

۲- سيگنال در حوزه فركانس

نمودار سيگنال كانال انتخابي در حوزه فركانس در اين قسمت نمايش داده مي‌شود. دو كرسور F_1 و F_2 كه با خطوط قرمز رنگ عمودي نشان داده شده است، محدوده انتخابي اين نمودار را جهت بزرگنمايي در نمودار پايين مشخص مي‌كنند. اين دو كرسور توسط موس جابجا مي‌شوند.

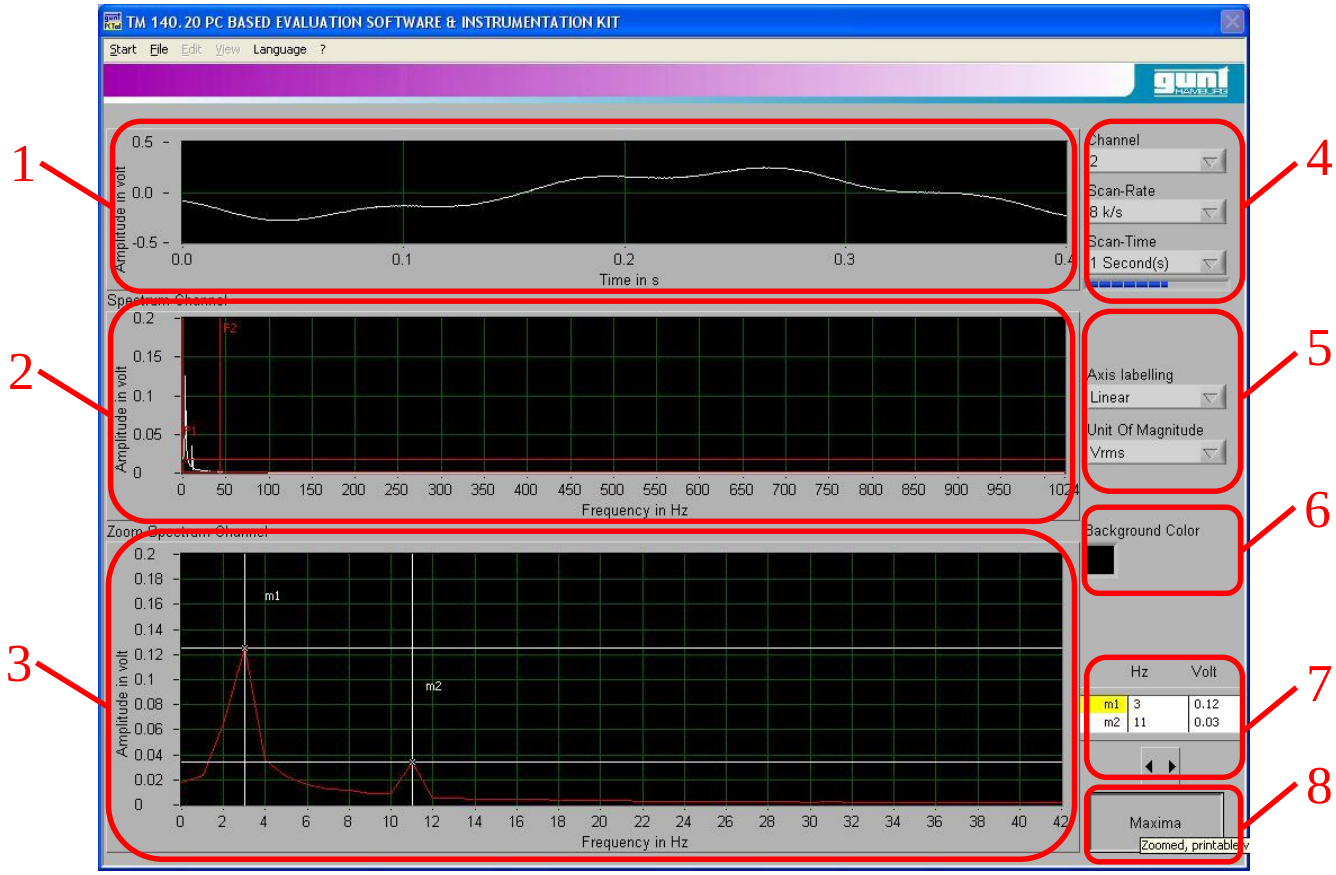
۳- محدود فركانسي زوم‌شده

در اين قسمت نمودار فركانسي با جزئيات بيشتر قابل مشاهده است. دو كرسور m_1 و m_2 براي مشخص كردن دقيق فركانس و دامنه دو نقطه از اين نمودار استفاده مي‌شود كه توسط موس قابل جابجايي هستند.

۴- تنظيم ورودي‌ها

در اين قسمت كنترل‌هاي زير وجود دارد:

- Channel : براي انتخاب كانال
- نرخ Scan : نرخ خواندن سيگنال ورودي
- زمان Scan : طول مدت زمان اسكن سيگنال ورودي



۵- تنظیم نمودارها

با استفاده از دو کنترل این قسمت مي‌توان چگونگي نمايش نمودارها را تنظيم كرد:

- نوع نمودار (Axis Labeling): لگاريتمي يا خطي بودن نمودار را تنظيم مي‌كند.
- واحد اندازه گيري (Unit of Magnitude) : مقادير محور قائم را براساس rms ولتاژ، پيك ولتاژ يا متوسط مربع rms ولتاژ ورودي تنظيم مي‌كند.

۶- رنگ زمینه (Background color)

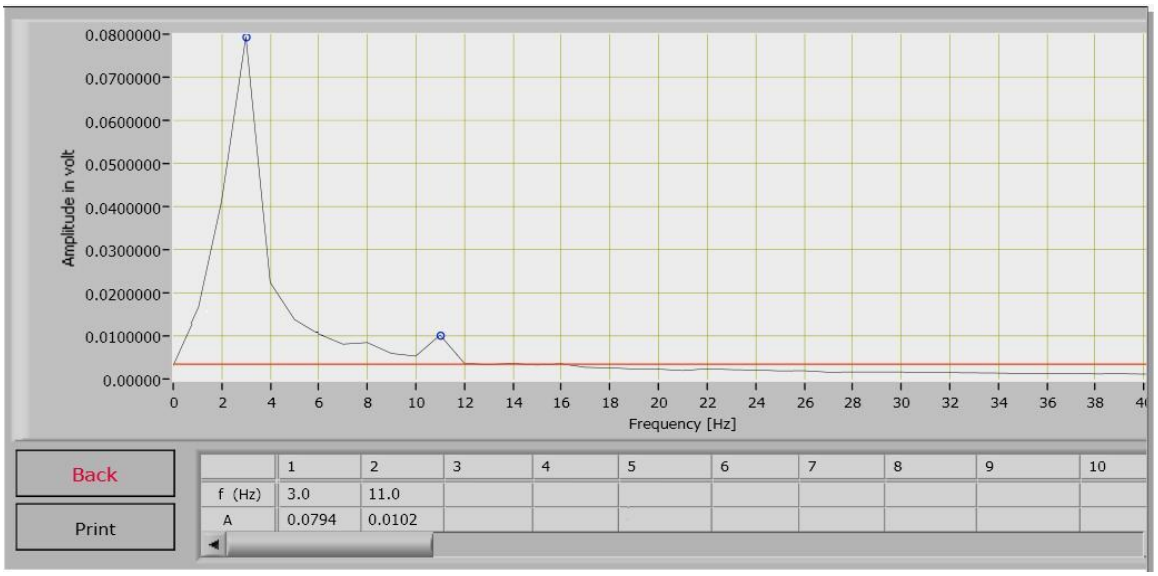
با استفاده از اين كنترل مي‌توان رنگ زمينه نمودارها را تغيير داد.

۷- نمایشگر کرسور

مقادير فركانس و دامنه متناظر با كرسورهاي m_1 m_2 را نشان مي‌دهد. كرسورها را مي‌توان با موس يا با كنترل كرسور حركت داد.

۸- کلید Maxima

با زدن اين كليد، نمودار قسمت زوم شده پاسخ فركانسي نمايش داده مي‌شود. در اين پنجره ماكزيمم‌هاي نمودار FFT كه بالاتر از كرسور افقي قرمز قابل تنظيم قرار دارند، توسط دايره‌هاي آبي نشان داده مي‌شوند. مقادير فركانس و دامنه متناظر ماكزيمم‌ها در جدول پايين پنجره نمايش داده مي‌شود. با استفاده از كليد Print مي‌توان نمودار را به فرمت Xps ذخيره نمود و با زدن كليد Back به پنجره اصلي باز گشت.



د- تابع بزرگنمايي

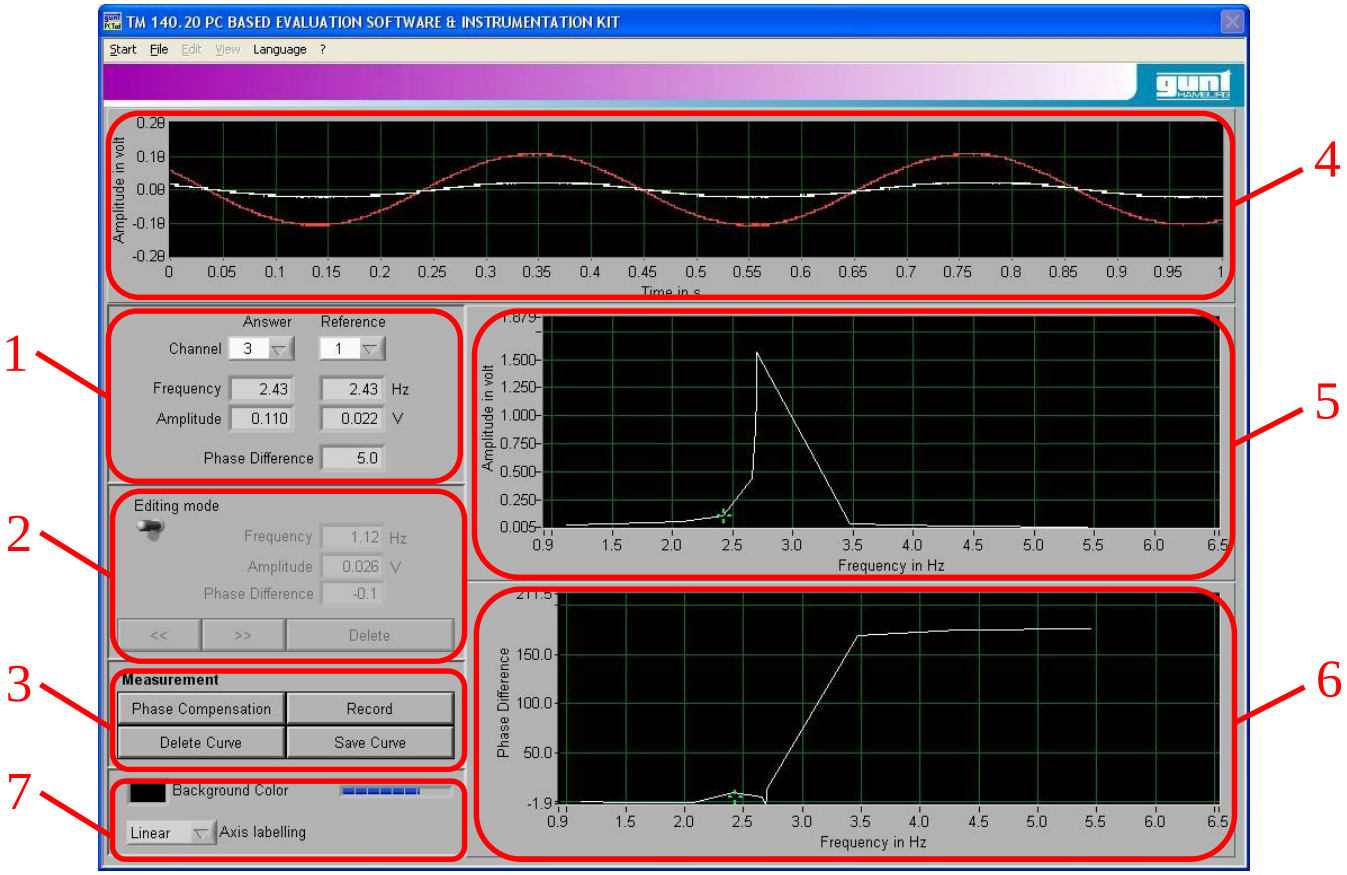
در اين قسمت ويژگي‌هاي دامنه و فاز پاسخ نشان داده مي‌شوند كه در مهندسي كنترل به آن دياگرام بود (Bode Diagram) گفته مي‌شود.

۱- نمايش كانال‌ها

در اين قسمت كانال‌هاي سيگنال پاسخ (Answer) و سيگنال (Reference) انتخاب مي‌شوند. در اين بخش مقادير فركانس و دامنه هر سيگنال و اختلاف فاز آنها نيز نمايش داده مي‌شود.

۲- حالت ويرايش براي حذف نقاط اندازه‌گيري شده (Editing Mode)

در اين بخش امكان انتخاب و حذف نقاط اندازه‌گيري شده وجود دارد. اين كار فقط زماني كه نقاط ثبت شده وجود داشته باشد امكان پذير است و تا زماني كه در حالت ويرايش هستيم بقيه كنترل‌ها غير فعال مي‌شوند. نقطه مورد نظر را مي‌توان توسط كليدهاي جهت‌نما انتخاب و با كليد Delete آن را حذف نمود. مقدار فركانس، دامنه و اختلاف فاز نقطه انتخابي نيز در اين قسمت نشان داده مي‌شود.



۳- کنترل‌هاي اندازه‌گيري (Measurement)

چگونگي اندازه‌گيري توسط چهار كليد قابل كنترل است.

- جبران فاز (Phase Compensation) : اختلاف فاز حقيقي موجود را روی صفر تنظيم مي‌كند تا نمايش بهتري را بتوان در اختلاف فاز ۹۰° و ۱۸۰° مشاهده كرد.
- ثبت (Record) : مقدار اندازه‌گيري شده فعلی را ثبت مي‌كند.
- پاك كردن (Delete Curve) : تمام نمودار اندازه‌گيري شده را حذف مي‌كند.
- (Save Curve) : نمودار اندازه‌گيري شده را ذخيره مي‌كند.

۴- نمايش سيگنال‌هاي ورودي

در اين قسمت سيگنال ورودي تحريك و پاسخ ترسيم مي‌شوند. براي ثبت يک نقطه از نمودار، سيستم بايد به صورت يكنواخت نوسان كند. بنابراين اين سيگنال‌ها جهت مشاهده رفتار سيستم و آگاهی از رسيدن ارتعاشات سيستم به حالت دائمی استفاده مي‌شوند.

۵- دامنه پاسخ

با ثبت اطلاعات در فركانس‌هاي مختلف تحريك، دامنه پاسخ در اين قسمت نمايش داده مي‌شود كه به‌صورت اتوماتيك مقياس‌بندي مي‌شود. نقاط ثبت‌شده برحسب فركانس مرتب مي‌شوند و امكان افزودن نقاط جديد بين نقاط موجود نيز وجود دارد.

۶- پاسخ فاز
اختلاف فاز تحريك و پاسخ در اين قسمت نمايش داده مي‌شود. اين نمودار نيز به صورت اتوماتيك مقياس‌بندي مي‌شود.

۷- Axis view
در اين قسمت مي‌توان نوع نمودار را به صورت خطي يا لگاريتمي انتخاب كرد و رنگ زمينه را تغيير داد.

روش ثبت يك نمودارپاسخ :
- قبل از شروع اندازه‌گيري، تمام سنسورها بايد در مقدار صفر ولت تنظيم شوند.
- با استفاده از واحد كنترل TM140 فركانس تحريك را به تدريج و پس از ثبت هر نقطه از نمودار، افزايش دهيد.
- پس از هر بار افزايش فركانس تحريک، كمي صبر كنيد تا سيستم به حالت پايدار و پاسخ حالت دائمي رسيده و دامنه‌ها ثابت شوند.
- قبل از ثبت اولين نقطه اندازه‌گيري (در فركانس صفر) كليد جبران فاز (Phase compensation) را يك بار بزنيد تا اختلاف فاز ورودي صفر تنظيم شود.
- در هر فركانس جهت ذخيره اطلاعات همان نقطه از نمودار، كليد ثبت را بزنيد.
- اين كار را آنقدر تكرار كنيد تا منحني پاسخ كامل شود.
- نزديك تشديد، مقدار فركانس تحريك را با گام‌هاي كوچك تغيير دهيد و مراقب افزايش دامنه ارتعاشات ديسك باشيد.
- آنگاه كليد Save Curve را بزنيد تا اطلاعات نمودار به فرمت Excel ذخيره شود.

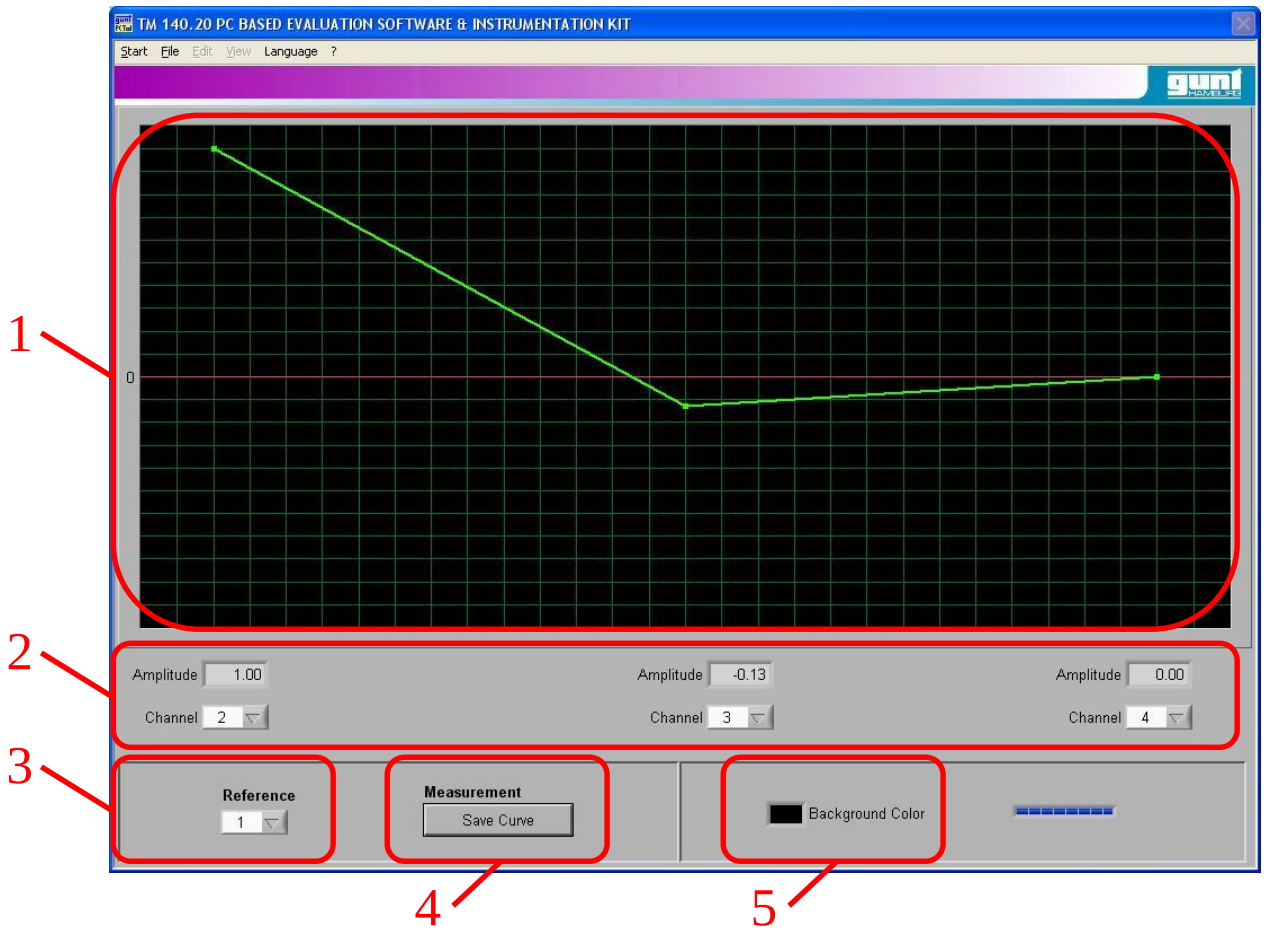
هـ- شكل مود
در اين قسمت شكل مودها با استفاده از مقادير دامنه‌هاي نرمال شده سيگنال پاسخ نسبت به سيگنال تحريك رسم مي‌شود.

۱- نمايش شكل مود
در اين قسمت شكل مود براي سيگنال‌های دامنه پاسخ سه نقطه از سيستم ارتعاشی رسم مي‌شود. در اين نمودار خط قرمز نشانگر صفر است.

۲- نمايش و انتخاب سيگنال‌هاي پاسخ
در اين قسمت سه كانال به عنوان سيگنال‌های پاسخ انتخاب می‌شوند. مقدار دامنه نرمال شده نيز در بالاي هر كانال نشان داده مي‌شود. دراين قسمت شماره كانال تحريك غير فعال است.

۳- تحريك (Reference)
در اين قسمت مي‌توان كانال تحريک را انتخاب كرد.

۴- كليد ذخيره
با زدن كليد ذخيره، اطلاعات نقاط مربوط به شكل مود به صورت يك فايل dat ذخيره مي‌شود كه قابل استفاده در Excel است.


TM 140.20 PC BASED EVALUATION SOFTWARE & INSTRUMENTATION KIT
Start File Edit View Language ?
0
Amplitude 1.00
Channel 2
Amplitude -0.13
Channel 3
Amplitude 0.00
Channel 4
Reference
1
Measurement
Save Curve
Background Color
1
2
3
4
5

آزمایش شماره ۷:

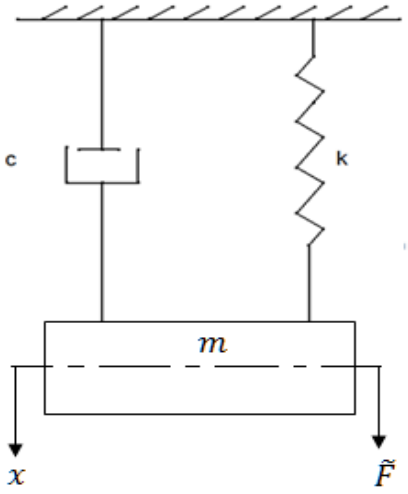
۷-۱- هدف :

مشاهده و مطالعه سیستم خود مرتعش $(Self\ Excited\ Oscillations)$ و پدیده ارتعاشات خود مرتعش

۷-۲- مقدمه :

در مطالعه سیستم های دینامیکی عموماً آنالیز سیستم بر مبنای آن است که عامل حرکت (مثلاً نیرو) مستقل از معلول (مثلاً جابجائی) است.

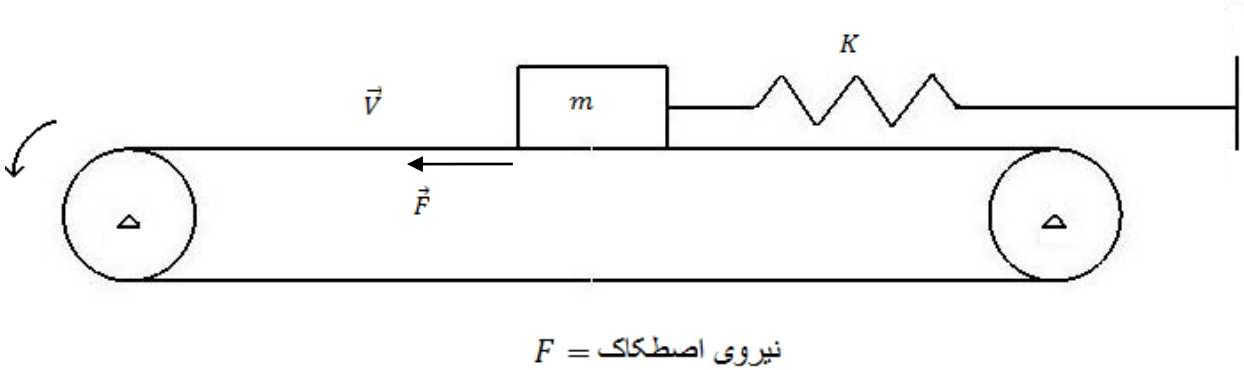
$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F \qquad ۱-۷$$



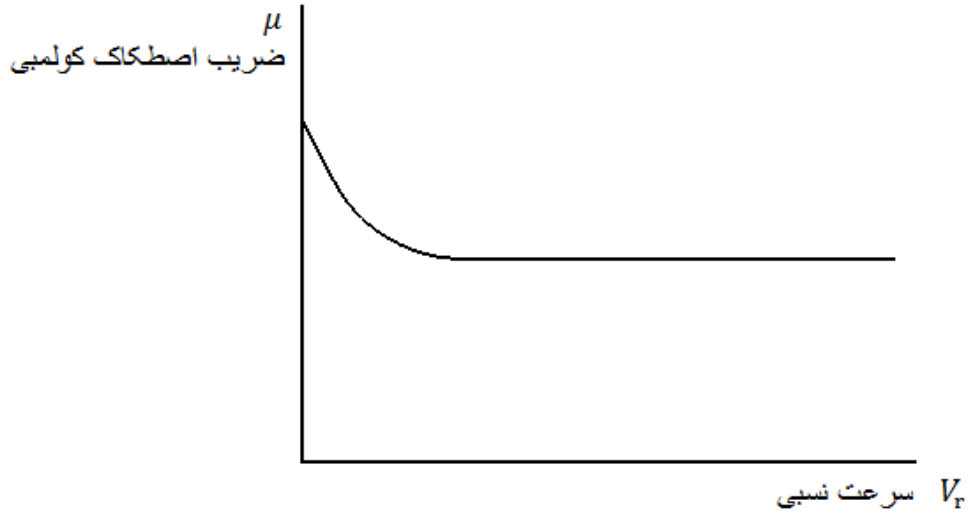
شکل ۷-۱ چگونگی تحریک سیستم ارتعاشی

همان طورکه دیده می شود حرکت سیستم (جابجائی) نمی تواند بر روی عامل حرکت (نیرو) اثری بگذارد. ولی مواردی وجود دارد که در آن نیروهای عامل حرکت، با حرکت سیستم بوجود آمده و با حذف حرکت از بین می روند. مثال ساده ای از این سیستم ها، سیستم شکل ۷-۲ است. در این سیستم جرم (m) توسط فنر (k) به پایه وصل شده است. این جرم بر روی تسمه ای قرار دارد که با سرعت ثابت $\overrightarrow{v}$ حرکت می کند. حال اگر جرم (m) قدری ازحالت تعادل خارج شده و رها گردد، درابتدا ممکن است تصور شود که جرم به حالت تعادل خواهد رسید یعنی وقتی که نیروی اصطکاک با نیروی فنر خنثی شده است جرم ساکن خواهد ماند ولی تجربه نشان می دهد که نه تنها نوسانات جرم m از بین نرفته و دائماً تکرار می شود.بلکه دامنه نوسانات مرتباً افزایش می یابد و سیستم ناپایدار می شود. برای توجیه چنین حرکتی لازم است توجه نمود که اصطکاک خشک (کولمب) ثابت نیست بلکه با افزایش سرعت نسبی کاهش می یابد (شکل ۷-۳) در اینصورت اگر بعلت یک اغتشاش اولیه سیستم شروع به حرکت نماید. نیروی اصطکاک همواره در جهت سرعت $\overrightarrow{v}$ است (با این فرض که سرعت جرم همواره کوچکتر از $\overrightarrow{v}$ است ثابت نبوده، وقتی که جرم در جهت سرعت حرکت می نماید، مقدار بیشتری خواهد شد (زیرا سرعت نسبی کمتر است)). با توجه به اینکه هنگامیکه جرم m در جهت سرعت $\overrightarrow{v}$ حرکت می کند کار مثبت در جهت عکس کار منفی انجام

می شود. نتیجه می گیریم که در یک سیکل کامل کار مثبتی به سیستم داده می شود. بنابراین انرژی به سیستم اضافه شده و این افزایش انرژی صرف بالا بردن دامنه حرکت می شود. این پدیده را پدیده خود مرتعش یا ($Self\ Excited\ Oscillations$) می نامند زیرا عامل تحریک با حرکت جرم بوجود آمده و با ساکن شدن آن از بین می رود. نمونه صنعتی این پدیده (شبیه مثال فوق) هنگامی بوجود می آید که از قلم ماشین تراش برای بار گرفتن از روی قطعه کار استفاده می شود. و احتمالاً در نتیجه چسبیدن و لغزیدن های مکرر قلم بر روی قطعه کار تولید صدا ناهنجاری می کند که این پدیده را $Chatter$ می گویند.



شکل ۷-۲ پدیده خود مرتعش



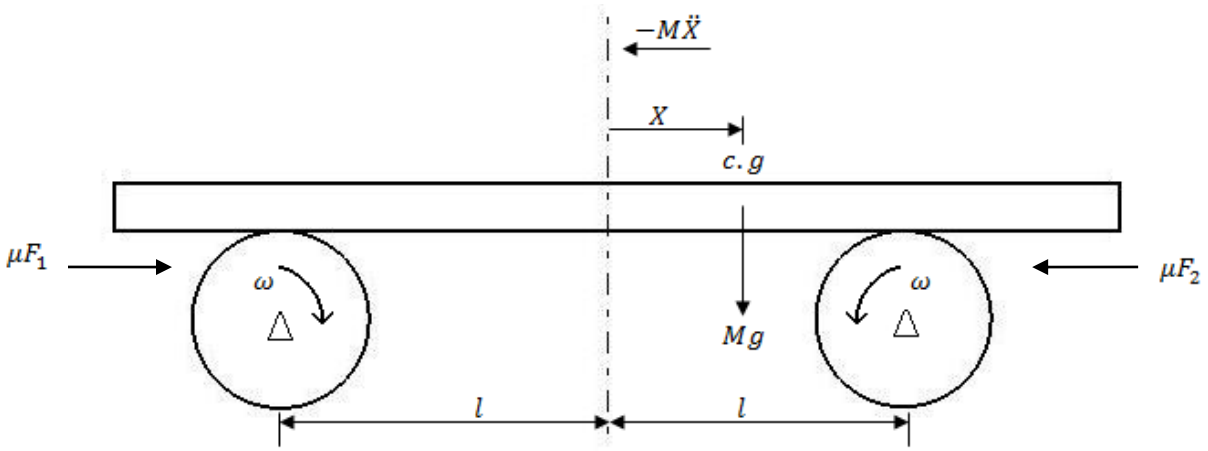
شکل ۷-۳ تغییرات ضریب اصطکاک کولمبی بر حسب سرعت نسبی

۷-۳- دستگاه آزمایش :

دستگاه آزمایش از قطعه ای تشکیل شده که بر روی دو غلتک قرار داد این غلتک ها توسط یک موتور الکتریکی با دور متغیر هر دو با سرعت ثابتی ولی در جهت خلاف یکدیگر در هر لحظه می گردند. دور خروجی شافت موتور دور متغیر را می توان به وسیله چرخ فلکه ای یک گیر بکس با نسبت تبدیل متغیر تغییر داد.

۷-۴- تئوری دستگاه آزمایش :

دستگاه آزمایش را می توان توسط مدل شکل۷-۴ نشان داد.



شکل ۷-۴ مدل سیستم خود مرتعش

با فرض آنکه ضریب اصطکاک روی هر دو غلطتک یکسان و ثابت باشد. هرگاه جرم m را به مقدار x در حالت تعادل خارج کرده و رها کنیم چون دو نیروی عکس العمل F_1 و F_2 مساوی نیستند و همچنین بین غلتک و قطعه اصطکاک موجود است، دونیروی غیر مساوی μF_1 و μF_2 (در راستای افقی) بر قطعه وارد شده باعث حرکت آن می شوند. این نیرو با نیروی اینرسی خنثی می شود. (اصل دالامبر)

$$F_1 = \frac{mg}{2}(1 - {}^{x}/_{l}) \qquad ۲\text{-}۷$$

$$F_2 = \frac{mg}{2}(1 + {}^{x}/_{l}) \qquad ۳\text{-}۷$$

$$m\ddot{x} + \mu(F_1 + F_2) = 0 \qquad ۴\text{-}۷$$

$$\ddot{x} + {}^{\mu g x}/_{l} = 0 \qquad ۵\text{-}۷$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\mu g}{l}} \qquad ۶\text{-}۷$$

یعنی که اگر جرم از حالت $x = 0$ خارج شده، رها شود شروع به ارتعاشات هارمونیک ساده با فرکانس طبیعی می نماید :

$$\tau_n = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{\mu g}{l}}} \qquad ۸-۷$$

دقت شود که این فرکانس مستقل از سرعت دورانی غلتک می باشد و این بدین دلیل است که از ابتدا ضریب اصطکاک ثابت فرض شده است. در حالیکه عملاً ضریب اصکاک بین قطعه و غلتکی که حرکتش در جهت خلاف حرکت قطعه است به علت آن که دارای سرعت نسبی بیشتر است، کمتر از ضریب اصطکاک بین قطعه و غلتک دیگر که به حرکت قطعه کمک می کند می باشد. پس دراین حال نیز انرژی به سیستم داده شده، یا کار مثبت روی آن انجام شده و باعث افزایش دامنه حرکت می گردد. که باز هم پدیده خود مرتعش است.

همانطور که گفته شد، پریود حرکت فوق مستقل از سرعت دورانی غلتک ها است ولی حقیقتاً می توان غلتک را در سرعت های مختلف به حرکت در آورد و ضریب اصطکاک را بر حسب سرعت از رابطه فرکانس پیدا کرده و رسم نمود. نکته جالب توجه در رابطه فرکانس طبیعی حرکت ω_n آن است که مقدار آن به مقدار جرم M بستگی ندارد.

۷-۴- روش آزمایش :

۱- ابتدا موتور را با دور کم به راه اندازید.

۲- قطعه مورد نظر را به تنهایی روی غلتک ها قرار داده و سپس توسط تاکومتر (دورسنج نوری) دور یکی از غلتک ها را اندازه بگیرید. حال قطعه را در حالت افقی از وضعیت تعادل اش کمی خارج کرده رها کنید تا شروع به نوسان نماید. توسط یک کرنومتر زمان چند سیکل نوسانات قطعه را اندازه گیری نمائید.

۳- آزمایش را برای چند دور مختلف انجام دهید.

۴- جرم اضافی را در وسط قطعه قرار داده و برای یکی ازدوره های قبلی آزمایش را تکرار نماید.

۵- موتور را خاموش کرده و فاصله بین مراکز غلتک ها را اندازه بگیرید.

۷-۵- خواسته های آزمایش :

۱- فرکانس طبیعی سیستم را در دوره های مختلف بدست آورده و از آنجا ضریب اصطکاک را برای هر دور غلتک محاسبه نمائید. منحنی تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب نسبی را رسم نمایید. آیا منحنی حاصل شده در حد انتظار است؟

۲- اثر اضافه کردن جرم در وسط قطعه را بر روی فرکانس طبیعی تشریح کنید.

۳- آیا عملاً سیستم فوق پایدار است؟ چرا؟

۴- به چه دلیل با دلایلی مطالعه این پدیده حائز اهمیت است.مثال های صنعتی پدیده را نقل کنید.

آزمایش شماره ۸- آزمایش ژیروسکوپ(*Gyroscope*)

Screenshot of the VDAS® software

هدف آزمایش : نشان دادن اثرات ژیروسکوپی و تعیین رابطه بین کوپل اعمالی و سرعت پیش روی در یک ژیروسکوپ

۸-۱- مقدمه :

ژیروسکوپ دستگاهی است که می تواند حول محور دورانش آزادانه حرکت کند. اگرمقدار ممنتم زاویه ای ثابت باشد محور ژیروسکوپ ox ثابت می ماند و این تا موقعی است که کوپلی روی محور آن وارد نشود، حال اگر روی محور ژیروسکوپ کوپلی اعمال گردد (در جهتoz) ژیروسکوپ دوّار شروع به چرخش می نماید و بردار چرخش oy با بردار کوپل زاویه ۹۰ درجه می سازد. این گردش حول محور را اصطلاحاً پیش روی(Precession) و کوپل اعمالی را کوپل ژیروسکوپی گویند.

کاربردهای ژیروسکوپ در مهندسی جالب توجه است. کوپل ژیروسکوپی که بوسیله مولفه های دورانی حاصل می شود در بعضی موارد اثرات نامطلوبی را در پایداری وسیله نقلیه میگذارد.

برای مثال وقتی یک وسیله نقلیه یک خم را دور می زند کوپل ژیروسکوپی که به علت چرخش محور چرخ ایجاد شده ، سبب واژگونی وسیله نقلیه می گردد. در تغییر جهت هواپیما ، کوپل ژیروسکوپی حاصله از مؤلفه دورانی سبب بالا و پایین رفتن آن می شود. همچنین کوپل حاصل توسط موتور توربین در کشتی سبب تاب خوردن آن میگردد. با توجه به این پدیده، طراح قادر خواهد بود کوپل را محاسبه و از اثرات نامطلوب آن جلوگیری نماید.

۸-۲- تئوری:

الف- محاسبه کوپل ژیروسکوپی :

فرض کنید دیسک با سرعت زاویه ایω (شکل ۸-۱) در جهت نشان داده شده دوران کند و محور آن هم در ox صفحه xoz با سرعت ω_p(حولoy) بچرخد، مقدار ممنتم زاویه ای دیسک در یک لحظه معین بردار$\overrightarrow{oa}$ است و وضعیت آن بعد از زمانδt با بردار$\overrightarrow{ob}$ مشخص میشود. بنابراین تغییرات ممنتم زاویه ای در این فاصله زمانی بردار$\overrightarrow{\text{ab}}$ است که این تغییر ممنتم زاویه ای فقط در اثر کوپل بوجود می آید. پس کوپل وارده برابر میزان تغییرات ممنتم زاویه ای است یعنی:

$$T = \frac{\delta(I\omega)}{\delta t} \qquad ۱ - ۸$$

جهت خنثی کردن کوپل ژیروسکوپی در حالتهای مختلف شکل ۸-۱

اما

$$\delta(I\omega) = ab = oa\,.\,\delta\theta \qquad ۲\text{-}۸$$

که در آن $\delta\theta$ زاویه ای است که محور چرخش در فاصله زمانی δt می پیماید.

$$T = oa\,.\frac{\delta\theta}{\delta t} = I\omega.\frac{\delta\theta}{\delta t} \qquad ۳\text{-}۸$$

در حد وقتی δt به سمت صفر میل کند:

$$T = oa\,.\frac{d\theta}{dt} = I\omega\,.\,\omega_p \qquad ۴\text{-}۸$$

که در آن:

ω_p :سرعت زاویه ای پیشروی $(Precession)(\frac{rad}{s})$

I :ممان اینرسی دیسک و آرمیچر $kg.m^2$ ω : سرعت زاویه ای دیسک$(\frac{rad}{s})$

ب- جهت کوپل ژیروسکوپ

با توجه به شکل بردار$\overrightarrow{ab}$ در صفحهxoz قرار گرفته و در حد وقتی کوچک باشد جهتش بر$\overrightarrow{oa}$ و در نتیجه صفحه xoyعمود است. پس کوپل وارده بایستی در صفحهxoy اعمال شود و اگر این را با قاعده دست راست تطبیق کنیم برای وقتی که در جهت$\overrightarrow{ab}$ نشان داده شود (جهت oz) جهتش میبایست در جهت حرکت عقربه های ساعت باشد.

ج- محاسبه گشتاور ماند محور دوّار و دیسک:

جهت بررسی فرمول ۸-۵ لازم است ممان اینرسی رتور محاسبه شود. برای این کار رتور را بوسیله دوسیم مطابق شکل ۲-۲ به حالت تعلیق در می آوریم. اگر جرم آنM و طول سیمها برابرL و فاصله آنها d باشد، در این صورت معادله حرکت دورانی رتور به شکل ذیل است:

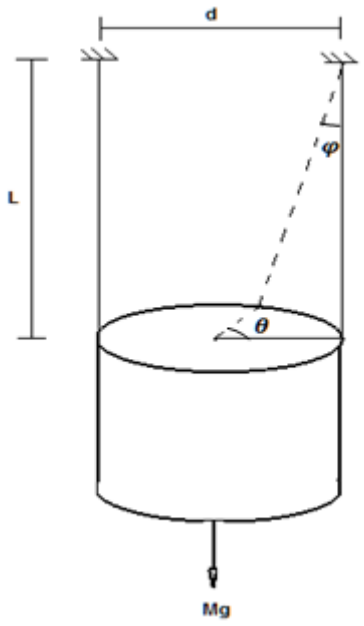
$$\sum M = I\alpha \qquad ۵-۸ \qquad I\ddot{\theta} = -\frac{Mgd^2\theta}{4L} \qquad ۶\text{-}۸$$

که یک حرکت ها رمونیک ساده بوده و پریود آن برابر است با :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{4IL}{Mgd^2}} \qquad ۷\text{-}۸$$

لذا مقدار ممان اینرسی برابر است با:

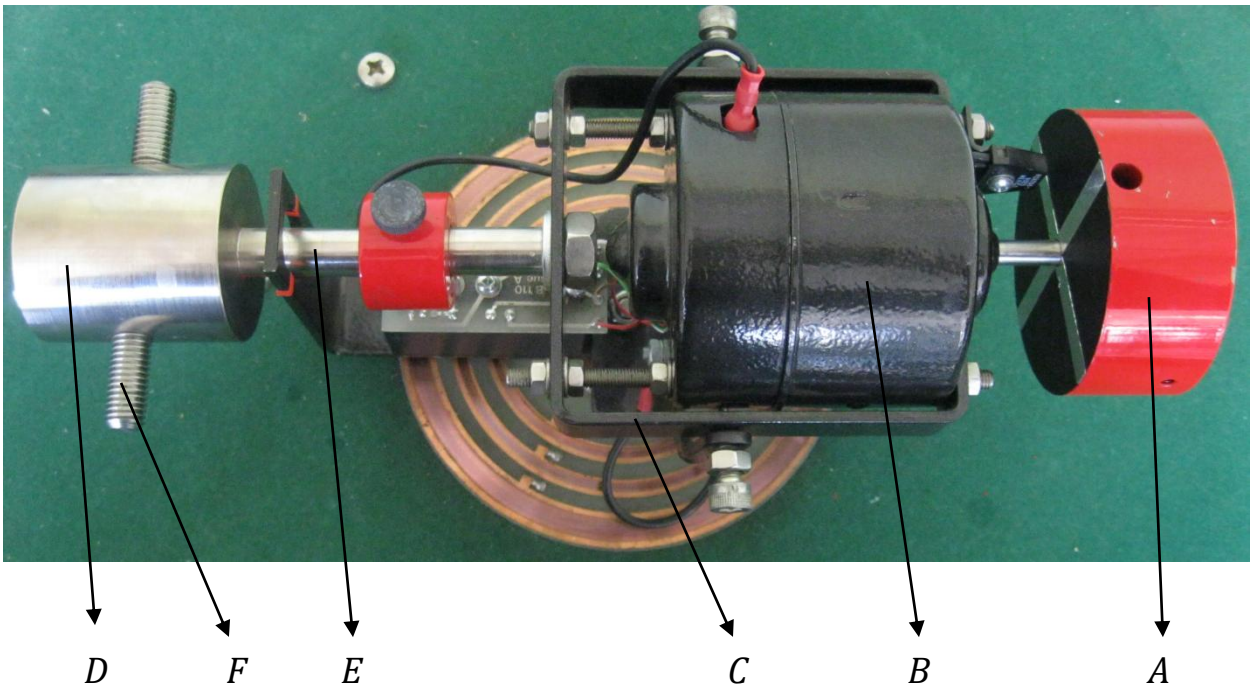
$$I = \frac{Mgd^2T^2}{16\pi^2L}$$ ۸-۸



شکل ۸-۱ محاسبه اینرسی موتور

۸-۳- شرح دستگاه:

دستگاه $TM104$ شامل یک دیسک دوّار A است که روی محور موتور کوچکی قرار گرفته و به وسیله گهواره C $(Gimbal)$ نگهداشته می شود. این مجموعه میتواند حول محور قائم بوسیله موتوری که در پایه جای گرفته، حرکت دورانی کند.



شکل ۸-۲ موتور ژیروسکوپ و سایر اجزاء

به یک انتهای موتور بازوی گشتاوری که جرم D را نگه داشته متصل است که تعادل موتور ودیسک دوّار را برقرار می کند. جرمهای اضافی در محل F جهت بالانس کوپل ژیروسکوپی به انتهای بازو متصل می شود. یک پوشش شفاف بر روی دستگاه قرار گرفته که با برداشتن آن موتورها متوقف میشوند. سرعت موتورها با دستگاه کنترل سرعت $E91$ کنترل میشود. سرعت دوران موتور را میتوان از روی سرعت سنج $E64$ بدست آورد. سرعت پیشروی با کرنومتر اندازه گیری می شود. ممان اینرسی رتور، آرمیچر با معلق نمودن آنها از بازو و اندازه گیری زمان نوسان بدست می آید.

۸-۴- روش انجام آزمایش :

اتصالات الکتریکی:

ترانسفورمر $E66$ را به برق وصل کرده و اتصالات دنباله را انجام دهید. ترمینالهای ورودی ۱۲ ولت دستگاههای $E64$ و $E91$ را به ترمینال خروجی $E66$ وصل کنید. یک جفت از ترمینالهای خروجی $E91$ را به ترمینال ورودی دستگاه آزمایش و جفت دیگر را به ترمینال

ورودی پیش روی($Precession$) وصل نمائید. ورودی سرعت سنج $E64$ را به پریز خروجی دستگاه آزمایش وصل کنید.

آزمایش اول:

a - تغییرات کوپل بر حسب سرعت پیشروی (ω_p) با سرعت رتور (ω) ثابت

دستگاه در صورتی تنظیم است که خط افقی روی انتهای بازوی گشتاور در صفحه خط روی دوره سرپوش (درب شفاف) باشد. در غیر این صورت با شل کردن پیچهای روی دیسک که آن را روی محور رتور محکم کرده کمی جای دیسک را بر روی محور تغییر دهید تا تنظیم شود و سپس پیچها را محکم کنید. این عمل صورت گرفته ونیازی به انجام آن نیست.

جرم ۱۰۰ گرمی را در انتهای بازوی گشتاور پیچ کنید و سرپوش را در محل خود قرار دهید. به رتور سرعت کمی بدهید. با استفاده از واحد کنترل سرعت $E91$ موتور چرخنده را نیز بچرخانید. کوپل ژیروسکوپی حاصل، بازوی گشتاور را بلند می کند.

حال سرعت رتور را روی ۲۰۰۰ دور/دقیقه تنظیم کرده و سرعت پیشروی را تغییر دهید تا خط روی بازوی گشتاور در صفحه خط دور سرپوش قرار گیرد. این حالت تعادل است که درآن کوپل ژیروسکوپی برابر با ممان حال از جرم روی بازوی گشتاور است. حالت تعادل را برای چهار کوپل مختلف بدست آورده سرعت پیشروی را در هر حالت با کرنومتر تعیین کنید (زمان چرخش ۳۰ دور را تعیین کرده و از روی آن سرعت زاویه ای را بدست آورید) و با کوپلهای مربوطه یادداشت نمائید.

b - تغییرات کوپل بر حسب سرعت موتور با سرعت (ω) و سرعت پیشروی ثابت (ω_p)

در این آزمایش سرعت موتور پیشروی را در مقدار نسبتا زیادی ثابت نگه داشته و با وارد کردن کوپل مشخصی سرعت رتور را برای رسیدن به حالت تعادل بدست آورید. آزمایش را با چهار کوپل مختلف انجام دهید (از جرم ۱۰۰ گرمی شروع کنید). و مقادیر سرعت رتور، کوپل مربوطه وسرعت موتور پیشروی ω_p را یادداشت کنید.

آزمایش دوم:

- تغییراتω بر حسب$\frac{1}{\omega_p}$ با کوپل ثابت

برای آنکه کوپل ثابتی بدستگاه وارد شود جرم دلخواهی (مثلا ۱۰۰ گرمی) را روی بازوی گشتاور قرار دهید و برای آنکه به یاتاقان ها نیروی نامتعالی وارد نشود به اندازه نصف این جرم در طرف مقابل اضافه کنید. سرعت رتور را در دور دلخواهی قرار داده (از ۱۰۰۰ دور شروع کنید) و سرعت موتور پیشروی را طوری تنظیم نمائید که دستگاه در حال تعادل قرار گیرد. بوسیله کرنومتر سرعت پیشروی را بدست آورید (تعداد مثلا ۲۰ دور آنرا بدست آورده و از روی آن سرعت را تعیین کنید) و با سرعت رتور یادداشت نمائید.

سپس سرعت رتور را تغییر داده و آزمایش را تکرار کنید تا به حالت تعادل برسید. این آزمایش را در ۵ سرعت مختلف رتور انجام داده و نتایج بدست آمده را یادداشت کنید.

۸-۵- محاسبه کوپل

برای محاسبه کوپل ژیروسکوپی به ممان اینرسی رتور احتیاج است برای تعیین آن آرمیچر اضافی و رتور را از گیره جدا کرده و بازوی تکیه گاه را نیز باز کنید. رتور را بر روی بازو مطابق شکل ۸-۱ آویزان کرده وآنرا حول محور قائم در حدود ۱۰ درجه بچرخانید و سپس رها کنید. از کرنومتر برای تعیین زمان نوسان استفاده کنید. طول سیم و فاصله آنها را اندازه بگیرید. جرم رتور kg ۱/۳است. با استفاده از فرمول ۸-۸ ممان اینرسی بدست می آید.

۸-۶- خواسته های آزمایش :

۱- با استفاده از نتایج آزمایش اول (a)منحنی تغییرات سرعت پیشروی$(\frac{rad}{s})\boldsymbol{\omega_p}$ را بر حسب کوپل محاسبه شده وکوپل حقیقی $(N.m)$رسم کنید.

۲- با استفاده از نتایج آزمایش اول(b) منحنی تغییرات سرعت موتور$(\frac{rad}{s})\boldsymbol{\omega}$ را بر حسب کوپل محاسبه شده و کوپل حقیقی$(N.m)$ رسم کنید.

۳- با استفاده از نتایج آزمایش دوم منحنی تغییرات$\frac{1}{\omega p}$ را بر حسب$\boldsymbol{\omega}$ رسم کنید.

۴- با استفاده از منحنی فوق ممان اینرسی رتور را بدست آورده و با نتیجه تئوریک مقایسه کنید.

آزمایش شماره ۹- آزمایش بالانس استاتیکی و دینامیکی

۹-۱- مقدمه :

شافتها که در سرعتهای بالائی میچرخند بایستی به دقت بالانس گردند و در غیر این صورت، خود سرچشمه ارتعاش خواهند بود. چنانچه شافتی کمی خارج از مرکزی داشته باشد و با سرعت کمی بچرخد، ارتعاش حاصل ممکن است زیاد قابل توجه نباشد ولی در سرعتهای بالا وجود کمی غیر بالانسی ممکن است موجب شکست محور گردد.

مثال بارزی از اثر غیر بالانسی را میتوان در چرخ اتومبیل مشاهده نمود چنانچه چرخ جلو اتومبیل کمی خرج از مرکزی داشته باشد میتوان ارتعاش و لرزش را در سیستم فرمان حس کرد. اگر این خارج از مرکزی قابل توجه باشد کنترل ماشین غیر ممکن و بلبرینگ چرخ ها و سیستم تعلیق، بخصوص اگر فرکانس ارتعاش برابر با یکی از فرکانسهای طبیعی سیستم باشد به سرعت ساییده و از بین می رود. این مسائل بشرط اینکه جرم کوچکی در نقطه ای که موقعیت آن قابل محاسبه است روی لبه چرخ گذاشته شود قابل حل است. به همین دلیل روی لبه چرخها، قطعات کوچک سرب را می توان مشاهده کرد که نصب شده اند. بسیار مهم و ضروری است که شافت و رتورهای توربین های گازی که در سرعت های دورانی بین $۱۵۰۰۰rpm$ تا $۵۰۰۰۰\ rpm$ می چرخند کاملا بالانس شده و کوچکترین خارج از مرکزی نداشته باشند. در چنین سرعتهایی کوچکترین غیربالانسی سبب ارتعاش و لقی در یاتاقانها و شکست موتور است.

گذاشتن جرم در جائی از شافت بطوریکه محور در یک موقعیت ساکن قرار گیرد و به عبارت دیگر تعادل استاتیکی کافی نبوده زیرا با چرخش شافت نیروی پریودیک سانتریفیوژ بوجود آمده و موجب ارتعاش می گردد. بنابراین لزوم تعادل استاتیکی و دینامیکی برای شافت محسوس است.

معمولاً شافتها روی دستگاههایی مخصوص سوار می شوند و نقاطی که بایستی به آنها جرم اضافه ویا کم گردد را نشان می دهند. دستگاه $TM102$ موجود دستگاهی است که ابتدا دانشجو بالانس شافت را از طریق روشهای محاسباتی و یا ترسیمی صورت داده و سپس نتایج خود را روی آن آزمایش می کند. چهار عدد بلوک وجود دارد که میتوان بوسیله آنها در روی شافت ایجاد تعادل و یا عدم تعادل کرد.

۹-۲- تئوری:

یک محور با جرمهایی که رویش قرار میگیرد میتواند هم بالانس استاتیکی و هم بالانس دینامیکی گردد. چنانچه شافت بالانس استاتیکی شده باشد در هر موقعیت زاویه ای قرار گیرد بدون حرکت باقی خواهد ماند. همچنین اگر بالانس دینامیکی شده باشد در هر سرعتی بدون ارتعاش خواهد چرخید. نشان داده خواهد شد چنانچه محوری بالانس دینامیکی شده باشد بالانس استاتیکی نیز است ولی عکس آن صادق نمی باشد.

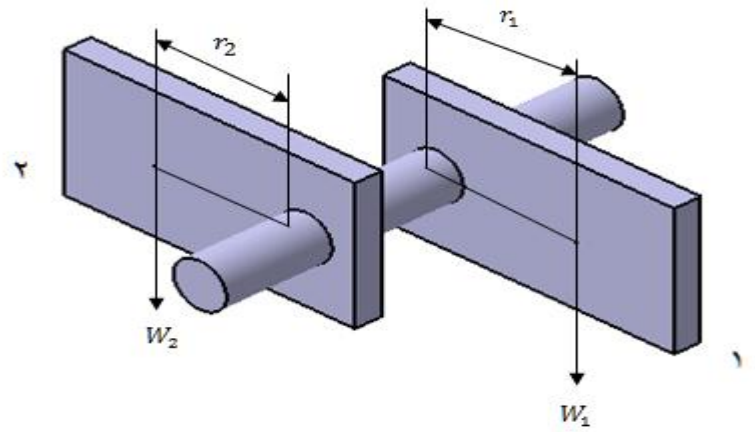
۹-۲-۱- بالانس استاتیکی:

شکل ۹-۱ وضعیت ساده ای از دو جرم که روی محوری قرار گرفته اند را نشان می دهد چنانچه محور دارای بالانس استاتیکی باشد، ممان ناشی از وزن جرم(۱) که تمایل به چرخاندن محور در جهت عقربه های ساعت را دارد بایستی با ممان ناشی از جرم(۲) که تمایل به چرخاندن آن در خلاف جهت عقربه های ساعت دارد برابر باشد. یعنی:

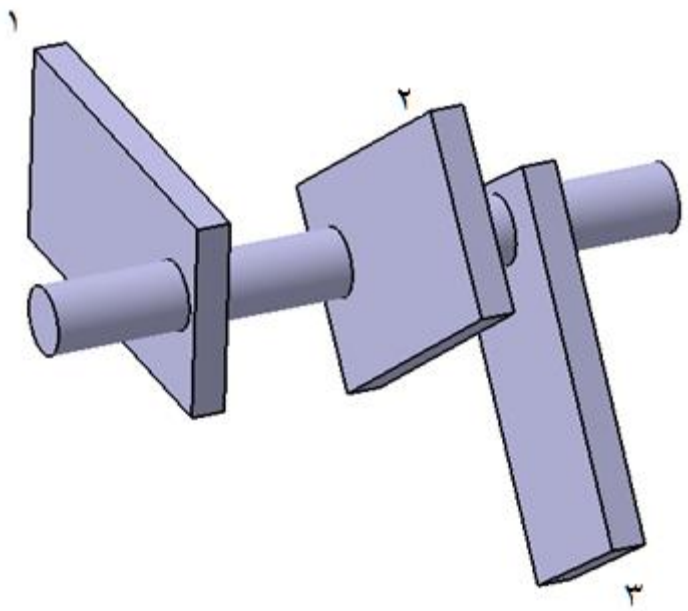
$$w_1 r_1 = w_2 r_2 \qquad ۹-۱$$

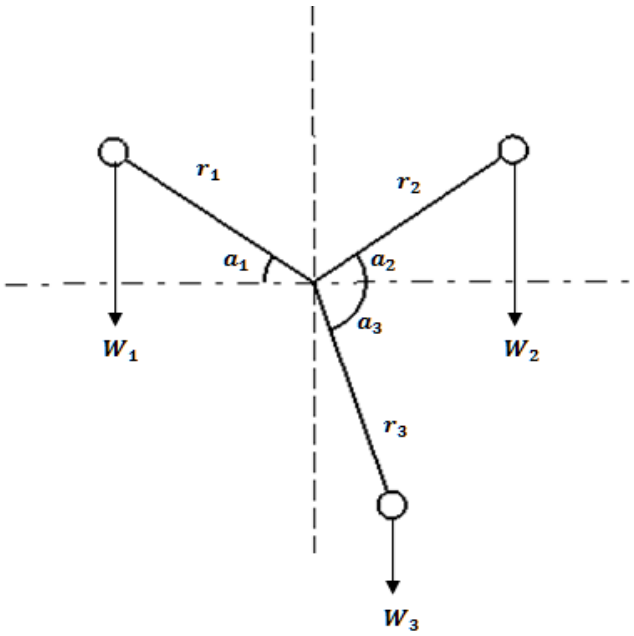
چنین اصلی برای پیش از دو جرم چنانچه بر روی محوری باشند و در تعادل استاتیکی بوده باشند برقرار است. برای محور شکل ۹-۲ که دارای سه بلوک بوده و در تعادل استاتیکی هست میتوان نوشت:

$$w_1 r_1 \cos\alpha_1 = w_2 r_2 \cos\alpha_2 + w_3 r_3 \cos\alpha_3 \qquad ۹-۲$$

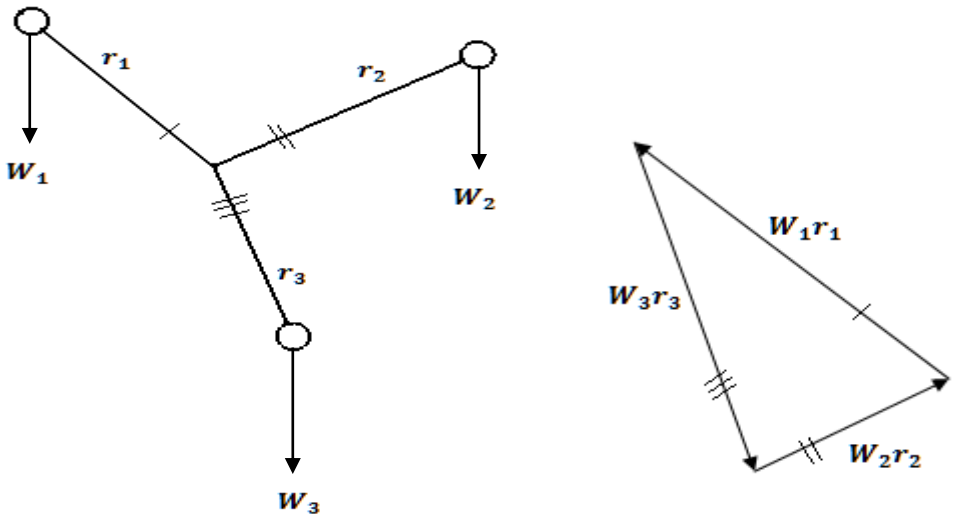


شکل ۹-۱: سیستم با دو جرم

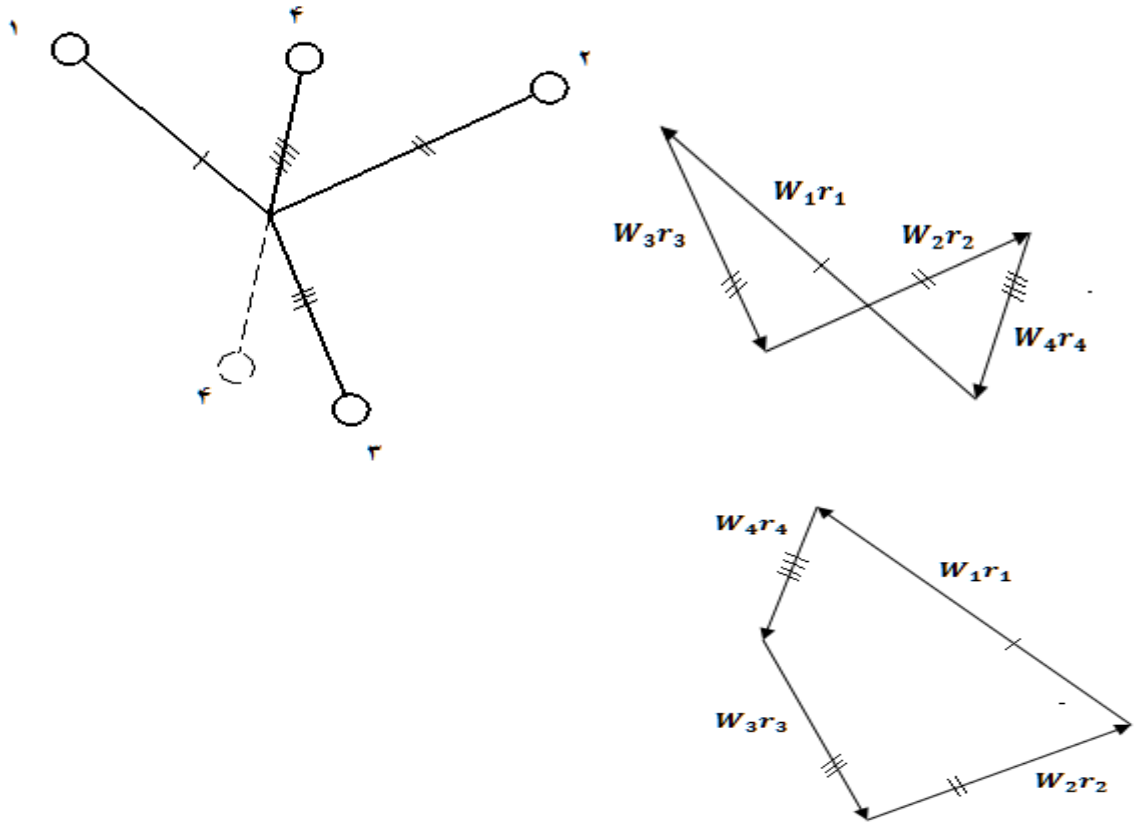




شکل ۹-۲: سیستم با سه جرم



a) سیستم با سه جرم



b) سیستم با چهار جرم

شکل ۹-۳ : کثیر الاضلاعهای ممان برای سیستم با سه جرم و چهار جرم در بالانس استاتیکی

اصولا مقادیر w, r, α چنان باید انتخاب شوند که محور در تعادل استاتیکی باشد در هر صورت برای آزمایش با بکار بردن دستگاه $TM1020$ می توان حاصل ضرب wr را مستقیما اندازه گرفت و تنها جهت تعادل استاتیکی موقعیت جرم باید حساب گردد. چنانچه موقعیت دو جرم در روی شافت تثبیت شود می توان موقعیت جرم سوم را از طریق محاسبه و یاترسیم بدست آورد. روش دوم (ترسیمی) این را بکار می گیرد که ممان نیروی وزن ها (جرم ها) بصورت بردار و متناسب با حاصلضرب wr و موازی خط اتصال ازمرکزمحور تا مرکز جرم است. برای برقراری تعادل بایستی مثلث بردارهای ممان بسته شود در این صورت ممان نامعلوم بدست می آید. (شکل(a) ۹-۳) هرگاه تعداد جرمها بیش از سه بوده کثیرالاضلاع بردارهای ممان همانطوریکه در شکل (b)۹ – ۳ دیده می شود بسته خواهد شد. ترتیب رسم بردارها مهم نمی باشد. چنانچه دو نمونه مختلف از رسم بردارها آمده است. هرگاه در ترسیم بردار نهایی جهتش مخالف آن جهتی باشد که فرض شده درآن صورت موقعیت فرض جرم بایستی عوض شود. برای مثال موقعیت جرم(۴) در شکل (b)۹ – ۳ بایستی دو وضعیت خط چین به جای خط پر باشد تا با وضعش در دیاگرام برداری ممان تطابق داشته باشد.

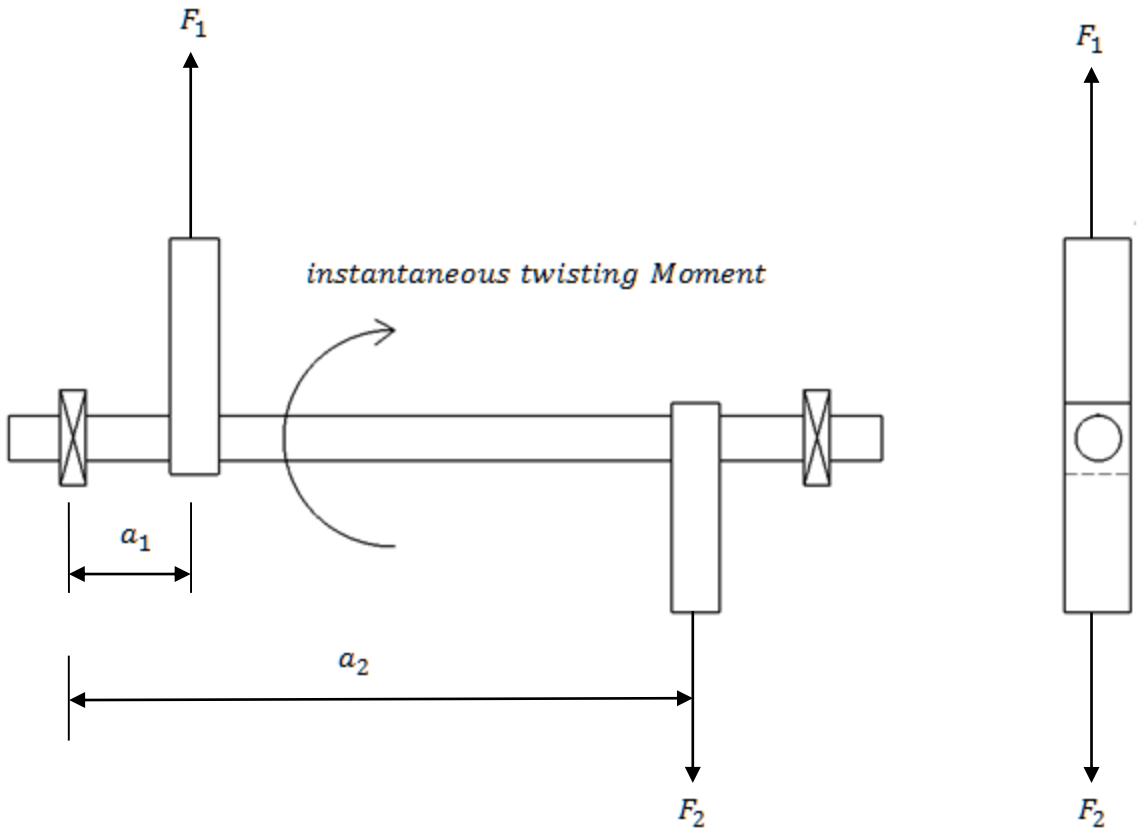
۹-۲-۲- بالانس دینامیکی

جرمهای مونتاژ شده روی شافتها ، موقعیکه آنها با سرعت بچرخند تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز قرار می گیرند. دو شرط زیر بایستی جهت جلوگیری از ارتعاش یک شافت موقعی که به چرخش در می آید برقرارباشد.

a– وجود نداشتن هرگونه نیروی غیربالانسی گریز از مرکز که موجب انحراف محور گردد.

b– وجود نداشتن هرگونه ممان و یا کوپل غیربالانسی که موجب انحراف طولی شافت گردد.

چنانچه این دو شرط برقرار باشد محور در تعادل دینامیکی خواهد بود.



شکل ۹-۴ : سیستم با دو جرم بدون تعادل دینامیکی

با بکار بردن شرط برای محور نشان داده شده در شکل ۹-۴رابطه زیر برقرار است.

$$F_1 = F_2 \qquad ۹-۳$$

نیروی گریز از مرکز $mr\omega^2$ و یا $\frac{w}{g}r\omega^2$ می باشد یعنی:

$$\frac{w_1}{g}r_1\omega^2 = \frac{w_2}{g}r_2\omega^2 \qquad ۹-۴$$

چون سرعت دورانی دو جرم برابر با سرعت دورانی شافت میباشد پس:

$$w_1 r_1 = w_2 r_2 \qquad ۹-۵$$

این رابطه همان نتیجه را دارد که برای تعادل استاتیکی در معادله ۹-۱ حاصل شد. بنابرای اگر محوری بطور دینامیکی در تعادل باشد بطور استاتیکی در تعادل خواهد بود. دومین شرط با گرفتن ممان حول مبنای مناسبی نظیر یکی از یاتاقانهاحاصل میشود.

$$a_1 F_1 = a_2 F_2 \qquad ۹-۶$$

اما از معادله ۹-۳ چون $F_{1=}F_2$ است وبه ناچار $a_{1=}a_2$ بنابراین دراین مثال ساده وقتی تعادل دینامیکی وجود دارد که دو جرم در موقعیت یکسانی از محور قرار گیرند. چون نقطه مبنا در نتیجه تأثیری ندارد بنابراین بهتر است همیشه حول یکی از جرمها ممان گرفته شود تا خود به خود آن یکی حذف شود و محاسبات آسان ترشود برای مثال میتوان نوشت:

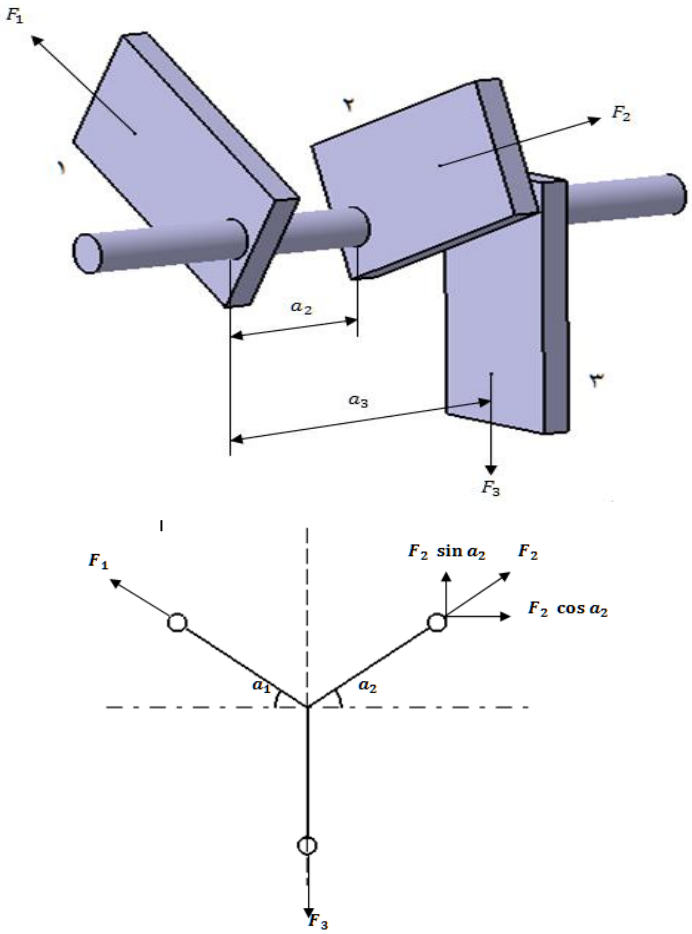
$$F_2(a_2 - a_1) = 0 \qquad ۹\text{-}۷$$

از آنجایی که مقدار نیروی گریز از مرکز نمی تواند صفر باشد، بنابراین بایستی نظیر قبل $a_1 = a_2$ گردد برای برقراری تعادل استاتیکی قرار دادن جرم ها در طول شنافت روبروی هم مهم نمی باشد. در حالیکه برای از بین بردن انحراف طولی شافت قرار دادن آنها در روبروی هم ضروری است.

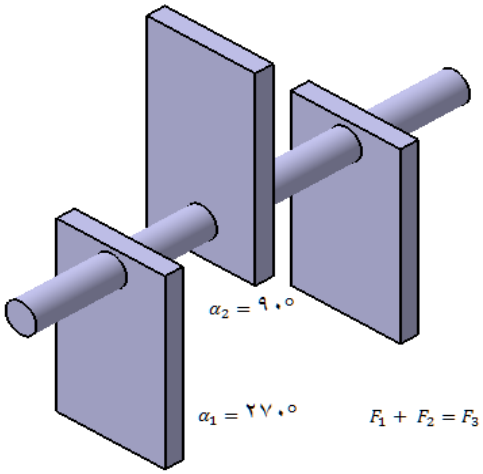
۹-۲-۳- بالانس دینامیکی سه جرم:

دیده شد که برای بالانس دینامیکی دو جرم واقع بر یک محور بایستی جرمها در یک نقطه روبرو هم روی محور قرار گیرند. همچنین شرایط بخصوص برای بالانس دینامیکی سه جرم وجود دارد.

شکل(a) ۹-۵ در نظر گرفته می شود. جرم (۳) بطور عمودی روی محور قرار گرفته است برای برقراری شرط (b) برای تعادل دینامیکی را می توان با مساوی قرار دادن ممان نیروهای گریز از مرکز حول یکی از جرمها (۱)، در دو جهت قائم و افقی عملی ساخت. ممان نیروهای مار از این نقطه حول آن حذف خواهد شد.



a) حالت کلی برای سیستمی با سه جرم



b)جای واقعی قرار گرفتن جرمها در روی محور

شکل ۹-۵ تعادل دینامیکی برای سیستم با سه جرم

ممان نیروهای در جهت افقی :

$$a_2F_2\cos\alpha_2 = 0$$ ۹-۸

ممان نیروهای در جهت قائم :

$$a_2F_2\sin\alpha_2 = a_۳\,F_۳$$ ۹-۹

برای برقراری شرایطی که معادله ۹-۸ برقرار باشد بایستی

$a_2 = 0$ یا $\alpha_2 = ۹۰°$ یا ۲۷۰° (یعنی $\cos\alpha_2 = 0$) با جایگزین کردن درمعادله

۹-۹ نتایج زیر حاصل می شود.

در حالتی که باشد بدین ترتیب برای مقادیر دلخواه سه جرم بایستی در یک نقطه روی محور باشد.

در حالیکه است لزوم نوشتن معادلات بیشتری جهت حل مسئله وجود دارد. برای برقراری شرط تعادل دینامیکی میتوان نوشت.

در جهت افقی :

$$F_1\cos\alpha_1 = F_2\cos\alpha_2$$ ۹-۱۰

در جهت قائم :

$$F_3 = F_1\sin\alpha_1 + F_2\sin\alpha_2$$ ۹-۱۱

چنانچه $\alpha_2 = ۹۰°$ باید $\alpha_1 = ۹۰°$ یا ۲۷۰° فرض می شود که $\alpha_1 = ۹۰°$ باشد معادله ۹-۱۱ بصورت :

$$F_3 = F_1 + F_2$$ ۹-۱۲

همچنین معادله ۹-۹ بصورت زیر در می آید.

$$a_2F_2 = a_3F_3$$ ۹-۱۳

با ترکیب دو معادله فوق و حذف F_2 مقدار F_1 برحسب F_3 حاصل می شود.

$$F_1 = F_3\left(1 - \frac{a_3}{a_2}\right)$$ ۹-۱۴

چنانچه a_3 بزرگتر از a_2 باشد همانطوریکه در شکل دیده می شود باید F_1 منفی باشد و α_1 باید مقدار ۲۷۰° را بجای ۹۰°فرض شده انتخاب کند. نتیجه تعادل دینامیکی این حالت در شکل(b)۹-۵ نشان داده شده است.

بدین ترتیب اگر جرمها در طول محور قرار گیرند برای تعادل دینامیکی باید شرایط زیر برقرار باشد:

۱- جرم وسطی باید نسبت به دو جرم دیگر ۱۸۰° اختلال موقعیتی داشته باشد.

۲- جرمهای انتخابی چنان باشند که:

$$F_3 = F_1 + F_2 \qquad ۹ - ۱۵$$

۳- وضع قرار گرفتن جرمها باید چنان باشد که در معادله زیر صادق باشد.

$$a_2F_2 = a_3F_3 \qquad ۹ - ۱۶$$

۹-۲-۴- تعادل دینامیکی بیش از سه جرم:

هرگاه بیش از سه جرم روی محور وجود داشته باشد هیچگونه محدودیتی برای موقعیت زاویه ای و توزیع آنها در طول محور وجود ندارند. و شرایط عمومی برای بالانس دینامیکی آنها باید وجود داشته باشد.

موقعیت زاویه ای جرمها را میتوان از طریق تعادل استاتیکی و یا شرط۱ تعادل دینامیکی بدست آورد. توزیع جرمها در طول محور از طریق شرط۲ تعادل دینامیکی حاصل می شود. این توزیع جرمها را می توان از راه محاسبه و یا روش ترسیمی مشابه آنچه در تعادل استاتیکی گفته شد انجام داد.

۹-۲-۴-۱- روش محاسباتی:

ممان های خمشی شافت در دو صفحه قائم و افقی تجزیه می شود که در آن صورت باید جمع جبری مولفه های آنها در دو صفحه افق و قائم صفر باشند. همانند حالت قبلی گرفتن ممان حول یکی از جرمها، مسئله را سهل تر می کند. با مراجعه به شکل ۹-۶ معادلات مناسب برای چهار جرم عبارتند از:

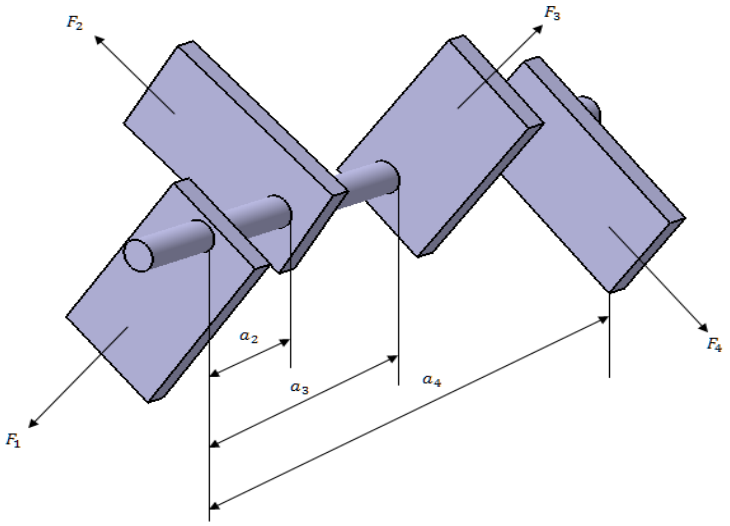
مولفه ممانها در جهت قائم – حول جسم (۱)

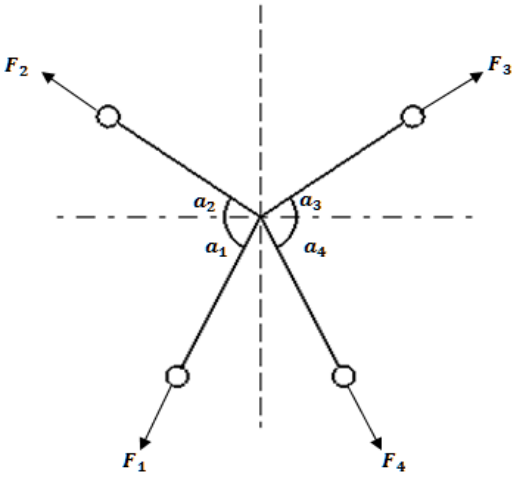
$$-a_2F_2\cos\alpha_2 + a_3F_3\cos\alpha_3 + a_4F_4\cos\alpha_4 = 0 \qquad ۹\text{-}۱۷$$

مولفه ممانها در جهت افق – حول جسم (۱)

$$a_2F_2\sin\alpha_2 + a_3F_3\sin\alpha_3 - a_4F_4\sin\alpha_4 = 0 \qquad ۹\text{-}۱۸$$

باید توجه شود که F_1 و F_2 و غیره متناسب با w_1r_1 و w_2r_2 و غیره هستند. در این آزمایش مقادیر wr برای جرمهای مختلف معلوم و بنابراین می توانند بجای مقادیر F در روابط $\begin{cases} ۹-۱۷ \\ ۹-۱۸ \end{cases}$ بالا جایگزین شوند.





شکل ۹-۶: سیستم با چهار جرم

چنانچه موقعیت زاویه ای دو جرم معلوم باشد میتوان توسط دو رابطه فوق موقعیت دو جرم دیگر را بدست آورد. هرگاه موقعیت قرار گرفتن دو جرم در طول شافت معلوم باشد میتوان توسط دو رابطه فوق موقعیت دو جرم دیگر را در طول محور بدست آورد.

۹-۲-۴-۲- روش ترسیمی:

در این روش نیازی به تجزیه ممانها به دو مولفه نیست. بردارهائی که نمایش دهنده $w_1r_1a_1$ و $w_2r_2a_2$ و..... و $w_nr_na_n$ هستند (متناسب با ممانهای F_1a_1 و .... و F_na_n) به طریقه روش ترسیمی ذکر شده برای تعادل استاتیکی رسم می شوند بیش از دو مجهول با توجه به بسته شدن کثیرالاضلاع ممان حاصل نخواهد شد. معمولاً دو مقدار a بعنوان مجهول در روش برداری یافته خواهد شد. کارترسیم چنانچه ممان نیروها حول یکی از جرمها گرفته شود آسانتر می گردد.

هر روشی بکار گرفته شود اغلب دست آخر معلوم می شود که ترتیب فرضی قرار گرفتن جرمها روی شافت درست نیست. برای مثال ترکیب نشان داده شده در شکل ۶-۲ ممکن است تعادل دینامیکی بوجودآورد هرگاه ترتیب قرار گرفتن جرمها طبق شکل باشد. در هر حال هر دو روش بطور اتوماتیکی با مشخص شدن مقادیر a وضعیت قرار گرفتن جرمها را روی محور تعیین می کنند. اصولا دیاگرام ها صرفا موقعیت های اختیاری جرمها را نشان می دهند.

۹-۳- دستگاه آزمایش:

دستگاه بالانس دینامیکی و استاتیکی $TM102$ شامل یک محور کاملا بالانس شده بوده که میتوان چهار بلوک مستطیلی را روی آن در موقعیت های مختلف در طول محور سوار نمود. محور روی یاتاقانهای بلبرینگی سوار شده و توسط موتور الکتریکی و تسمه و پولی میچرخد. موتور با منبع تغذیه ۱۲ ولت تغذیه میشود. موتور و محور روی یک صفحه فولادی روی یک پایه لاستیکی رزیلنتی قرار گرفته اند این صفحه موقعی که خارج از مرکزی بر روی محور وجود داشته باشد به ارتعاش در می آید.

دیسک هایی با سوراخهای خارج از مرکز و با قطرهای متفاوت می توانند به بلوک های مستطیلی شکل متصل وبدین ترتیب ممان هر بلوک را تغییر دهند. بلوک ها میتوانند در هر موقعیت طولی از محور و در هر موقعیت زاویه ای قرار گیرند. دو آچار آلن بزرگ و کوچک وجود دارند که آچار بزرگتر جهت نصب بلوک به محور وآچار کوچکتر جهت محکم کردن

پیچهای دیسکهای خارج از مرکز بر روی بلوک ها بکار می روند. مقیاسهای خطی و زاویه ای جهت تثبیت و یا اندازه گیری موقعیت بلوک در مکانهای زاویه ای و طولی بلوک بکار می رود. لغزنده همچنین بعنوان یک وسیله متوقف کننده بکار رفته میشود وبلوک ها می توانند نگه داشته شوند تا در موقع خواندن موقعیت زاویه ای آن ها حرکت نداشته باشند. ممان های جرمهای خارج از مرکز محور را می توان با ثابت کردن شافت فرعی همراه با پولی به شافت اصلی اندازه گرفت. هر بلوک مستطیلی می تواند روی شافت سوار شده و نخی که در دو انتهایش دو مخزن سطلی کوچک دارد روی شافت فرعی آویزان شده است و داخل این مخزنها گلوله های کوچکی جای میگیرند. ممان جرمهای خارج از مرکز محور، متناسب با تعداد گلوله های مورد نیازاست.

میکروسوئیچ هایی روی دستگاه قرار دارند تا درپوش شفاف روی دستگاه قرار نگیرد محور بکار نمی افتد. کلید اصلی موتور در جلوی دستگاه بوده و زیر آن فنر می باشد و تا فشار داده نشود موتور بکار نخواهد افتاد. موتور نیاز به جریان مستقیم ۱۲ ولت با آمپر ۲ دارد که میتواند بوسیله یک منبع تغذیه تامین شود.

۹-۴- روش آزمایش:

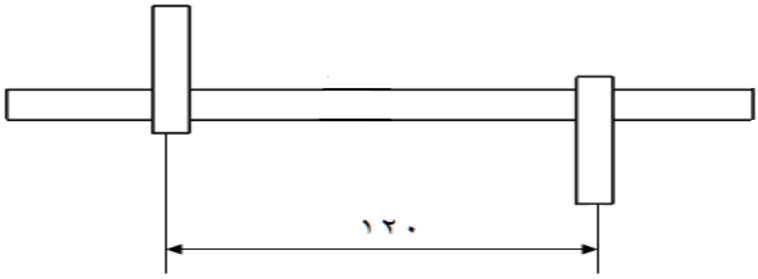
۹-۴-۱- بالانس استاتیکی بدون بالانس دینامیکی :

برای انجام آزمایش به ترتیب زیرعمل می شود.

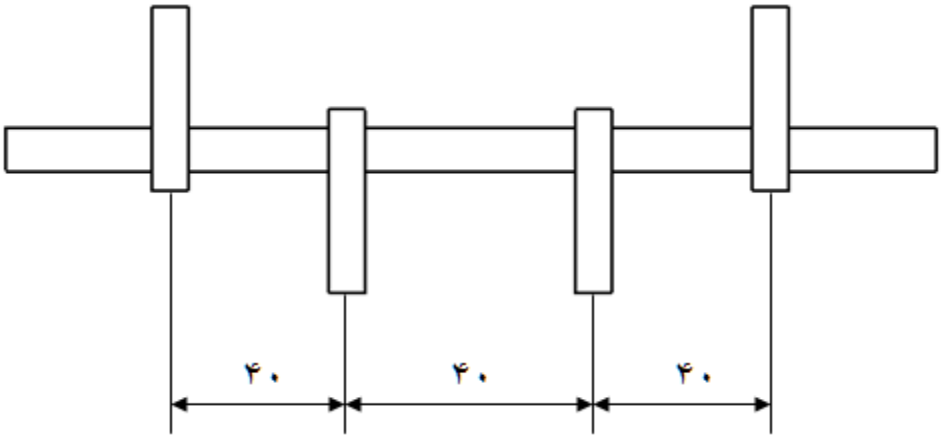
۱- درپوش از روی دستگاه برداشته و تسمه از پولی دور شود.

۲- دیسکهای خارج از مرکز از بلوک های مستطیلی توسط آچار آلن جدا شوند.

۳- دوتا از بلوک های مستطیلی مطابق شکل ۹-۷-a با اختلاف زاویه ای ۱۸۰° و به فاصله $۱۲۰mm$ روی محور سوار شود. از لغزنده برای تثبیت و خواندن موقعیت بلوک ها استفاده شود همچنین از آچار آلن بزرگتر برای سوار کردن بلوک ها روی محور استفاده گردد.



a) تعادل استاتیکی برای سیستم با دو جرم



b) تعادل استاتیکی و دینامیکی برای سیستم با چهار جرم

شکل۹-۷ شکل ترکیبی از جرم ها

۴- مشاهده اینکه محور در هر موقعیتی قرار گیرند بدون حرکت باقی خواهد ماند و دارای بالانس استاتیکی است.

۵- وصل دستگاه به جریان مستقیم۱۲ ولت و اطمینان از اینکه لغزنده آزاد میباشد. گذاشتن محدد درپوش و تسمه به جای خودشان.

۶- چرخش موتور و مشاهده یک عدم بالانس جدی محور.

۹-۴-۲- بالانس دینامیکی ساده با چهار جرم:

۱- درپوش از روی دستگاه برداشته شود و چهار بلوک مستطیلی مطابق شکل روی محور قرار گیرد. (شکل (b) ۹ -۷)

۲- بررسی تئوریک بالانس استاتیکی و دینامیکی شکل با ترکیب موجود (به بخشهای ۹-۲-۱ و ۹-۲-۴ مراجعه شود)

۳- بررسی اینکه ترکیب موجود دارای بالانس استاتیکی هست یا خیر. (به بخش های ۹-۴-۱ مراجعه شود).

۴- گذاشتن مجدد درپوش دستگاه و چرخاندن موتور ومشاهده بالانس دینامیکی.

یک روش کارآمد آن است که دو جرم وسطی نزدیک به یکدیگر و به فاصله تقریباً مساوی از دو بلوک انتهایی باشند. این روش ترکیبی معادل برای یک سیستم سه جرمی مطابق آنچه در شکل (b)۹-۵ وجوددارد بدست می دهد که در آن$F_2 = 2F_1 = 2F_3$ این وضع خاص برای بالانس دینامیکی سه جرم برقرار بوده و بنابراین شافت در بالانس میباشد.

۹-۴-۳- بالانس استاتیکی و دینامیکی برای یک سیستم چهار جرمی:

۹-۴-۳-۱- محاسبه تجربی مقادیر wr

۱- درپوش دستگاه برداشته شود و تسمه از پولی محور باز شود.

۲- شافت اضافی در انتهای محور اصلی در جایش قرار گیرد.

۳- دستگاه به لبه میز آورده شود .دو الی سه دور نخ در روی پولی پیچیده شود و اطمینان حاصل شود که هیچ گونه مانعی برای حرکت مخزن های سطلی شکل وجودندارد.

۴- دیسک خارج از مرکز با سوراخ کوچک در روی یکی از بلوک های مستطیلی قرار گیرد. نصب بلوک روی شافت طوری صورت گیرد که بلوک روبروی عدد صفر مقیاس زاویه ای باشد. این بلوک شماره یک نامگذاری شود.

۵- به تدریج گلوله های بلبرینگی در یکی از ظرفها ریخته شود تا اینکه بلوک به اندازه ۹۰°بچرخد و در حالیکه وزنه ها اضافه می شود بهتر است گهگاهی تکی به محور زده شود تا بر چسبندگی یاتاقان فاقد آید.

۶- تعداد گلوله هایی که برای بالا آوردن بلوک به اندازه۹۰° است یادداشت شود. این تعداد متناسب با ممان خارج از بالانس بلوک است.

۷- هر کدام از دیسک های خارج از مرکز به بلوک ها ثابت شود و سپس آزمایش فوق تکرار شود نتایج در جدولی مطابق جدول ۹-۱ وارد شود.

۸- پس از آن شافت فرعی برداشته شود ودر جایش قرار گیرد.

۹-۴-۳-۲- محاسبه موقعیت بلوک ها برای تعادل دینامیکی:

فرض می شود که هدف بدست آوردن موقعیت زاویه ای و طولی دو بلوک ۳ و ۴ باشد با فرض آنکه موقعیت دو بلوک ۱ و ۲معلوم باشند. به منظوریافتن جواب عملی و نشان دادن آن لازم است دقت کافی در انتخاب موقعیت دو بلوک ۱ و ۲ صورت گیرد. برای حصول چنین منظوری باید از جدول۹-۲ که تعداد مختلف از ترکیباتی که دارای جواب عملی است استفاده شود. روش به شرح زیر میباشد.

۱- انتخاب موقعیت زاویه ای و طولی مناسبی برای بلوک های ۱ و ۲ با مراجعه به جدول ۹-۲ توجه شود چنانچه مقادیر ممانها با جدول ۹-۱ فرق داشته باشد ترکیب ذکر شده در جدول میتواند بعنوان راهنما تقریبی باشد.

۲- موقعیت های زاویه ای بلوک های ۳ و ۴ بوسیله محاسبه و با ترسیم بدست آورده شود.

۳- موقعیت های طولی بلوک های ۳ و ۴ بوسیله محاسبه و یا ترسیم نیز بدست آورده شود.

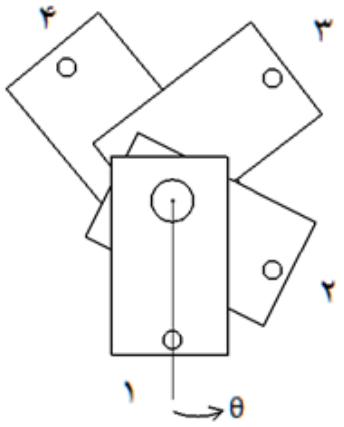
۴- بلوک های در روی شافتها در موقعیتهای حساب شده قرار گیرد و پس از آن اطمینان حاصل شود که لغزنده روی مقیاس طولی آزاد است.

۵- بررسی شود که آیا شافت در بالانس استاتیکی است یا خیر؟ (بخش ۹-۴-۱ مراجعه شود).

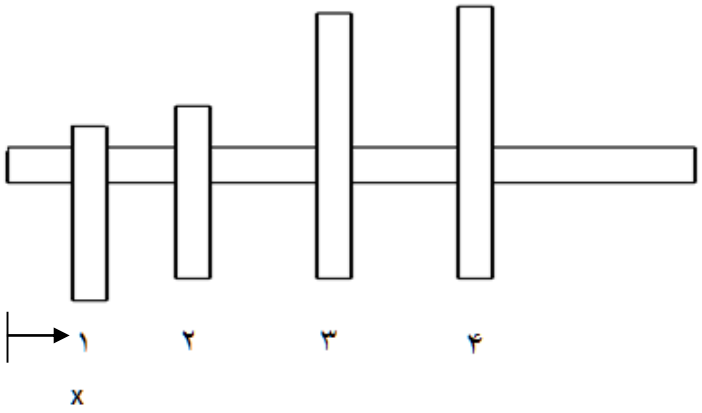
۶- درپوش در روی دستگاه قرار گرفته و تسمه روی پولی محور محکم شود سپس موتور به حرکت در آمده و مشاهده شود که آیا بالانس دینامیکی وجود دارد یا خیر؟ (بخش ۹-۴-۲ مراجعه شود)

۷- چنانچه شافت در بالانس دینامیکی نمی باشد مجددا محاسبات بازرسی و کنترل شود تا خطا معلوم گردد.

۸- درپایان موقعیکه شافت دارای تعادل دینامیکی است یکی از بلوک ها کمی حرکت داده شود و اثر غیر بالانسی مشاهده گردد.



شکل (a) ۹-۸



شکل ۹-۸ ترتیب قرار گرفتن وزنه ها (b)

۱- اندازه گیری زوایا نسبت به بلوک ۱ انجام می شود.

۲ - فواصل از صفر مقیاس اندازه گیری شود.

۳ - خارج از بالانسی جرمها بر حسب تعداد گلوله ها می باشد.

۴ - فاصله بین بلوکهای ۱ و ۲ معمولاً برابر $۱۰۰mm$ است.

جدول ۹-۱ مقادیر Wr بلوک ها

۱	۲	۳	٤	$Orange\ Block$
۸۸	۸۲	۷٤	٦٤	$Wr\ (balls)$
۱	۲	۳	٤	$Silver\ Block$
٦۰	٥٦	٥۰	٤۸	$Wr(balls)$

جدول ۹-۲ نمونه ای از داده های ورودی برای بلوکهای ۱ و ۲

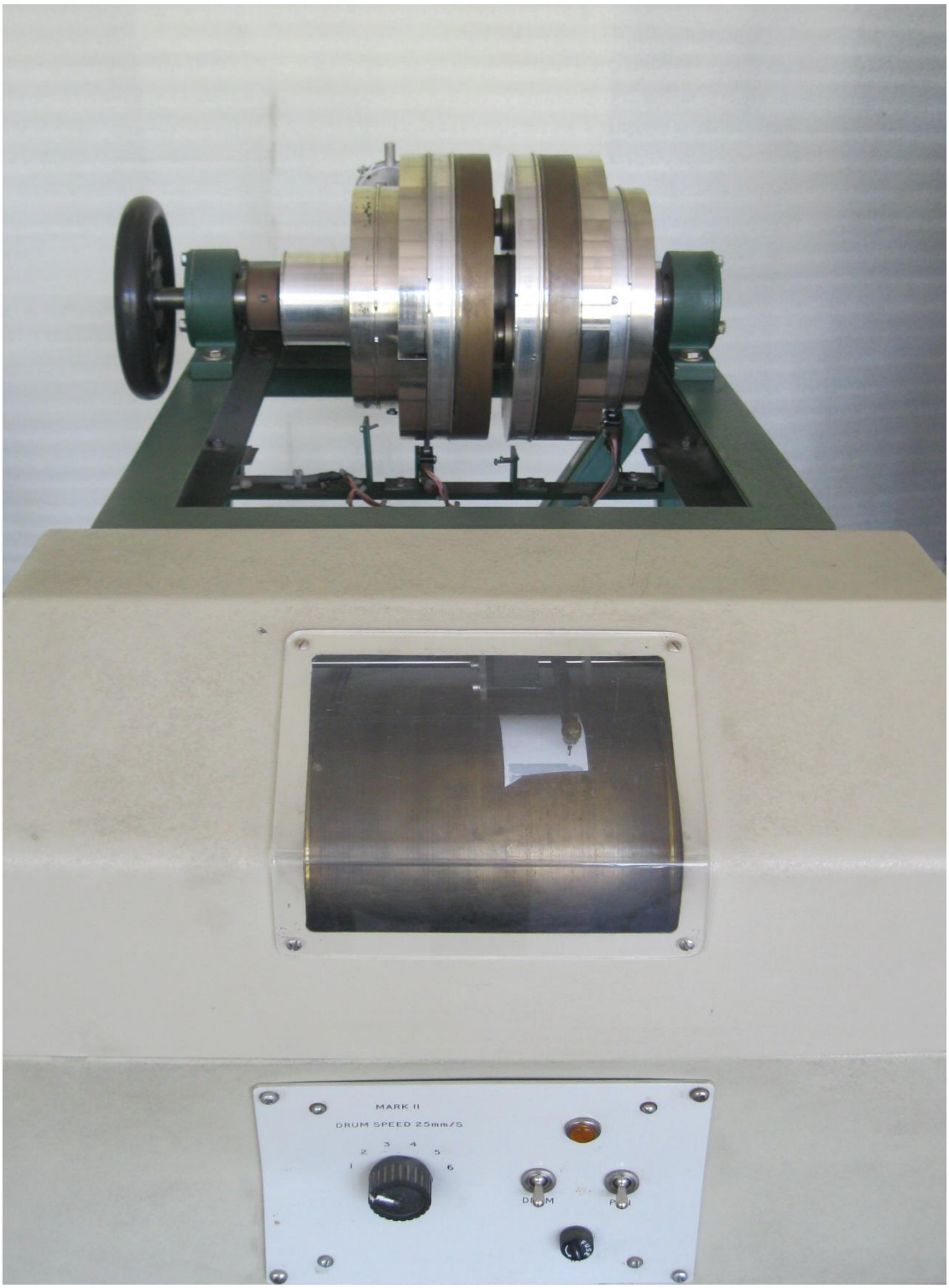
	$Block1$		$Block2$		$Block3$		$Block4$			
Ref	θ_1 °	x_1 mm	θ_2 °	x_2 mm	θ_3 °	x_3 mm	θ_4 °	x_4 mm	$Black\ order$	$limitations$
A	۰	۵	۱۶۰	۱۰۵						شافت خیلی بلند
B	۰	۵	۱۵۰	۱۰۵						
C	۰	۵	۱۴۰	۱۰۵						بلوک های خیلی
D	۰	۱۴	۱۳۰	۱۱۴						نزدیک
E	۰	۱۷	۱۲۰	۱۱۷						
F	۰	۲۵	۱۱۰	۱۲۵						
G	۰	۲۹	۱۰۰	۱۲۹						
H	۰	۴۱	۹۰	۱۴۱						شافت خیلی کوتاه
I	۰	۱۵۶	۸۵	۲۵۶						
J	۰	∞	۸۱	∞						

۹-۵ - خواسته های آزمایش :

۱- ابتدا هر کدام از چهار بلوک را روی محور قرار داده و با گذاشتن محور فرعی در امتداد محور اصلی ممان ناشی از وزن هر کدام از آنها را مطابق جدول ۹-۱ تنظیم شود.

۲- دو حالت مانند AوBاز حالات جدول ۹-۲ انجام دهید. ابتدا از طریق محاسبه و یا ترسیم موقعیت های طولی و زاویه ای بلوک های ۳ و ۴ را تعیین و سپس روی دستگاه آزمایش کنید.

آزمایش شماره ۱۰- آزمایش دستگاه چرخ دنده خورشیدی (*Epicyclic Gears*)



هدف آزمایش:

آشنا شدن با دستگاه چرخ دنده خورشیدی و بدست آوردن شتاب چرخ دنده ها و راندمان دستگاه.

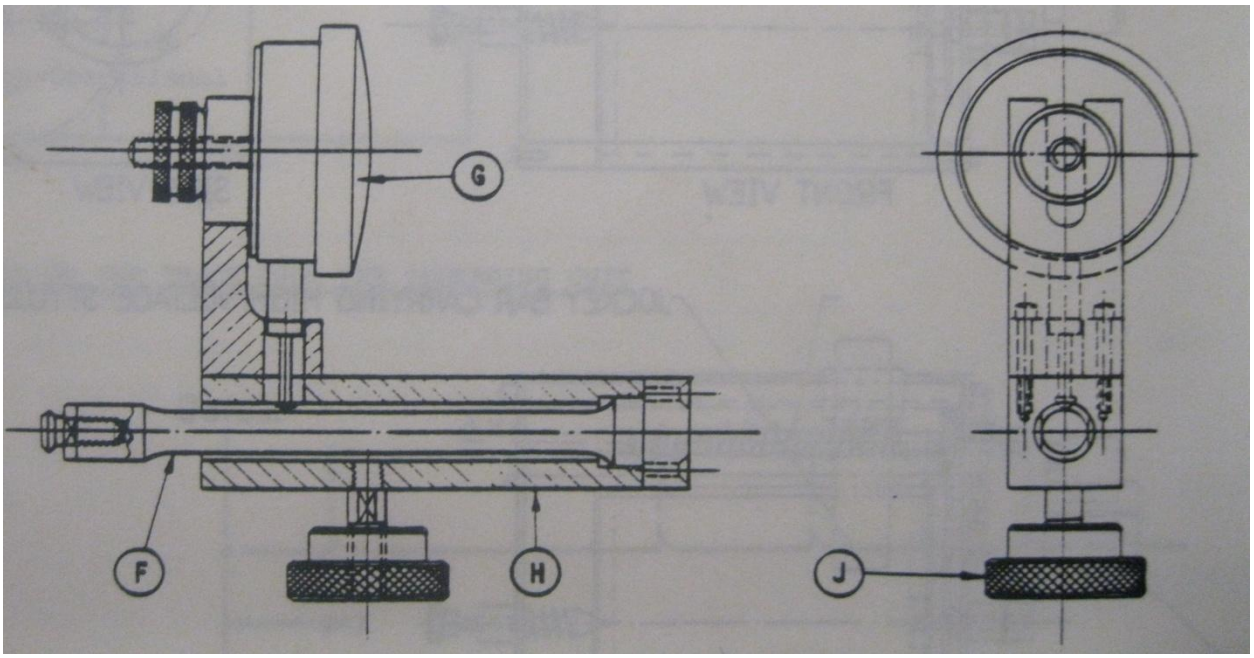
۱۰-۱- شرح دستگاه:

دستگاهی که شرح داده می شود از دو واحد چرخ دنده خورشیدی تشکیل شده است که می تواند دو نسبت سرعت مختلف بین محورهای ورودی و خروجی تولید کند.

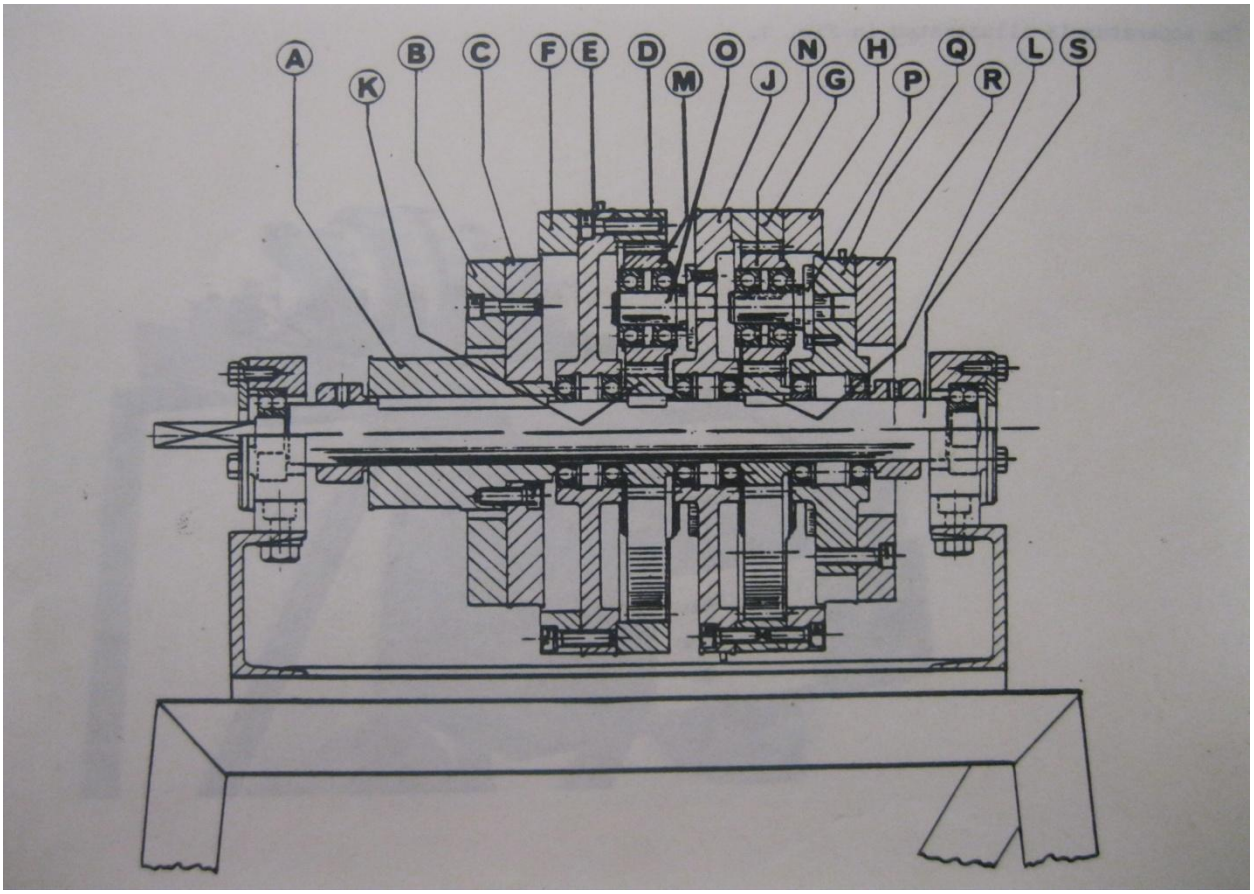
سیستم چرخ دنده روی محوری سوار شده است که بوسیله $Self\ Aligning\ Bearing$ نگه داشته می شودودستگاه کلا روی پایه ای استاندارد از فولاد سبک که می تواند روی زمین بایستد قرار داده شده بطوریکه برای وزنه هائی که میخواهیم به قسمتهای دوّار آویزان کنیم از زمین ماکزیمم به اندازه ۴۰ اینچ فاصله هست.

این دستگاه طرحی برای محاسبه راندمان چرخ دنده ها و همین طور اندازه گیری گشتاور عکس العمل بدست می دهد. با افزودن یک استوانه برای ضبط همراه با تعدادی میکروسوئیچ شتاب اعضاء دوّار را هم می توان محاسبه کرد.

واحد چرخ دنده خورشیدی دو سرعته در شکل ۱۰-۱ نشان داده شده است که اساساً از دو سری چرخ دنده خورشیدی مشابه که هر کدام دارای سه چرخ دنده ستاره می باشد تشکیل شده است.



شکل ۱۰-۱ : $Load\ Cell$



شکل ۱۰- ۲: $Two\ Speed\ Epicycle\ Gear\ Unit$

محور اصلی S که در بلبرینگهای $S.A$ قرار گرفته سیستم چرخ دنده را نگه میدارد.

یک انتهای این محور به صورت مکعب مستطیل تراشیده شده تا بتوان یک دستگیره برای پیچاندن روی آن جا داد. استوانه بارگذاری A که به محور اصلی قفل شده است با دیسک اینرسی B و استوانه بارگذاری C درگیر است. اولین محفظه$(Casing)$ مرکّب است از چرخ دنده داخلی D استوانه بارگذاری E و دیسک اینرسی F که هر سه به هم مربوطند. استوانه بارگذاری E بوسیله بلبرینگهائی روی محور اصلی قرار گرفته است.

محفظه دوم مرکّب است واز چرخ دنده داخلی G ،دیسک اینرسی H و استوانه بارگذاری J و به طریقی مشابه به اولین محفظه وصل شده است. چرخ دنده های خورشید K و L به محور اصلی قفل بوده و چرخ دنده های داخلی را (هر کدام در داخل سه سری چرخ دنده های ستارهM وN) میگردانند. چرخ دنده های ستاره حول بلبرینگهائی که روی محورهایO وP سوار شده اند میگردند استوانه بارگذاری Q که روی بلبرینگ سوار شده با دیسک اینرسی R مربوط است.

هر چهار دیسک اینرسی بوسیله پیچهائی محکم شده اند و به آسانی می توان آنها را برداشت میخهای ریز روی محیط استوانه های A و C و E و J و Q برای این است که بتوان ریسمان را حول آنها پیچیده و در نتیجه به دستگاه کوبل وارد کرد. هر کدام از دو چرخ دنده داخلی D یا G را میتوان با بکار بستن واحد بارگذاری $load\ cell$ میزان شده قفل کرده و ممان نگهدارنده (گشتاور عکس العمل) چرخ دنده داخلی را برای یک سیستم بارگذاری داده شده اندازه گرفت. شتاب چهار عضو را اگر لازم باشد میتوان با بکار بردن دستگاه ضبط شتاب استاندارد بدست آورد.

۱۰-۱-۱- واحد بارگذاری $(The\ Load\ Cell)$

واحد بارگذاری در شکل ۱۰-۲ نشان داده شده است.

این واحد مرکّب است از تیریک سردرگیر F که لبه تیز مدوری به انتهای آزاد آن وصل شده یک وسیله اندازه گیری تغییر بعد $Dad\ Gauge$ که تا ۰/۰۰۰۱اینچ را اندازه می گیرد (۰/۰۱میلیمتر برای سیستم متریک) و روی محفظه H سوار شده تا تغییر مکان (تغییر شکل خمشی) تیریک سر درگیر را وقتی که بار به انتهای آزاد آن وصل می شود اندازه بگیرد. واحد بارگذاری را میتوان با افزودن وزنه های معلوم به ریسمانی که حول یکی از استوانه های بارگذاری پیچیده شده است میزان کرد. در حالیکه لبه تیز تیریک سر درگیر در فرو رفتیگهای جداره استوانه جا گرفته است وقتی که بخواهیم استوانه را قفل کرده و بدینوسیله کوبل عکس العمل روی استوانه را اندازه بگیریم واحد بارگذاری را بوسیله پیچ J به صفحه صاف (ماشینکاری شده) روی سطح بدنه اصلی میبندیم. سپس می توان نمودار با ر را بر حسب انحراف رسم کرده و ثابت$k(Calibration\ Constant$ را برای وسیله اندازه گیری تغییر بعد اندازه گرفت.

۱۰-۱-۲- واحد ثبت شتاب ($The\ Acceleration\ Recording\ Unit$)

واحد ثبت شتاب در جزئیات در شکل ۱۰-۳ نشان داده شده است.

این واحد مرکّب است از استوانه ای که بوسیله یک موتور سنکرون با سرعت ثابت دوران میکند یک سوزن ثابت ولتاژ قوی که روی پیچی هدایت کننده $lead\ screw$ حرکت کرده و روی کاغذ ثبتی که دور استوانه پیچیده شده اثری مارپیچی به جا می گذارد. انتقال حرکت استوانه و پیچ هادی بوسیله سه چرخ دنده انجام می شود. بادامکهائی روی هر کدام از چهار

عضـو دوّار سـوار شـده انـد و بـه هنگـام دوران هـر بـار کـه میکروسـوئیچ وصـل مـی شـود علامتـی روی کاغـذ مخصـوص بـر جـا مـی مانـد کـه بـا انـدازه گـرفتن فاصـله بـین دو علامـت متـوالی میتـوان شـتاب را محاسـبه کـرده سـوئیچ انتخـاب کننـده ای در جلـوی تـابلوی واحـد ثبـت قـرار گرفتـه کـه بوسـیله آن را میتـوان هـر یـک از میکروسـوئیچ هـا را انتخـاب کـرد. یـک سـوئیچ بـرای اطمینـان وجـود دارد که وقتی که پوشش ثبت برداشته میشود دستگاه را از گردش باز می دارد.

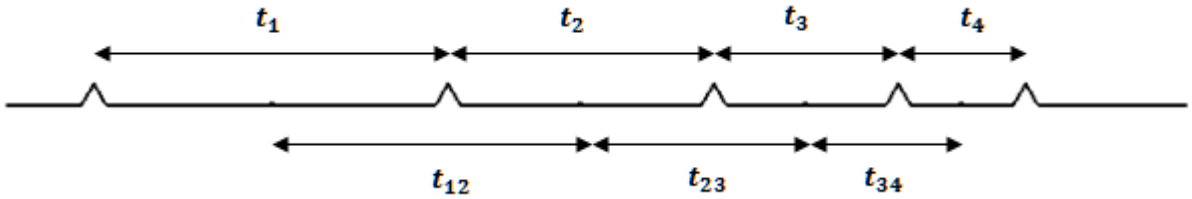
اطلاعات:

سرعت استوانه $= ۳/۸۵۷ \frac{rev}{min} = ۱ \frac{in}{sec} = ۲۵/۴ \frac{mm}{sec}$

قطراستوانه $= ۴/۹۶۲ \ in \ (۱۲۶ \ mm)$

ولتـاژ ورودی بـه دسـتگاه ثبـت: جریـان یـک فـاز متنـاوب $۲۵۰V$ بـا فرکـانس$۵۰ \frac{cycle}{sec}$ ،ولتـاژ سـوزن ثبات $۳۵۰ \ V$

تعیین شتاب زاویه ای با استفاده از آثار ثبت شده:

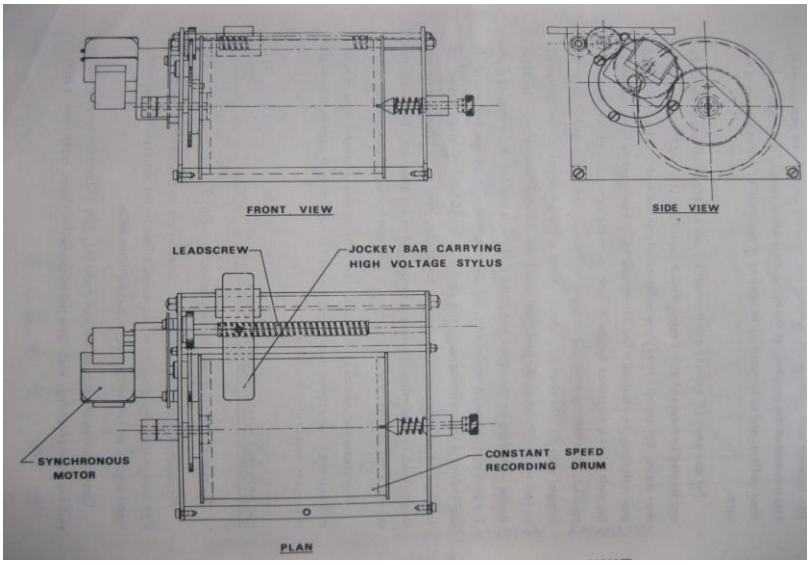


فرض کنیم که :

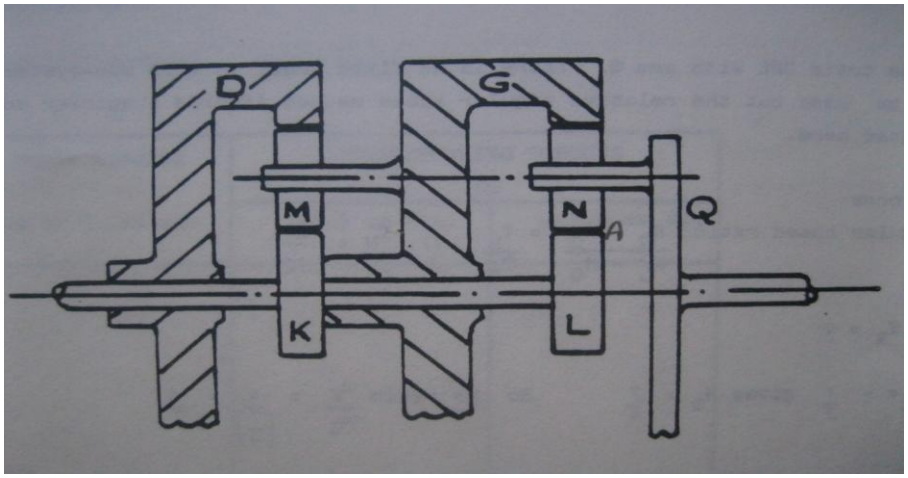
t_1 و t_2 فاصله بین علامات متوالی بر حسب اینچ

t_{12}و t_{23} و t_{34} فاصله بین مراکز علامات متوالی

و n تعـداد دندانـه هـای روی بادامـک (۴ یـا ۲ و ۱) (بـه جـدول ۱ مراجعـه شـود) و سـرعت کاغـذ برابـر$\frac{in}{sec}$ ۱ باشـند در ایـن صـورت t_1 و t_2 زمـان$\frac{1}{n}$ دور میباشـد. (پـس مقیـاس ایـنچ ۱=۱ ثانیـه خواهد بود).



شکل ۱۰-۳ : $Acceleration\ Recording\ Unit$



شکل ۱۰-۴ شکل شماتیک سیستم چرخ دنده ها

شتاب زاویه ای متوسط:

$$\omega_1 = 2\frac{\pi}{nt_1} \quad \frac{rad}{sec} \qquad \omega_2 = 2\frac{\pi}{nt_2} \quad \frac{rad}{sec} \qquad \omega_3 = \cdots$$

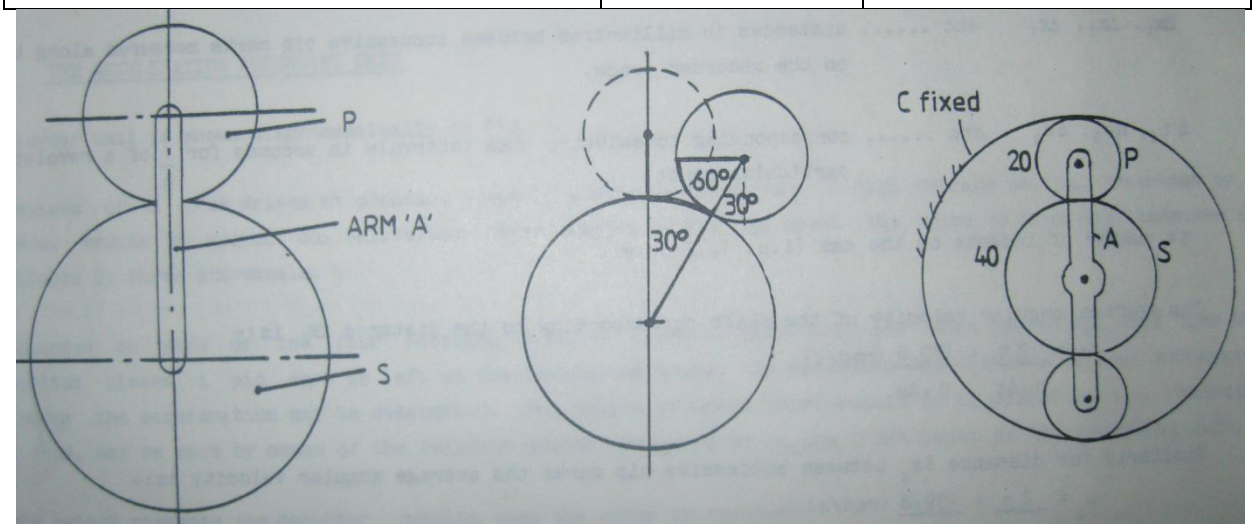
$$\alpha_1 = 2\frac{\pi}{nt_{12}}\left(\frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1}\right) \qquad {rad}/{sec^2}$$

$$\alpha_2 = 2\frac{\pi}{nt_{23}}\left(\frac{1}{t_3} - \frac{1}{t_2}\right) \qquad {rad}/{sec^2} \qquad \alpha_3 = \cdots$$

مقدارمتوسطα_1 وα_2 وα_3 و..... باید طوری انتخاب شود که مقدار دقیقی برای شتاب حاصل شود.

جدول ۱۰-۱ مشخصات چرخدنده ها

$Channel\ No$	$Member$	$No\ \ of\ cam\ indents$
۱	$A-C$	۲
۲	$D-E$	۴
۳	$G-J$	۴
۴	Q	۲
۵ ۶ } $Non\ operation$		



شکل ۱۰-۵ چرخدنده خورشیدی

شکل ۱۰-۵ ساده ترین شکل یک سری چرخ دنده خورشیدی را نشان میدهد.

اگر بازوی A ثابت نگه داشته شود در آن صورت سری به یک سری ساده تبدیل میشود.

وقتیکه چرخ دنده خورشیدی C ثابت است روی زیر را برای پیدا کردن نسبت S به A اختیار می کنیم.

a)تمامی چرخ دنده ها را قفل کرده و تمام سیستم را یک دور در جهت عقربه های ساعت (۱+ دور) میگردانیم در نتیجه چرخ دنده ستاره P بازوی A ، چرخ دنده خورشیدی C وچرخدنده Sهمه یک دور در این جهت گشته اند.

b)حـال اگـر بـازوی A ثابـت نگـه داشـته شـود و چـرخ دنـده خورشـیدی C یـک دور در خـلاف جهـت حرکـت عقربـه هـای سـاعت (۱- دور) بگـردد تـا بـه حالـت اولیـه اش برگـردد در آن صـورت چـرخ دنـده سـتارهP بـه انـدازه$\left(\frac{C}{P}\right)$ دور در جهـت عقربـه هـای سـاعت خواهـد گشـت. پـس چـرخ دنـده سـتاره روی هـم رفتـه بـه انـدازه $\left(1+\frac{C}{P}\right)$ دور در طـول مراحـل a و b خواهـد گشت. بازوی A فقط یک دور می گردد پس:

$$\frac{\omega_P}{\omega_A}=1+\frac{C}{P} \qquad ۱-۱۰$$

برای انجام محاسبه های لازم معمولاً دورانها را در جدولی می نویسند پس:

جدول ۱۰-۲ چگونگی حرکت چرخ دنده ها نسبت به هم

حرکت	عضو		
	A	C	P
(a) تمام چرخ دنده ها قفل شده وبه تمام سری $+1$ دور میدهیم	$+1$	$+1$	$+1$
(b) بازوی A را ثابت نگه داشته و C را -1 دور میگردانیم	0	-1	$+\frac{C}{P}$
جمع (a) و (b)	$+1$	0	$1+\frac{C}{P}$

خلاصه مطالب بالا:

اولین قدم بدون توجه به اینکه سری خورشیدی چقدر پیچیده باشد این است که سری کل را قفل کرده و سیستم حاصل را یک دور در جهت عقربه های ساعت بگردانیم. سپس با ثابت نگه داشتن بازو و گرداندن چرخ دنده ای که می بایست در دستگاه ساکن باشد یک دور در خلاف جهت حرکت عقربه های ساعت می توان تعداد دورهائی را که بقیه چرخ دنده ها می گردند تعیین کرد که ممکن است این چرخ دنده های باقیمانده سری ساده و یا سری مرکّب باشند. حال اگر تعداد دورهای هر چرخ دنده را در دو حالت با هم جمع کنیم با اعداد حاصل میتوان هر نسبت سرعت خواسته شده را تعیین کرد.

۱۰-۱-۳- کوپلها در سری چرخ دنده های خورشیدی:

معمولاً سه کوپل به یک چرخ دنده خورشیدی اعمال می شود کوپل ورودی T_1 (در جهت گردش محور ورودی) کوپل عکس العمل خروجی T_0 و کوپل محفظه T_2.

اگر قسمتهای سری با سرعتهای یکنواخت حرکت کند هیچ شتاب زاویه ای وجود نخواهند داشت. پس:

$$T_1 + T_0 + T_2 = 0 \qquad ۲\text{-}۱۰$$

یعنی مجموع جبری این سه کوپل صفر است.

اگر بازده دستگاه ۱۰۰ درصد باشد یعنی هیچگونه تلفات داخلی در اثر اصطکاک و غیره وجود نداشته باشد خواهیم داشت:

$$T_1\omega_1 + T_0\,\omega_0 + T_2\,\omega_2 = 0 \qquad ۳\text{-}۱۰$$

که در آن ω_1 و ω_0 و ω_2 سرعتهای زاویه ای میباشند.

معمولاً محفظه۲ ثابت بوده و رابطه ۱۰-۳ بصورت زیر در می آید:

$$T_1\omega_1 + T_0\,\omega_0 = 0 \qquad ۴\text{-}۱۰$$

اگر حالت معمولی را در یک چرخ دنده خورشیدی در نظر بگیریم و R نسبت کل چرخ دنده ها باشد و فرض کنیم $\omega_1 = R\omega_0$ بوده و محفظه ثابت باشد از رابطه ۱۰-۴ داریم:

$$T_1R\omega_0 + T_0\omega_0 = 0 \longrightarrow T_0 = -RT_1 \qquad ۵\text{-}۱۰$$

علامات باید در هر محاسبه در نظر گرفته شود.

اگر x یعنی محفظه طوری باشد که می بایست نگه داشته شود در آن صورت:

$$T_1 - RT_1 + T_x = 0 \longrightarrow T_x = T_1(R-1) \qquad ۶\text{-}۱۰$$

یا:

$$T_2 = T_0\left(\frac{1}{R} - 1\right) \qquad ۷\text{-}۱۰$$

اگر فرض کنیم که x ثابت بوده و راندمان انتقال بین محور ورودی و خروجی η باشد در آن صورت:

$$T_0 = -R\eta T_1 \qquad \text{یا} \qquad T_1 = -\frac{T_0}{R\eta} \qquad ۸\text{-}۱۰$$

همین طور کوپل x هم تغییر خواهد کرد:

$$T_1 - R_0\eta T_1 + T_x = 0 \qquad ۹\text{-}۱۰$$

یا :

$$-\frac{T_0}{R\eta} + T_0 + T_x = 0 \longrightarrow T_x = T_1(R\eta - 1) \qquad ۱۰\text{-}۱۰$$

یا :

$$T_X = T_0\left(\frac{1}{R\eta} - 1\right) \qquad ۱۱\text{-}۱۰$$

جدول ۱۰-۳ مشخصات چرخ دنده ها

چرخ	A	B	E, F, D	I, G, H	Q
قطـــر: ایـــنچ (سانتی متر)	۳ (۷/۶۲)	۷ (۱۷/۸۶)	۹ (۲۲/۸۶)	۹ (۲۲/۸۶)	۷ (۱۷/۸۶)

۱۰-۲- روش آزمایش:

قبل از آغاز آزمایش واحد بارگذاری بایستی کالیبره شود که قبلا طرز کالیبره کردن آن گفته شده است ، در نتیجه یک ثابت تطابق برای واحد بارگذاری تعیین می شود. بارهای تا حدود $۷kg$ با تغییرات $۱kg$ برای این منظور کافی هستند.

با استفاده از شکل ۱۰-۴ نسبت کلی چرخ دنده $\frac{\omega_{input}}{\omega_{output}} = \frac{\omega_C}{\omega_P}$ را برای دو حالت که حالت اول چرخ دنده D ثابت است و حالت دوم چرخ دنده G بدست آورید.

۱۰-۲-۱- آزمایش اول: چرخ دنده داخلی D ثابت:

در این آزمایش چرخ دنده داخلی D را بوسیله واحد بارگذاری کالیبره شده قفل کنید سپس استوانه بارگذاری ورودی C را با یک کوپل معلوم بارگذاری کرده و این را با کوپل مقاومی که روی محور خروجی (استوانه بارگذاری خروجی) اعمال می شود میزان کنید بطوریکه سیستم بخواهد در جهت ورودیشروع به حرکت کند وزنه لازم و تغییر واحد بارگذاری را یادداشت کنید. با استفاده از کوپلهای متعادل بدست آمده و نسبت کلی چرخ دنده و فرمولهای قسمت تئوری راندمان کلی سیستم و کوپل عکس العمل را با استفاده از کوپلها بدست آورید.

آزمایش را برای ۱۰ بارگذاری تکرار کنید.

۱۰-۲-۲- آزمایش دوم: چرخ دنده G ثابت:

چرخ دنده داخلی G را بوسیله واحد بارگذاری کالیبره شده قفل کرده و طبق روش ذکر شده در آزمایش اول راندمان کلی سیستم را برای ۱۰ بارگذاری بدست آورید.

۱۰-۲-۳ آزمایش سوم: چرخ دنده D ثابت:

در این آزمایش پس از قفل کردن چرخ دنده D استوانه بارگذاری Q را با یک کوپل معلوم بارگذاری کرده و شتاب آنرا با استفاده از واحد ثبت شتاب بدست آورید.

سپس مقدار کوپل را اضافه کرده شتاب نظیر آنرا بدست آورید.

این آزمایش را برای ۵ کوپل مختلف انجام داده و با رسم منحنی کوپل بر حسب شتاب زاویه ای مقدارممان اینرسی متوسط سیستم را نسبت به Q بدست آورید.

سؤال: سری چرخ دنده های دیفرانسیل را تعریف نموده و کاربرد آنها را با ذکر مثال شرح دهید.

آزمایش شماره ۱۱- آنالیز بادامک ها

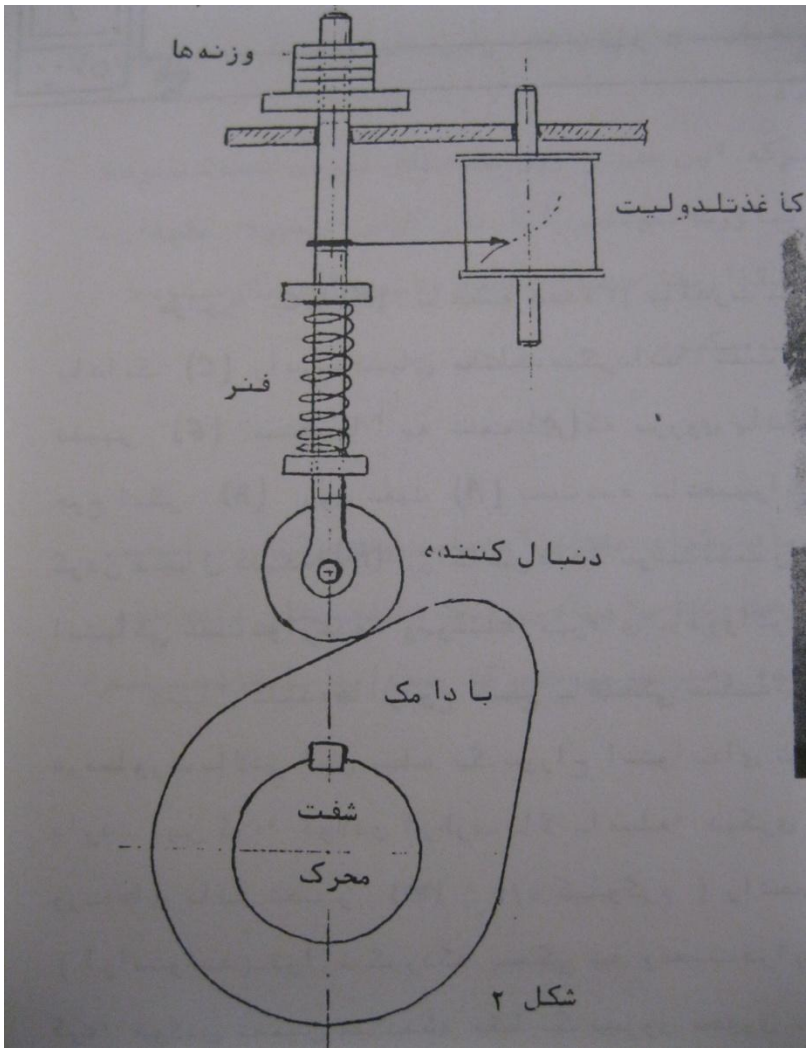
هدف آزمایش:

مشاهده و مطالعه رفتار دنبال کننده بادامک در شرایط مختلف

۱۱-۱- کار دستگاه:

مداد متصل بدنبال کننده بادامک قابل تعویضی که در انتهای شافت متحرک با سرعت متغیر قرار گرفته است بالا رفتن دنبال کننده را برای وزنهای مختلف آن و برای فنرهای با شدت متفاوت روی کاغذ تلدولیت رسم مینماید.

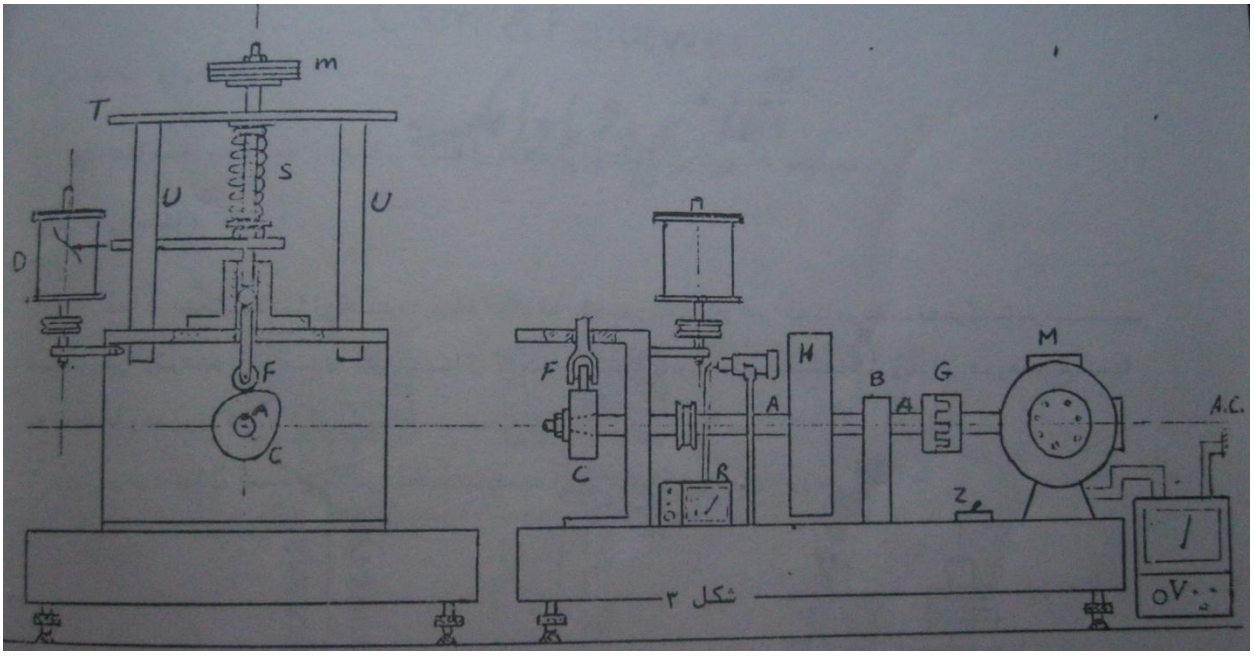
پرش دنبال کننده در شرایط مختلف با این دستگاه(شکل ۱۱-۱) قابل بررسی است.



شکل ۱۱-۱ شکل شماتیک پیرو بادامک

۱۱-۲- شرح دستگاه:

دستگاه در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است:



شکل ۲-۱۱ نمایه کلی از دستگاه آنالیز بادامک

موتور $D.C$ (M) با جعبه دنده (با قدرت $\frac{1}{3}$ اسب بخار و سرعت ۴۷۵ دور در دقیقه) بادامک (C) را در سرعتهای مختلف می گردند شافت خروجی موتور توسط کوپلینگ قابل تغییر (G) مستقیما به شافت(A) که بر روی یاتاقان(B) سوار است ، متصل شده است.

چرخ لنگر (H) روی شافت(A) نصب شده تا تغییرات سرعت ناشی از تورک متغیر لازم برای بلند کردن دنبال کننده را کاهش داده سرعت شافت را تعدیل نماید. بادامک روی قسمت مخروطی انتهائی شافت سوار شده و بوسیله مهره ای با دو واشر روی شافت محکم تثبیت شده است.

دنبال کننده ها از نوع مسطح یا غلطکی هستند که در انتهای یک میله عمودی قرار گرفته اند. در مجاورت بالائی این میله یک سوراخ استوانه ای تعبیه شده که داخل آن یک کره فولادی قرار گرفته است. این کره فولادی از طرف بالا با میله دیگری تماس دارد که ازداخل فنر(S) عبور کرده و وزنه های قابل تغییر(m) (۰/۴ کیلوگرم) را تحمل می نماید. بنابراین کره فولادی در محلی (از استوانه) قرار می گیرد که بستگی به وضعیت قرار گرفتن بادامک در

تماس با پیرو دارد. این کره فولادی تضمین میکند که فقط یک نیروی محوری به میله بالائی که به فنر (S) و وزنه های (m) مرتبط است منتقل گردد.

نیروی فنر ممکن است بوسیله مهره ای که روی میله بالائی است و با تعویض فنر با سختی دیگر تغییر کند. انتهای بالائی فنر توسط یک پایه افقی (T) که روی دو ستون عمودی(U) نصب شده نگهداشته می شود ستونهای عمودی روی صفحه تکیه گاه نصب شده اند. قلم منحنی دامنه نوسان دنبال کننده را روی کاغذ رسم می کند.

کاغذ روی طبلک استوانه ای(D) بسته شده که توسط تسمه ای از شافت بادامک حرکت میگیرد.

سرعت شافت بادامک توسط یک تاکومترتعیین می شود.

موتور و تکیه گاههای شافت بادامک روی صفحه (چدنی) تکیه گاه نصب شده اند که این صفحه با پیچهائی کاملا تراز میشود.

سرعت موتور را می توان توسط یک دستگاه کنترل (V) تغییر داد. سوئیچ(Z) دو طرفه اجازه میدهد جهت چرخش بادامک را بطور دلخواه عوض نمود.

۱۱-۳- نحوه تعویض بادامک دنبال کننده و فنر

با شل کردن و باز کردن مهره محکم کننده، بادامک روی شافت را بیرون بیاورید. معکوس همین کار را برای نصب بادامک دیگر انجام دهید.

دو مهره روی عضو افقی نگهدارنده بالائی فنر که این عضو را روی ستونهای عمودی نصب کرده است را باز کنید. عضو افقی و دستگاه فنر را بیرون بیاورید. خود فنر را با باز کردن دو مهره نگهدارنده فنر بیرون آورید و فنر مناسب را در جای آن بگذارید. دنبال کننده با پیچ آلن باز می شود. سوار کردن دستگاه با انجام اعمال معکوس صورت میگیرد.

۱۱-۴- تئوری آزمایش:

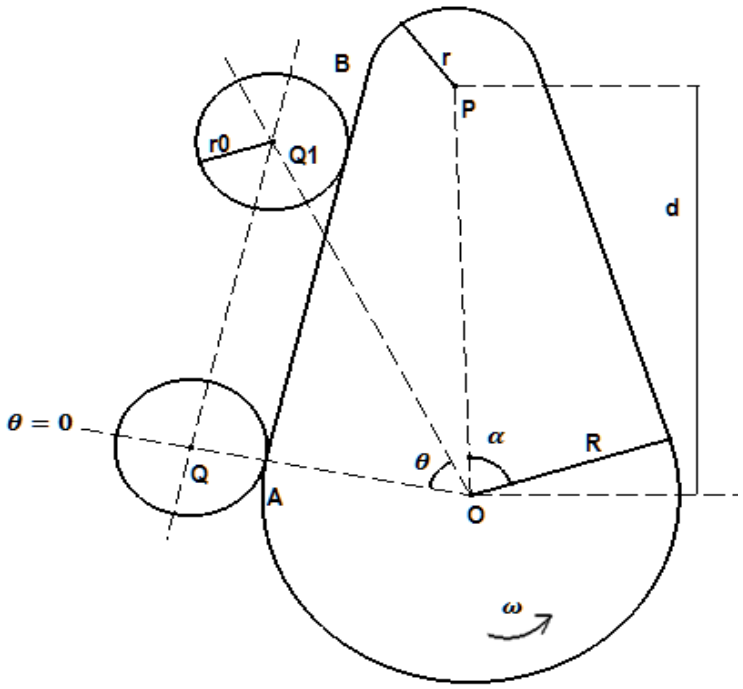
در قسمت زیر محاسبات تئوریک مربوط به بادامکهای مختلف آمده است و فرمولهای مناسب برای محاسبه تغییر مکان دنبال کننده ها و سرعت و شتاب آنها در شرایط مختلف نشان داده شده است . نیروهای دینامیکی مربوط به دنبال کننده و فنر بررسی شده که می تواند با مقادیر اندازه گیری شده آنها مقایسه شود.

الف- بادامک مماسی با دنبال کننده غلطکی:

۱- غلطک در تماس با سطح مسطح جانبی:

در شکل ۱۱-۳ فرض می شود که:

R : شعاع دایره پایه r : شعاع نوک r_0 : شعاع دنبال کننده d : فاصله مرکزی



شکل ۱۱-۳ غلطک در تماس با سطح جانبی بادامک

فرض کنیم دنبال کننده غلطکی با سطح جانبی AB در حین حرکت تماس مییابد.

وقتی دنبال کننده زاویه θ را از پایین ترین موقعیت سطح جانبی بادامک (یعنی از موقعیت A) طی می کند تغییر مکان دنبال کننده X برابر است با:

$$X = OQ_1 - OQ = (R + r_0)\sec\theta - (R + r_0) \qquad ۱-۱۱$$

$$V = \frac{dX}{dt}\ ,\ d\theta = \omega dt \longrightarrow V = \omega\frac{dX}{d\theta} \qquad ۲-۱۱$$

$$A = \omega^2\frac{d^2X}{dt^2} = \omega\frac{dV}{d\theta} \qquad ۳-۱۱$$

$$V = \omega(R + r_0)\sec\theta\ \tan\theta \qquad ۴-۱۱$$

فرمولهای ۱۱-۱و ۱۱-۳و ۱۱-۴ برای:

زوایا از روی شکل ۱۱-۴ $\theta = 0$ تا $\theta = \beta$ ، $\theta = 2\alpha$ تا $\theta = 2\alpha - \beta$ صادق است.

اگر β زاویه ای باشد که بادامک وقتی غلطک از نقطهٔ A به B میرسد طی کرده است.

در ایـــــــــــن صـــــــــــورت:$= AB$

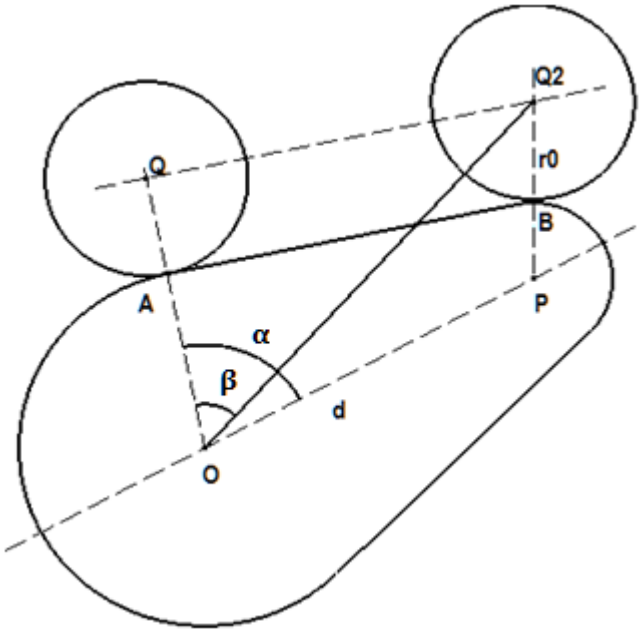
$$d \sin \alpha \qquad ۵ - ۱۱$$

$$\tan \beta = \frac{QQ_2}{R + r_0} = \frac{AB}{R + r_0} = \frac{d \sin \alpha}{R + r_0}$$

$$= \frac{d\sqrt{1 - \frac{(R-r)^2}{d^2}}}{R + r_0}$$

$$= \frac{\sqrt{d^2 - (R-r)^2}}{R + r_0}$$

۶-۱۱



شکل ۱۱-۴ غلطک در تماس با سطح مسطح

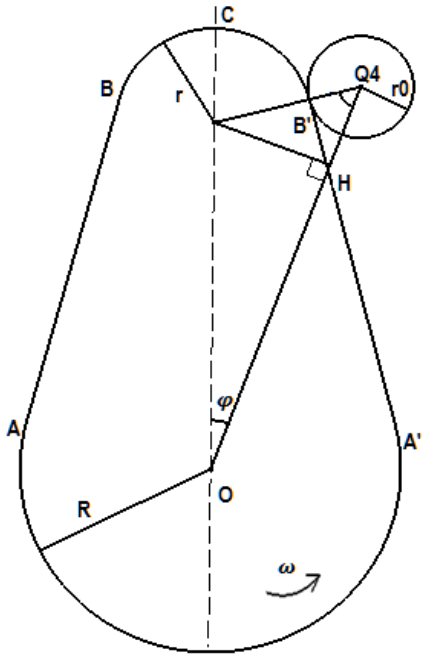
جانبی پس از حرکت از A بهB

که α کل زاویه بالا رفتن دنبال کننده است.

مـاکزیمم سـرعت و شـتاب در سـطح جـانبی بادامـک وقتـی بـه ازای θ در فرمولهای ۱۱-۳ و ۱۱-۴ ، β را قرار دهیم بدست می آید.

۲- غلطک در تماس با نوک بادامک:

وقتـی غلطـک زاویـه φ را از بـالاترین وضـعیت دنبـال کننـده طـی مـی کند تغییر مکان X برابر است با:



شکل ۱۱-۵ غلطک در تماس با نوک بادامک

$$X = OQ_4 - OQ$$

$$OQ_4 = Q_4H + HO = (r + r_0)\cos\lambda + d\cos\varphi$$

$$X = [(r + r_0)\cos\lambda + d\cos\varphi] - (R + r_0) \qquad ۷\text{-}۱۱$$

$$\sin\varphi = \frac{PH}{d} = \frac{(r+r_0)\sin\lambda}{d} \qquad ۸\text{-}۱۱$$

$$\sin\lambda = \frac{d\sin\varphi}{r+r_0} \qquad ۹\text{-}۱۱$$

$$n = \frac{r+r_0}{d} \qquad \sin\lambda = \frac{\sin\varphi}{n} \quad , \quad \cos\lambda = \sqrt{1 - (\frac{\sin\varphi}{n})^2} \qquad ۱۰\text{-}۱۱$$

$$X = d\left[\cos\varphi + \sqrt{n^2 - (\sin\varphi)^2}\right] - (R + r_0) \qquad ۱۱\text{-}۱۱$$

$$V = \omega\frac{dX}{d\varphi} = -\omega d\left[\sin\varphi + \frac{\sin 2\varphi}{2\sqrt{n^2-(\sin\varphi)^2}}\right] \qquad ۱۲\text{-}۱۱$$

$$A = \omega\frac{dV}{d\varphi} = -\omega^2 d\left[\frac{\cos\varphi+(\sin\varphi)^4+n^2\cos 2\varphi}{(n^2-(\sin\varphi)^2)^{\frac{3}{2}}}\right] \qquad ۱۳\text{-}۱۱$$

برای $\theta = \beta$ تا $\theta = 2\alpha - \beta$ ، $\varphi = \theta - \alpha$ یعنی دنبال کننده بر روی قوس دایره راس باشد.

مقدار سرعت از ماکزیمم خود در نقطه B به مقدارصفر در نقطه C کاهش می یابد و نیز شتاب از ماکزیمم خود در نقطه B به مقدار حداقل خود در C میرسد.

مشخصات بادامک مسطحی که در این دستگاه با آن کار می کنیم به قرار زیر است:

$r = ۱۲/۷mm$ $\quad R = ۲۵/۴mm$ $\quad r_0 = ۱۴/۳mm$ $\quad d = ۳/۸\,mm$

ب- بادامک محدب با پیرو غلطکی:

فرض می شود که پیرو در نقطه Q_1 باشد(شکل ۱۱-۶):

$$\left.\begin{aligned} PA &= x_1.\cos\theta + (\rho - R) \\ PA &= (\rho + r_0)\cos\psi \end{aligned}\right\} \longrightarrow \quad x_1 = \frac{(\rho+r_0)\cos\psi-(\rho-R)}{\cos\theta} \qquad ۱۴\text{-}۱۱$$

در مثلث POQ_1 رابطه زیر قرار است:

$$\cos\psi = \frac{(\rho+r_0)^2+(\rho-R)^2- {x_1}^2}{2(\rho+r_0)(\rho-R)} \qquad ۱۵\text{-}۱۱$$

اگر مقدار $\cos\psi$ را در رابطه فوق قرار دهیم خواهیم داشت:

$${x_1}^2 + 2x_1(\rho - R)\cos\theta - [(\rho + r_0)^2 - (\rho - R)^2] = 0 \qquad ۱۶\text{-}۱۱$$

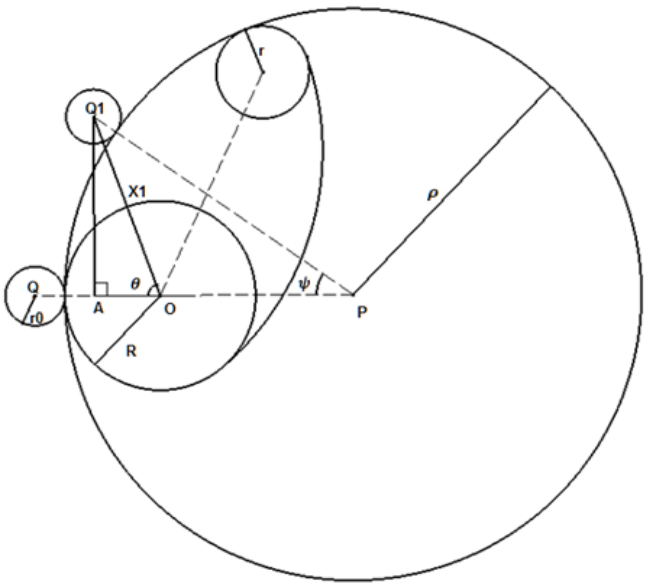
$$x = x_1 - (R + r_0) \qquad ۱۷\text{-}۱۱$$

$$x = (\rho - R)\left[\sqrt{(\cos\theta)^2 + (\frac{\rho+ r_0}{\rho-R})^2 - 1} - \cos\theta - \frac{(R+r_0)}{(\rho-R)}\right] \qquad ۱۸\text{-}۱۱$$

$$V = \omega\frac{dx}{d\theta} = (\rho - R)\omega\left[\sin\theta - \frac{\sin 2\theta}{2\sqrt{(\cos\theta)^2+(\frac{\rho+ r_0}{\rho-R})^2-1}}\right] \qquad ۱۹\text{-}۱۱$$

$$A = \omega\frac{dV}{d\theta} = (\rho - R)\omega^2\left[\cos\theta - \frac{\cos 2\theta\left[(\cos\theta)^2+\left(\frac{\rho+r_0}{\rho-R}\right)^2-1\right]+0.25(\sin 2\theta)^2}{\left[(\cos\theta)^2+\left(\frac{\rho+r_0}{\rho-R}\right)^2-1\right]^{\frac{3}{2}}}\right] \qquad ۲۰\text{-}۱۱$$

برای $\theta = 0$ تا $\theta = \beta$ ، $\theta = 2\alpha - \beta$ تا $\theta = 2\alpha$



شکل ۱۱-۶ بادامک محدب با پیرو غلطکی

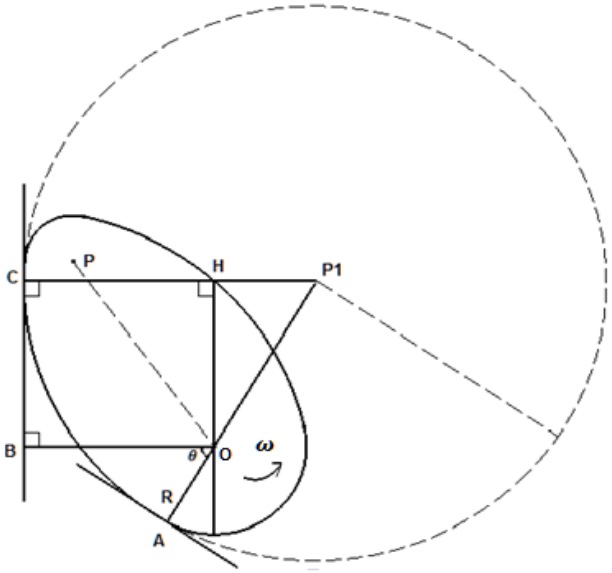
وقتی که غلطک در تماس با نوک بادامک باشد معادلات ۱۱-۱۱ و ۱۱-۱۲ و ۱۱-۱۳ قابل استفاده است اگر β زاویه ای باشد که بادامک طی می کند وقتی غلطک از نقطه Q به نقطه Q_2 میرسد:

$$\tan\beta = \frac{(\rho+r)d}{(\rho+r_0)(\rho-R)-(\rho-r)(\rho-R)} \qquad ۲۱\text{-}۱۱$$

$$\cos(\pi-\alpha) = \frac{d^2+(\rho-R)^2-(\rho-r)^2}{2d(\rho-R)} \qquad ۲۲\text{-}۱۱$$

ج- بادامک محدب با دنبال کننده مسطح:

وقتی بادامک از پائین ترین وضعیت دنبال کننده (نقطه A) به اندازه زاویه θ بچرخد تا به وضعیت بعدی (نقطه B) برسد(شکل ۱۱-۷).



شکل ۱۱- ۷ بادامک محدب با دنبال کننده مسطح

$$X = OB - OA$$

$$X = \left[\rho - (\rho-R)\cos(\widehat{OP_1H})\right] - R = (\rho-R)(1-\cos\theta) \qquad ۲۳\text{-}۱۱$$

$$V = \omega\frac{dx}{d\theta} = \omega(\rho-R)\sin\theta \qquad ۲۴\text{-}۱۱$$

$$A = \omega\frac{dV}{d\theta} = \omega^2(\rho-R)\cos\theta \qquad ۲۵\text{-}۱۱$$

وقتی دنبال کننده با نوک بادامک تماس دارد و به اندازه زاویه φ بچرخد. (شکل ۱۱-۸)

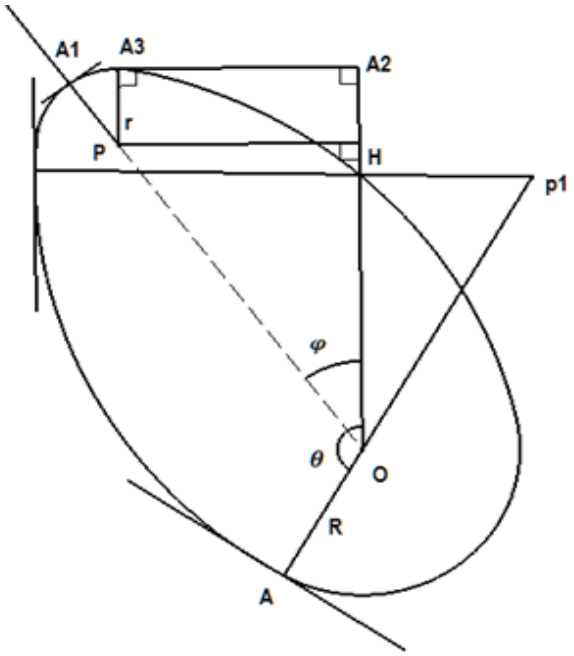
مطابق شکل داریم:

$$X = OA_2 - OA = (OH + HA_2) - OA \qquad ۲۶\text{-}۱۱$$

$$X = (d\cos\varphi + PA_3) - OA = (d\cos\varphi + r) - R \qquad ۲۷\text{-}۱۱$$

$$V = \omega\frac{dX}{d\varphi} = -\omega d\sin\varphi \qquad ۲۸\text{-}۱۱$$

$$A = -\omega^2\cos\varphi \qquad (\varphi = \theta - \alpha) \qquad ۲۹\text{-}۱۱$$



شکل ۱۱-۸ دنبال کننده در تماس با نوک بادامک

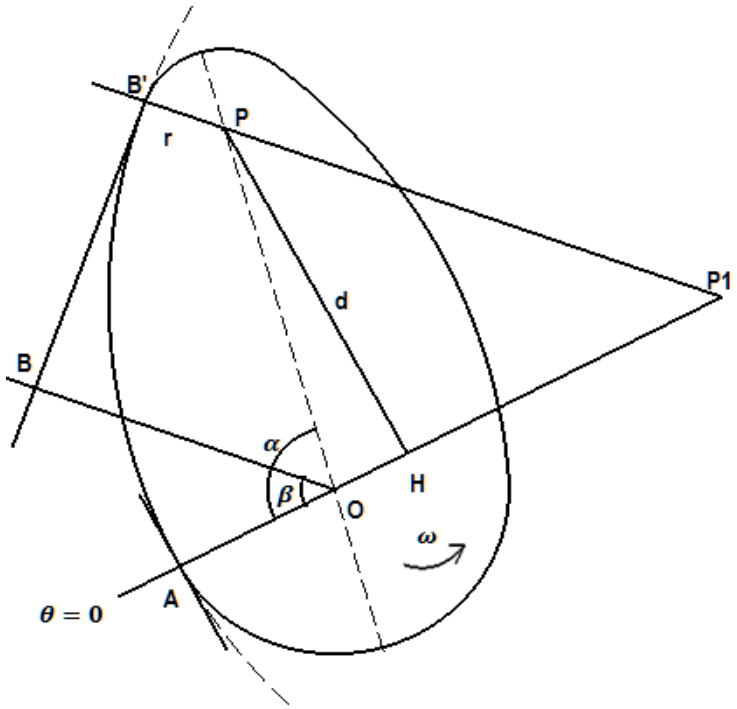
اگر β زاویه ای باشد که بادامک میچرخد وقتی دنبال کننده از A به B میرسد یا منحنی جانبی AB'را طی می کند:

$$\widehat{AP_1B} = \beta \qquad \widehat{HOP} = (\pi - \alpha) \qquad ۳۰\text{-}۱۱$$

$$\sin\beta = \sin(\widehat{HP_1P}) = \frac{PH}{\rho - r} \quad , \quad \sin(\pi - \alpha) = \frac{PH}{d} \qquad ۳۱\text{-}۱۱$$

$$(\rho - r)sin\,\beta = d\sin(\pi - \alpha) = d\sin\alpha \qquad ۳۲\text{-}۱۱$$

$$\sin\beta = \frac{d\sin\alpha}{\rho - r} \quad , \quad \cos\alpha = \frac{(\rho-r)^2 - d^2 - (\rho-R)^2}{2d(\rho-R)} \qquad ۳۳\text{-}۱۱$$

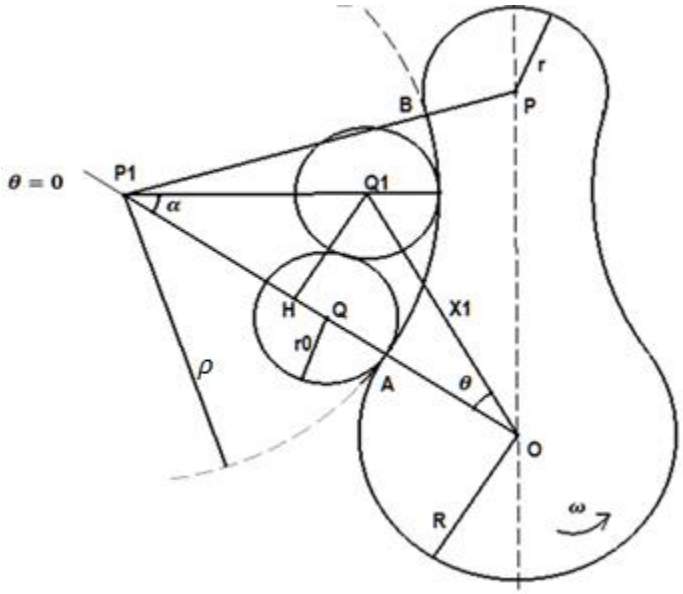


شکل ۱۱-۹ دنبال کننده در حال طی کردن $A - B$

روابـــط ۱۱-۲۳ و ۱۱-۲۴ و ۱۱-۲۵ بـــرای $\theta = 0$ تـــا $\theta = \beta$ ، $\theta = 2\alpha - \beta$ تـــا $\theta = 2\alpha$ صادق است.

و روابط ۱۱-۲۷ و ۱۱-۲۸ و ۱۱-۲۹ برای $\theta = \beta$ تا $\theta = 2\alpha - \beta$ صادق است.

د- بادامک مقعر با دنبال کننده غلطکی:



شکل ۱۱-۹ بادامک مقعر با دنبال کننده غلطکی

در شکل ۱۱-۹ میتوان نوشت که:

$$P_1O = P_1H + HO = \rho + R \qquad ۳۴\text{-}۱۱$$

$$P_1H = P_1\,Q_1 \cos\alpha = (\rho - r_0)\cos\alpha \quad , \quad HO = OQ_1 \cos\theta = X_1 \cos\theta \qquad ۳۵\text{-}۱۱$$

بنابراین:

$$\rho + R = (\rho - r_0)\cos\alpha + X_1 \cos\theta \qquad ۳۶\text{-}۱۱$$

از طرف دیگر در مثلث $P_1O\ Q_1$ داریم:

$$\cos\alpha = \frac{(\rho-r_0)^2+(\rho+R)^2-{X_1}^2}{2(\rho-r_0)(\rho+R)} \qquad ۳۷\text{-}۱۱$$

$$\rho + R = (\rho - r_0)\frac{(\rho-r_0)^2+(\rho+R)^2-{X_1}^2}{2(\rho-r_0)(\rho+R)} + X_1 \cos\theta \qquad ۳۸\text{-}۱۱$$

$$X = OQ_1 - OQ = X_1 - (R + r_0) \qquad ۳۹\text{-}۱۱$$

اگر از رابطه فوق مقدار X_1 را در این رابطه قرار دهیم:

$$X = (\rho + R)\left[\cos\theta - \sqrt{(\cos\theta)^2 + \left(\frac{\rho-r_0}{\rho+R}\right)^2 - 1} - \frac{(R+r_0)}{(\rho+R)}\right] \qquad ۴۰\text{-}۱۱$$

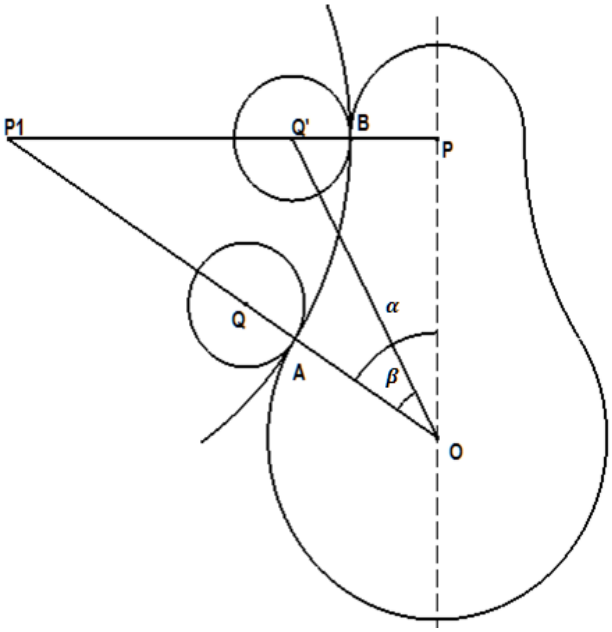
$$V = (\rho + R)\left[-\sin\theta + \frac{\sin 2\,\theta}{2\sqrt{(\cos\theta)^2+\left(\frac{\rho-r_0}{\rho+R}\right)^2-1}}\right] \qquad ۴۱\text{-}۱۱$$

$$A = (\rho + R)\left[-\cos\theta + \frac{\left[(\cos\theta)^2+\left(\frac{\rho-r_0}{\rho+R}\right)^2-1\right]\cos 2\theta+0.25(\sin 2\theta)^2}{\left[(\cos\theta)^2+\left(\frac{\rho-r_0}{\rho+R}\right)^2-1\right]^{\frac{3}{2}}}\right] \qquad ۴۲\text{-}۱۱$$

معادلات ۱۱-۱۱ و ۱۱-۱۲ و ۱۱-۱۳ در اینجا نیز برای مواقعی که غلطک در تماس با نوک بادامک است قابل استفاده است.

(روابط ۱۱-۴۰ و ۱۱-۴۱ و ۱۱-۴۲ برای: $\theta = 0$ تا $\theta = \beta$ و $\theta = 2\alpha - \beta$ تا $\theta = 2\alpha$ و روابط ۱۱-۱۱ و ۱۱-۱۲ و ۱۱-۱۳ برای: $\theta = \beta$ تا $\theta = 2\alpha - \beta$)

βزاویه ای است که بادامک میچرخد وقتی دنبال کننده سطح جانبی را طی می کند.



$$\cos\alpha = \frac{(\rho+R)^2+d^2-(\rho+r)^2}{2(\rho+R)d} \qquad ۴۳ - ۱۱$$

شکل ۱۱-۱۰غلطک در حال پیمودن بادامک مقعر

مشخصات بادامک مقعر با پیرو غلطکی:

$R = ۳۰/۱۶mm\ (۱/۸۷۵\ in)$ $\rho = ۱۰۱/۶mm\ (۴\ in)$ $r = ۱۲/۷mm\ (۰/۵in)$

$r_0 = ۱۴/۳\ mm\ (۰/۵۶۲۵\ in)$ $d = ۳۸/۱mm\ (۱/۵\ in)$

$d_1 = ۳۸/۶mm\ (۱/۵۲\ in)$

مشخصات بادامک محدب با پیرو غلطکی:

$R = ۲۵/۴mm\ (۱\ in)$ $\rho = ۷۹/۴mm\ (۳/۱۲۵\ in)$ $r = ۱۲/۷mm\ (۰/۵in)$

$r_0 = ۱۴/۳\ mm\ (۰/۵۶۲۵\ in)$ $d = ۳۸/۱mm\ (۱/۵\ in)$

مشخصات بادامک محدب با پیرو مسطح:

$R = ۲۵/۴mm\ (۱\ in)$ $\rho = ۸۷/۳mm\ (۳/۴۳۷۵\ in)$ $r = ۲۵/۸\ mm\ (۱/۰۱۵۶in)$

$r_0 = \infty$ $d = ۲۱/۴mm\ (۰/۸۴۳۷۵\ in)$

ه- نیروهای دینامیکی روی فنر و دنبال کننده:

اگر m جرم موثر دنبال کننده باشد نیروی مورد نیاز برای اینکه به دنبال کننده شتاب بدهد عبارتست از:

$$F = m.A$$

فرض کنیم S سختی فنر مربوط به دنبال کننده و Y طول فنردر فشار اولیه باشد وقتی دنبال کننده مسافت X را طی نماید نیروی فنر برابر است با $S(X+Y)$. بنابراین در نقطه پرش دنبال کننده داریم:

$$mg + S(X+Y) = m.A \qquad ۴۴-۱۱$$

پس برای جلوگیری از پرش باید:

$$mg + S(X+Y) \geq m.A \qquad ۴۵-۱۱$$

و یا:

$$W + S(X+Y) \geq \frac{W}{g} A \qquad ۴۶-۱۱$$

W وزن موثر دنبال کننده است.

۱۱-۵- روش آزمایش:

نخست باید صفحه تکیه گاه دستگاه توسط پیچهای تنظیم تراز شود و اتصالهای الکتریکی بین سوئیچ معکوس (واقع روی صفحه تکیه گاه دستگاه) و دستگاه کنترل انجام شود، سپس برق $A.C$ را به دستگاه کنترل وصل کنید مطمئن شوید که مهره محکم کننده بادامک روی شافت محکم شده باشد. سپس بادامک را توسط چرخ لنگر یک یا دو دور بچرخانید تا مطمئن شوید کشش فنرزیاد نبوده و قلم روی کاغذ خش نمی اندازد. برق را وصل کنید. دستگاه کنترل را روشن نمائید موتور شروع به حرکت می کند. اگر موتور متوقف شد ممکن است بعلت این باشد که دنبال کننده در تماس با منتها الیه زائده بادامک قفل کرده باشد در این صورت دستگاه را خاموش کرده و دکمه را در جهت خلاف عقربه های ساعت و شافت بادامک را با دست در جهت مخالف آن (جهتی که موتور شافت را میگرداند) بچرخانید تا آنجا که دنبال کننده با جانب دیگر بادامک تماس باید سپس دکمه را در جهت حرکت عقربه های ساعت بچرخانید تا شافت شروع به دوران کند.

توجه: قبل از آنکه جهت چرخش موتور را عوض کنید مطمئن شوید که کلید اصلی تامین برق موتور بسته باشد وگرنه فیوزهای موتور خواهد سوخت.

با این ترتیب دستگاه پرشهای دنبال کننده را بعد از شروع بکار مشخص خواهد کرد و نیز صداهای کوتاه زیادی که شنیده می شود مربوط به پرشهای دنبال کننده است.
هر بار قبل از شروع آزمایش مطمئن شوید که دنبال کننده و بارها و بادامک محکم شده باشند.
برای ثبت شدن منحنی روی کاغذ ، نوک قلم را با کاغذ تماس دهید.

دنباله روش آزمایش:

۱- سرعت پرش را برای ترکیب پیرو غلطکی با فنر قرمز (بدون هرگونه فشردگی) با بادامک های زیر بدست آورید (بدون وزنه اضافی)

الف- بادامک مماسی ب- بادامک مقعر

ج- بادامک محدب (دو نوع) د- بادامک خارج از مرکز

۲- منحنی تغییر مکان پیرو (غلطکی) را برای کلیه بادامکهای فوق (۵ نوع) رسم نمائید.

۳- سرعت پرش (سرعت دورانی شافت بادامک که در آن جدائی اتفاق می افتد) را برای پیرو تخت با فنر قرمز (بدون هرگونه فشردگی) برای بادامک مماسی بدست آورید. (بدون وزنه اضافی)

۴- سرعت پرش را (بادامک مماسی و پیرو غلطکی) برای فنرهای مختلف (سیاه – سفید – قرمز) بدون هرگونه فشردگی و بدون وزنه اضافی بدست آورید.

۵- سرعت پرش را با فشردگیهای اولیه ۵،۱۰ ،۱۵ ،۲۰ ، ۲۵، ۳۰ میلیمتر با فنر قرمز بدون هرگونه وزنه اضافی با پیرو غلطکی بدست آورید.

۶- سرعت پرش را (بادامک مماسی و فنر قرمز بدون فشردگی و پیرو غلطکی) برای وزنه های مختلف (حداقل ۵ وزنه دوتائی) بدست آورید.

۱۱-۶- خواسته های آزمایش :

۱- نتایج مختلف که از راه آزمایش بدست آورده اید مقایسه کنید.

۲- با استفاده از منحنی موقعیت منحنی تغییرات سرعت خطی و شتاب خطی پیرو را برای حالت (بادامک مماسی - فنر قرمز بدون وزینه اضافی و پیرو غلطکی) رسم نموده، ماکزیمم سرعت خطی و شتاب خطی را تعیین کنید. یکبار نیز از راه تئوریک ماکزیمم شتاب خطی و سرعت خطی را حساب کرده با مقادیر تجربی مقایسه کنید.

۳- سرعت زاویه ای که در آن پرش دنبال کننده در بند قبل (بادامک مماسی، فنر قرمز، بدون وزنه اضافی و پیرو غلطکی) را از راه تئوری محاسبه و با مقدار اندازه گیری شده مقایسه کنید.

۴- منحنی تابع سرعت پرش بر حسب وزنه های مختلف را در حالت (بادامک مماسی، فنر قرمز، پیرو غلطکی) را رسم کنید و روی منحنی رسم شده بحث نمائید. و دلیل اینکه منحنی شکل خاصی دارد را از روی فرمول تئوریک توضیح دهید.

فنرسفید $k = ۴/۲۵۳ \frac{KN}{m}$ فنرسیاه $k = ۳/۱۵۲ \frac{KN}{m}$ فنرقرمز $k = ۵/۲۵۴ \frac{KN}{m}$

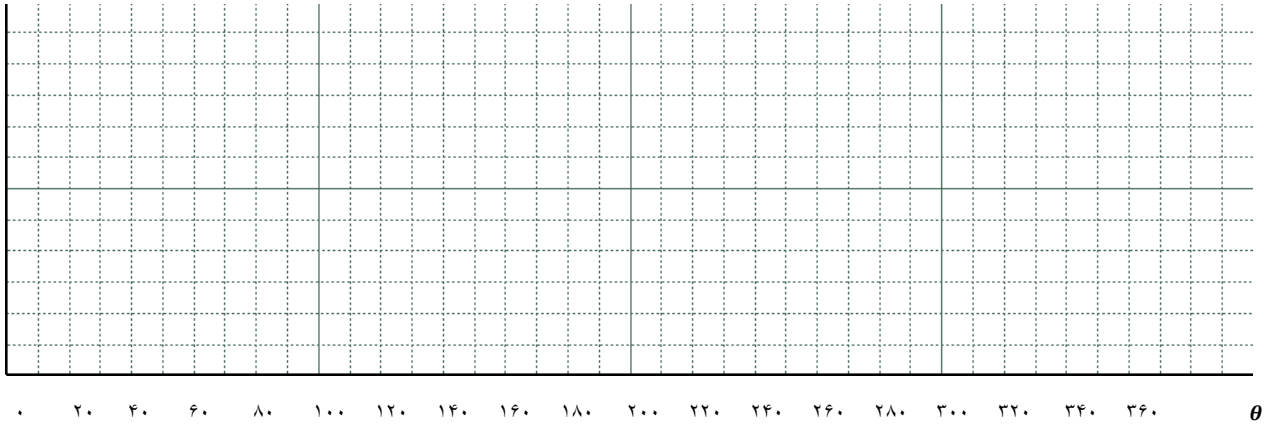
وزن موثر دنبال کننده برابر با ۱۳۵۰ گرم است.

پیوست ۱ :

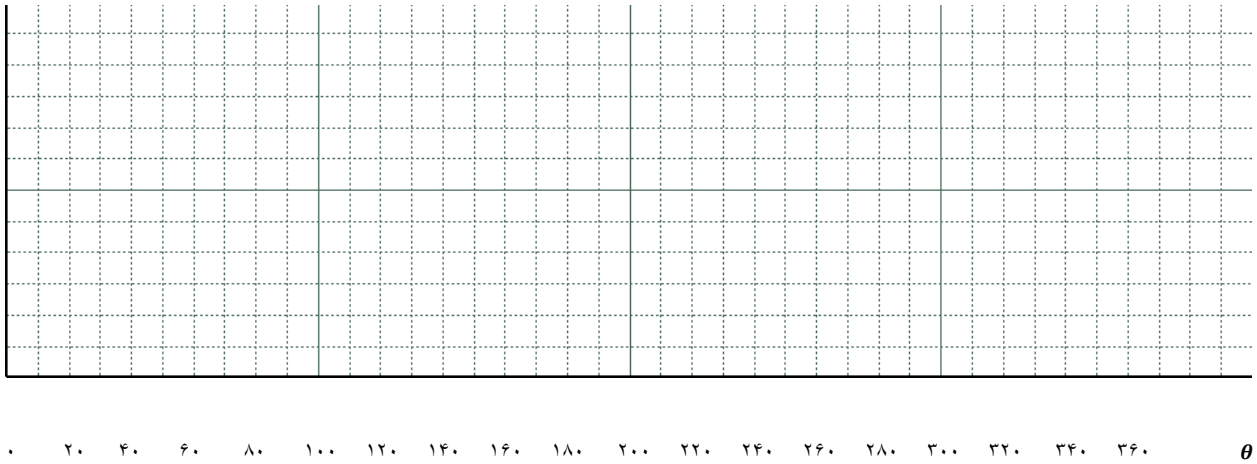
نمونه ای از جداول محاسباتی سرعت و شتاب مکانیزمها

θ	۱۰	۳۰	۵۰	۷۰	۹۰	۱۱۰	۱۳۰	۱۵۰	۱۷۰	۱۹۰	۲۱۰	۲۳۰	۲۵۰	۲۷۰	۲۹۰	۳۱۰	۳۳۰	۳۵۰
x																		
Δx																		
$V = \frac{\Delta x}{\Delta \theta}$																		
ΔV																		
$A = \frac{\Delta V}{\Delta \theta}$																		

$x(mm)$



$V\ (\frac{mm}{sec})$

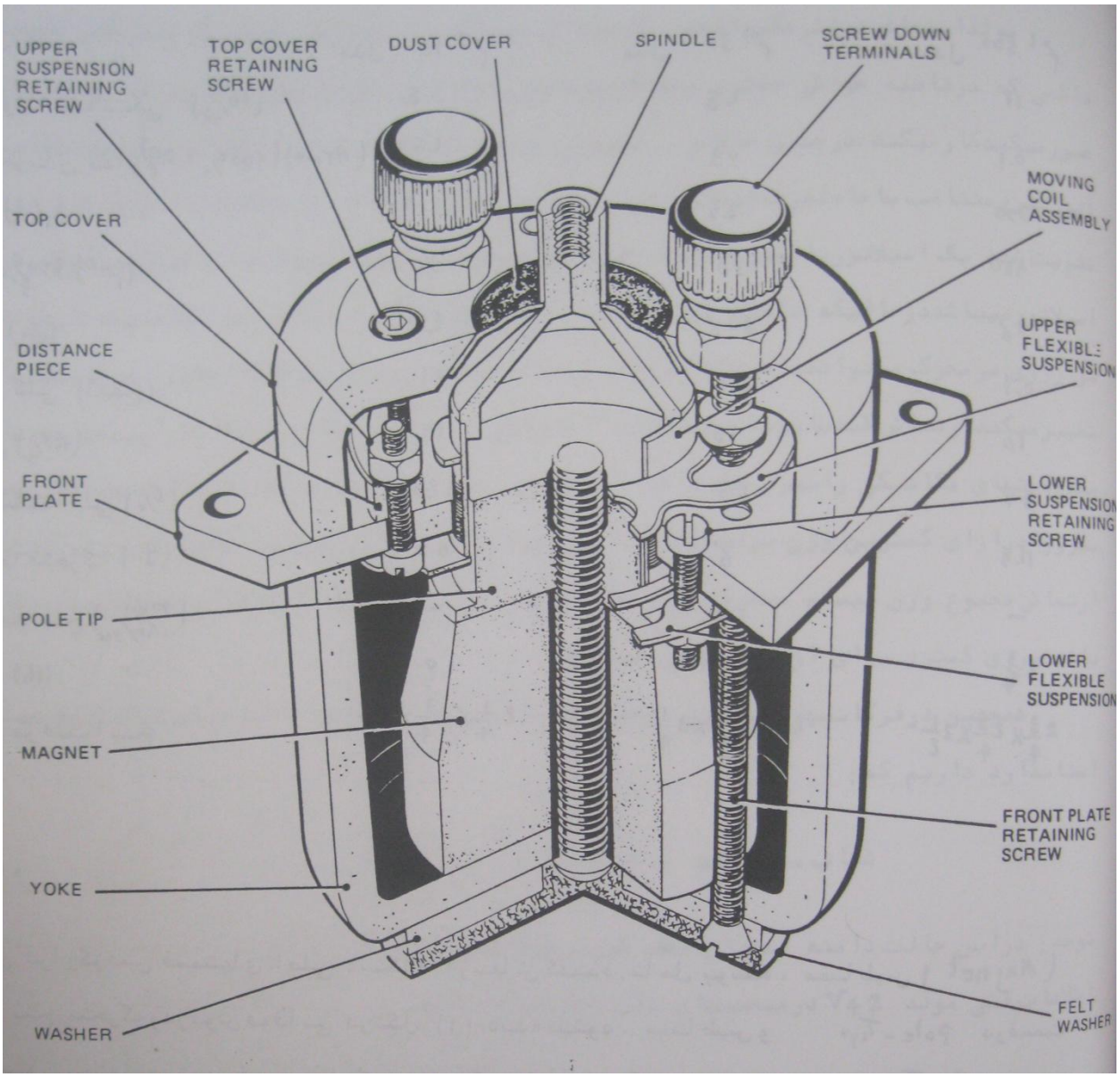


پیوست۲ :

نمونه ای از جداول داده های مکانیزمها

θ	۱۵		۴۵		۷۵		۱۰۵		۱۳۵		۱۶۵		۱۹۵		۲۲۵		۲۵۵		۲۸۵		۳۱۵		۳۴۵	

پیوست۳: استربوفلاش



شکل پ-۱ :مقطع مولد ارتعاش مکانیکی

جدول پ-۱ مشخصات مولد ارتعاشی

مشخصات	مدل ۱۳اهمی	مدل۳۰ اهمی	مدل۳۰۰ اهمی
ضریب نیروی استاتیکی	۰/۸	۱/۸	۱۱
ماکزیمم جریان مداوم	۱/۵	۰/۳	۰/۱
مقاومت	۲/۵	۲۵	۳۰۰
امپدانس	۳۰	۳۰	۵۰۰
توان لازم	۵-۱۰	۳-۶	۳/۶
تغییر طول کلی (اینچ)	۰/۱	۰/۱	۰/۱
حد فرکانس	۱۰	۱۰	۱۰
فرکانس تشدید اصلی	۱۲۰	۵۵	۳۵
جرم سیستم متحرک	۶/۵	۶	۱۱/۵
حساسیت سیم پیچ	-	۲۰۰	-
وزن کلی	۲	۲	۲/۷۵
ابعاد کلی برحسب اینچ	۲/۷۵×۲/۷۵×۲۵ ۳/	۲/۷۵×۲/۷۵×/۲۵ ۳	۲/۷۵×۲/۷۵×/۵ ۳

۲- شرح دستگاه :

طرز قرار گرفتن قسمت های اصلی دستگاه ارتعاش کننده شامل پیوسته، مغناطیس قسمت سیم پیچ متحرک و در پوش فوقانی در شکل (۷-۵) دیده می شود. مغناطیس و $Pole-Tip$ درقسمت داخلی پوسته ریخته گری شده طوری که قرار گرفته اند یک فضای آزاد حلقه ای بین$Pole-Tip$ و سوراخ محور صفحه جلوئی تشکیل می دهد. یک پیچ سرتاسری از قسمت پوسته رد شده و مغناطیس و را نگه می دارند. صفحه جلوئی توسط چهار عدد پیچ که از یک قسمت $Packing$ رد شده و به پوسته متصل می باشند در جای خود محکم می شود.

مکانزیم سیم پیچ متحرک بوسیله پیچ های تنظیم و قطعات مخصوص در فضای حلقه ای بین$Pole-$ Tip و سوراخ صفحه جلوئی قرار دارد.

سر محرک به قسمت فوقانی سیم پیچ متصل است و از یک دیافراگم انعطاف پذیر در پوشش فوقانی رد می شود. در پوش فوقانی، توسط چهار عدد پیچ در جا مستقر می باشد و حاصل دو ترمینال جریان برق برای مغناطیس می باشد یک میله محافظ از داخل سر محرک رد شده و در زیر ترمینال ها محکم شده است. مدار مغناطیسی بوسیله مغناطیس طبیعی، پوسته فولادی و صفحه جلوئی حاصل شده و میدان مغناطیس با شدتی کافی برای دستگاه ویبراتور تولید می نماید.

۵-۹- کارکرد دستگاه :

مولد ارتعاش در اثر عکس العمل یک میدان مغناطیسی دائم که توسط یک مغناطیس طبیعی دائمی که در فاصله هوائی حلقوی متمرکز می باشد و یک جریان نوسان کننده که از داخل سیم پیچ عبور می کند کار می کند. در چنین حالاتی، نیروئی عمودی بر خطوط جریان حاصل برق تولید می کند این نیرو متناسب با حاصلضرب جریان آنی و دانسیته فلوی مغناطیسی می باشد. انرژی لازم از خروجی تقویت شده یک اسیلاتور تامین می شود. فرکانس حرکت سیم پیچ متحرک همان فرکانس سیگنال اسیلاتورمی باشد در حالیکه دامنه آن متناسب با سیگنال می باشد بنابراین یک نمونه آزمایش سواراروی سر محرک می تواند با هر فرکانس ثابتی یا دامنه ای از فرکانس ها که بطور اتوماتیک یا دستی تغییر می کند ارتعاش کند با توجه به مشخصات الکتریکی دستگاه، هنگام استفاده از ویبراتور باید محدودیت های مکانیکی را نیز در نظر داشت. ساختمان قسمت محرک طوری است تا ماکزیمم مقدار ممکن نیرو را در ازای کمترین وزن تولید نماید. این امر در راندمان مولد خیلی اهمیت دارد زیرا وزن کل ارتعاش مجموع وزن سیستم متحرک و وزن بار نمونه آزمایش می باشد. بنابراین هرچه وزن زیادتر باشد نیروی کمتری برای آزمایش باقی می ماند.

همچنین در فرکانس های پائین، محدودیت دامنه، شتاب تئوری را محدود می سازد. از فرمول استاندارد داریم که:

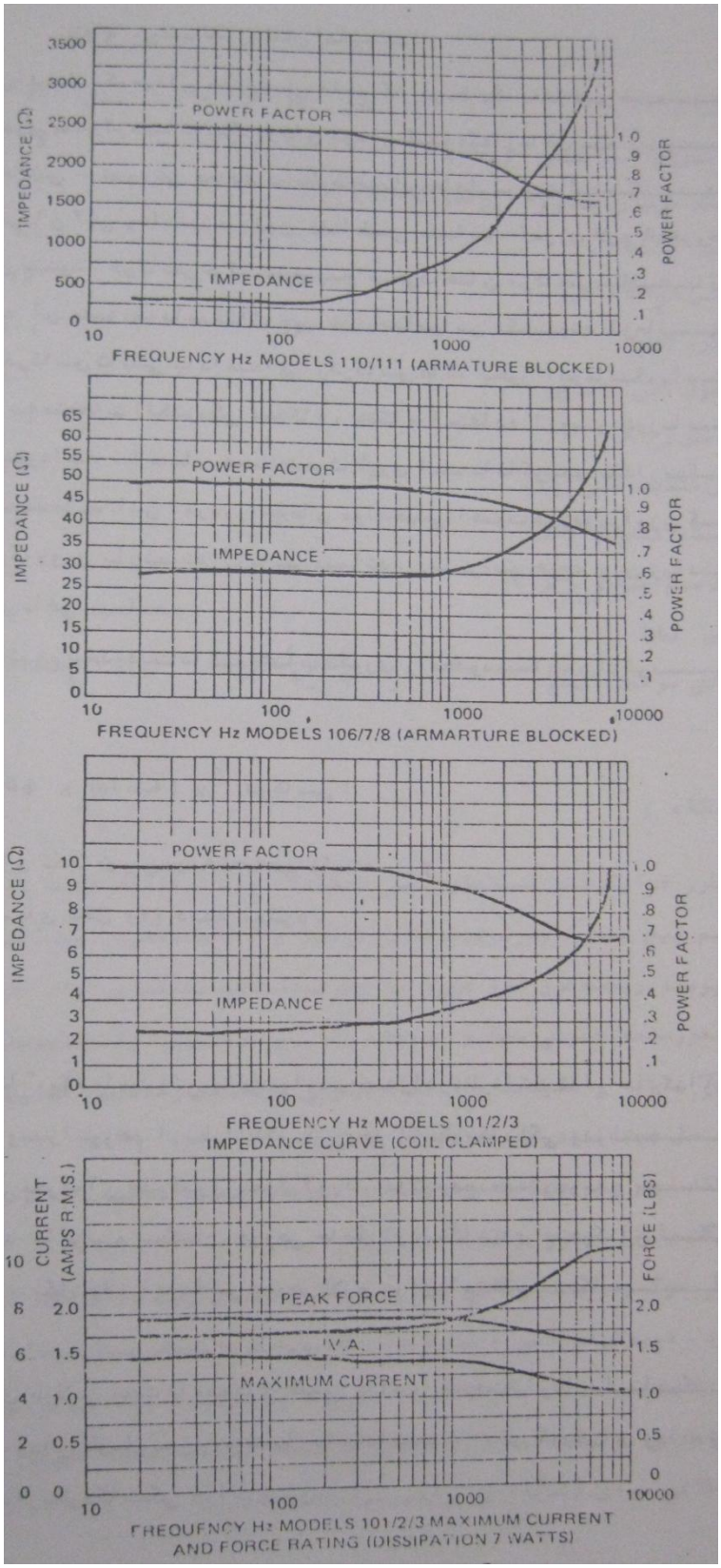
$$\text{شتاب} = 4\pi^2 \times (\text{دامنه}) \times (\text{فرکانس})^2$$

توجه: در این حالت دامنه به معنای نصف کورس می باشد یعنی $X =$ دامنه

۳- طرز کار :

طرز کار مولد تعاش نسبتاً ساده است ولی باید مواردی چند را در نظر داشت تا از بارگذاری زیاد از حد ($Over\ Loading$) ویبراتورهم ازنظر الکتریکی و هم از نظر مکانیکی و در نتیجه خراب شدن ویبراتور یا دستگاه های محرک آن جلوگیری بعمل آورد. ماکزیمم مقدار جریان مجاز در شکل (۷-۶) دیده می شود. در حالیکه ماکزیمم سیگنال خروجی حاصل از دستگاه های متحرک آن بستگی به امپدانس و ضریب توان بار دارد. شکل (۷-۶) امپدانس خروجی لازم برای انتخاب دستگاه های ویبراتور رانشان می دهد.

مولد ارتعاش هنگام کار های طولانی تحت دامنه های خیلی زیاد، با تحا بارهای استاتیکی خیلی زیاد مخصوصاً اگر برای مدت زمان طویل بدون حذف بار باشد یا تحت تاثیر کوپل های زیاد در محورهای عمودی یا افقی قرار گیرد از نظر مکانیکی خراب می شود.



شکل پ-۲ : *Typical Performance Curve*

عموماً باراستاتیکی اعمال شده به ویبراتور باید طوری باشد که تغییر مکان سیستم متحرک باضافه نصف دامنه لازم برای آزمایش از نصف کورس ویبراتور زیادتر نباشد. هنگام آزمایش با بارهای استاتیکی زیاد باید از یک فرم مناسب سیستم آویز کمکی مثل یک فنر سخت استفاده شود. سیم های لاستیکی بافته شده ($Brolded\ rubber$) برای این منظور عموماً استفاده می شود.
برای این منظور از ویبراتور باید مطابق زیر رفتار کرد:
۱- ویبراتور را بوسائل مکانیکی طوری به بار متصل نمائید که سیستم متحرک آن از حالت میانی خود انحراف پیدا نکند.
۲- چک کنید که کنترل دامنه اسیلاتور (دستگاه نوسان ساز) در حالت صفر باشد سپس اسیلاتور و تقویت کننده را روشن نمائید.
۳- فرکانس و دامنه مطلوب را با کنترل های اسیلاتور ایجاد کنید و چک کنید که سر متحرک شروع به ارتعاش کند.
۴- برنامه آزمایش را شروع نمائید.
توجه: اگر فرکانس متغیر باشد، جریان خروجی و موقعیت آزمایش در نتیجه تغیرات امپدانس ویبراتور و ضریب توان نسبت به فرکانس قابل تغییر می باشد. این موضوع در شرایطی که فرکانس متغیر باشد حائز اهمیت می باشد.

Sterobo Flash

۱- مقدمه :

استروبوفلاش دستگاه بسیار جامعی است که نور سفید با شدت زیاد و تسهیلات زیادی دارد این دستگاه از یک مدار اسیلاتورترا نزیستوری که یک لامپ گزنون($Xenon$)را تریگر ($Trigger$) و یک فرکانس مترآنالوگ($Analogue$) را بکار میاندازد تشکیل شده است. عمل فلاش $flashing$ یا عمل خاموش و روشن شدن درسه دامنه مختلف از ۳۰۰ تا ۱۸۰۰۰ سیکل در دقیقه می باشد.
لازم نیست که استرو بوفلاش در تماس مکانیکی متحرک قرار بگیرد و یا جریان را از آن اخذ نماید در نتیجه برای اندازه گیری سرعت محوری که انتهای آن محدود یا جریان برقی ک محدود باشد مفید میباشد.
از این دستگاه می توان همچنین برای مشاهده حالت حرکت کند $Slow\ Motion$ یا حالت ثابت $Stationary$ قسمت هائی با سرعت زیاد استفاده نمود.
در جائیکه یک قطعه با سرعت دورانی ثابت تحت نوراستروبوفلاش مشاهده شود، چشم انسان حالتی از حرکت را حس می کند که جسم با سرعت نسبی بین سرعت جسم و فرکانس نور استروبوفلاش در حرکت باشد. هرگاه فرکانس استربوفلاش با سرعت جسم یکی باشد، هر نقطه روی جسم متحرک هنگام روشن شدن لامپ در یک وضعیت دیده می شود در نتیجه جسم را ثابت خواهیم دید. هرگاه فرکانس نور کمی کمتر از سرعت دوران باشد در نقطه ای از جسم هربار که لامپ روشن شود کمی جلو تر دیده میشود . در نتیجه چنین به نظر میرسد که جسم با سرعت خیلی کمی زیادتر از سرعت جسم باشد، چنین به نظر میآید جسم با سرعت کمی خلاف جهت خود حرکت میکند.

۱- مشخصات :

دامنه : ۳۰۰-۱۸۰۰۰ فلاش در دقیقه در سه دامنه ی متفاوت
دقت : ۱%+
رنگ نور :سفید
زمان یک فلاش :۵-۱۰ نانوثانیه
توان متوسط فلاش :ماکزیمم ۶ وات
۲- دستورات
۱- کلید $function$ را روی$int.osc$ قرار دهید.
۲- کلید$lamp$ را روی$int.$ قرار دهید.
۳- کلید $meter\ range$ را روی دامنه ی مطلوب قرار دهید.
۴- نود لامپ فلاش را روی جسم تحت آزمایش بتابانید.
۵- کنترل سرعت را به گونه ای تنظیم کنید که یک تصویر ثابت از جسم ببینید.
۶- برای انجام مرحله ی قبل از سرعت های زیاد شروع کنید و سرعت را مدام کم کنید تا به نقطه ی اصلی سنکرونیزاسیون $(synchronism)$ برسید و با این کار از مشاهده ی سرعت در مضارب کمتر نقطه ی اصلی سنکرونیزاسیون پرهیز میکنیم .

توجه کنید که بر روی اجسام دوار باید نشانه گذاری نمود تا بتوان نقطه ی اصلی سنکرونیزاسیون را مشاهده نمود ضمنا از آنجایی که دقت دستگاه در سرعت های کم بیشتر استاز دامنه های ۱۸۰۰ و۱۲۰۰ در $meter\ range$ استفاده کنید .

نکته : تعیین سرعت های بالا

هرگاه سرعت جسم متحرک بالا تر از دامنه ی استربوفلاش بود به طریق زیر عمل کنید:
۱- تصویر ثابتی از جسم بدست اورید و سرعت فلاش را x بنامید.
۲- سرعت بعدی سنکرونیزاسیون را بدست آورید و آن را y بنامید.
۳- سرعت جسم از رابطه ی زیر بدست میآید:

$$\text{سرعت} = \frac{xy}{\mathrm{x-y}}$$

برای دقت بیشتر ۲ سرعت غیر متوالی را بخوانید و سرعت را از رابطه ی زیر بدست آورید:

$$\text{سرعت} = n\frac{xy}{\mathrm{x-y}}$$

که n تعداد دفعات تغییر سرعت است.

ب :

اگر لامپ با سرعتی معادل ضرایبی از سرعت جسم روشن و خاموش شود چندین تصویر دیده می شود در نتیجه یک خط شعاعی در انتهای یک محور متحرک بصورت چندین خط یا فواصل متساوی در سطح

دایرهای دیده می شود. دو برابر سرعت جسم متحرک دو خط با زاویه°۱۸۰ تولید می کند، سه برابر سرعت جسم سه خط با زاویه°۱۲۰ از هم تولید می کند و بهمین ترتیب.
با تقسیم سرعت فلاش به تعداد خطوط بدست آمده سرعت حقیقی بدست می آید.
این روش برای سرعت های خیلی کم توصیه نمی شود مگر آنکه از یک اطاق تاریک استفاده شود.
سرعت های کمتر از سرعت انتقال دید که در حدود ۱۰ فلاش در یک ثانیه می باشند برای تعین مشکل می باشند.