

PRINSIPP FOR OPPTAK AV ENERGI FRÅ HAVBØLGJER. FASESTYRING OG OPTIMAL SVINGERØRSLE.

J. Falnes

Institutt for fysikk, NTNU, 7034 Trondheim.

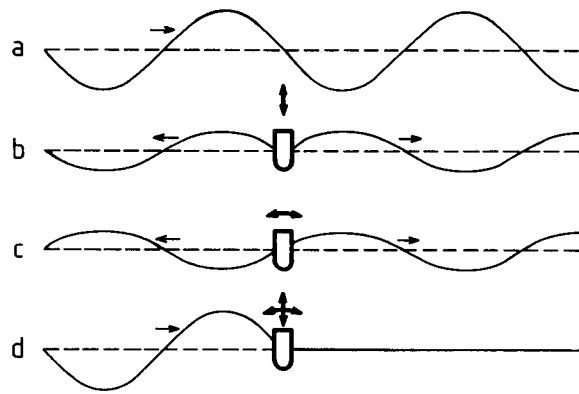
1. Å absorbera bølger vil seia å generera bølger.

Ein kropp som svingar i vatn, set opp bølger. Ein mindre kropp kan setja opp ei like stor bølge som ein større kropp, dersom han svingar med ein større amplitude. Dette kan utnyttast ved opptak av bølgeenergi, t.d. med ein liten flytande kropp i opp-og-ned-svinging (hiv) som resultat av ei innkomande bølge. Særleg effektivt blir energiopptaket dersom det teknisk er innretta såleis at kroppen kan få høgare utsving enn bølga.

Reint allment kan det seiast at ein god bølgeabsorbator må vera ein god bølgegenerator.¹ Skal det absorberast energi frå ei bølge, trengst det altså ei svingande vassforskyving som er passeleg stor og som skjer til rett tid (svinging med riktig fase). Det kan gjerast med ein svingande kropp, som nemnt ovanfor. I staden kan vassforskyvinga skje t.d. med ei “svingande vassøyle” (SVS) i eit kammer med opning i sjøen. Dersom det i opninga er montert ein bøyeleg og elastisk, men tett, duk som kan svinga under påverknad av bølger, kan ei viss væskemengd, som ikkje treng vera sjøvatn, stengjast inne i kammeret. Eventuelt kan det vera berre luft innanfor duken. Lufta må då ha eit visst overtrykk, som svingar i takt med bølga.

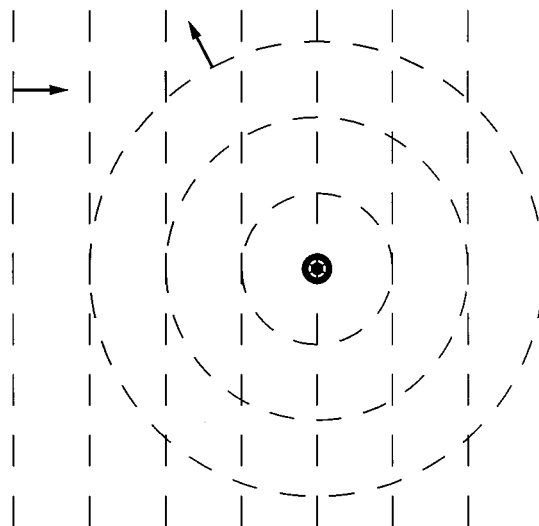
Når bølgeenergi blir absorbert, må det bli verande att mindre med bølgeenergi i havet. Det må altså bli ein reduksjon eller ei fjerning av bølger som elles ville bli kasta tilbake frå eller gå forbi den absorberande innretniga. Når denne svingar, må det altså bli sett opp bølger som motverkar (er i motfase med) dei tilbakekasta og/eller forbipasserande bølgjene. M.a.o. må det vera genererte bølger som interfererer destruktivt med bølgjene elles i sjøen. Dette forklarar den paradoksale, men sanne, påstanden: “å øydeleggja bølger vil seia å skapa bølger”. Eit eksempel som illustrerer dette, er vist i figur 1, for eit tilfelle der den innkomande bølga kan bli fullstendig absorbert. Dette eksemplet svarar til ei uendeleg lang rekkje (normalt på figurplanet) av svingande kroppar med liten nok innbyrdes avstand (mindre enn ei bølglengd). Fullstendig absorpsjon er også mogleg med ein langstrekt kropp, med tverrsnitt som vist i figur 1, under føresetnad av at kroppen svingar vertikalt og horisontalt på ein optimal måte.

Det kan visast teoretisk^{2,3,4} at ikkje meir enn halvparten av bølgeenergien kan bli absorbert dersom det er berre ei symmetrisk utstrålt bølge, slik som vist med kurve b i figur 1, når bølga er generert av ein symmetrisk kropp som har berre ein svingemodus, som her er vertikal svinging (hiv). Likeins kan det visast at det er uråd å få meir enn halvparten av bølgeenergien absorbert dersom det berre er ei antisymmetrisk utstrålt bølge (kurve c) frå den symmetriske kroppen. Men ein kropp som er usymmetrisk nok, og som svingar i berre ein modus, kan absorbera bortimot all innkomande bølgeenergi. Ved universitetet i Edinburgh kom Salter nær denne ideelle situasjonen med sine eksperiment med “voggande and” (Duck).⁵



Figur 1. Å absorbera bølger vil seia å generera bølger. Kurve a representerer ei uforstyrra innkomande bølge. Kurve b illustrerer symmetrisk bølgegenerering (på vatn som elles er i ro) med ei strak rekkje av små flytande kroppar, som har innbyrdes lik avstand, og som svingar i hiv (opp og ned). Kurve c illustrerer antisymmetrisk bølgegenerering. Kurve d, som representerer superposisjonen (summen) av dei tre bølgjene ovanfor, illustrerer fullstendig absorpsjon av den innkomande bølgeenergien.¹

Eit anna eksempel er vist i figur 2. Ein “punktabsorbator” som absorberer bølgeenergi, må svinga og dermed stråla ut sirkulære bølger som interfererer destruktivt med den innkomande plane bølga. Ein “punktabsorbator”, som kan vera ein hivande bøye, er (pr. definisjon⁶) av svært lite tverrmål samanlikna med bøljelengda. Den maksimale energien som kan bli absorbert av ein hivande aksesympetrisk kropp er lik^{2,3,6} den bølgeenergien som blir transportert på ein like brei bølgefrent som bøljelengda dividert med 2π . Den tilsvarande breidda kan kallast “absorpsjonsbreidda”. Tidlege eksperimentatorar, som ikkje kjende til denne teoretiske samanhengen, blei forundra då dei målte absorpsjonsbreidder større enn den fysiske breidda av ein prøvd punktabsorbatormodell. I staden for absorpsjonsbreidd kan ein bruka uttrykket “tappebreidd” for den noko mindre breidda som svarar til konvertert nytteenergi, som er den absorberte energien minus energi tapt ved friksjon og andre dissipative effektar.



Figur 2. Bølgjemønster frå to interfererande bølger, sett ovanfrå. Når ein “punktabsorbator” absorberer energi frå ei innkomande bølge, genererer han ei sirkulær bølge som strålar ut frå den neddukka delen av overflata på den svingande kroppen.

2. Optimal svingerørsle for maksimalt energioptak.

Skal det bli maksimalt med energioptak, må bølgeenergiomformaren (BEOen) ha ei optimal svingerørsle. Med ei sinusforma innkomande bølge må svinginga ha ein optimal fase og ein optimal amplitude.¹

La oss illustrera dette ved å sjå på figur 1 ein gong til. Her er amplitudane for dei utstrålte bølgjene (kurvene b og c) akkurat halvparten av amplituden på den innkomande bølgja (kurve a). Difor må amplitudane på dei vertikale og horisontale svingingane ha bestemte verdiar. Merk at desse optimale amplitudane er proporsjonale med amplituden på den innkomande bølgja.

Dei optimale fasane for desse to svingemodiane er slik at dei tilsvarande to utstrålte bølgjene mot høgre (figur 1 b og c), får same fasen (d.v.s. samanfallande bølgetoppar og -dalar). Det fører då også til at dei to utstrålte bølgjene mot venstre, den symmetriske og den antisymmetriske, veg kvarandre opp. Dessutan må dei to svingemodiane ha rett fase i forhold til den innkomande bølgja, slik at dei bølgjene som strålar mot høgre (kurvene b og c), har bølgetopp der den innkomande bølgja (kurve a) har bølgedal.

For eit tilfelle med berre ein svingemodus, t.d. berre hiv, vil den resulterande bølgja vera gitt ved superposisjonen (summen) av kurvene a og b i figur 1. Optimal amplitude og fase for hivsvinginga er i dette tilfelle den same som ovanfor, i tilfellet med to svingemodi. Bølgja strålt ut mot venstre og den resulterande bølgja mot høgre har då begge ein amplitude som er lik halve amplituden på den innkomande bølgja. Ettersom bølgeenergien er proporsjonal med kvadratet av bølgeamplituden, vil dette seia at 25 % av den innkomande bølgeenergien blir reflektert mot venstre, og at også 25% går vidare mot høgre. Den attverande delen, som er 50 %, er den energien som må vera absorbert av BEOen. Og dette er, som nemnt ovanfor, det teoretiske maksimum når det er berre ein svingemodus.

For ein BEO med berre ein svingemodus har det seg slik at fasen er optimal i fall bølgja er i resonans med svingesystemet. Det vil seia at bølgefrequensen (det inverse av bølgeperioden) er den same som den naturlege frekvensen for svingesystemet. Då er svingefarten i fase med eksitasjonskrafta som verkar på svingesystemet frå bølgja. Samanlikning av kurvene a og b i figur 3 illustrerer dette.

Det optimale fasevilkåret er tilnærma oppfylt også for frekvensar litt på sida av resonans, nemleg for frekvensar innanfor den såkalla resonans-bandbreidda for svingesystemet. BEOar av stor geometrisk utstrekning har stor bandbreidd. For å spara byggjematerial (betong, stål, etc.) er der ynskjeleg å utvikla BEO-system av mindre fysisk storleik. Men ei ulempe med det er at bandbreidda då blir heller smal.

Difor er det svært viktig at det i samband med BEOar av liten fysisk storleik blir brukt ein metode for fasestyring, slik at fasen blir optimal eller tilnærma optimal. Prinsippet for fasestyring med metoden med fasthalding er illustrert med kurve c i figur 3. (Ein skal gå ut frå at dei ulike flytande kroppane som det er tenkt på i samband med figur 3 har like store vassplanareal. Men ein kropp med større masse er høgare, og han stikk lenger ned i vatnet.)

Som nemnt ovanfor må det også vera ein optimal svingeamplitude om det skal bli ein maksimal absorbert energi. Ein noko mindre amplitude krevst for å maksimera den konverterte nytteenergien, som er skilnaden mellom absorbert energi og ein uunngåeleg tapt energi (p.g.a. friksjon, væskeviskositet o.l.). Bortsett frå tilfelle med små eller nokså moderate bølgehøgder, så vil denne ynskjelege amplituden ikkje vera oppnåeleg, p.g.a. det maksimale utsvinget som systemet er konstruert for. I praksis vil også den maskinelle energibehandlingskapasiteten i ein BEO ha ei grense. Av økonomiske grunnar bør dei tekniske spesifikasjonane for ein BEO vera valde slik at kapasiteten blir fullt utnytta i ein etter måten stor brøkdel av

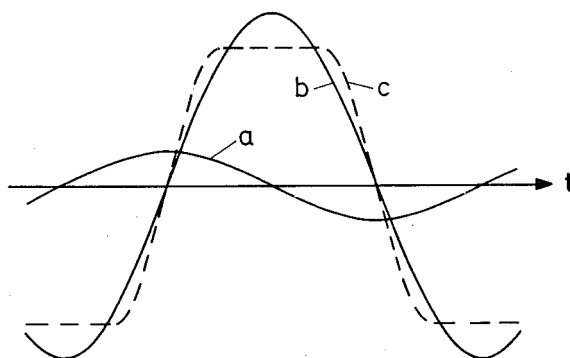
levetida.^{7,8} Av dette følger det at mesteparten av den gratis bølgeenergien blir verande att i havet, bortsett frå når det, til tider, er heller moderat bølgeaktivitet i havet.

Også i dei tilfella der den tekniske spesifikasjonen avgrensar amplituden til mindre enn det ynskjelege, er både den absorberte energien og den konverterte nytteenergien maksimum når svingefarten er i fase med eksitasjonskrafta frå den innkomande bølge.

3. Fasestyring med metoden med fasthalding.

For å få til den optimale svingerørsla som skal til for å oppnå maksimal absorbert energi eller maksimal konvertert nytteenergi, kan det vera nødvendig å senda noko energi attende ut i sjøen under visse korte brøkdeler av kvar svingesyklus og profitera på dette i resten av syklusen.⁹ Av denne grunnen har “optimal styring” av bølgekraftverk blitt kalla “reaktiv styring”.¹⁰ For den praktiske realiseringa av dette trengst eit reversibelt energiomformings-maskineri med svært lite konverteringstap. Det kan t.d. vera eit hydraulisk maskineri som kan fungera som motor eller pumpe,¹¹ og som har høg verknadsgrad. For å realisera optimal styring i praksis må ein bruka ein datamaskin med høveleg programvare, og med inngangssignal frå sensorar som måler bølge¹ og/eller svingerørsla til BEOen.¹⁰ Det er også nødvendig at datamaskinen predikerer bølge nokre sekund inn i framtida.^{12,13}

Når bølgeperiodane er lengre enn eigenperioden (den naturlege svingeperioden) for BEOen, kan ein på ein meir enkel måte få til tilnærma optimal fase, nemleg med metoden med fasthalding, som syter for at svingerørsla blir omlag som vist med kurve c i figur 3. Ein låsemekanisme blir aktivert i same stunda som svingerørsla er i eit ytterpunkt, dvs. i den augneblinken farten blir null. Mekanismen får frå datamaskinen eit laussleppingssignal ei viss tid (omlag ein firedels naturleg periode) før neste ekstremverdi på eksitasjonskrafta frå bølge. For ein hivande bøye er denne krafta nær i fase med bølgehevinga (av vassflata) på grunn av den innkomande bølge. Fasestyringa skal då syta for at bøyen har maksimal fart oppover/nedover samstundes med at der er ein bølgetopp/bølgjedal.



Figur 3. Resonans og fasestyring. Kurvene viser den innfallande bølgehevinga og vertikalrørsla (hivutsvinget) for (ulike versjonar av) ein hivande kropp, som funksjon av tida.

Kurve a: Hevinga av vassflata pga. den innfallande bølge (på den staden kroppen er). Denne kurva kan òg representera vertikalposisjonen til ein kropp med forsvinnande liten masse. For ein kropp som har diameter svært mykje mindre enn bøljelengda, vil kurve a også representera den vertikale (hiv-) eksitasjonskrafta som verkar på kroppen frå bølge.

Kurve b: Vertikal posisjon av ein hivande kropp som har masse stor nok til at den naturlege perioden er lik bølgeperioden (resonans).

Kurve c: Vertikal posisjon for kropp med mindre masse, og difor kortare naturleg periode. Fasestyring kjem då i stand ved å låsa kroppen i fast vertikal posisjon gjennom visse, relativt korte, tidsintervall.¹

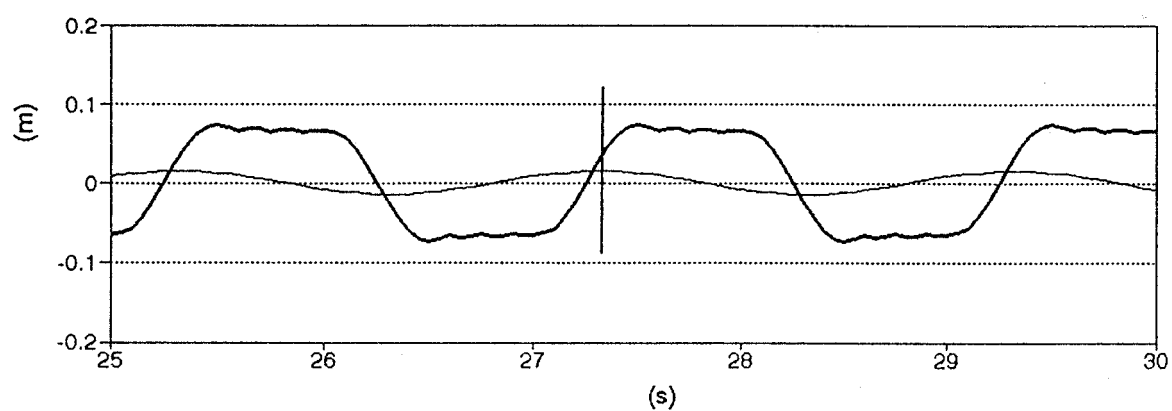
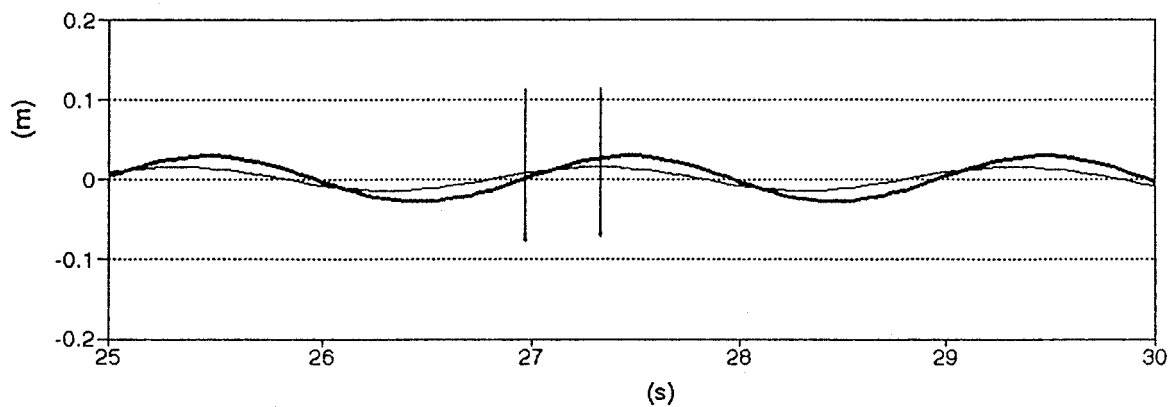
Ein matematisk simuleringsstudie¹⁴ har blitt utført på ein ned-skalert laboratorie-modell av ei svingande vassøyle (SVS) plassert ved den vertikale endeveggen av ei 0,4 m brei og 0,7 m djup bølgeren. Breidda av SVSa er 0,18 m, og det rektangulære arealet av den indre vassflata og av innlaupsmunninga er 0,022 m². Den øvre kanten av munninga er 0,06 m under vassflata. For eit tilfelle der det er ei sinusforma bølge med periode 2 s, blir SVS-svinginga som vist i figur 4a utan fasestyring og i figur 4b med fasestyring etter metoden med fasthalding. Ein ser at utsvingsamplituden blir monaleg større med fasestyring.

Medan ein kjem temmeleg nær til den optimale fasen med metoden med fasthalding, vil gjerne amplituden bli mindre enn den optimale. Det skriv seg frå at ein ved denne metoden ikkje har eit reversibelt energikonverteringsmaskinri som (under mindre brøkdeler av syklusen) kan levera ynskjelege mengder med energi tilbake til sjøen. Men denne ulempa gjeld ikkje under vertilstandar med så mykje bølgeenergi at amplituden likevel er avgrensa av det maksimale utsvinget som systemet er konstruert for.

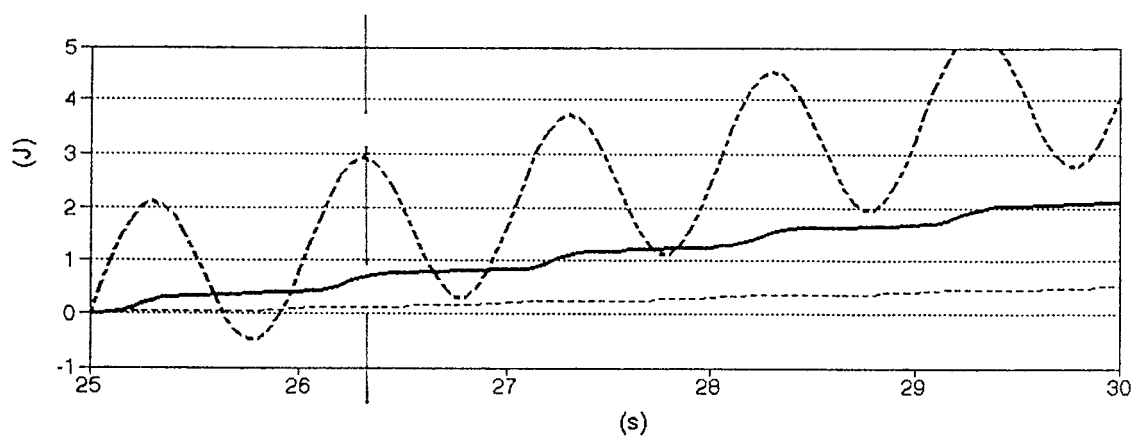
Ved den ovannemnde simuleringsstudien¹⁴ er det funne absorberte energi som vist med kurvene i figur 5 for dei tre tilfella: inga styring, fasestyring med fasthalding og full optimal styring (dvs. både fase- og amplitudestyring). I sistnemnde tilfelle ser ein at ei relativt stor energimengd må sendast ut i sjøen under to tidsintervall av kvar svingesyklus. Det teoretiske resultatet viser at dette kan løna seg på litt lengre sikt, då den absorberte energien blir omlag dobbelt så stor som i tilfelle med berre fasestyring, som vidare fører til fire gonger så mykje absorbert energi samanlikna med inga styring.

For verkelege bølger på sjøen vil tidene som går mellom bøljetoppar og bølgedalar variera på ein tilfeldig måte. Når ein skal utøva fasestyring av ein BEO i slike uregelrette (ikkje-sinusforma) bølger, må laussleppingssignalet til fasthaldingsmekanismen bestemast av ein datamaskin med høveleg programvare. Det trengst å forsyna datamaskinen med inngangssignal m.a. frå ein sensor som måler bølga eller eksitasjonskrafta frå bølga. Datamaskinen må vera i stand til å predikera bølga ei viss tid inn i framtida. Det er opplagt at avgjerda om lausslepping må takast minst ein firedels naturleg svingeperiode føre neste ekstremverdi av eksitasjonskrafta frå bølga.

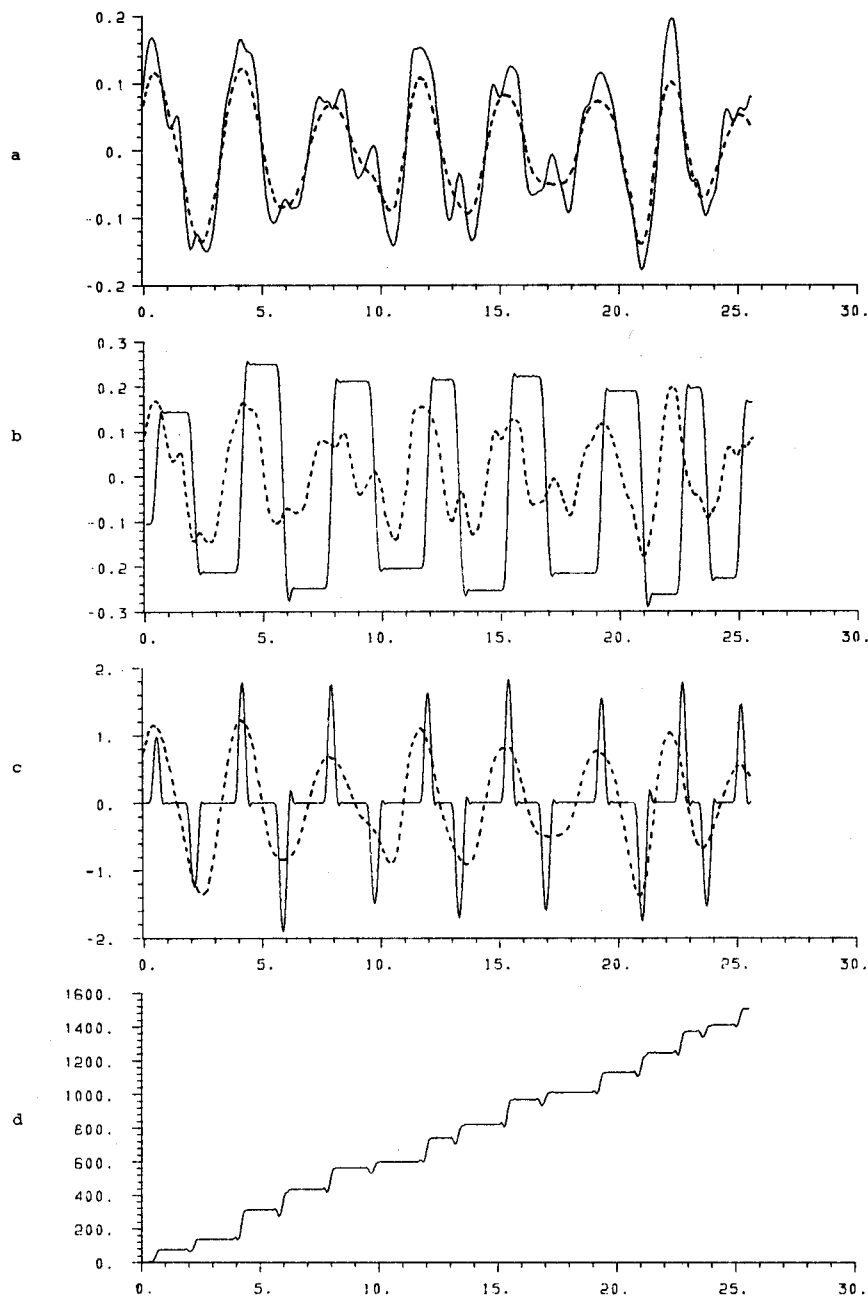
Prinsippet med fasestyring etter metoden med fasthalding av ein hivande (vertikalt svingande) kropp i uregelrette bølger er illustrert med dei eksperimentelle resultat¹⁵ viste i figur 6. Laboratorie-eksperimentet blei gjennomført i ein stor bølgekana (skipsmodelltank), 10,5 m brei og 10 m djup. I dette spesielle tilfellet var kroppen forma som ein kjegle med spissen ned. Hivrørsla var kopla til ei stempelpumpe inni kroppen. Stempelet var gjennom ei lang stong forbunde til eit universalledd på eit anker på botnen av bølgekana. Pumpesynderen var fest til kroppen og svinga opp og ned med denne. Gjennom hivørsla blei energi ført til pumpa og vidare gjennom ventilar og turbin til mekanisk nytteenergi på ein roterande aksling. Den hydraulisk styrte låsemekanismen kunne (som ein parkeringsbremse) låsa kroppen fast til stempelstonga, slik at vidare hivørsla blei hindra. Låse- og laussleppingssignal kom frå ein datamaskin som fekk inngangssignal frå sensorar som målte hivørsla til kroppen og bølga ved sida av kroppen. Høgda av den kjegleforma kroppen var 2,3 m. Øvst hadde kroppen ein diameter på 0,9 m, og her var det 0,62 m ned til vassflata når alt var i ro i likevektsstilling. Diameteren på stempelstonga var 75 mm. Massen på kroppen var 120 kg og volumet 0,5 m³. Den naturlege svingeperioden til kroppen var omlag 1,0 s.



Figur 4. Vertikal svinging av SVS utan styring (øvre diagram) og med fasthaldings-fasestyring (nedre diagram). Den tynnast teikna kurva gjeld innkomande bølge (nær i fase med eksitasjonskrafta), og den tjukkare kurva gjeld posisjonen til vassflata av SVSa. Einingane er meter på den vertikale skalaen og sekund på den horisontale. To vertikale strekar viser tidspunkt for maksimum eksitasjonskraft (streken til høgre) og for SVS-farten (streken til venstre). I tilfellet med fasestyring er desse to hendingane samtidige. Då er SVS-farten i fase med eksitasjonskrafta, og følgjeleg blir det større SVS-utsving.



Figur 5. Absorbert energi utan fasestyring (nedre stipla kurve), med fasthaldings-fasestyring (fullt teikna kurve) og med teoretisk ideell optimalstyring (øvre stipla kurve). Kurvene viser absorbert energi (i joule) akkumulert gjennom 5 sekund.



Figur 6. Måleresultat frå 25 sekund av eit eksperiment med fasthaldings-fasestyrt hivande bøye i ei uregelrett bølge.¹⁵

- a. To ulike målingar av bølga ved sida av bøyen.
Fullt teikna kurve: Vassflatehevinga (i m) målt med to-tråds-sensor.
Stipla kurve: Hydrodynamisk trykk (i 10^4 N/m^2) målt med ein trykksensor 0.70 m under middel-vassflata.
- b. Bølgehevinga og hivposisjonen av bøyen (begge i m).
- c. Hydrodynamisk trykk (i 10^3 N/m^2) og hivfart (i m/s).
- d. Energi levert inn på pumpa (i J). Den middels stigninga på kurva svarar til ein inngangseffekt til pumpa på 60 W.

For dei resultatane som er viste i figur 6, er den middels perioden for den uregelrette bølga vel 3 s, og såleis monaleg lengre enn den naturlege perioden. Av figuren kan ein sjå at låsingar og laussleppingar stort sett skjer til dei rette tidspunkta, men av figur 6b ser vi at låsingane skjedde litt i seinaste laget ved tidspunkta 6 og 21 s. Figur 6c viser at farten var maksimum litt før bølga ved 2 og 9 s og litt etter ved 12 og 22 s, noko som kan tyda på litt unøyaktig laussleppingstidspunkt. Figur 6d viser korleis den oppsamla energien blei bygt opp når bøyen svinga med rett fase, slik at farten var maksimum når eksitasjonskrafta frå bølga var nær maksimum. Stort sett viste eksperimentet vellukka fasestyling.

Referansar

- 1 Falnes, J. and Budal, K. (1978). Wave power conversion by point absorbers. *Norwegian Maritime Research*, Vol.6, No.4, pp. 2-11
- 2 Evans, D.V. (1976). A theory for wave-power absorption by oscillating bodies. *Journal of Fluid Mechanics*, 77, pp. 1-25.
- 3 Newman, J.N. (1976). The interaction of stationary vessels with regular waves. *Proc. 11th Symposium on Naval Hydrodynamics*, London, pp. 491-501.
- 4 Mei, C.C. (1976). Power extraction for water waves. *Journal of Ship Research*, Vol.21, No.4, pp.248-253.
- 5 Salter, S.H. (1974). Wave Power. *Nature*, Vol.249, pp.720-724.
- 6 Budal, K. and Falnes, J. (1975). A resonant point absorber of ocean-wave power. *Nature*, 256, 478-479. (With corrigendum in Vol.257, p.626).
- 7 Budal, K. and Falnes, J. (1980). Interacting point absorbers with controlled motion. In: *Power From Sea Waves* (B. Count, ed.), p. 381-399. Academic Press, London.
- 8 Falnes, J. (1994). Small is beautiful: How to make wave energy economic. *1993 European Wave Energy Symposium*, Proceedings of an International Symposium held in Edinburgh, Scotland, 21-24 July 1993, (ISBN 0-903640-84-8), pp.367-372 (1994).
- 9 Budal, K. and Falnes, J. (1977). Optimum operation of improved wave-power converter. *Marine Science Communications*, 3, 133-150
- 10 Salter, S.H., Jeffery, D.C. and Taylor J.R.M. (1976). The architecture of nodding duck wave power generators. *The Naval Architect*, Jan 1976, pp. 21-24
- 11 Salter, S.H. and Rampen W.H.S. (1994). The wedding-cake multi-eccentric radial piston hydraulic machine with direct computer control of displacement applied to wave energy devices. *1993 European Wave Energy Symposium*, Proceedings of an International Symposium held in Edinburgh, Scotland, 21-24 July 1993, (ISBN 0-903640-84-8), pp.89-105 (1994).
- 12 Naito, S. and Nakamura, S. (1985). Wave energy absorption in irregular waves by feedforward control system. IUTAM Symposium "Hydrodynamics of Ocean Wave Energy Utilization", edited by D.V. Evans and A.F. de O. Falcao (Springer-Verlag, 1985), pp. 269-280.
- 13 Falnes, J. : On non-causal impulse response functions related to propagating water waves. *Applied Ocean Research*, Vol. 17, pp.379-389 (1995).
- 14 Lillebekken, P.M. Privat opplysning, 1994.
- 15 Budal, K., Falnes, J., Hals, T., Iversen, L.C. and Onshus, T. (1981). Model experiment with a phase controlled point absorber. *Proceedings of Second International Symposium on Wave and Tidal Energy*, Cambridge, UK, 23-25 September 1981, p. 191-206, BHRA Fluid Engineering. Cranford, Bedford, UK.