



(12) **PATENT**

(19) NO

(11) **333959**

(13) **B1**

NORGE

(51) Int Cl.

E21B 44/00 (2006.01)

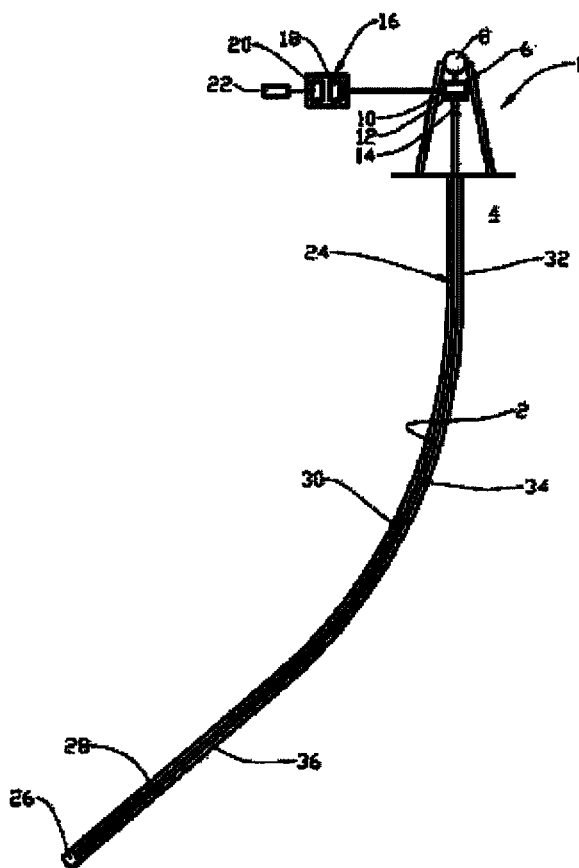
E21B 41/00 (2006.01)

Patentstyret

(21)	Søknadsnr	20120073	(86)	Int.inng.dag og søknadsnr
(22)	Inng.dag	2012.01.24	(85)	Videreføringsdag
(24)	Løpedag	2012.01.24	(30)	Prioritet
(41)	Alm.tilgj	2013.07.25		
(45)	Meddelt	2013.10.28		
(73)	Innehaver	National Oilwell Varco Norway AS, Postboks 8181, 4069 STAVANGER, Norge		
(72)	Oppfinner	Åge Kyllingstad, Hogstadbakken 8, 4330 ÅLGÅRD, Norge		
(74)	Fullmektig	Håmsø Patentbyrå ANS, Postboks 171, 4302 SANDNES, Norge		

(54)	Benevnelse	Fremgangsmåte og system for å redusere borestrengoscillasjon		
(56)	Anførte publikasjoner	WO 2010/064031 A1 PERREAU, P. J. ET AL: "New Results in Real Time Vibrations Prediction", SPE 49479 1998.10.11		
(57)	Sammendrag			

Fremgangsmåte og system for å redusere eller unngå i det minste aksiale oscillasjoner eller torsjonsoscillasjoner i en borestreng (24) med en krone (26) tilknyttet dens lavere ende og kontrollert ved en heise- og rotasjonsmekanisme (8, 6) tilknyttet dens toppende, hvor de kontrollerbare variablene er vertikal- og rotasjonshastighet og responsvariablene er aksial strekkspenning og torsjon relatert til toppen av borestrengen (24), hvor fremgangsmåten innbefatter trinnene: i) å velge minst én strengoscillasjonsmodus som skal kontrolleres; ii) å overvåke den kontrollerbare variabelen og responsvariabelen relevant for nevnte oscillasjonsmodus; iii) å bestemme oscillasjonsperioden for nevnte modus; iv) å estimere den dynamiske kronehastigheten for nevnte modus, ut fra relevant responsvariabel; v) å bestemme en hastighetspuls som er i stand til å generere en oscillasjon med en amplitude hovedsakelig lik amplituden til nevnte, estimerte kronehastighet; og vi) å starte en åpen-sløyfe-kontrollert hastighetsvariasjon ved å tilsette nevnte hastighetspuls til den operatørbestemte hastighetskommandoen når amplituden til nevnte kronehastighetsestimat overskrider et visst terskelnivå og motfasen til nevnte kronehastighetsestimat tilsvarer fasen til den pulsgenererte oscillasjonen.



FREMGANGSMÅTE OG SYSTEM FOR Å REDUSERE BORESTRENGOSCILLASJON

Oppfinnelsens område

Den foreliggende oppfinnelse vedrører en fremgangsmåte og et system for å fjerne eller i vesentlig grad redusere luggesvingninger i en borestreng.

5 Oppfinnelsens bakgrunn

Boring av en olje- og/eller gassbrønn innebærer dannelse av et borehull av betydelig lengde, ofte opp til flere kilometer vertikalt og/eller horisontalt innen produksjonen starter. En borestreng omfatter en borekrone ved dens nedre ende og lengder av borerør som er skrudd sammen. Hele borestrengen roteres av en boremekanisme ved overflaten, hvilket i sin tur roterer borekronen til å forlenge borehullet. Den roterende delen av boremekanismen er typisk et toppdrevet rotasjonssystem som består av én eller to motorer med et reduksjonsgir som roterer toppen av borestrengen med tilstrekkelig torsjonsmoment og hastighet. En maskin for aksial styring av boremekanismen er typisk en vinsj (vanligvis kalt heisespill) som styrer en løpeblokk, som er forbundet med og styrer den vertikale bevegelse av det toppdrevne rotasjonssystemet.

Kjent teknikk og ulemper med denne

Borestrengen er en ekstremt slank struktur i forhold til lengden av borehullet, og under boring vrir borestrengen flere omdreininger på grunn av det totale torsjonsmomentet som er nødvendig for å rotere borestrengen og borekronen. Torsjonsmomentet kan typisk være i størrelsesorden 10-50 kNm. Borestrengen fremviser også en komplisert dynamisk oppførsel omfattende aksial-, lateral- og torsjonsvibrasjoner. Samtidige målinger av borerotasjon ved overflaten og ved borekronen har vist at borestrengen ofte oppfører seg som en torsjonsspendel, det vil si at toppen av borestrengen roterer med en konstant vinkelhastighet, mens borekronen roterer med varierende vinkelhastighet omfattende en konstant del og en superponert torsjonsvibrasjon. I ekstreme tilfelle blir torsjonsdelen så stor at borekronen i perioder blir stående fullstendig stille samtidig med at borestrengen vrir inntil borekronen plutselig roterer igjen og aksele-

rerer til en vinkelhastighet som langt overskrider hastigheten til det toppdrevne rotasjonssystemet. Dette fenomenet er kjent som lugging, eller mer presist, torsjonslugging (engelsk: "stick-slip"). Målinger og simuleringer har også vist at borestrengen noen ganger kan vise aksial luggebevegelse, spesielt når borestrengen heises eller
 5 senkes ved moderat hastighet. Denne bevegelsen er karakterisert ved store variasjoner i aksial hastighet ved den nedre enden av borestrengen og kan observeres ved overflaten som betydelige oscillasjoner i toppspenningen, vanligvis kalt kroklasten. Den observerte luggeoscillasjonsperioden er oftest nær perioden for den laveste naturlige resonansmodusen.

10 Torsjonslugging har vært studert i over to tiår og er kjent som en hovedkilde til problemer som for eksempel urimelig stor borekroneslitasje, for tidlig verktøysvikt og dårlig borerate. Én grunn for dette er de høye topphastigheter som forekommer under slippfasen. De høye rotasjonshastigheter leder i sin tur til sekundære effekter som ekstrem aksial og lateral akselerasjon og krefter.

15 Et stort antall avhandlinger og artikler har omhandlet luggeproblemet. Mange avhandlinger fokuserer på å avdekke luggebevegelse og på å styre oscillasjonene med operasjonelle midler, så som å tilføre friksjonsreducerende midler til boreslammet, endre rotasjonshastigheten eller borekronens belastning. Selv om disse tiltakene noen ganger hjelper, er de enten utilstrekkelige eller de representerer høye ekstraavgifter.

20 Noen avhandlinger anbefaler også å bruke avansert styring av det toppdrevne rotasjonssystem for å dempe og forebygge luggeoscillasjoner. I IADC/SPE 18049 ble det demonstrert at luggeoscillasjonene kunne avhjelpes ved momenttilbakekopling, det vil si at hastigheten ble justert i motfase med momentvariasjonene målt med en spesiell momentsensor. I Jansen, J.D. m.fl. «Active Damping of Self-Excited Torsional Vibrations in Oil Well Drillstrings», 1995, Journal of Sound and Vibrations, 179(4), 647-668,
 25 ble det foreslått at ulempen med denne tilnærmingen er behovet for en ny og direkte måling av drillstrengens torsjonsmoment, noe som ikke allerede er tilgjengelig.

US 5 117 926 beskrev den målingen som en annen type tilbakemelding, basert på motorstrømmen (torsjon) og hastigheten. Dette systemet har vært kommersielt tilgjengelig i mange år under varemerket SOFT TORQUE®. Den største ulempen med
 30 dette systemet er at det er et kaskadereguleringssystem som bruker torsjonstilbakekopling i serie med den stive hastighetsstyringen. Dette øker risikoen for ustabilitet ved frekvenser høyere enn luggefrekvensen, særlig hvis det er betydelig (50 millisekund eller mer) tidsforsinkelse på målingene av hastighet og torsjon.

Patentsøknaden PCT/GB2008/051144 beskriver en fremgangsmåte for å dempe luggeoscillasjoner, hvor maksimal demping finner sted ved eller nær en første eller fundamental (det vil si laveste frekvens) luggeoscillasjonsmodus. Under utvikling av den foreliggende fremgangsmåte er det identifisert et ytterligere problem som må tas hensyn til når borestrengen er ekstremt lang (mer enn omtrent 5 kilometer) og den fundamentale luggeperioden overskrider 5 eller 6 sekund. Selv om fremgangsmåten i henhold til dette dokumentet er i stand til å avhjelpe den fundamentale luggeoscillasjonsmodus i slike borestrenger, har så snart disse oscillasjoner er dempet, den andre naturlige modus en tendens til å bli ustabil og vokse i amplitude inntil full lugging er utviklet ved en høyere frekvens. I visse simuleringer er det funnet at denne andre modus har en naturlig frekvens som er tilnærmet lik tre ganger høyere enn den fundamentale luggefrekvensen. Luggeoscillasjonene av denne høyere orden karakteriseres av korte perioder og lange sykliske variasjoner i drivtorsjonens amplitude. Simuleringer viser at borekronerotasjonshastigheten også i dette tilfelle varierer mellom null og topphastigheter som overskrider dobbel middelhastighet.

En litt nyere patentsøknad PCT/GB2009/051618 beskriver noen forbedringer i forhold til den foregående publikasjonen, slik som treghetskompensasjon i kombinasjon med en lett avstemming av hastighetsstyringen til det toppdrevne rotasjonssystemet. Disse forbedringene utvider absorpsjonsbåndbredden og gjør det mulig for det toppdrevne rotasjonssystem å effektivt dempe også det andre torsjonsmodus, og slik forhindre en andre ordens torsjonslugging i å forekomme. En annen forbedring er en fremgangsmåte for sanntidsestimering av borekronens rotasjonshastighet, basert på de dynamiske variasjonene av drivmomentet.

Fra Perreau et al. "New Results in Real Time Vibrations Prediction", SPE 49479 er det kjent en fremgangsmåte for sanntidsestimering av en borekrones rotasjonshastighet ut fra måling av overflaterotasjonshastighet og -dreiemoment for en borestreng med torsjonssvingninger.

Felterfaring og også utstrakt testing med en avansert simuleringsmodell har vist at alle gjeldende systemer for å dempe luggeoscillasjoner noen ganger mislykkes i å løse luggeproblemet, særlig i veldig lange borestrenger, la oss si >5000 meter. Alle aktive systemer som er nevnt over, har det til felles at de modifiserer det toppdrevne rotasjonssystemets hastighet som respons til den varierende torsjonslasten. Den resulterende dempingen er noen ganger, men ikke alltid, sterk nok til å fjerne luggeoscillasjonene. Systemene har også vist seg å være svært sensitive for støy og forsinkelse i

styresignalene, det vil si hastighet og torsjon, slik at selv en liten tidsforsinkelse, i størrelsesorden 50 millisekund, kan forårsake instabilitet ved høyere frekvenser.

Oppfinnelsens formål

5 Oppfinnelsen har til formål å avhjelpe eller å redusere i det minste én av ulempene ved kjent teknikk.

Formålet oppnås ved trekk som er angitt i nedenstående beskrivelse og i de etterfølgende patentkrav.

Generell beskrivelse av hvordan formålene oppnås

10 Teksten i den etterfølgende generelle delen av beskrivelsen viser til de medfølgende tegninger, hvor:

Fig. 1 viser en graf hvor en harmonisk oscillasjon kanselleres av en én-periodes sinuspuls hvor abscissen representerer normalisert tid og ordinaten representerer normalisert rotasjonshastighet;

15 Fig. 2 viser en graf hvor en harmonisk oscillasjon kanselleres av en halvperiodes, trapesformet puls hvor abscissen representerer normalisert tid og ordinaten representerer normalisert rotasjonshastighet;

Fig. 3 viser en graf hvor hastigheten er økt og en harmonisk oscillasjon er kansellert av et halvperiodes lineært skråplan, hvor abscissen representerer normalisert tid og ordinaten representerer normalisert rotasjonshastighet;

20 Fig. 4 viser en graf hvor hastigheten økes lineært uten å danne oscillasjoner, hvor abscissen representerer normalisert tid og ordinaten representerer normalisert rotasjonshastighet; og

25 Fig. 5 viser grafer over beregnet torsjon og elastisitetsreaksjonsfunksjon i en 3200 meter lang borestreng hvor abscissen representerer oscillasjonsfrekvensen i sykler per sekund og ordinaten i det øvre underplott representerer normalisert topptorsjon i forhold til borekronens inngangstorsjon, og ordinaten til det nedre underplott representerer dynamisk torsjonsmykhet i radianer per kNm.

30 Den foreliggende oppfinnelse er basert på innsikten høstet både gjennom felterfaring og gjennom erfaringer med en avansert simuleringsmodell. Denne modellen er i stand til å beskrive samtidig aksial- og torsjonsbevegelse av borestrengen og innbefatter

undermodeller for heisverket og det toppdrevne rotasjonssystem. Erfaringen fra begge kilder viser at selv ikke de mest avanserte luggehindrende verktøyene er i stand til å fjerne lugging i ekstremt lange borestrenger i avviksbrønner. Simuleringer viste imidlertid at vanskelig lugging kan fjernes dersom det toppdrevne rotasjonssystemets hastighet gis en trinnvis endring med rett størrelse og rett tidspunkt. En videre undersøkelse viste at et antall ulike forbigående hastighetsvariasjoner kunne fjerne luggebevegelsen. Denne tilnærmingen er grunnleggende forskjellig på flere måter fra de systemer som er beskrevet ovenfor:

- For det første styres variasjonen i de forbigående hastighetene i en åpen sløyfe, hvilket betyr at rotasjonshastigheten følger en forhåndsbestemt kurve som ikke er justert som respons på øyeblikkets torsjonslast.
- For det andre representerer den nåværende fremgangsmåte en relativt kort varighet som er i størrelsesorden én luggeperiode, mens de foregående fremgangsmåtene representerer kontinuerlig justering av rotasjonshastigheten med «uendelig» varighet.
- Til slutt er ikke fremgangsmåten begrenset til torsjons-luggeoscillasjoner, men benyttes også ved aksial-luggeoscillasjoner.

I henhold til et første aspekt ved den foreliggende oppfinnelsen er det tilveiebrakt en fremgangsmåte for å redusere eller unngå i det minste aksial- eller torsjonsoscillasjoner i en borestreng med en borekrone tilkoplest dens lavere ende og styrt ved en heise- og rotasjonsmekanisme forbundet med dens toppende, hvor de kontrollerbare variable er vertikal- og rotasjonshastighet, og responsvariablene er aksialtensjonskraft og torsjon i forhold til toppen av borestrengen, hvor fremgangsmåten innbefatter trinnene å:

- i) velge minst én strengoscillasjonsmodus som skal styres;
- ii) overvåke de kontrollerbare variable og responsvariable for nevnte oscillasjonsmodus;
- iii) bestemme oscillasjonsperioden for nevnte modus;
- iv) estimere den dynamiske borekronehastigheten til nevnte modus, fra de relevante responsvariablene;
- v) bestemme en hastighetspuls, definert som en midlertidig hastighetsavvikskomponent, som er i stand til å generere en oscillasjon med en amplitude i hovedsak lik amplituden til nevnte estimerte borekronehastighet; og
- vi) starte en åpen-sløyfe-styrt hastighetsvariasjon ved å addere nevnte hastighetspuls til den operatørsatte hastighetskommandoen når amplituden av nevnte, estimerte borekronehastighet overskrider et bestemt terskelnivå og motfasen av nevnte estimerte borekronehastighet er i overensstemmelse med fasen til den pulsgenererte oscillasjon.

I henhold til et andre aspekt ved den foreliggende oppfinnelsen er det tilveiebrakt et system for å redusere eller unngå i det minste aksiale oscillasjoner eller torsjonsoscil-

lasjoner i en borestreng, kjennetegnet ved at systemet omfatter:

en drivaksel anvendelig til å:

- 5 i) velge minst én strengoscillasjonsmodus som skal kontrolleres;
- ii) overvåke en kontrollerbar variabel og en responsvariabel som er relevant for nevnte oscillasjonsmodus, hvor de kontrollerbare variablene er vertikal hastighet og rotasjonshastighet, og hvor de responsvariable er aksial strekkspenning og torsjon;
- iii) bestemme oscillasjonsperioden for nevnte modus;
- 10 iv) estimere den dynamiske borekronehastigheten for nevnte modus fra den relevante responsvariabelen;
- v) bestemme en hastighetspuls, definert som en midlertidig hastighetsavvikskomponent, som er i stand til å generere en oscillasjon med en amplitude hovedsakelig lik amplituden for nevnte estimerte borekronehastighet; og
- 15 vi) starte en åpen-sløyfe-kontrollert hastighetsvariasjon ved å addere nevnte hastighetspuls til den operatørsatte hastighetskommandoen når amplituden til nevnte estimerte borekronehastighet overskrider et bestemt terskelnivå, og motfasen til nevnte estimerte borekronehastighet tilsvarer fasen til den pulsgenererte oscillasjonen.

Det bør merkes at den foreliggende oppfinnelsen er effektiv til å fjerne luggeoscilla-

20 sjoner, men er kanskje ikke alltid effektiv når det gjelder å hindre lugging i å komme tilbake. I noen tilfelle, spesielt ved lave til moderate hastigheter, kan systemet være ustabil på grunn av at friksjonen (torsjonen) minsker litt med økende hastighet. Dette betyr negativ differensiell demping som kan medføre at små variasjoner får vokse eksponensielt inntil full lugging er utviklet. Derfor bør den aktuelle fremgangsmåte

25 fortrinnsvis brukes i kombinasjon med et tilbakemeldingsbasert dempesystem, og således fungere som et tillegg til eksisterende luggehemmende fremgangsmåter. Siden tilbakemeldingssystemets oppgave er å forebygge heller enn å fjerne luggeoscillasjoner, kan imidlertid mykheten eller mobiliteten til hastighetskontrollen bli redusert mye. Fordelen med dette er høyere toleranse for signalforsinkelse og redusert risiko

30 for høyfrekvensinstabiliteter.

For å forenkle analysen er det antatt at borestrengen kan behandles som en enkel harmonisk oscillator. Det betyr at analysen er begrenset til kun én naturlig modus. Senere blir holdbarheten av denne antakelsen drøftet og fremgangsmåten gjøres til-

gjengelig for flere modi. Analysen nedenfor er begrenset til torsjonsoscillasjonen, men

35 samme formalisme kan like godt brukes for den aksiale borestrengbevegelsen. Likningen for bevegelse for en torsjonspendel er

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} = S(\theta_{td} - \theta) \quad (1)$$

hvor θ er den dynamiske vinkelforflytningen av sammenlagt treghet, θ_{td} er det toppdrevne rotasjonssystems bevegelse, J er pendelens treghet, S er vinkelfjærraten.

Oscillatorens naturlige frekvens er gitt ved $\omega = \sqrt{S/J}$. Ved å introdusere den ikke-dimensjonale (normaliserte) tidsvariabelen $\tau = \omega t$ kan bevegelseslikningen forenkles til

$$\frac{d^2 x}{d\tau^2} + x = y \quad (2)$$

Her angir x vinkelbevegelsen, enten vinkelforflytningen θ , vinkelhastigheten $d\theta/dt$ eller vinkelakselerasjonen $d^2\theta/dt^2$ og y er den tilsvarende variabel for det toppdrevne rotasjonssystem. Den generelle homogene løsning ($y \equiv 0$) er $x_h = a \cdot \cos(\omega t - \varphi)$ hvor amplituden og fasevinkelen φ er vilkårlige integreringskonstanter. Denne løsningen representerer en udempet harmonisk oscillasjon.

Differensiallikningen kan formelt være to ganger integrert for å gi en formell, generell, spesiell løsning som en integrallikning

$$x = x_0 + \int_0^\tau \left(\dot{x}_0 + \int_0^\tau (y - x) d\tau \right) d\tau \quad (3)$$

hvor x_0 og $\dot{x}_0$ representerer startverdier for x og dens tidsderivat. Denne formelen er også egnet for direkte numerisk integrasjon for å finne løsningen på enhver forhåndsbestemt puls y .

En triviell, men fysisk relevant spesiell løsning er konstanten: $x = y = x_0$. Dette representerer en jevn, rolig rotasjonsmåte uten oscillasjoner. Av bekvemmelighetsårsaker er den konstante komponenten i den spesielle løsningen utelatt i analysen nedenfor.

Det kan vises at det finnes et uendelig antall av ikke-trivielle funksjoner y som kan oppheve en begynnende oscillasjon x_h . En viktig underklasse av slike funksjoner er vindusfunksjoner som er null utenfor et avgrenset intervall og kan skrives som formel:

$$y = f(\tau) \cdot (H(\tau) - H(\tau - \tau_y)) \quad (4)$$

Her er f en generell pulsfunksjon og H er den såkalte Heaviside trinnfunksjonen definert som null for negative argumenter, $\frac{1}{2}$ for null og én for positive argumenter. Den siste faktor representerer et vindu som er lik én for $0 < \tau < \tau_y$ og null utenfor vinduet.

Uten tap av generalitet har vi her antatt at vinduet starter ved tid null. Det lar seg lett verifisere at en puls med endret fase og motsatt fortegn

$$y_k(\tau) = (-1)^k y(\tau + k\pi) \quad (5)$$

også er en løsningspuls, hvis k er et heltall. Denne formelen kan brukes til å konstruere en ny løsning bestående av en vektet sum av primære og skiftende pulser:

$$y = \sum_{k=0}^{k_{\max}} a_k y_k(\tau) \quad (6)$$

Her er a_k amplituder, normalisert slik at summen av dem er lik enhet. Det lar seg lett verifisere fra den generelle homogene løsning at $dx_h(\tau)/d\tau = x_h(\tau - \pi/2)$. Dette kan brukes til å generere nye, men ulikt formede løsningspulser ved:

$$y^{(d)} = \frac{d}{d\tau} y(\tau + \frac{\pi}{2}) \quad (7)$$

$$y^{(i)} = \int y(\tau - \frac{\pi}{2}) d\tau = - \int y(\tau + \frac{\pi}{2}) d\tau \quad (8)$$

Indeksene er her definert som en kombinasjon av integrasjon/differensiering og fase-skifting.

Som et ikke-begrensende eksempel er den følgende primære puls drøftet:

$$y = -\frac{\sin(\tau)}{\pi} \cdot (H(\tau) - H(\tau - 2\pi)) \quad (9)$$

Anta først at det ikke er noen oscillasjon før starten av pulsen, hvilket betyr at

$x_0 = \dot{x}_0 = 0$. Det kan sees at den spesielle løsningen med denne pulsen kan skrives som

$$x_y = \frac{\tau \cos(\tau) - \sin(\tau)}{2\pi} (H(\tau) - H(\tau - 2\pi)) + \cos(\tau) H(\tau - 2\pi) \quad (10)$$

Det lar seg lett bevise at denne løsningen reduseres til $\cos(\tau)$ når $\tau > 2\pi$. Fordi systemet er lineært, er eksempelpulsen i stand til å nulle ut forpuls-oscillasjonen

$x_h = \cos(\tau + \pi) = -\cos(\tau)$ som har samme amplitude, men motsatt fase i forhold til den genererte oscillasjon. De ulike funksjonene er plottet i figur 1 for å illustrere kanselleringsprosessen.

Den bipolare, sinusformede pulsen er bare én av et uendelig antall mulige kanselleringsfunksjoner. Et annet eksempel er den unipolare og trapesformede funksjonen vist som en stiplet kurve i figur 2. I dette tilfellet finnes løsningene numerisk, selv om analytiske løsninger finnes også for dette pulsvalget. Begge pulsene danner en oscillasjon med enhetsamplitude og fase null. Fase null er en konsekvens av det faktum at den dannede oscillasjonen har en topp ved multipler av 2π og kan representeres av et rent cosinusledd uten faseskifte. En vilkårlig puls kan ha ulik amplitude og en fase ulik null. En ikke-singulær puls, som her er definert som en puls som danner oscillasjoner med begrenset amplitude, kan normaliseres til å gi en enhetsoscillasjonsamplitude. Det er også nyttig å definere en pulsfase som fasen av dens dannede oscillasjon, referert til begynnelsen av pulsen. I de to eksemplene over er pulsfasene null, hvilket betyr at den genererte oscillasjon har en topp én periode etter pulsens start.

De første to eksempler har også det til felles at de ikke endrer middelhastighet. Det er mulig å konstruere generaliserte pulser som også endrer middelhastighet. Det kan hevdes at disse ikke er pulser i vanlig betydning, men en form for utjevnet trinnfunksjoner. Ikke desto mindre kalles de av bekvemmelighetsårsaker for hastighetsendrende pulser så lenge deres tidsderivate er null utenfor vinduet. Et eksempel på en slik hastighetsendrende puls er vist i figur 3. Her økes hastigheten lineært over en halv oscillasjonsperiode. Denne hastighetsendringen kan sees på som kvadratet av en akselerasjonspuls (ikke illustrert i figuren) som danner en hastighetsendring på $1\frac{1}{2}$ mens den danner en oscillasjon med enhetsamplitude. Legg merke til at i dette tilfellet har den genererte oscillasjonen toppen sin ved normalisert tid $\tau = 3\pi/2$. Pulsfasen er derfor, per definisjon, $3\pi/2$ eller $-\pi/2$. Optimal tidsinnstilling av denne pulsen relativt til borekronehastigheten er derfor forskjellig fra de to tidligere.

Generelt kan fasen til en (ikke-singulær) puls bestemmes eksplisitt som argumentet (fasen) i den følgende komplekse Fourieramplitude

$$c = \frac{1}{\pi} \int_{\tau_1}^{\tau_1 + 2\pi} x_y e^{-i\tau} d\tau \quad (11)$$

Her representerer den lavere integrasjonsgrensen den øvre ende av pulsvinduet.

Det fjerde eksempelet, vist i figur 4, er en singulær puls som ikke danner oscillasjoner, men bare en enhetshastighetsendring. I dette tilfellet er det valgt inngangssoscillasjon null, hvilket illustrerer det faktum at hastigheten kan endres uten å danne noen oscillasjoner. Den adderte hastigheten er ganske enkelt integralet av en rektangulær akselerasjonspuls som gir en enhetshastighetsendring under et tidsintervall på én oscillasjonsperiode. Fordi inngangssoscillasjonen er null, samsvarer den stiplede kurven med den heltrukne kurven og er gjemt under denne.

Disse eksempler er kun noen få av et uendelig antall mulige ikke-singulære og singulære pulser. En singulær puls kan anses som en lineær kombinasjon av to eller flere ikke-singulære pulser slik at vektorsummen av alle amplitudene er null. En spesiell kategori singulære pulser er konstruert fra en vilkårlig puls ved å dele den inn i summen av dens halve originale pulsen og den andre halve forsinket med en halv oscillasjonsperiode. Det vil si at

$$\eta = \frac{1}{2}y(\tau) + \frac{1}{2}y(\tau - \pi) \quad (12)$$

er en singulær puls, for hvilken som helst opprinnelig puls y . Dette kan utledes fra skifteregelen (5) som innebærer at den genererte oscillasjon fra det andre ledd er lik den fra første ledd med motsatt fortegn.

Teorien over beskriver en måte å generere en kontrollert harmonisk oscillasjon som er i stand til å kansellere en kjent, uønsket oscillasjon. Det gjenstår imidlertid å bestemme amplituden og fasen til denne uønskede oscillasjonen, fordi rotasjonshastigheten på bunnen av strengen ikke er direkte observerbar. Fra basisdifferensiallikningen for bevegelse (1) er det klart at høyresideleddet representerer vridningstorsjonen til den harmoniske oscillatoren. Før pulsen startes er denne siden representert ved tidsintegralet av hastigheten. Uttrykt i normaliserte variable er torsjonen lik integralet av hastigheten x_h , eller ganske enkelt $x_h(\tau - \pi/2)$. Dermed er det mulig å bestemme amplituden og fasen til den ikke-observerbare hastigheten fra oscillatorstrengtorsjonen.

Den studerte harmoniske oscillatoren er en enkel matematisk tilnærming for en borestreng. Slik det påpekes av Kyllingstad og Nessjøen i SPE-publikasjonen "Hardware-In-the-Loop Simulations Used as a Cost Efficient Tool for Developing an Advanced Stick-Slip Prevention System" (SPE 128223, Feb. 2010), er en borestreng mer nøyaktig beskrevet som et kontinuum eller som en bølgeleder som innehar en rekke naturlige modi. Denne publikasjonen presenterer formler som er gyldige for en relativt enkel borestreng bestående av én uniform borerørseksjon og sammenslått tregghet i en sammenstilling nederst i borehullet. Her tas dette et skritt videre, og det gis et kort

sammendrag av en fremgangsmåte som kan brukes også for mer komplekse strenggeometrier.

Anta at borestrengen består av m uniforme seksjoner og at oscillasjonstilstanden til strengen er beskrevet av $2m$ komplekse bølgeamplituder som representerer én ned-
 5 overgående bølge og én oppovergående bølge (monofrekvent) for hver seksjon. Kontinuitetskrav for hastighet og torsjon på tvers av grensene resulterer i $2m-2$ indre grenseforhold og 2 endeforhold som til sammen danner en matriselikning $2m \times 2m$. Detaljer for å derivere matriselikningen kan finnes i publikasjonen til Halsey m.fl.: "Drillstring Torsional Vibrations: Comparison between Theory and Experiment on a Full-
 10 Scale Research Drilling Rig", (SPE15564, 1989). Denne matriselikningen kan skrives på følgende form

$$\mathbf{Z} \cdot \mathbf{\Omega} = \mathbf{T} \quad (13)$$

Her er systemmatrisen $\mathbf{Z}$ en kompleks, frekvensavhengig impedansmatrise, $\mathbf{\Omega}$ innbefatter alle de komplekse rotasjonshastighetsamplituder, og høyre side er en vektor
 15 som representerer ytre torsjonspådrag. Løsning på matriselikningen kan skrives som

$$\mathbf{\Omega} = \mathbf{Z}^{-1} \mathbf{T} \quad (14)$$

En nyttig responsfunksjon er topp torsjon dividert med tilført torsjon ved nedre ende. Denne ikke-dimensjonale torsjonsoverføring kan uttrykkes som

$$H_T = \frac{\zeta_1 \cdot (\Omega_1 - \Omega_2)}{T_{2m}} \quad (15)$$

20 hvor ζ_1 er såkalt karakteristisk impedans for den øvre borestrengseksjonen, og de to leddene i parentes er rotasjonshastighetsamplituder av bølger med utbredelse henholdsvis oppover og nedover. Dersom en liten, men begrenset damping er innbefattet, enten det er i det toppdrevne rotasjonssystemet eller langs strengen, vil den ovenstående responsfunksjonen være en funksjon med skarpe topper som representerer nat-
 25URLIGE resonansfrekvenser for systemet. Dersom damping er utelatt, blir systemmatrisen singular (med en determinant lik null) ved naturlige frekvenser.

En annen nyttig responsfunksjon er dynamisk mykhet definert som forholdet mellom total vridningsvinkel og topp torsjon. Det kan matematisk skrives som

$$C = \frac{\Omega_{2m} e^{-ikl} - \Omega_{2m-1} e^{ikl}}{i\omega \zeta_1 \cdot (\Omega_1 - \Omega_2)} \quad (16)$$

Her er $i = \sqrt{-1}$ den imaginære enhet, ω er vinkelfrekvensen, $k = c/\omega$ er bølgetallet, mens c er bølgeutbredelseshastigheten og l er den totale strenglengden. De to hastighetsamplitudene i telleren er henholdsvis nedad- og oppadgående bølgeamplitude. Som et eksempel er magnituden på torsjonsoverføringsfunksjonen og de reelle og
 5 imaginære deler av dynamisk mykhet av en 3200 meter lang streng plottet mot frekvens i figur 5. Det valgte frekvensområdet på 1,6 Hz dekker 4 topper som representerer strengresonansfrekvenser. I motsetning til den spisse torsjonsoverføringsfunksjonen, er elastisiteten vist i det nedre underplottet en funksjon som endrer seg sakte med frekvensen. Den er tilnærmet lik den statiske (lavfrekvens) mykheten multiplisert
 10 med en dynamisk faktor $\sin(k)/kl$ som korrigerer for et begrenset forhold mellom bølgelengde og strenglengde. Den imaginære delen av C , vist som en stiplet linje, er mye lavere enn den reelle delen.

Når den dynamiske mykheten er bestemt, kan borekronehastigheten beregnes fra topptorsjonen. Én mulig måte å gjøre dette på er å multiplisere Fouriertransformasjonen av torsjonen med mobilitetsfunksjonen $i\omega C$ og benytte den inverse Fouriertransformasjonen på produktet. En mer praktisk fremgangsmåte, som krever mindre datakraft, er beskrevet av Kyllingstad og Nessjøen i avhandlingen det refereres til. Deres fremgangsmåte velger kun én dominerende frekvens, typisk luggefrekvensen, og benytter numerisk integrasjon og båndpassfiltrering av torsjonssignalet for å oppnå et
 15 20 estimat av borekronehastigheten. Fremgangsmåten benytter den statiske borestrengselastisiteten korrigert for den dynamiske faktoren $\sin(kl)/kl$.

En tredje fremgangsmåte for å finne den dynamiske borekronehastigheten beskrives av algoritmen nedenfor. Den antar at vinkeloscillasjonsperioden $t_\omega = 2\pi/\omega$ og den komplekse mykheten C ved denne frekvensen er kjente mengder funnet som forklart
 25 over.

a) Kalkuler den komplekse torsjonsamplitude ved Fourierintegralet

$$\tilde{T} = \frac{2}{t_\omega} \int_{t-t_\omega}^t T(t') e^{i\omega(t-t')} dt' \quad (17a)$$

b) Estimer den korresponderende komplekse borekronehastighetsamplituden ved

$$\tilde{\Omega}_b = -i\omega C \tilde{T} \quad (17b)$$

Denne funksjonen bestemmer amplituden $|\tilde{\Omega}_b|$ og den estimerte borekronehastighetsfasen $\arg(\tilde{\Omega}_b)$.

c) Estimer borekronehastigheten som summen av målt hastighet for det toppdrevne rotasjonssystem og den reelle del av denne komplekse amplitude

5

$$\Omega_{be} = \Omega_d + \operatorname{Re}(\tilde{\Omega}_b) \quad (17c)$$

Trinnene over må beregnes for hvert tidstrinn, og Fourierintegralet kan gjennomføres i en datamaskin som differansen mellom et akkumulert integral (som løper fra tid null) minus en tidsforsinket verdi av det samme integralet, forsinket med én oscillasjonsperiode. Nøyaktigheten av hastighetsestimatet kan forbedres, særlig under den innledende oppvridningen av strengen, dersom en lineær trendkurve som representerer en sakte varierende middeltorsjon trekkes fra den totale torsjonen før integrasjon. Videre er det mulig å jevne ut de momentane estimatene av amplitude og fase ved å benytte et lavpassfilter som også nyttiggjør de foregående målingene. For å unngå forsinkelse av faseestimatet, må den medgåtte tiden brukes, for eksempel ved å benytte følgende

10 førstegrads rekursive filter: $\sigma_{s,i} = (\sigma_{s,i-1} + \omega \Delta t)(1-b) + \sigma_{s,i-1} + b\sigma_i$. Her representerer $\sigma_{s,i}$ det utjevnede faseestimat, indeksen i representerer siste utvalgsnummer, Δt angir tidstilveksten, og b er en positiv utjevningssparameter, vanligvis mye mindre enn én. En annen måte å jevne ut borekroneestimatet på, er å øke integralintervallet bakover i tid, fra én oscillasjonsperiode til to eller flere perioder.

20 Bruken av ett kompleks Fourierintegral i trinn a) er av bekvemmelighetshensyn og for å minimere antall likninger. Det kan erstattes av to reelle sinus- og cosinus-Fourierintegraler.

Algoritmen over for å estimere borekronehastighet er ny og gir betydelige fordeler i forhold til fremgangsmåten for estimering som er beskrevet i den refererte avhandling

25 av Kyllingstad og Nessjøen. For det første gir den raskere svar fordi den finner amplituden direkte fra et tidsbegrenset Fourierintegral og unngår sakte båndpassfiltre av høyere grad. For det andre undertrykker fremgangsmåten de høyere harmoniske komponentene mer effektivt. Til slutt bruker den en teoretisk strengelastisitet som er mer nøyaktig, særlig for komplekse strenger med mange seksjoner.

30 Det er vist at en borestreng skiller seg fra en harmonisk oscillator på grunn av det betydelige strenglengde/bølgelengde-forholdet. En annen forskjell er friksjonen mel-

lom strengen og borehullet og borekronetorsjonen. Både brønnhullsfriksjonen og borekronetorsjonen er høyst ikke-lineære prosesser som faktisk representerer drivmekanismene for luggeoscillasjoner. Under heftfasen er den nedre enden av borestrengen mer eller mindre fast, hvilket betyr at rotasjonshastigheten er null og uavhengig av torsjon. I kontrast til dette er borekronetorsjonen og borehullsfriksjonen nær konstante, og dermed representerer de en dynamisk fri nedre ende under slippfasen. Teori forutsier og observasjoner har bekreftet at den laveste luggeperioden er litt lengre enn den laveste naturlige modus for en fullstendig fri nedre ende. Følgelig øker perioden når middelhastigheten synker og varigheten av heftfasen øker. For rene periodiske luggeoscillasjoner kan borekroneshastigheten og topp torsjonen være karakterisert ved Fourierserier av harmoniske frekvenser, som er frekvenser som er hele multiplum av den inverse luggeperioden. Disse frekvensene må ikke forveksles med de naturlige frekvensene som per definisjon er naturlige frekvenser av en løst hengende borestreng med ingen eller lav lineær friksjon. En høyere middelhastighet har en tendens til å korte ned slippfasen og reduserer den relative størrelsen på de høyere harmoniske svingningene. For hastigheter over en viss kritisk rotasjonshastighet kan heftfasene og oscillasjonene transformeres til frie, dempede oscillasjoner av de laveste naturlige modi. Denne kritiske hastigheten har en tendens til å øke med økende borestrenglengde og økt friksjon, og den kan nå nivåer utenfor rekkevidde selv for moderate strenglengder.

For å teste om den ovennevnte fremgangsmåte utledet for en enkel harmonisk oscillator er anvendelig for å kansellere torsjonsluggeoscillasjon i en borestreng, benyttes en avansert matematisk modell for å simulere borestrengen så realistisk som mulig. For detaljer for modellen, se den ovenfor nevnte avhandlingen av Kyllingstad og Nessjøen. Simulasjonsresultater, som drøftes mer detaljert i avsnittet nedenfor, rettferdiggjør at fremgangsmåten beskrevet for en enkel harmonisk oscillator også gjelder for lange borestrenger.

Ett av simuleringsresultatene nedenfor viser også at fremgangsmåten ikke er begrenset til å kansellere kun én oscillasjonsmodus om gangen, men kan brukes for samtidig kansellering av både første og andre torsjonsmodusoscillasjoner. Simuleringsresultater, ikke innbefattet heri, viser at fremgangsmåten også gjelder for kansellering av aksial luggeoscillasjon i en streng. Fremgangsmåten er like godt egnet for bruk på land og borerigger til havs, hvor en boremotor drives enten elektrisk eller hydraulisk.

Fremgangsmåten kan videre innbefatte å bestemme perioden for nevnte modus teoretisk fra borestrenggeometrien ved å løse systemet av grensebetingede likninger for

serier av mulige oscillasjonsfrekvenser og finne toppunktet i det korresponderende responsspekteret.

Fremgangsmåten kan videre innbefatte å bestemme et estimat for nevnte borekronehastighet ved de følgende trinnene:

- 5 a) å finne den dynamiske strengmykheten ved å bruke formel (16) for den bestemte modusfrekvens;
- b) å finne den dynamiske responsvariasjonen ved å trekke fra middelveiden eller en mer generell trendkurve fra råverdien av responssignalet;
- c) å finne en kompleks amplitude av nevnte dynamiske respons ved kalkulasjon av et
10 Fourierintegral over et helt antall perioder tilbake i tid;
- d) å bestemme den komplekse amplituden av nevnte dynamiske borekronehastighet ved å multiplisere nevnte kompleksresponsamplitude med den kalkulte, dynamiske mykheten og med produktet av den imaginære enheten og vinkelfrekvensen av nevnte modus; og
- 15 e) å finne realhastigheten, amplituden og fasen av nevnte komplekse borekronehastighetsamplitude respektiv til den reelle delen, magnituden og argumentet av nevnte komplekse amplitude.

Fremgangsmåten i henhold til den foreliggende oppfinnelsen vil overvinne svakhetene ved eksisterende luggedempingssystemer og en annen form for smart styring av det
20 toppdrevne rotasjonssystemet. Fremgangsmåten gjør det mulig å fjerne eller i vesentlig grad redusere luggeoscillasjoner over et bredere spekter av forhold. I motsetning til tidligere systemer, som alle representerer en kontinuerlig lukket-sløyfe-styring av hastigheten til det toppdrevne rotasjonssystemet som svar på den momentane torsjonslasten, bruker den foreslåtte fremgangsmåten en åpen-sløyfe-kontrollert hastighetsvariasjon som skal fjerne eller i vesentlig grad redusere uønskede oscillasjoner
25 under en kort periode.

Beskrivelse av utførelseseksemplet

Nedenfor forklares et eksempel på en foretrukket fremgangsmåte med referanse til de vedlagte tegninger, hvor:

- 30 Fig. 6 viser et skjematisk riss av en borerigg og en borestreng som styres i henhold til oppfinnelsen;
- Fig. 7 viser en graf fra en simulering av kansellering av torsjonslugging i en 3200 meter lang borestreng hvor abscissen representerer simuleringstid i

sekunder og ordinaten i det øvre underplottet representerer simulasjonshastighet, og ordinaten i det nedre underplottet representerer torsjonen;

Fig. 8 viser en graf fra simulering av kansellering av torsjonslugging i en 7500 meter lang borestreng hvor abscissen representerer simuleringstid i sekunder og ordinaten i det øvre underplottet representerer simulasjonshastighet, og ordinaten i det nedre underplottet representerer torsjonen; og

Fig. 9 viser en graf fra simulering av kansellering av torsjonslugging og andre modusoscillasjoner i en 7500 meter lang borestreng hvor abscissen representerer simuleringstid i sekunder og ordinaten i det øvre underplottet representerer simulasjonshastighet, og ordinaten i det nedre underplottet representerer torsjonen.

På figurene angir referansenummer 1 en borerigg hvorfra et borehull 2 bores ned i grunnen 4. Boreriggen 1 innbefatter en rotasjonsmekanisme 6 i form av et toppdrevet rotasjonssystem som er bevegelig i vertikal retning ved bruk av en heisemekanisme 8 i form av heisverk.

Det toppdrevne rotasjonssystemet 6 innbefatter en elektrisk motor 10, et gir 12 og en utgående aksel 14. Motoren 10 er forbundet med en drivaksel 16 som innbefatter kraftkretser 18 som styres av en hastighetsregulator 20. De satte hastighets- og hastighetsregulatorparameterne styres av en programmerbar logisk styring (Programmable Logic Controller, PLC) 22 som også kan være innbefattet i drivakselen 16.

En borestreng 24 er forbundet til den utgående akselen 14 til det toppdrevne rotasjonssystemet 6 og har en borekrone 26. I denne spesielle utførelsesformen består borestrengen 24 av tunge borerør 28 ved det nedre partiet og normale borerør 30 i resten av borestrengen 24. borekronen 26 arbeider i bunnen av borehullet 2 som har et øvre vertikalt parti 32, et krummet såkalt vinkelbyggende parti 34 og et avviksparti 36. Det bør merkes at figur 1 ikke er tegnet i målestokk.

Simuleringer som bruker simuleringsprogrammet nevnt i den generelle delen av beskrivelsen, har vist at fremgangsmåten for å utligne oscillasjoner i en harmonisk oscillator også gjelder for utligning/kansellering av lugging i borestrenger 24. Det valgte testtilfellet er en 3200 meter lang borestreng 24 plassert i et sterkt avvikende borehull 2. Brønnhullets bane kan beskrives ved tre seksjoner. Den første er vertikal fra toppen til 300 m, den andre er en krummet del (såkalt vinkelbyggende parti) fra 300 til 1500 meter og den tredje er et rett parti, skrånende med 75 grader, som når til enden av borestrengen 24.

Simuleringene er utført med en standard hastighetsregulator 20 for det toppdrevne rotasjonssystemet 6. For å forbedre responsen for raske forandringer i den satte hastigheten er det tilført et ledd for akselerasjonsmating forover, til PI-leddene. I den lineære modus, dvs. når kapasitetsgrenser unngås, kan det toppdrevne rotasjonssystemets 6 torsjon således uttrykkes ved

$$T_d = P \cdot (\Omega_{set} - \Omega_d) + I \int (\Omega_{set} - \Omega_d) dt + J_d \frac{d\Omega_{set}}{dt} \quad (18)$$

Her er Ω_{set} den satte hastighet, Ω_d er rotasjonshastigheten til det toppdrevne rotasjonssystem 6, P er proporsjonalitetsforsterkningen, I er integralforsterkningen og J_d er estimert mekanisk treghet for det toppdrevne rotasjonssystemet 6, referert til den utgående akselen 14. Den dynamiske delen av Ω_d representerer den skalerte versjonen av generell hastighet y for det toppdrevne rotasjonssystemet 6, brukt i teorien over. I simuleringstrengen tas torsjonen T_s direkte fra modellen (som om det er en dedikert torsjonsmåler ved toppen av strengen). (Dersom direktemålinger ikke er tilgjengelig, kan strengtorsjonen beregnes fra motormomentet i det toppdrevne rotasjonssystemet, ved å korrigere for girtap og treghet: $T_s = \eta T_d - J_d \cdot d\Omega_d / dt$ hvor η er girets virkningsgrad.)

Simuleringsresultatene er vist i figur 7. Den øvre delfiguren viser de simulerte verdiene av det toppdrevne rotasjonssystemets 6 hastighet Ω_d , borekronens 26 hastighet Ω_b og også den estimerte borekronehastigheten Ω_{be} som funksjon av tid t . Den nedre delfiguren viser drivtorsjon T_d fra motorer 10 og torsjon T_d for toppen av borestrengen 24 i samme tidsintervallet på 50 sekund. Forskjellen mellom de to torsjonskurvene kommer fra treghet og girtap. Den estimerte borekronehastigheten Ω_{be} finnes som summen av det toppdrevne rotasjonssystemets hastighet og den dynamiske hastigheten funnet fra strengens topptorsjon ved å bruke den nye estimeringsalgoritmen beskrevet i den generelle delen over. En ekstra sekvens holder hastigheten på null under den innledende vridningen, inntil topptorsjonen når sitt første maksimum. Disse simuleringene er utarbeidet med borestrengen 24 bestående av (fra nedre ende og oppover) en borekrone 26, 200 meter med 5 tommers tungvekts (tykkvegget) borerør 28 og 3000 meter med vanlig 5 tommers borerør 30. Den lineære fremgangsmåten, beskrevet i den generelle delen, forutsier en dynamisk mykhet på 2,14 rad/kNm ved den laveste resonans i perioden på 5,16 sekund når den benyttes for akkurat denne strengen. Til sammenlikning er den simulerte luggeperioden ved middelrotasjonshastighet på 60 o/min, omtrent 5,36 sekund. Denne forskjellen er i samsvar med at heftfasens varighet er omtrent 1,5 s, eller 27 % av hele luggeperioden. Den optimale

amplituden for den valgte bipolare, sinusformede pulsen (med en periode på 5,16 s) er 17,2 o/min. Denne amplituden er lavere, men i samme størrelsesorden som den estimerte borekronehastighetsamplituden dividert med π : $69,8 \text{ o/min}/\pi = 22,2 \text{ o/min}$. Den optimale starttiden for pulsen er 22,42 s, hvilket er 0,17 sekund etter det siste

5 minimum av den estimerte borekronehastigheten. Denne tidsforskjellen representerer 12 graders faseforsinkelse relativt til hva som forutsies fra teorien for enkle, harmoniske svingninger. Til tross for disse relativt beskjedne avvikene støtter simuleringsresultatene at fremgangsmåten utledet for en enkel, harmonisk oscillator også gjelder for en borestreng som er et svært mye mer komplekst dynamisk system. Det gode

10 samsvaret mellom simulert borekronerotasjonshastighet Ω_b og det torsjonsbaserte estimatet Ω_{be} er også en validering av den nye estimeringsmetoden. Det faktum at den estimerte hastigheten noen ganger svinger under null hastighet er ikke uventet med tanke på at luggeoscillasjoner ikke er rent periodiske og har betydelige hefttidsintervaller. Bakoverrotasjon støttes ikke av simuleringene så en visualisering av den

15 estimerte borekronehastighet bør innbefatte et klippefilter som fjerner negative hastigheter.

For praktiske formål er den optimale tidsreguleringen og amplituden for kanselleringspulsens kalkulert ved PLC 22 som er programmer til å foreta slike kalkulasjoner basert på målinger som forklart over. Signalverdier for å bygge en korrekt puls i kraftkretsene for motoren 10, er overført til hastighetsregulatoren 28.

20

I et annet eksempel, vist i figur 8, startes kanselleringspulsens før borekronen har begynt å rotere og torsjonen har nådd sitt første maksimum. Med riktig tidsregulering av denne pulsen hindres luggebevegelsen før den har startet. I dette tilfellet brukes en negativ, enkeltsidet puls (med varighet på en halv periode) fordi pulsen nesten fullstendig fjerner oversvingningen av borekronens hastighet. I kontrast til det tidligere

25 eksempel er det ingen torsjonsoscillasjon som kan gi et fornuftig estimat av borekronehastigheten, hvilket er derfor utelatt i plottet. Man kan imidlertid bruke pulsens krysspunkt med middeltorsjon som en utløsende hendelse for pulsen, dersom man vet middeltorsjonen og oscillasjonsperioden før starten på rotasjonen. Figur 8 viser også

30 et eksempel på endring av hastigheten på en kontrollert måte uten å etterlate restoscillasjoner etter justeringen. I dette spesielle tilfellet er hastigheten redusert fra 60 til 40 o/min gjennom en lineær nedramping av hastigheten. Vi ser at denne hastighetsendringen, som finner sted i løpet av én periode (5,16 s) er vellykket idet at den ikke skaper noen nye oscillasjoner. Ved nærmere ettersyn viser simuleringsresultatene

35 at det er en liten restoscillasjon med amplitude på omtrent 0,8 o/min, og denne ser ut til å vokse litt mot enden av simuleringen. Dette illustrerer at jevn rotasjon ved lav

hastighet er ustabil og at et aktivt dempesystem trengs for å forhindre at full lugge-oscillasjon utvikles.

Eksemplene over støtter sterkt opp under antakelsen om at teorien for kansellering av oscillasjoner i en enkel oscillator, gjelder ganske bra for en borestreng 24, i det minste når borestrengen 24 ikke er ekstremt lang. Simuleringer med en 7500 meter lang borestreng 24 viser at fremgangsmåten med kanselleringspuls også gjelder for ekstremt lange borestrenger 24, hvilket representerer de vanskeligste tilfeller for å unngå lugging. Det henvises nå til figur 9 som viser simuleringsresultatene når en kanselleringspuls brukes på en 7500 meter lang borestreng 24 i en høyavviksbrønn med 80 graders inklinaison fra 1500 meter til brønnbunnen. Den teoretiske torsjonsspendelperioden for denne strengen er 10,56 s, igjen litt lavere enn den observerte luggeperiode på 10,8 sekund. Den dynamiske mykheten ved denne frekvens er 4,94 rad/kNm. Denne verdien brukes for kalkulasjon av borekronerotasjonshastighet Ω_{be} . Amplituden for dette estimatet varierer litt med tiden og er omtrent 63 o/min ved 50,5 sekund når motfasen er null. Disse verdier er i ganske god overensstemmelse med den optimale pulsamplituden og tiden for henholdsvis 22,9 o/min ($= 71,9 \text{ o/min}/\pi$) og 51,1 sekund. Resultatene fra simuleringene, ikke gjengitt her, hvor amplitude og fase fra borekronerotasjonshastighetsestimatet erstatter de optimale verdiene, viser at spesielt tidsavviket på 0,5 sekund (17 grader), er stort nok til å få pulsfremgangsmåten til å mislykkes i å kansellere luggingen, bortsett fra for en svært kort stund. Dette strenge kravet til en nesten perfekt amplitude og tidsregulering for kanselleringspulsen er skuffende, men ikke fullstendig uventet. Den lave rotasjonshastigheten på 60 o/min er langt under den naturlige stabilitetsgrensen for denne lange strengen. Tilleggssimuleringer (ikke vist her) med den samme lange strengen, men med en høyere hastighet og/eller innbefattet et aktivt dempesystem, viser at fremgangsmåten for pulskansellering virker og med større feiltoleranse for ikke-perfekt amplitude og tidsregulering av kanselleringspulsen.

En kommentar til de siste simuleringsresultatene i figur 9: Det er klart at det er noen restoscillasjoner igjen etter at luggingen er fjernet. Disse oscillasjonene er identifisert som andre svingninger av andre egenmodus fordi perioden er svært nær den teoretiske periode på 3,52 sekund for denne modus. I dette tilfellet er det imidlertid tilstrekkelig damping til å få disse oscillasjonene til å svinne hen. Simuleringer har vist at disse vibrasjoner kan kanselleres samtidig ved å tilsette en pulskomponent med optimal amplitude og fase til den første pulsen designet til å kansellere kun laveste oscillasjonsmodus.

Fremgangsmåten for kansellering av torsjonslugeoscillasjoner kan oppsummeres ved følgende algoritme:

- i. Bestemme oscillasjonsperioden og den korresponderende vinkelfrekvensen, enten teoretisk fra en beskrivelse av borestrengens 24 geometri, eller empirisk fra de observerte variasjoner av torsjon eller rotasjonshastighet.
- ii. Kontinuerlig måling av hastigheten og torsjonen i toppen av borestrengen 24. Sistnevnte kan enten måles direkte fra en dedikert torsjonssensor (ikke vist) plassert mellom det toppdrevne rotasjonssystem 6 og borestrengen 24, eller indirekte fra motorens 10 drivmoment korrigert for girtap og treghetseffekter.
- iii. Estimere borekronehastighetsamplituden og –fasen fra den målte torsjonen med én av algoritmene gitt i den generelle beskrivelsen.
- iv. Velge en kanselleringspulsform og skalere den slik at dens genererte oscillasjonsamplitude passer med den estimerte borekronehastighetsamplituden.
- v. Dersom hastighetsamplituden overskrider et visst nivå, for eksempel 50 prosent av middelhastigheten, aktiver utløseren og vent på et optimalt tidspunkt for å starte kanselleringspulsen.
- vi. Start den skalerte kanselleringspulsen som et tillegg til den konstante, fastsatte hastigheten når fasen til den estimerte borekronehastighetsamplituden tilsvarer eller overskrider motfasen av den pulsgenererte oscillasjonen ved et bestemt faseskifte.

En enklere algoritme kan brukes når hensikten er å endre hastigheten permanent uten å danne en ny oscillasjon:

- i. Velg en singulær, hastighetsendrende akselerasjonspuls som er en lineær kombinasjon av ikke-singulære pulser slik at deres vektorsum av genererte oscillasjoner er null.
- ii. Start pulsen når hastighetsendring er ønsket.

P a t e n t k r a v

1. Fremgangsmåte for å redusere eller unngå i det minste aksielle eller torsjonelle oscillasjoner i en borestreng (24) med en borekrone (26) tilknyttet dens lavere ende og kontrollert ved en heise- og rotasjonsmekanisme (8, 6) tilknyttet dens toppende, hvor de kontrollerbare variablene er vertikal- og rotasjonshastighet, og responsvariablene er aksial strekkraft og torsjonsmoment relatert til toppen av borestrengen (24), k a r a k t e r i s e r t v e d at fremgangsmåten innbefatter trinnene:
 - i) å velge minst én strengoscillasjonsmodus som skal styres;
 - ii) å overvåke den styrbare variabelen og responsvariabelen relevant for nevnte oscillasjonsmodus;
 - iii) å bestemme oscillasjonsperioden for nevnte modus;
 - iv) å estimere den dynamiske borekronehastigheten for nevnte modus, ut fra relevant responsvariabel;
 - v) å bestemme en hastighetspuls, definert som en midlertidig hastighetsavvikskomponent, som er i stand til å generere en oscillasjon med en amplitude hovedsakelig lik amplituden til nevnte, estimerte borekronehastighet; og
 - vi) å starte en åpen-sløyfe-kontrollert hastighetsvariasjon ved å addere nevnte hastighetspuls til den operatørbestemte hastighetskommandoen når amplituden til nevnte borekronehastighetsestimat overskrider et visst terskelnivå og motfasen til nevnte borekronehastighetsestimat tilsvarer fasen til den pulsgenererte oscillasjonen.
2. Fremgangsmåte som angitt i krav 1, hvor perioden til nevnte modus er bestemt teoretisk fra borestrengsgeometrien ved å løse systemet av grenseverdilikninger fra en serie mulige oscillasjonsfrekvenser og finne toppen i det korresponderende responsspekter.
3. Fremgangsmåte som angitt i krav 1, hvor estimatet av nevnte borekronehastighet er bestemt ved de følgende trinnene:
 - a) å finne den dynamiske strengelastisiteten ved å bruke formelen (16) for den bestemte modusfrekvensen;
 - b) å finne en kompleks amplitude for nevnte responsvariabel ved kalkulasjon av et Fourierintegral av nevnte variabel over et helt antall perioder tilbake i tid;
 - c) å bestemme den komplekse amplituden av nevnte dynamiske borekronehastighet ved å multiplisere nevnte komplekse responsamplitude med den

kalkulerte dynamiske mykhet og med produktet minus den imaginære enheten og vinkelfrekvensen av nevnte modus; og

d) å finne amplituden og fasen av nevnte dynamiske borekronehastighet som respektivt magnituden og argumentet for nevnte komplekse amplitude; og

5 e) å finne estimatet av nevnte borekronehastighet som summen av den reelle delen av nevnte komplekse borekronehastighetsamplitude og de målte kontrollerbare variablene.

4. System for å redusere eller unngå i det minste aksiale oscillasjoner eller torsjonsoscillasjoner i en borestreng (24), k a r a k t e r i s e r t v e d
10 at systemet omfatter:

en drivaksel (16) anvendelig til å:

i) velge minst én strengoscillasjonsmodus som skal kontrolleres;

15 ii) overvåke en kontrollerbar variabel og en responsvariabel som er relevant for nevnte oscillasjonsmodus, hvor de kontrollerbare variablene er vertikal hastighet og rotasjonshastighet, og hvor de responsvariable er aksial strekkspenning og torsjon;

iii) bestemme oscillasjonsperioden for nevnte modus;

iv) estimere den dynamiske borekronehastigheten for nevnte modus fra den relevante responsvariabelen;

20 v) bestemme en hastighetspuls, definert som en midlertidig hastighetsavvikskomponent, som er i stand til å generere en oscillasjon med en amplitude hovedsakelig lik amplituden for nevnte estimerte borekronehastighet; og

25 vi) starte en åpen-sløyfe-kontrollert hastighetsvariasjon ved å addere nevnte hastighetspuls til den operatørsatte hastighetskommandoen når amplituden til nevnte estimerte borekronehastighet overskrider et bestemt terskelnivå, og motfasen til nevnte estimerte borekronehastighet tilsvarer fasen til den puls-genererte oscillasjonen.

5. System som angitt i krav 4, som videre omfatter:

30 en rotasjonsmekanisme (6) koplet mellom drivakselen (16) og borestrengen (24), hvor rotasjonsmekanismen (6) er anvendelig til å rotere borestrengen (24) inne i et borehull (2) som respons på et signal fra drivakselen (16).

6. System som angitt i krav 5, hvor rotasjonsmekanismen (6) er et toppdrevet rotasjonssystem.

7. System som angitt i krav 4, hvor drivakselen (16) omfatter en programmerbar regulator (22) som kontrollerer en satt hastighet og en hastighetsregulatorparameter.

1/6

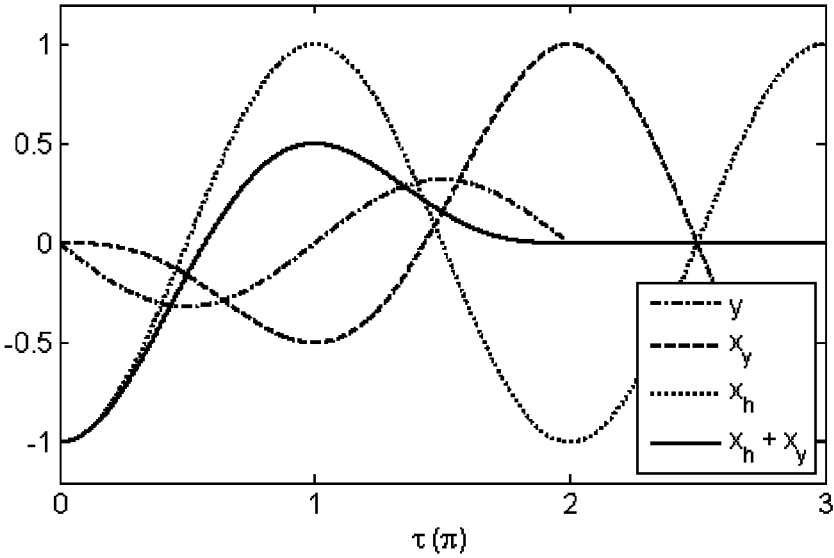


Fig. 1

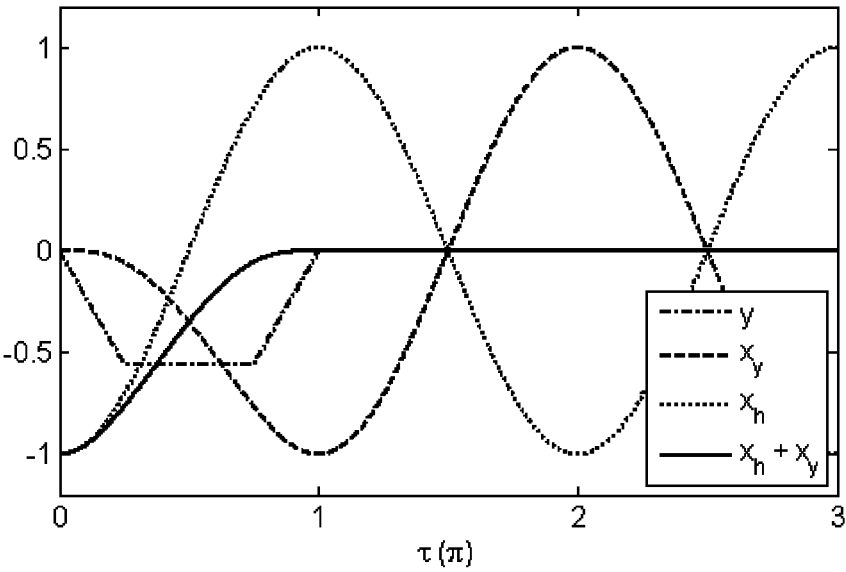


Fig. 2

2/6

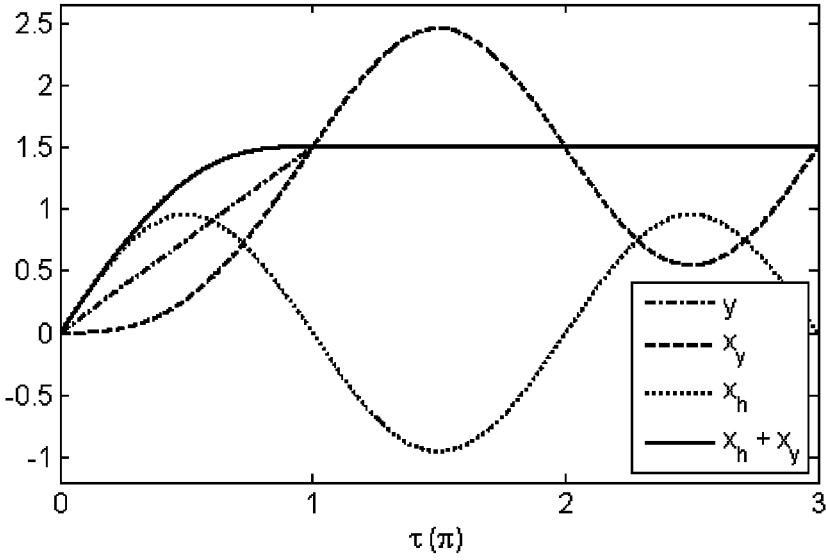


Fig. 3

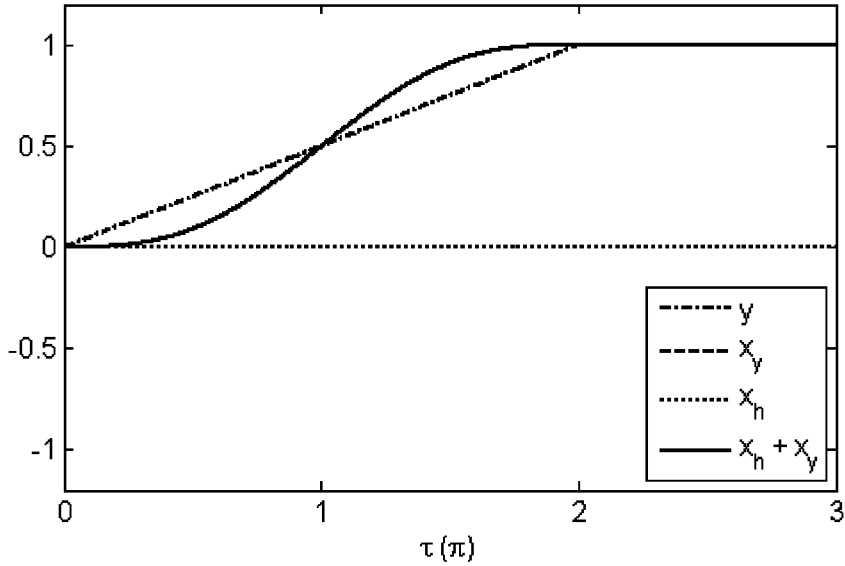


Fig. 4

3/6

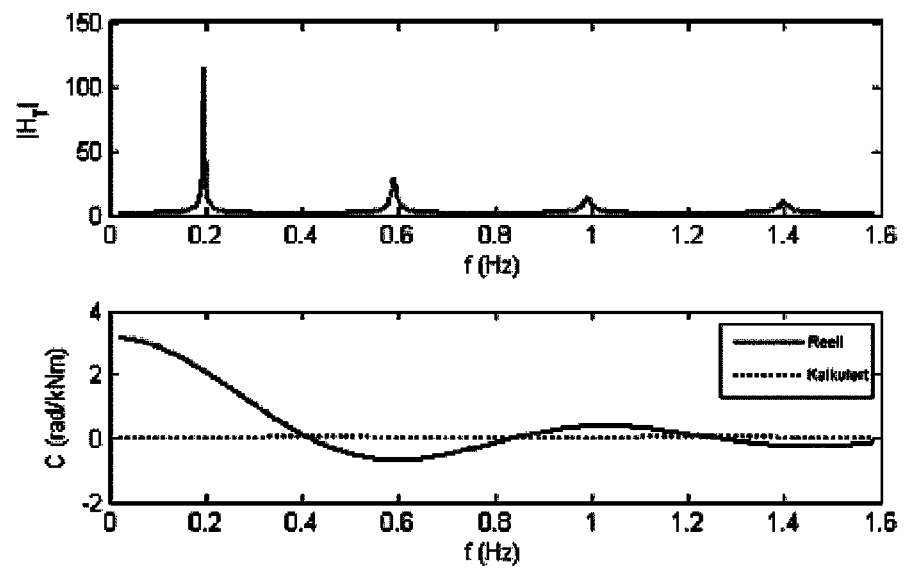


Fig. 5

4/6

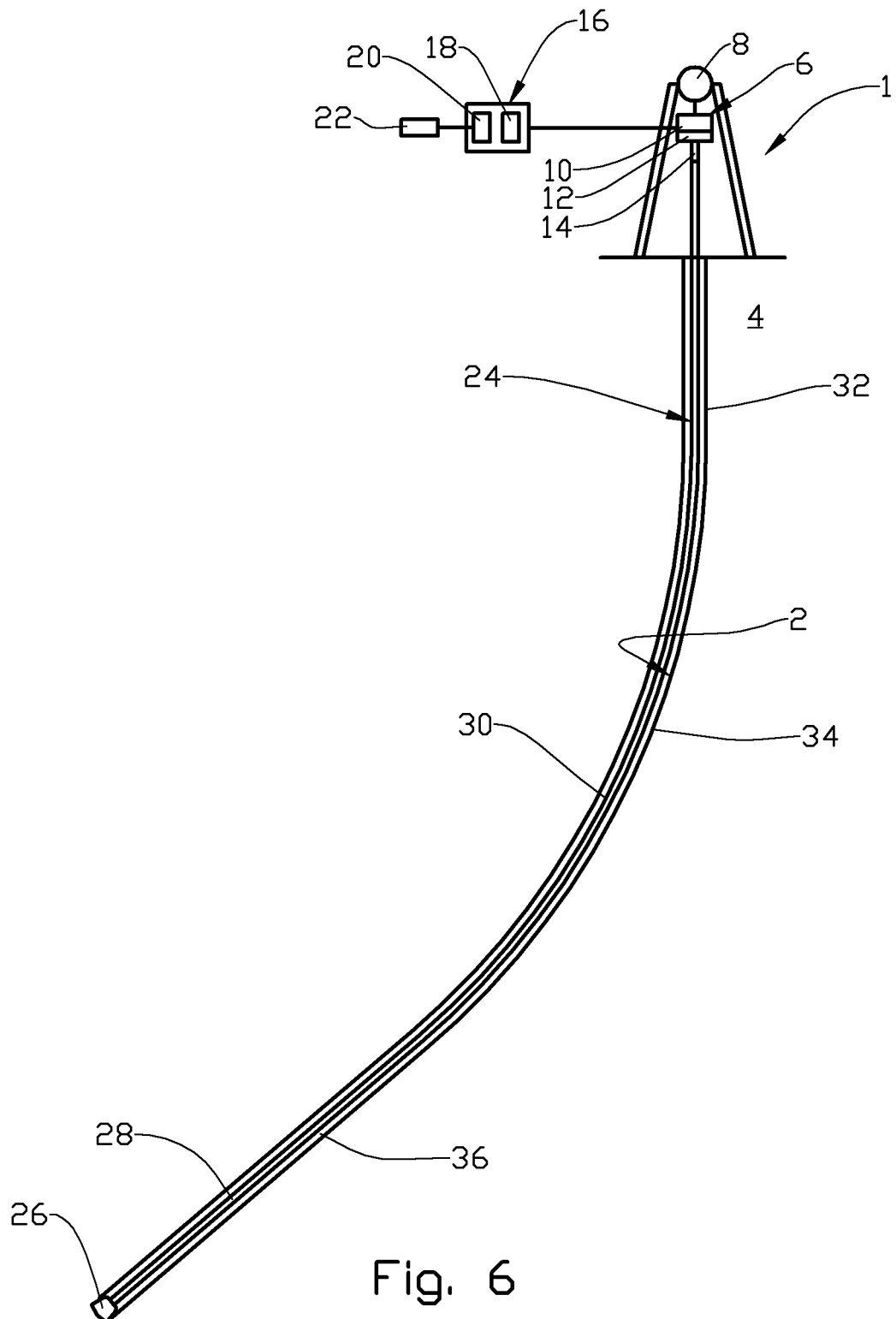


Fig. 6

5/6

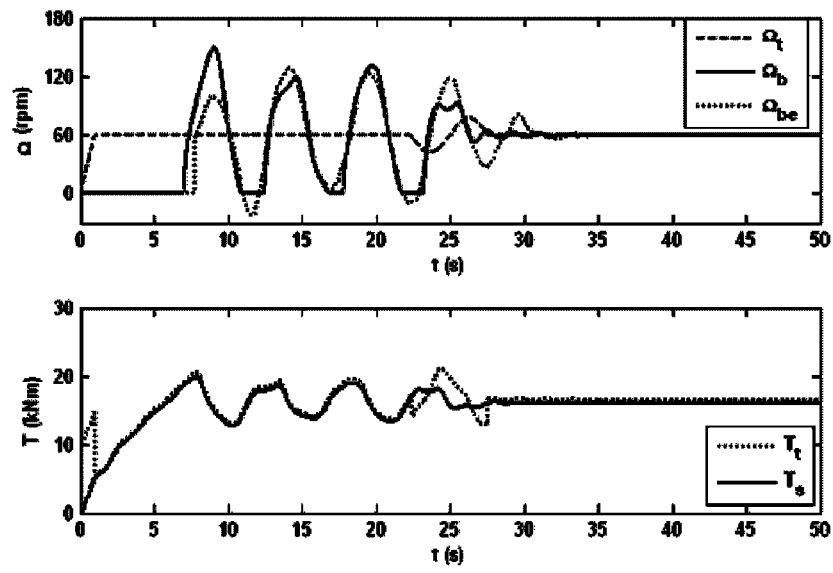


Fig. 7

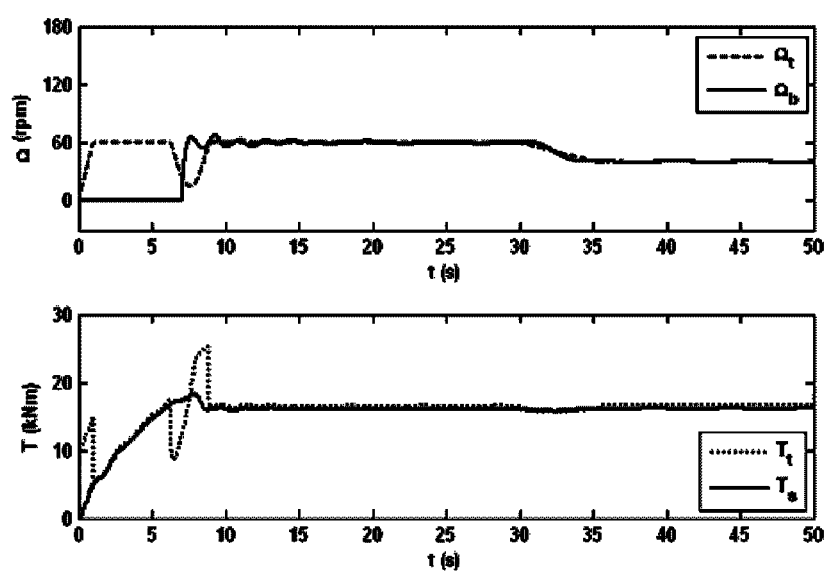


Fig. 8

6/6

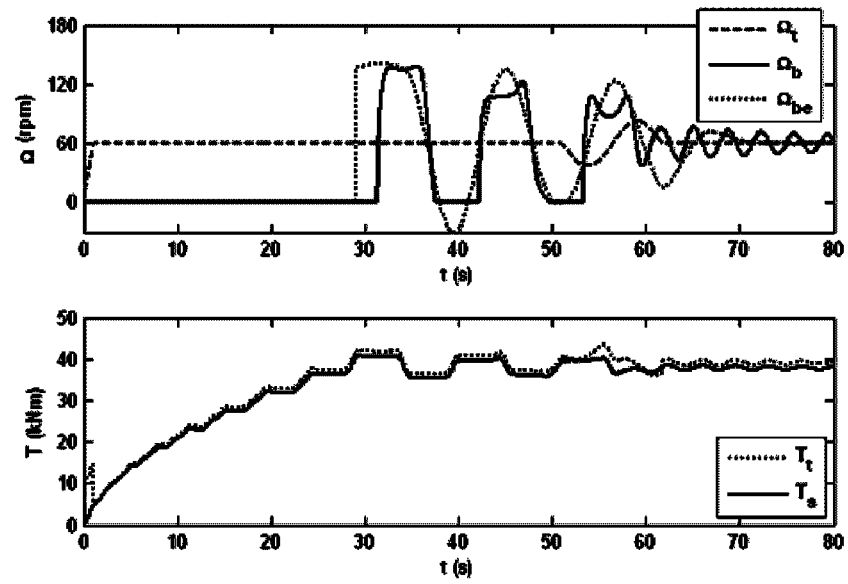


Fig. 9