

## Noggrannhet för vinkelpulsgivare

### Pulsgivare används nästan överallt...

Många automatiseringssystem bygger på exakt vinkelrörelse. T ex för roterande dator-till-plåt-tryckpressar (CTP), A-, B- & C-axlar i verktygsmaskiner, ytmonteringsmaskiner, formmätning, hantering och kontroll av halvledarskivor samt goniometrar används någon form av roterande pulsgivare eller vinkelpulsgivare\*.



Tillämpning med direktdrivande motor (DDR)

Olika tillämpningar kräver olika kombinationer av prestanda och egenskaper för optimal funktion. Vissa kräver noggrannhet, andra repeterbarhet, hög upplösning eller små cykliska fel för höghastighetsstyrning med återkoppling. Man väljer till exempel en pulsgivare som ger en optimal avvägning mellan specificerade krav och funktion och det finns ett stort antal att välja mellan. Det är dock få som uppfyller alla krav.

\*Vinkelpulsgivare har vanligen linjeantal på 10.000 eller mer, med en noggrannhet som överstiger  $\pm 5$  bågsekunder. I strikt mening är "roterande pulsgivare" pulsgivare som ligger under dessa krav, men används ofta som en allmän benämning för alla "runda" pulsgivare.

Det räcker inte med enbart noggrannhet för precisionsstyrning av rörelse utan systemets dynamiska gensvar är lika viktigt. Det är viktigt med noggrann mätning av position, men systemet är oanvändbart om det inte har kapacitet att positionera noggrant. Direktdrivande rotationsmotorer (eller momentmotorer) utvecklar högt vridmoment och medger noggrann servoreglering i mycket små vinklar. De har utmärkt dynamiskt gensvar eftersom belastningen är kopplad direkt till drivenheten utan behov av transmissionskomponenter som kan orsaka glapp, hysteres, kuggfel eller remtöjning. Momentmotorer med stor innerdiameter utan ram saknar bra infästningsmöjlighet för en axelpulsgivare, men en ringformad givare är en bra lösning. Dessutom är givarringen, liksom belastningen, fast kopplad till drivenheten, vilket eliminerar oönskat spel i systemet. I alla mät- eller reglersystem är det fördelaktigt om pulsgivaren sitter så nära drivenheten som det är praktiskt möjligt. Detta bidrar till att minimera eventuella resonanser som påverkar servofunktionen, särskilt med ökad servobandbredd.



DDR-motor, Shinko Electric

Oavsett tillämpning är tillförlitlig, direkt positionsåterkoppling en nyckelfaktor...

Den bästa lösningen för att erhålla exakt positionsåterkoppling är en roterande pulsgivare. Som vid val av motor är valet av rätt roterande pulsgivare beroende av en realistisk kravspecifikation, kännedom om faktorer som påverkar pulsgivarens noggrannhet och bra förståelse om hur funktionsbrister kan avhjälpas. I denna artikel beskrivs grundläggande faktorer som påverkar en roterande pulsgivares funktion, som hjälp för konstruktörer att välja "rätt" pulsgivarsystem.

Vid val av en roterande pulsgivare eller vinkelpulsgivare är det oklokt att välja maximal noggrannhet och upplösning utan att väga in datamängd, systemets storlek, komplexitet och kostnad. Linjära pulsgivare finns tillgängliga med noggrannhet och upplösning på några tiotal nanometer. Vinkelpulsgivare kan likaledes tillhandahålla noggrannhet på under en bågsekund\*

(\* en bågsekund motsvarar 1  $\mu\text{m}$  på en radie av 206,25 mm)

Vid fastställande av erforderlig noggrannhet är det värt att skilja mellan precision, upplösning och repeterbarhet:

- För tillämpningar som kräver repeterbarhet (t ex en plocknings- och placeringsautomat) är den exakta vinkeln för varje station mindre viktig än systemets förmåga att stanna vid samma pulsgivarvärde upprepade gånger.
- För att erhålla en kontinuerlig, jämn rörelse får inte den valda upplösningen och precisionen medge "fladder" inom reglerservobandbredden.
- För en långsamgående anordning, t ex ett astronomiskt teleskop, är exakt vinkelmätning viktigare än maximal datakapacitet i systemet.
- För ett kamerastativ i en helikopter, som kräver noggrann manuell positionering, är upplösning viktigare än repeterbarhet eller absolut precision, men det senare är viktigare om samma sensor tillhandahåller målföljningsdata för ett vapensystem.
- För höghastighetssystem kan en avvägning mellan hastighet och positionering behöva göras. System med grövre delning (lägre linjeantal) passar för högre datakapacitet, men finare delning (högre linjeantal) ger vanligen mindre interpoleringsfel.

När man väl förstår noggrannhetskraven för ett system är det lättare att välja lämplig pulsgivare. Trots att vissa tillverkare hävdar detta är noggrannhet i rotationsmätning sällan "plug & play". Att förstå felbudgeten är nyckeln till att optimera prestanda.

## Sammanställa felbudgeten

Komponenten på bild 1, vars vinkelrörelse ska mätas/styras, roterar på en axel som löper i två lager. En vinkelpulsgivare med inbyggt lager är kopplad till denna axel och läses av via ett läshuvud som sitter på den icke roterande strukturen. För att pulsgivarsystemet ska ge utdata som motsvarar komponentens faktiska rotationsrörelse krävs följande:

1. Varje del i systemet måste rotera i sina lager utan radiellt kast (d v s sidledsrörelse) i rotationsaxeln.
2. Axelsystemet som förbinder komponenten med pulsgivaren ska vara vridstvt.
3. Kopplingen ska konstrueras så att vinkelrörelsen för pulsgivaren som roterar i sitt lager är samma som för komponenten som roterar i sitt eget lagersystem, d v s en koppling med exakt konstant hastighet behövs.
4. Linjernas delning längs kanten på pulsgivarens skala ska vara enhetlig och läshuvudet ska interpolera mellan dessa på ett linjärt sätt.
5. Pulsgivarens skala ska vara sant cirkelformad med rotationsaxeln vinkelrätt genom centrum.
6. Läshuvudet ska läsa av skalan utan parallax eller annat geometriskt fel och kan vara fast monterad på den icke roterande referensramen.

Om något av ovanstående inte stämmer kommer det att finnas avvikelser mellan komponentens vinkeläge och det som registreras av pulsgivarsystemet. Genom att undersöka var och en av dessa potentiella felkällor går det att fastställa deras individuella bidrag och därmed totala felbudgeten för hela systemet.

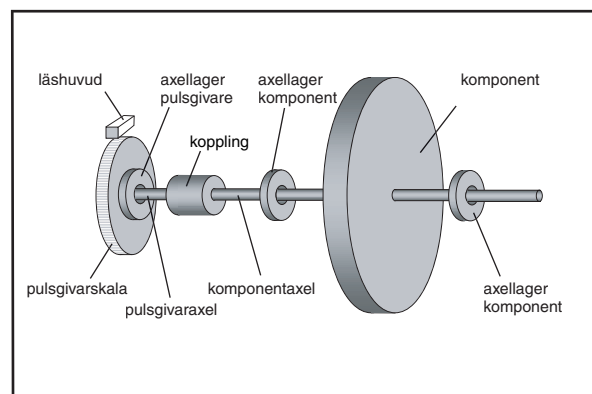


Bild 1: Exempel på system för vinkelmätning av komponent

Vi ska inte gå in på dessa i detalj i denna artikel, men en sammanfattning av dessa felkällor följer:

### “Lagervandring”

Denna term används för att beskriva olika systemattribut som leder till radiellt kast (eller sidledsförskjutning) av komponentens och/eller pulsgivarens rotationsaxel. De flesta av dessa orsakas av fel i lagersystemet. I detta ingår spel och högre övertoner (t ex fel i kullor/rullar/lagerbanor), men inte excentricitet.

### Kopplingsfel

Bild 1 visar ett system med en vinkelpulsgivarenhet med egna lager, ansluten till komponenten via en koppling. Detta kan vara en fördel eftersom endast vandrigen i pulsgivarens lager påverkar vinkelmättnoggrannheten. Denna “fördel” kräver dock viss försiktighet eftersom vandring i huvudlagren påverkar positioneringsnoggrannheten om systemet är konstruerat för att återge polkoordinaterna för en punkt på komponenten i stället för ett fjärrplacerat föremåls vinkellager.

Själva kopplingens konstruktion kan ha stor inverkan på systemets noggrannhet med fel orsakade av faktorer som t ex glapp, vridmotstånd och vinkelfel.

### Inverkan av axeltorsion

Liksom för kopplingen ger bristfällig vridstyvhet hos axeln (axlarna) mellan komponenten och vinkelpulsgivarens skala upphov till dynamiska fel, som försämrar systemets funktion. För att minimera detta rekommenderas en beröringsfri givare, som monteras så nära komponenten som möjligt, eller på denna (se bild 2).

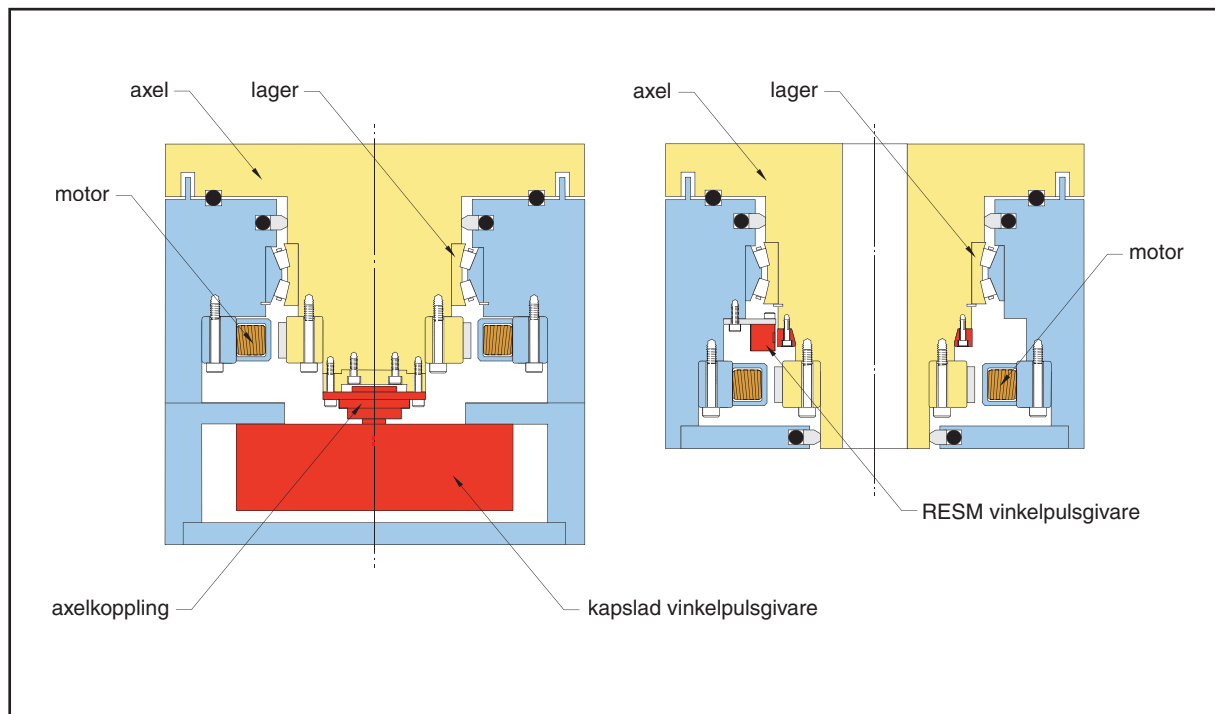


Bild 2: Kapslad vinkelpulsgivare och öppen vinkelpulsgivare av ringtyp

## Excentricitet och formfel

En noggrann skala kan tillverkas som en kombination av icke enhetlig skaldelning och varierande radie (formfel). Men om exakt vinkelmätning ska erhållas måste dock en skala med enhetlig linjär delning placeras på ett konstant radiellt avstånd från rotationsaxeln. Variationer i radien, som orsakas av excentricitet hos en annars helt cirkulärt roterande skala, alstrar fel som varierar en gång per varv. Dessa kombineras med andra fel som varierar 2 eller flera gånger per varv på grund av formfel hos skalan.

## Axiellt kast

Axiellt kast uppstår när pulsgivarens skala monteras koncentriskt med komponenten men då dess geometriska axel bildar en vinkel med rotationsaxeln (se bild 3). Sett från sidan, d v s radiellt, alstrar detta en sinusformad axiell rörelse en gång per varv på omkretsen för vinkelpulsgivarens skala.

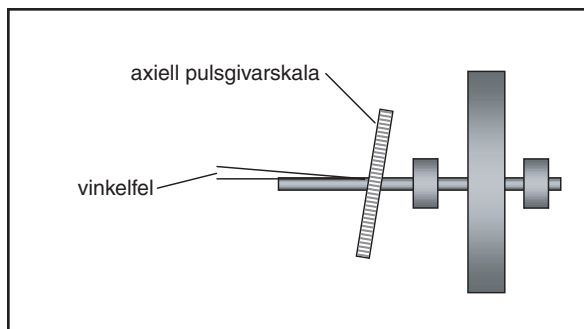


Bild 3: Axiellt kast

## Fel orsakade av läshuvudet

Vi har redan nämnt pulsgivarens skala och dess felmekanismer. Skalan är dock endast en del av pulsgivarsystemet. Även läshuvudet bidrar till den totala felbudgeten. De mest signifikanta felen som orsakas av läshuvudet är följande:

**Delningsfel** - En roterande pulsgivare med 3600 skaldelningar har en delning var  $0,1:e^\circ$  eller var  $360:e$  bågsekund. Om den erforderliga upplösningen är finare än detta måste läshuvudet interpolera. Eventuell icke-linjäritet i interpoleringen leder till ett cykliskt fel, som även kallas delningsfel (SDE).

**Parallax** - Om avståndet mellan skalan och läshuvudet ändras (t ex på grund av excentricitet hos ringen, temperaturändring etc) alstras fel om inte läshuvudet är korrekt inriktat i förhållande till skalans rotationscentrumlinje. Om läshuvudet lutar kommer ändringar i arbetshöjden att orsaka fel som är proportionella med sinus för lutningsvinkeln.

**Infästningsstabilitet** - Detta kan tyckas självklart, men en styv och säker infästning av läshuvudet och referensmärket är av avgörande betydelse för exakt och repeterbar vinkelmätning. Systemet ska konstrueras så att läshuvudet inte rör sig i förhållande till skalans rotationsaxel vid ändringar i horisontalläge, belastning, temperatur, vibrationer etc.

## Skaldelningens noggrannhet

När en vinkelpulsgivare tillverkas genom att markera skaldelningarna direkt på underlaget kan tillverkaren fästa skalämnet på en dorn som vrids för att placera varje skaldelning. När skaldelningsprocessen är klar, men innan skalan tas bort från dornen, kallas den uppmätta skalnoggrannheten (skillnad mellan faktiskt och avsett läge för skaldelningarna) skaldelningsfel. Om denna mätning upprepas, men med ett korrekt justerat läshuvud, skulle felet, förutom skaldelningsfelet, innehålla komponenter orsakade av läshuvudet (primärt SDE). Detta kallas systemfel.

Om vinkelpulsgivaren sedan demonteras och återmonteras på samma dorn eller en annan dorn och dess noggrannhet kontrolleras med ett läshuvud skulle det registrerade felet skilja sig. Skillnaden skulle motsvara det fel som orsakas av ändrad excentricitet och större orundhet hos pulsgivarskalan när den återmonteras för användning jämfört med första monteringen för skaldelning. Det totala fel som uppmäts i detta fall kallas, logiskt nog, monteringsfel och är den feldefinition som närmast motsvarar den funktion som användaren uppnår i praktiken.

Detta kan sammanfattas enligt följande:

**Skaldelningsfel** = Fel i skaldelningen vid tillverkning

**Systemfel** = Skaldelningsfel + SDE

**Monteringsfel** = Systemfel + Inverkan av skillnader i monteringen

## Felkompenseringsmetoder

När inverkan av alla felkällor hos konstruktionsutkastet fastställts kan en jämförelse göras mellan den noggrannhet som krävs för att uppnå specificerade värden och den funktion som kan förväntas av ett roterande pulsgivarsystem utan kompensering. Om den förstnämnda överträffar den sistnämnda måste man välja mellan ett annat pulsgivarsystem med snävare specifikation, om det finns ett sådant som klarar utrymmeskraven, leveranstiden och budgeten eller att använda felkompenseringsmetoder för att avhjälpa bristen. De två kraftfullaste kompenseringssättningarna är användning av flera läshuvuden och felkompenseringsstabeller.

**Flera läshuvuden:** Om två läshuvuden monteras mitt emot varandra elimineras inverkan av excentricitet och högre udda övertoner för repeterbart fel. Detta eliminerar även inverkan av lagervandring på vinkelmätning, men ett lager med snäva toleranser eller fyra läshuvuden krävs normalt för att motverka lagervandring för exakt positionering. Om antalet läshuvuden ökas så reduceras det repeterbara felet ytterligare, men det anses vanligen att fördelarna med att montera fler än 4 elimineras av alltför hög komplexitet och kostnad. Fördelen med denna metod är att den inte kräver omfattande kalibrering, vilket ger stora fördelar vad gäller tidsåtgång och utprovning av systemkonstruktion.

**Felkompenseringsstabeller:** En felkompenseringsstabell kan användas tillsammans med eller i stället för flera läshuvuden för att reducera repeterbara fel om det valda styrsystemet är konfigurerat för ett läshuvud. För att denna metod ska bli effektiv måste utrustningstillverkaren kalibrera pulsgivarsystemet med en interferometer eller annan erkänd normal efter slutmontering av anordningen. Det går inte att förlita sig på ett kalibreringscertifikat från pulsgivartillverkaren eftersom fel som tillkommer vid installationen inte skulle beaktas, varvid felkompenseringsstabellen blir värdelös. Det är väl värt att optimera antalet punkter i felkompenseringsstabellen. För ett sinusformat varierande cykliskt fel eliminerar sju punkter per cykel ca 90% av felet vid den frekvensen. En felkompenseringsstabell med hundra punkter kompenserar därmed för de flesta felen i de första fjorton övertonerna. Observera dock att det kan öka felen orsakade av de högre övertoner som återstår. Denna metod minskar dock inte inverkan av lagervandring, axeltorsion eller andra tidsberoende felkällor.

### Sammanfattning

I denna artikel har vi i korthet behandlat några avvägningar som måste göras för att fastställa realistiska krav på ett vinkelpulsgivarsystem. Vi har även gått in på några av de mest signifikanta faktorerna som kan begränsa den noggrannhet som kan uppnås, samt några metoder för att minska ev brister. För ytterligare information om detta, se ISO230-7 Rotationsaxlar. Ytterligare produktinformation finns på vår webbplats [www.renishaw.se](http://www.renishaw.se)

### Om författaren

Dr Alex Ellin är civilingenjör, teknisk kandidat i marinteknik och teknisk doktor i interaktiv aerodynamik för helikoptrar. Som chefsingenjör, mekanik, är Alex ansvarig för utveckling av tillverkningsprocesser för skalor, inklusive vinkelpulsgivare RESM och RESR.