



نام درس: روش‌های اندازه‌گیری پیشرفته – ترانسدیوسرهای حرکت دورانی

جلسه دهم

نام استاد: علی چائی بخش لنگرودی



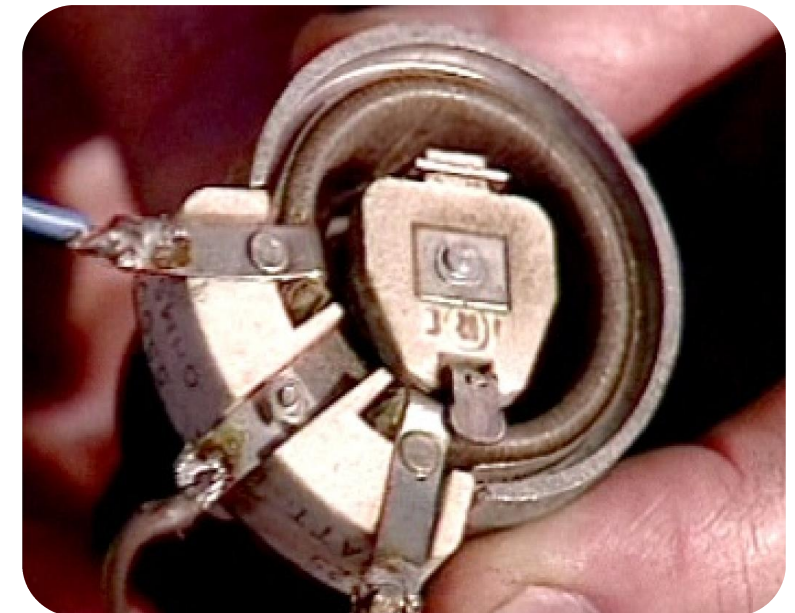
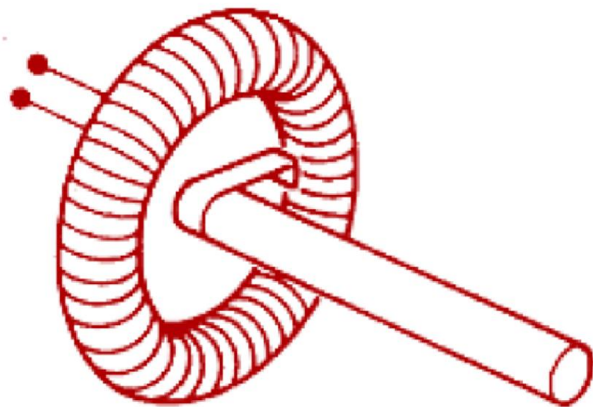
جابجایی دورانی

پتانسیومترهای دایره‌ای

اندازه‌گیری حرکت زاویه‌ای یک جسم حول محور چرخشی

محدوده اندازه‌گیری: $0 \sim 360$ درجه

صحت: ± 1 درصد



جابجایی دورانی

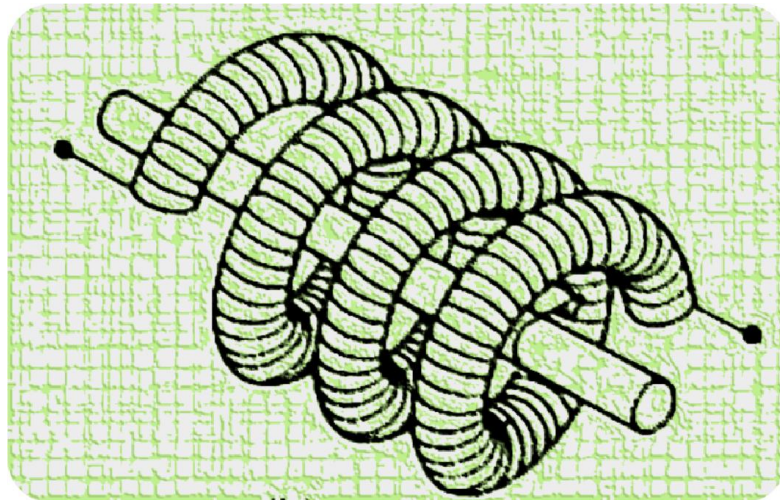
پتانسیومتر مارپیچی

ارزانترین وسیله برای اندازه‌گیری جابجایی دورانی

برای اندازه‌گیری دامنه‌های بیشتر از ۳۶۰

- محدوده اندازه‌گیری : بیش از ۶۰ دور

- نامعینی اندازه‌گیری: $\pm 0.002\%$



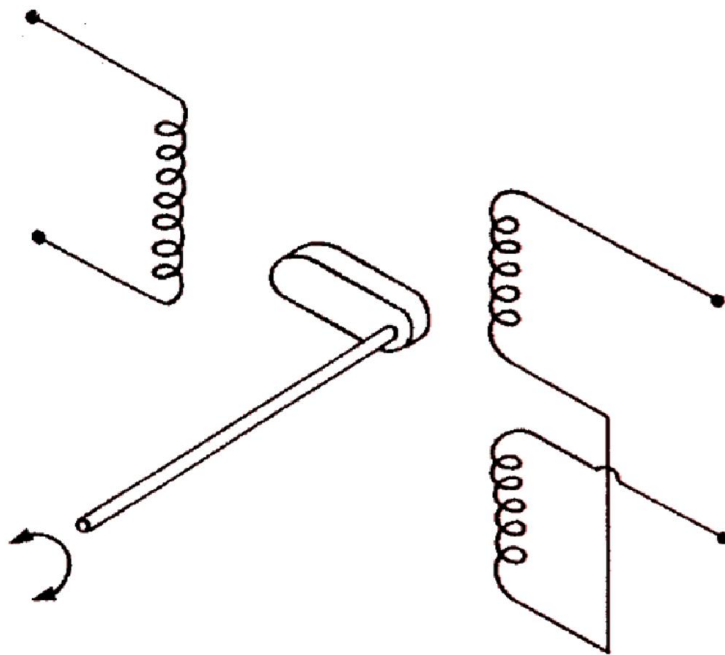
جابجایی دورانی

ترانسفرمرهای تفاضلی دورانی

← محدوده اندازه‌گیری: $\pm 40^\circ$

← نامعینی اندازه‌گیری: $(\pm 3\%)$ برای $\pm 60^\circ$ ، $\pm 1\%$

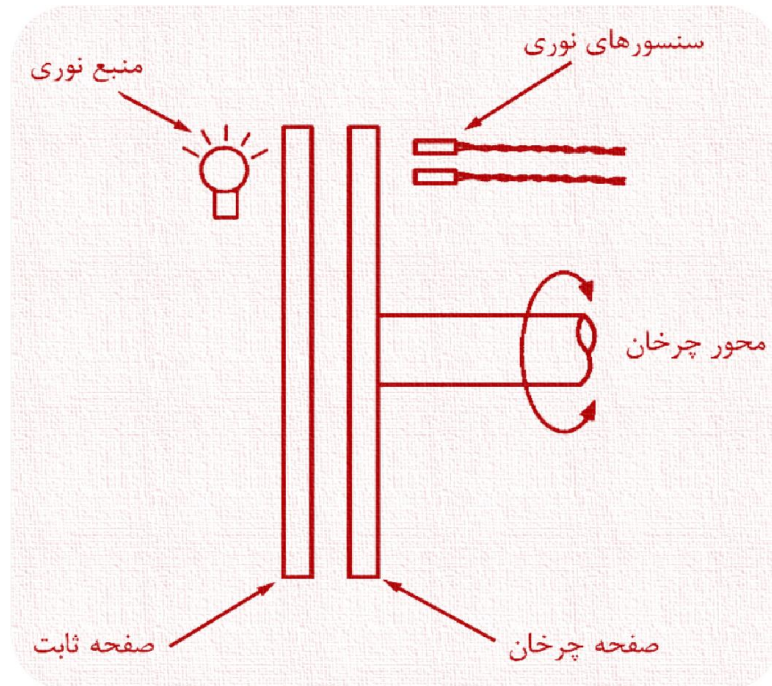
← طول عمر بالا، بی‌نیاز از تعمیر و نگهداری



جابجایی دورانی

اینکودرهای افزایشی

اصول عملکرد: دوران زاویه ای کل با شمارش پالس هنگام چرخش شفت مورد اندازه‌گیری، استنباط می‌گردد. 



بیشترین تعداد شکاف: دیسک با قطر ۱۵۰ میلی متر = ۵۰۰۰

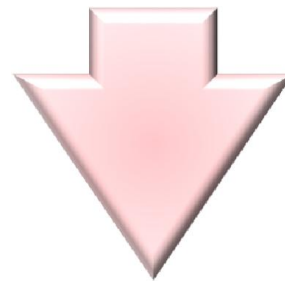
تفکیک اندازه‌گیری: $۱ \div ۵۰۰۰ \sim ۱ \div ۲۰۰۰۰$

خروجی از نوع دیجیتال بوده است. 



جابجایی دورانی

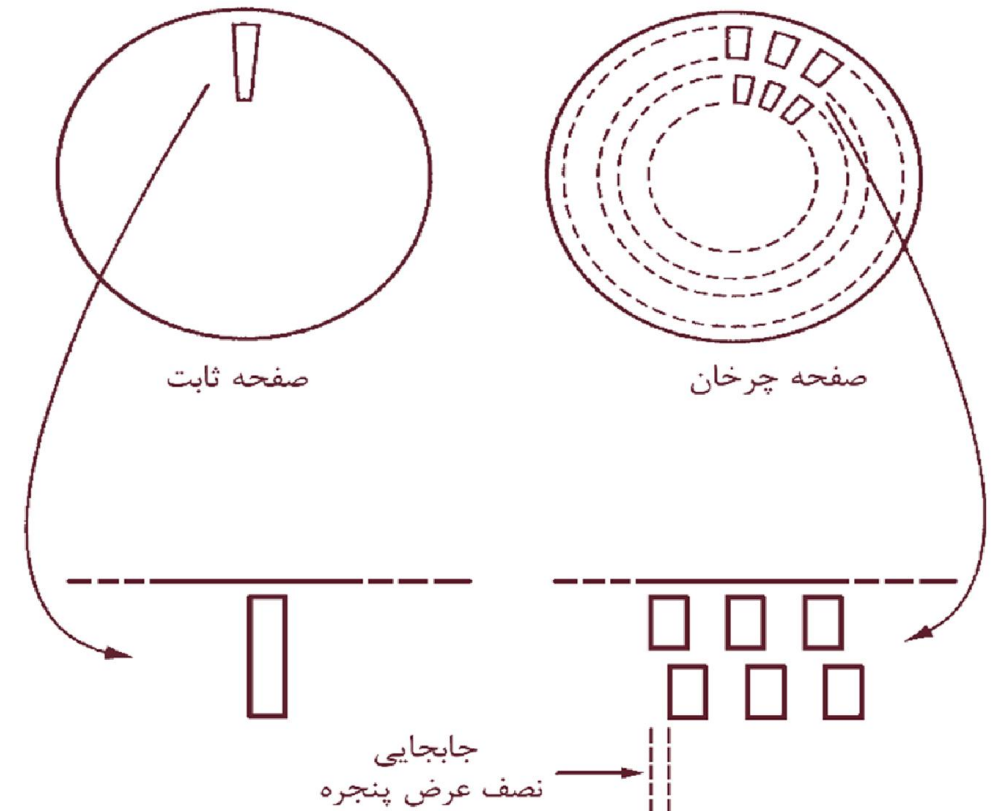
بیشترین تعداد شکاف‌ها بر مسیر برای دیسکی با قطر 150 mm برابر با $5000 =$ تفکیک اندازه‌گیری زاویه‌ای برابر با 1 در 5000



با پیچیده کردن

بیشترین تفکیک اندازه‌گیری 1 در $20,000$

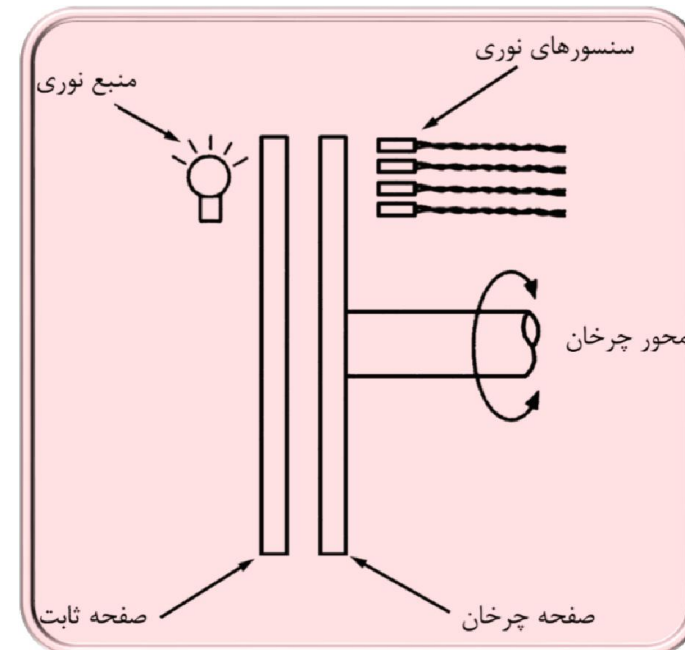
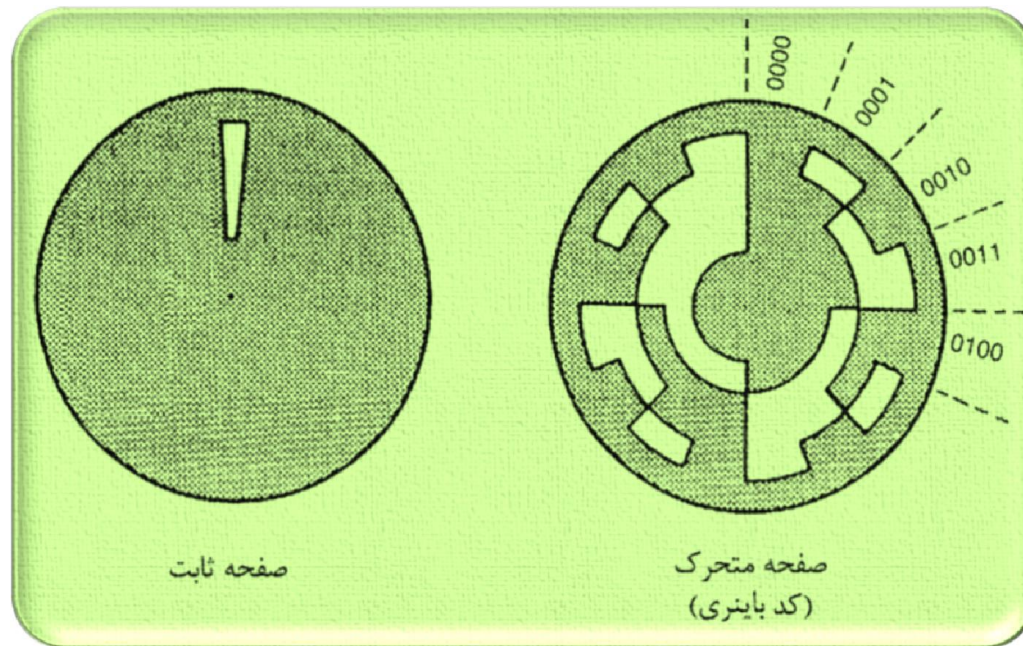
اینکودرهای افزایشی



جابجایی دورانی

اینکودرهای صفحه کد شده

دارای خروجی باینری بوده و دارای دقت و قابلیت اطمینان بسیار بالا می‌باشند.

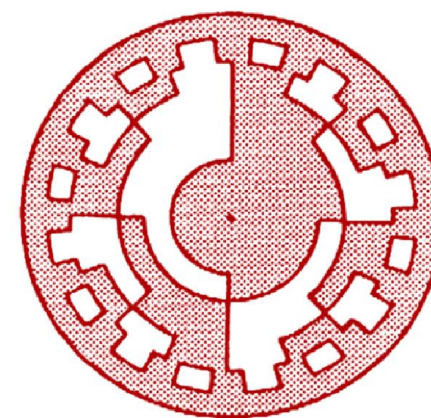


جابجایی دورانی

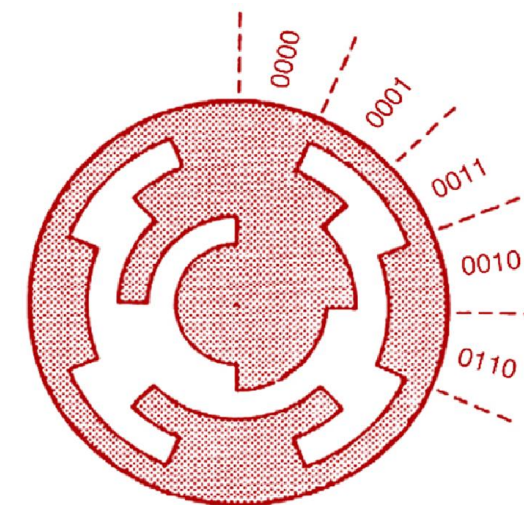
اینکودرهای دیجیتال تماسی (الکتریکی)

بیشترین تعداد شیار ۱۰

تفکیک: $1 \div 1000$



کد باینری
با مسیر ضد ابهام

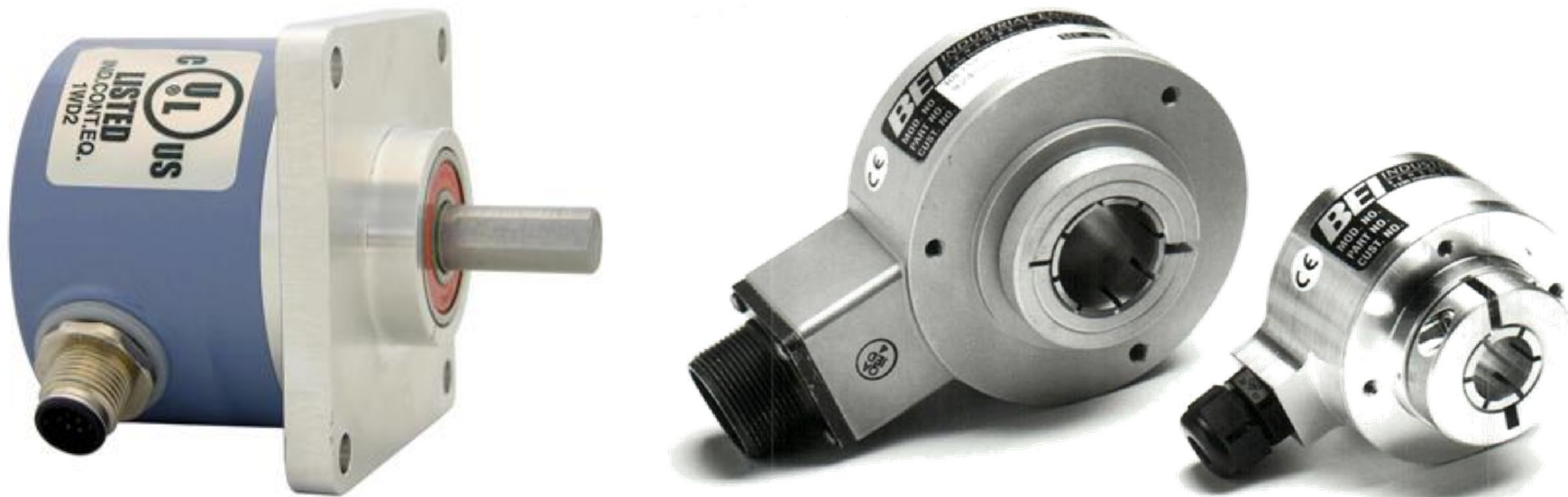


کد خاکستری
(گری کد)

عدد دهگان	کد باینری	کد خاکستری
۰	۰۰۰۰	۰۰۰۰
۱	۰۰۰۱	۰۰۰۱
۲	۰۰۱۰	۰۰۱۱
۳	۰۰۱۱	۰۰۱۰
۴	۰۱۰۰	۰۱۱۰
۵	۰۱۰۱	۰۱۱۱
۶	۰۱۱۰	۰۱۰۱
۷	۰۱۱۱	۰۱۰۰
۸	۱۰۰۰	۱۱۰۰
۹	۱۰۰۱	۱۱۰۱
۱۰	۱۰۱۰	۱۱۱۱

اینکودرهای دیجیتال تماسی (الکتریکی)

بیشترین تعداد شیارهای ممکن ۱۰ بوده که تفکیک را به ۱ بخش در ۱۰۰۰ محدود می‌کند.



جابجایی دورانی

ریزولور (سینکرو-ریزولور)

دستگاه الکترومغناطیس برای تبدیل جا به جایی به خروجی آنالوگ

قطری بین ۱۰ تا ۱۰۰ میلی متر





جابجایی دورانی

ریزولور با دامنه خروجی متغیر

استاتور این مدل توسط ولتاژ سینوسی تک فاز با فرکانس ω تحریک شده، دامنه ولتاژ بصورت زیر است:

$$V_1 = V \sin(\beta); \quad V_2 = V \cos(\beta); \quad V = V_s \sin(\omega t)$$

کوپل مغناطیسی بین سیم‌پیچ‌ها زمانی که $\theta = (\beta + \pi/2)$ حداکثر و هنگامی که $\theta = \beta$ حداقل است.

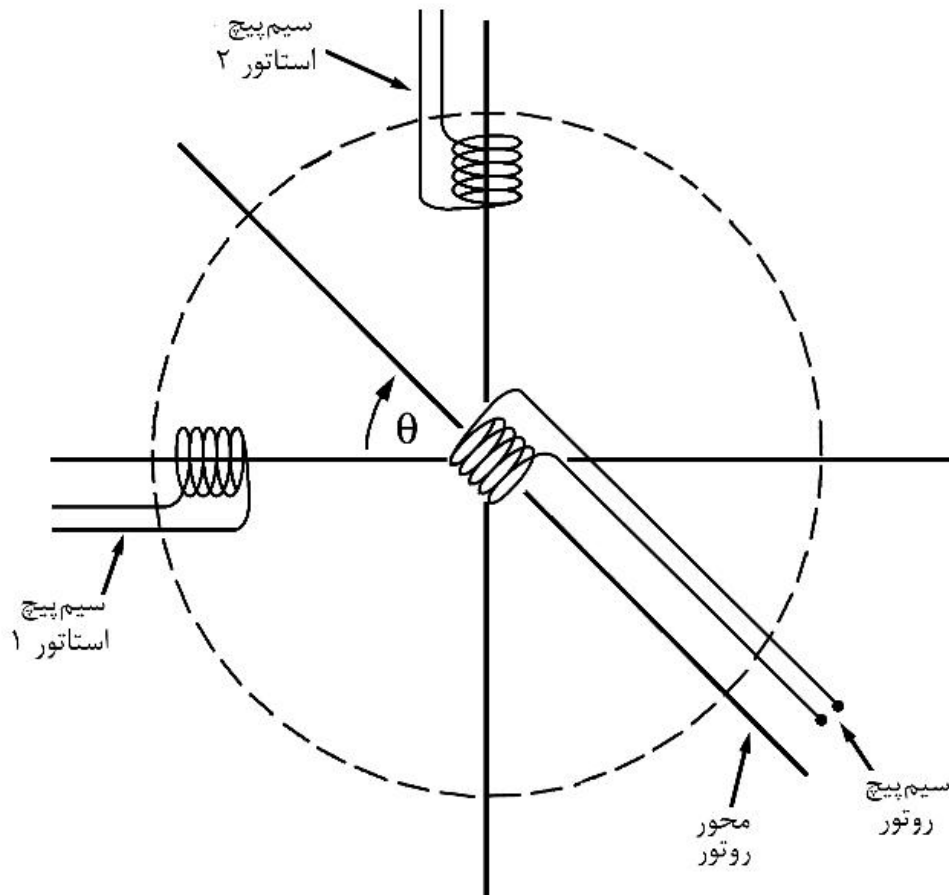
ولتاژ خروجی روتور در فرکانس ثابت و دامنه متغیر به صورت زیر می‌باشد:

$$V_0 = KV_s \sin(\beta - \theta) \sin(\omega t) \quad |\beta - \theta| < 15^\circ$$

ریزولور با دامنه خروجی متغیر

تفکیک: $1 \div 1000$

باعث بهبود تفکیک اندازه‌گیری به اندازه ۲ دقیقه کمانی





جابجایی دورانی

ریزولور با فاز خروجی متغیر

دامنه‌های ولتاژ لحظه‌ای در دو پیچش به صورت زیر می‌باشد:

$$V_1 = V_s \sin(\omega t); \quad V_2 = V_s \sin(\omega t + \pi/2) = V_s \cos(\omega t)$$

$$V_0 = K V_s \sin(\omega t) \cos(\theta) + K V_s \cos(\omega t) \cos(\pi/2 - \theta)$$

$$= K V_s [\sin(\omega t) \cos(\theta) + \cos(\omega t) \sin(\theta)]$$

$$= K V_s \sin(\omega t + \theta)$$

نامعینی اندازه‌گیری : $\pm 1\%$

فرکانس تحریک متعادل: 400 Hz

جابجایی دورانی

سینکرو

وسیله الکترومکانیکی شبه موتور با خروجی آنالوگ
ولتاژ تحریک روتور، در صورت اعمال یک ولتاژ محرک a.c. توسط حلقه‌های لغزش و جاروبک‌ها به روتور به صورت زیر است.

$$V_r = V \sin(\omega t)$$

ولتاژ القا شده در سیم‌پیچ سه استاتور عبارتند از:

$$V_1 = V \sin(\omega t) \sin(\beta)$$

$$V_2 = V \sin(\omega t) \sin\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right);$$

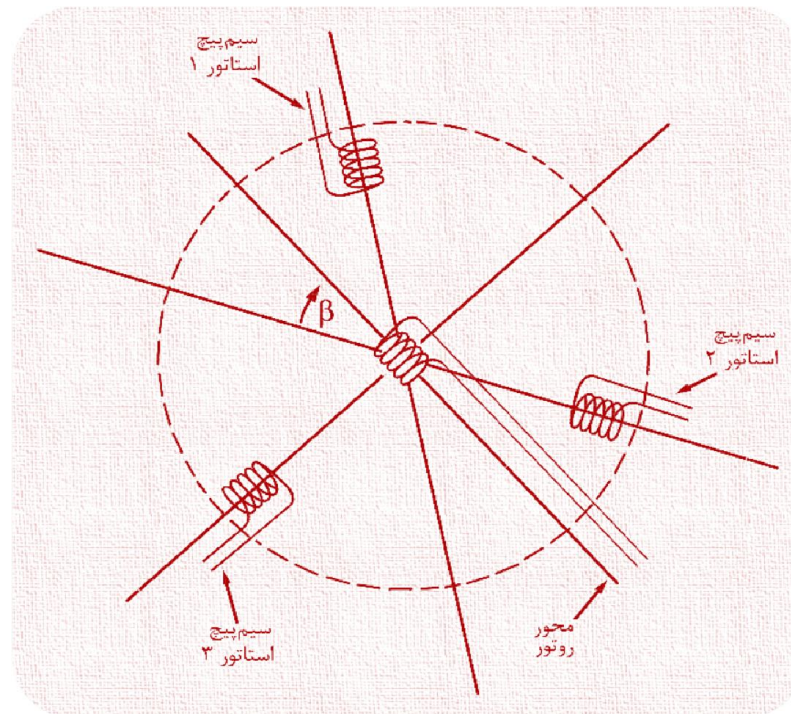
$$V_3 = V \sin(\omega t) \sin\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right)$$

سینکرو

برای ولتاژ تحریک، $V \sin(\omega t)$ اعمال شده به روتور ترانسمیتر، ولتاژ اندازه‌گیری شده در روتور ترانسفرمر به صورت زیر خواهد بود،

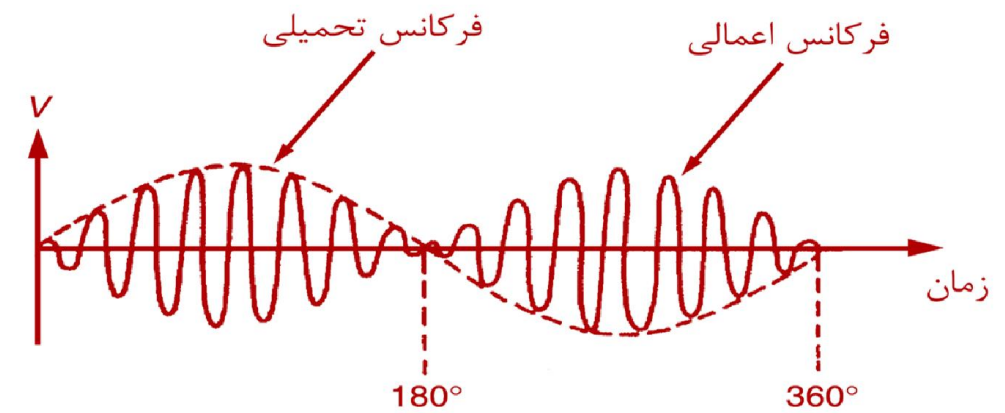
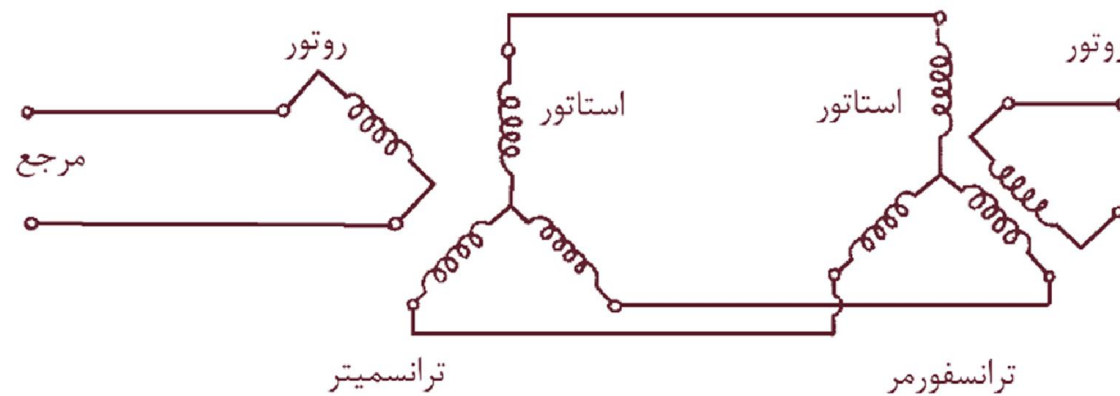
$$V_0 = V \sin(\omega t) \sin(\theta)$$

نامعینی اندازه‌گیری: $\pm 0.5\%$



سینکرو

شکل موج ولتاژ القا شده در هر سیم‌پیچ استاتور:



ژیروسکوپ

ژیروسکوپ برای اندازه‌گیری هم جابجایی زاویه‌ای مطلق و هم سرعت زاویه‌ای مطلق استفاده می‌شود. 

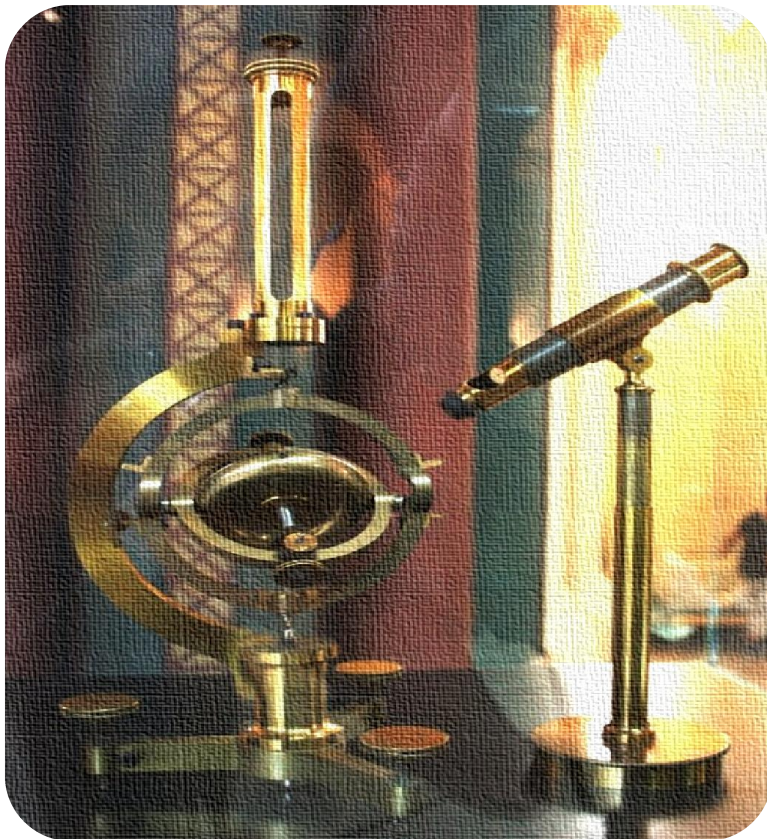
ژیروسکوپ مکانیکی

انواع ژیروسکوپ مکانیکی:

ژیروسکوپ آزاد 

ژیروسکوپ انتگرالی 

ژیروسکوپ نرخ 



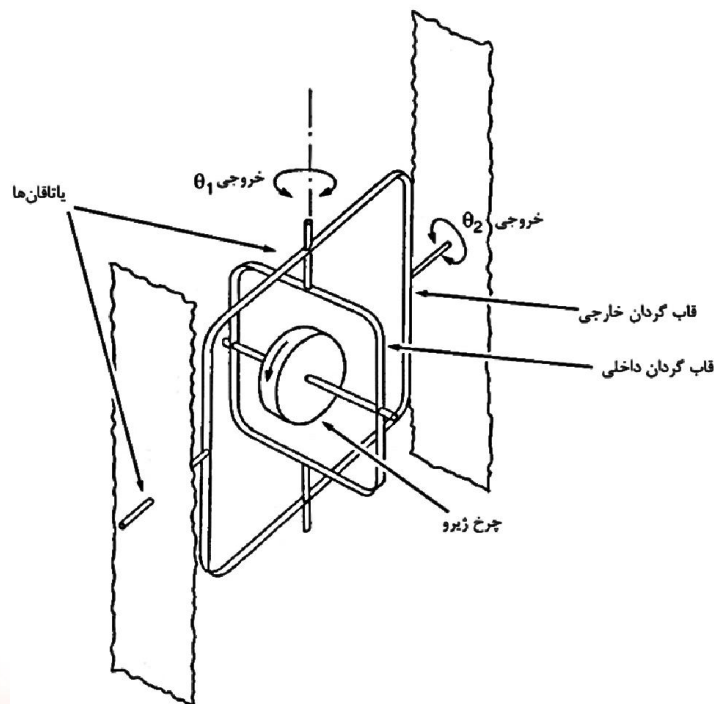
ژیروسکوپ مکانیکی

ژیروسکوپ آزاد

اندازه‌گیری زاویه‌ای مطلق دوران حول دو محور عمودی برای جسم متصل به قاب

↪ حدود: بالای 10°

↪ بزرگنمایی: $0.5^\circ/\text{min}$



ژیروسکوپ مکانیکی

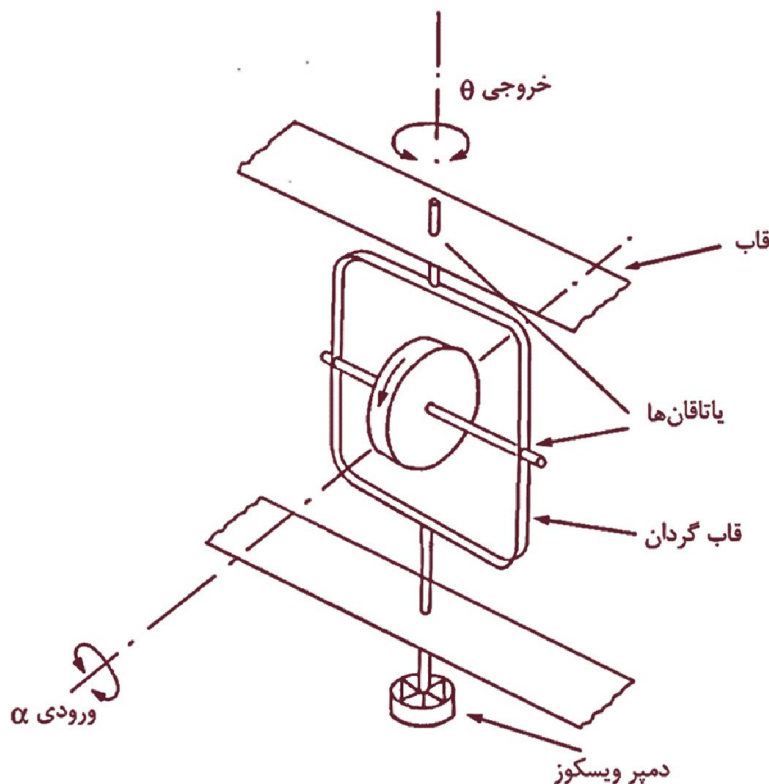
ژیروسکوپ انتگرال نرخ (انتگرالی)

این ابزار دارای پاسخ رسته یکی به صورت زیر است:

$$\frac{\theta_0}{\theta_i}(D) = \frac{K}{\tau D + 1}$$

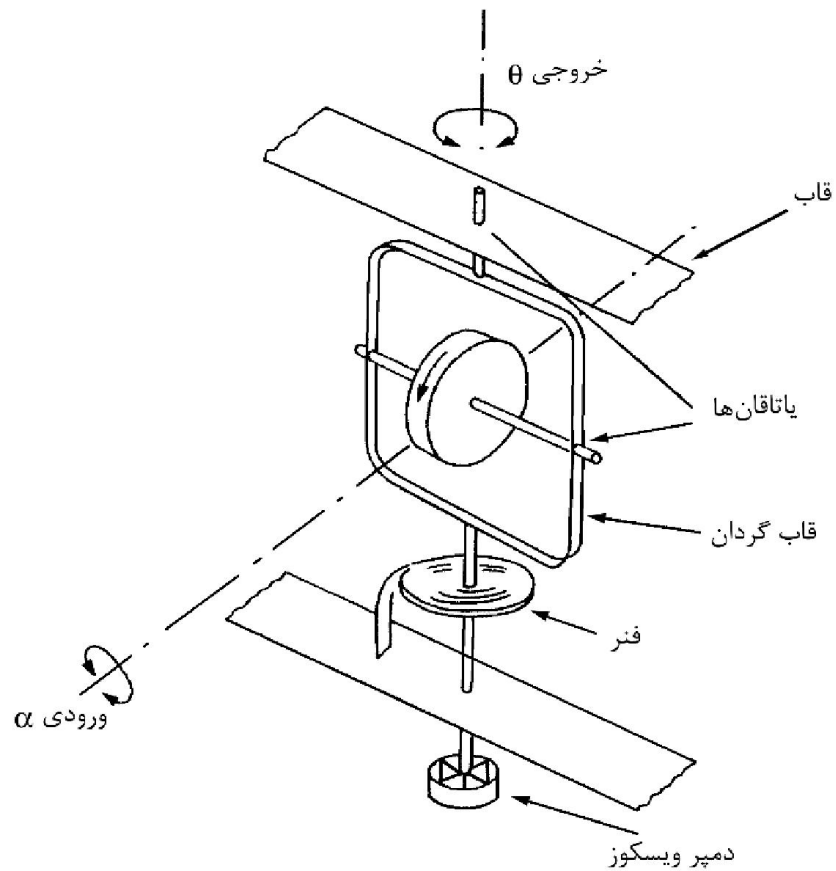
انحراف 0.01° در ساعت

سرعت‌های بالای ۲۴۰۰۰ r.p.m



ژیروسکوپ

ژیروسکوپ نرخ





ژیروسکوپ

ژیروسکوپ نرخ

تفکیک اندازه‌گیری معمول بدست آمده توسط این ابزار 0.1% /S
نرخ چرخشی تا 50° /S
سرعت زاویه‌ای جسم:

$$\frac{\theta}{\alpha}(D) = \frac{H}{MD^2 + \beta D + K}$$

با بازنویسی برای رسیدن به مقدار نهایی:

$$\left| \frac{\theta}{\alpha}(D) \right| = \frac{K'}{D^2/\omega^2 + 2\xi D/\omega + 1}$$

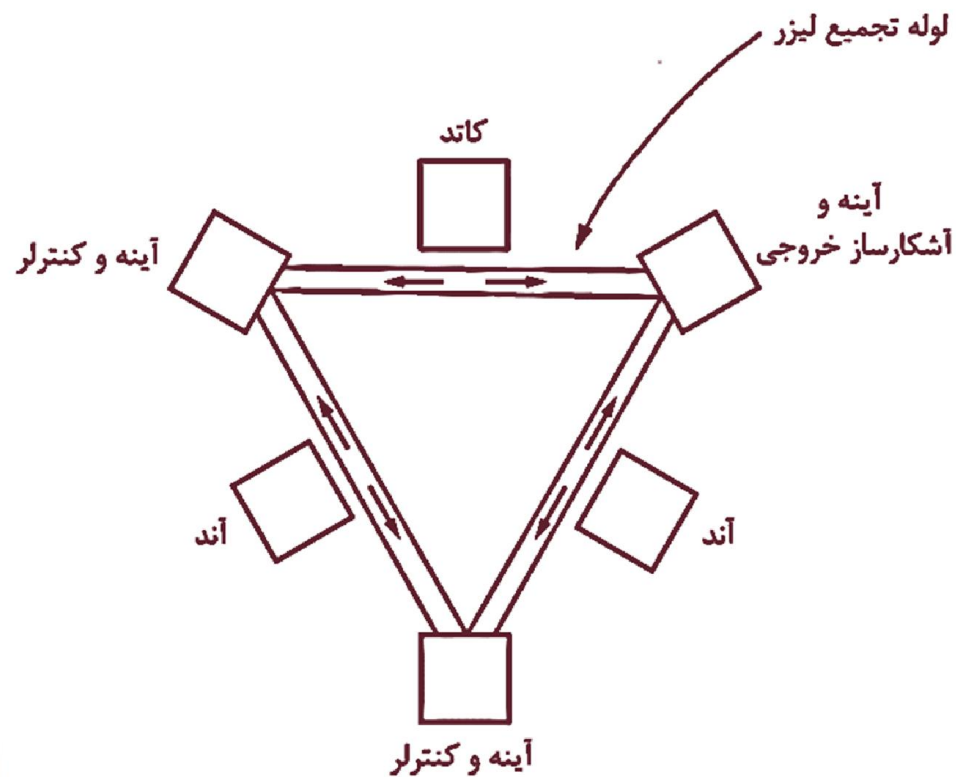
$$K' = H/K, \omega = \sqrt{K/M}, \text{ and } \xi = \frac{\beta}{2\sqrt{KM}}$$

ژیروسکوپ نوری

دو نوع ژیروسکوپ‌های حلقه- لیزر و ژیروسکوپ‌های فیبر نوری

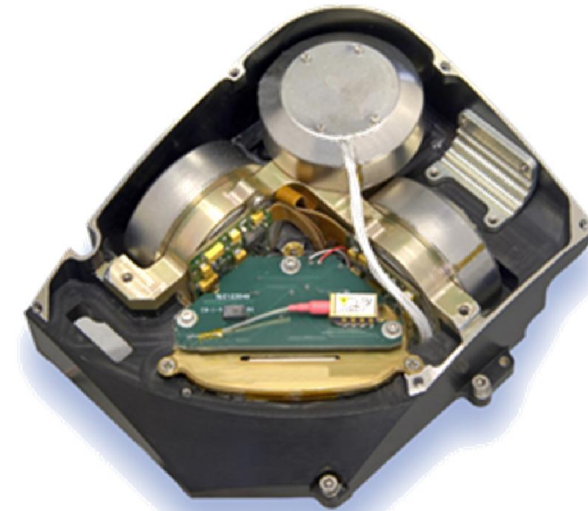
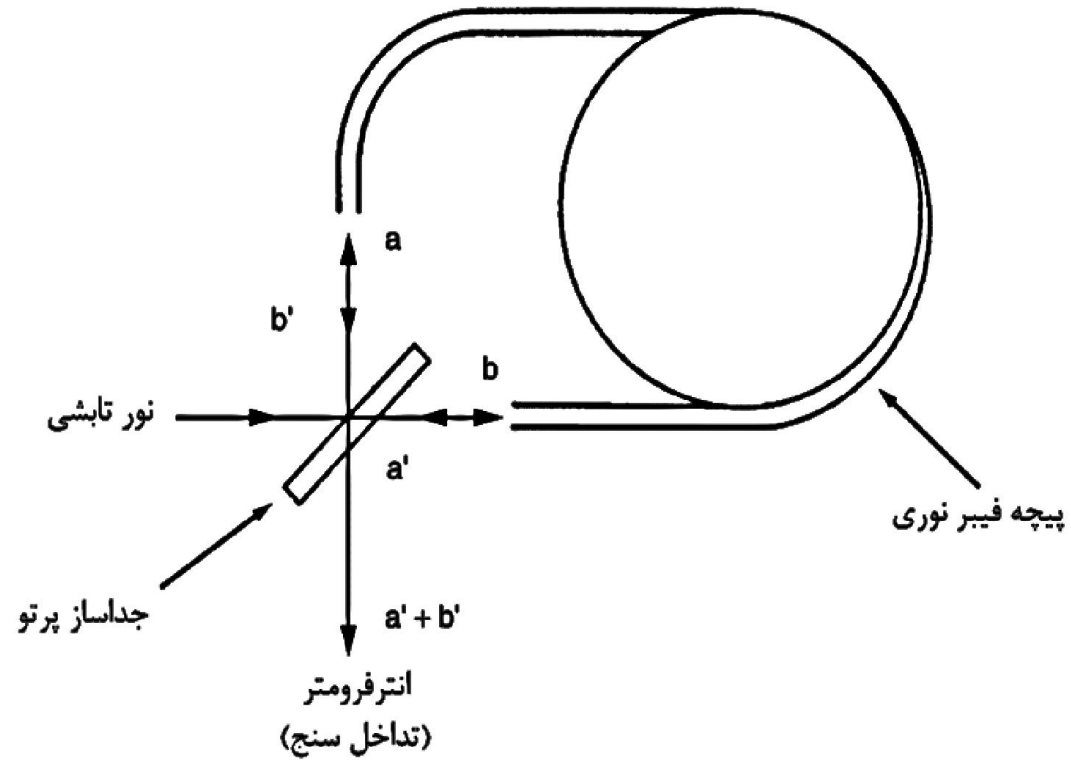
ژیروسکوپ‌های لیزری

مزیت: دقت اندازه‌گیری بالا، اندازه مناسب برای اکثر کاربر



ژیروسکوپ نوری

ژیروسکوپ فیبر نوری



ژیروسکوپ

Computers	Sensor stabilization	Commercial AHRS	Commercial & military aircraft navigation
Cameras	Automotive	Guided munitions	Commercial spacecraft
Medical	General aviation		
Games			
>200 deg/hr	10 – 200 deg/hr	0.1 – 10 deg/hr	<0.01 deg/hr
\$50 – 1,000	\$5,000 – 10,000	\$10,000 – 50,000	>\$100,000
Consumer	Automotive	Tactical	Navigation

Source: Shaikh *et al.* (2005)

سرعت زاویه‌ای

کاربرد اصلی ترانسدیوسرهای سرعت دورانی در سیستم‌های کنترل سرعت

سرعت سنج دیجیتالی

پالس‌های زمانی از MHz

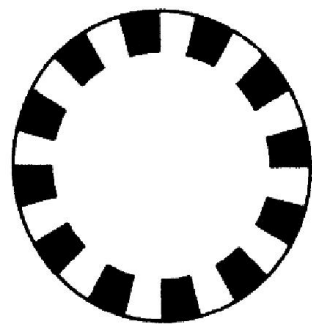
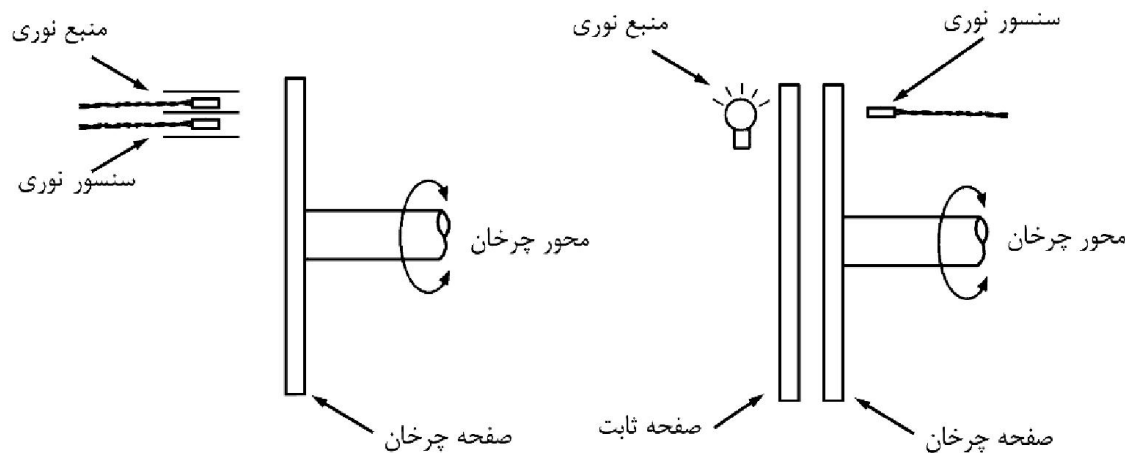


سرعت زاویه‌ای

سنجش نوری

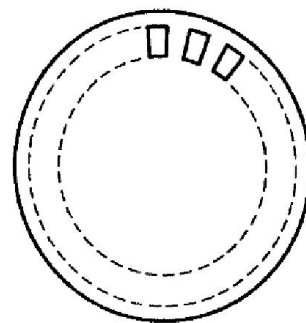
روش تولید پالس فتوالکتریک:

منبع نور عموماً از نوع لیزر یا دیودهای LED بوده که به همراه با دیودهای نوری و فوتوترانزیستور به عنوان آشکارساز بکار می‌روند.



جزئیات صفحه

(ب)



جزئیات پنجره روی صفحه چرخان

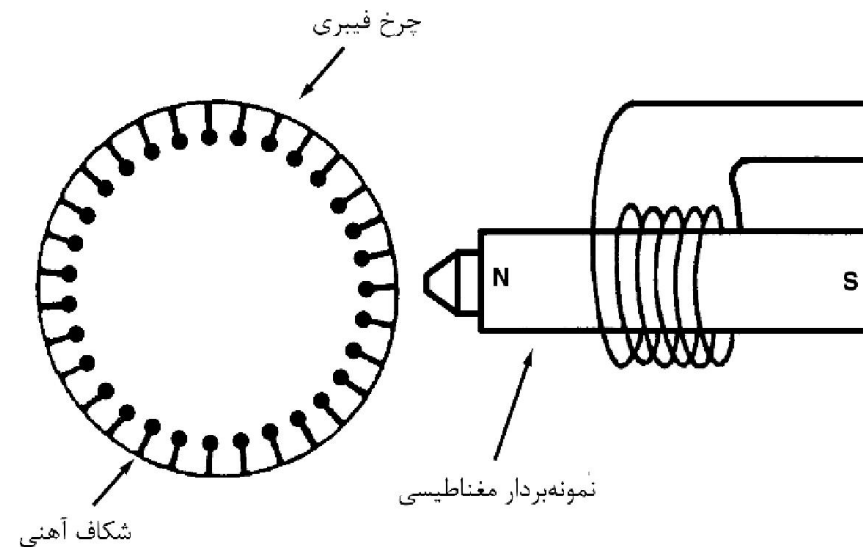
(الف)

سرعت زاویه‌ای

سنجش القایی-ترانسدیوسرهای سرعت مقاومت متغیر (VRVT)

فاصله بین نمونه‌بردار (پیکاپ) و محیط خارجی صفحه حدود ۰/۵ میلیمتر

حداکثر سرعت زاویه‌ای قابل اندازه‌گیری: ۱۰,۰۰۰ .r.p.m





سرعت زاویه‌ای

روش چرخش‌نما

- سرعت نور موجود در چرخ‌نماهای تجاری: از ۱۱۰ تا ۱۵۰،۰۰۰ در هر دقیقه
- خطا در مقادیر اندازه‌گیری خوانده شده $\pm 1\%$

سرعت زاویه‌ای

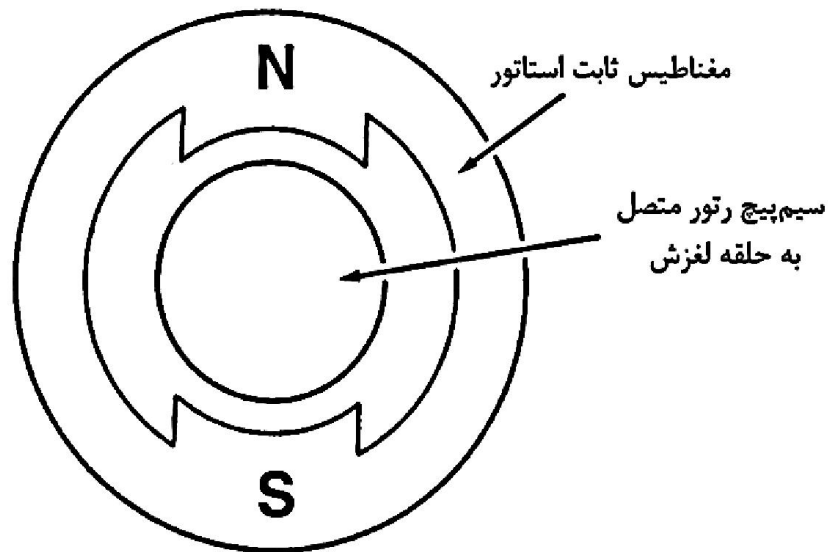
سرعت‌سنج آنالوگ

سرعت‌سنج d.c.

میزان حساسیت اندازه‌گیری ۵ ولت در هر ۱۰۰۰ دور در دقیقه

دامنه معمول اندازه‌گیری صفر تا ۶۰۰۰ دور در دقیقه

بیشترین مقدار غیرخطی بودن در حدود ± 1 f.s. درصد





سرعت زاویه‌ای

سرعت‌سنج آنالوگ

سرعت‌سنج a.c.

دامنه معمول اندازه‌گیری صفر تا ۴۰۰۰ دور در دقیقه

عدم صحت $\pm 0.5\%$ درصد در مقیاس کامل

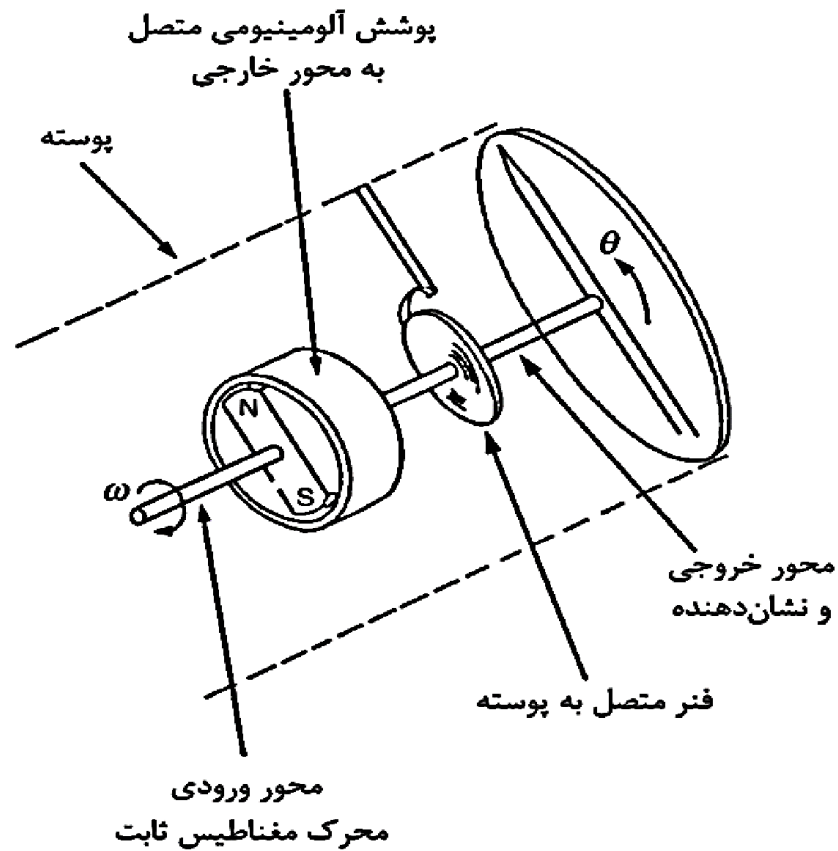
عدم صحت نسخه‌های ارزاتر با روتور قفس سنجابی : $\pm 0.25\%$

سرعت زاویه‌ای

سرعت سنج فنجان کششی

خطای اندازه‌گیری معمول $\pm 0.5\%$

به اندازه‌گیری سرعت بالای ۱۵۰۰۰ دور بر دقیقه





سرعت زاویه‌ای

✚ مشتق گیر اندازه‌گیری جابجایی زاویه‌ای

◀ باعث افزایش نویز در سیستم

◀ بیشترین عدم صحت و خطا در حدود $\pm 1\%$

✚ انتگرال‌گیری از خروجی یک شتاب‌سنج

◀ کاهش اندازه نویز

◀ مقدار اندازه‌گیری در این حالت بیانگر سرعت متوسط است.

شتاب دورانی

🚩 شتاب وارده به غلاف سبب ایجاد گشتاور، $J\ddot{\theta}$ بر روی جرم می‌شود. این گشتاور با عکس العمل گشتاور حاصل از مقاومت فنر برابر بوده، داریم:

$$J\ddot{\theta} = K\theta$$

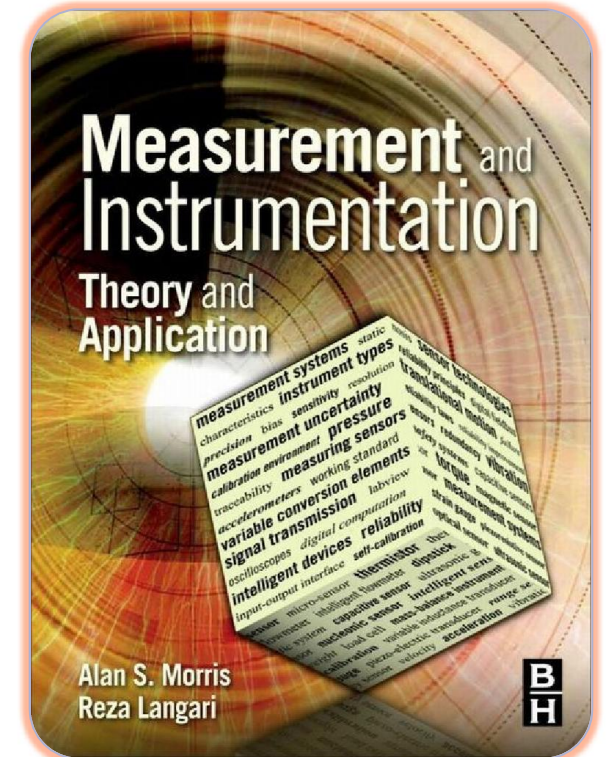
$$\ddot{\theta} = \frac{K\theta}{J}$$

🚩 معمولاً از یک میراگر برای جلوگیری از نوسان سیستم در ابزار استفاده می‌شود:

$$J\ddot{\theta} = B\dot{\theta} + K\theta$$

منابع

- Measurement and Instrumentation: Theory and Application, A. S. Morris, R. Langari, 2013
- Measurement and Instrumentation Principles, 3rd Edition, Butterworth-Heinemann, (Alan S. Morris),
- Condensed Handbook of Measurement and Control (3rd Edition), ISA publication, (N. E. Battikha)
- Measurement Systems : Application and Design, McGraw-Hill, (E. Doebelin)





پایان جلسه دهم