



(12) **PATENT**

(19) NO

(11) **335452**

(13) **B1**

NORGE

(51) Int Cl.
G06Q 10/00 (2006.01)

Patentstyret

(21)	Søknadsnr	20053858	(86)	Int.inng.dag og søknadsnr	
(22)	Inng.dag	2005.08.18	(85)	Videreføringsdag	
(24)	Løpedag	2005.08.18	(30)	Prioritet	2004.08.30, FR, 04 09177
(41)	Alm.tilgj	2006.03.01			
(45)	Meddelt	2014.12.15			
(73)	Innehaver	Institut Francais du Petrole, 1 & 4, avenue de Bois-Préau, FR-92852 RUEIL MALMAISON CEDEX, Frankrike Isabelle Zabalza-Mezghani, 23-25 rue du Gué, FR-92500 RUEIL-MALMAISON, Frankrike Mathieu Feraille, 6 place du Maréchal Foch, FR-92000 NANTERRE, Frankrike Céline Scheidt, 13 rue Danielle Casanova, FR-92500 RUEIL MALMAISON, Frankrike Dominique Collombier, 6 avenue Foch, FR-54000 NANCY, Frankrike			
(72)	Oppfinner				
(74)	Fullmektig	Bryn Aarflot AS, Postboks 449 Sentrum, 0104 OSLO, Norge			
(54)	Benevnelse	Fremgangsmåte for modellering av produksjonen til et oljereservoar			
(56)	Anførte publikasjoner	US 6,108,608 A			
(57)	Sammendrag				

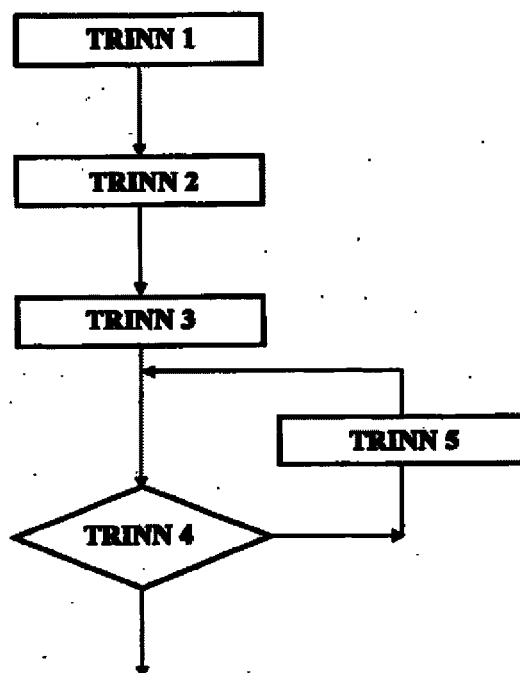
Fremgangsmåten gjør det mulig å simulere produksjonen fra et oljereservoar ved utførelse av de følgende trinn:

Trinn 1: konstruering av en strømningssimulator fra fysiske data som er målt i oljereservoaret.

Trinn 2: bestemmelse av en første analytisk modell som vedrører produksjonen fra reservoaret som en funksjon av tid ved å ta hensyn til parametere som har en innvirkning på produksjonen fra reservoaret, idet den første modell best justeres til et endelig antall av produksjonsverdier som er fremskaffet ved hjelp av reservoarsimulatoren.

Trinn 4: valg av minst én ny produksjonsverdi, idet denne nye verdi fremskaffes ved hjelp av reservoarsimulatoren.

Trinn 5: bestemmelse av en annen modell ved justering av den første modell, slik at den annen modell interpolerer den nye produksjonsverdi.



Den foreliggende oppfinnelse vedrører studiet og optimaliseringen av produksjonsplaner for oljereservoar. Den er tiltenkt for modellering av oppførselen til et oljereservoar for å være i stand til å sammenlikne flere produksjonsplaner og å definere en optimal plan som betrakter et gitt produksjonskriterium (oljeutvinning, vanninnstrømming, produksjonsmengde, ...).

Studiet av et reservoar omfatter to hovedtrinn.

Trinnet med karakterisering av reservoaret består i å bestemme en numerisk strømningsmodell eller strømningsimulator som er kompatibel med de virkelige data som er samlet inn på feltet. Ingeniører har adgang til kun en svært liten del av det reservoar de studerer (kjerneanalyse, logging, brønntester, ...). De må ekstrapolere disse nøyaktige data over hele oljefeltet for å konstruere den numeriske simuleringsmodell.

Trinnet med prediksjon av produksjonen bruker den numeriske simuleringsmodell til å estimere reservene og produksjonene som vil komme eller til å forbedre produksjonsplanen på stedet. Dette trinnet utføres ved hjelp av den numeriske simuleringsmodell som er konstruert fra mange forskjellige data, men som fremskaffes kun fra en svært liten del av reservoaret. Usikkerhetsbegrepet må følgelig hele tiden tas i betraktning.

For korrekt å karakterisere innvirkningen av hver usikkerhet på oljeproduksjonen, må det størst mulige antall produksjonsscenarioer testes, hvilket derfor krever et stort antall reservoarsimuleringer. Ved å betrakte den lange tid som er påkrevd for en strømningssimulering, er det klart at det ikke er tenkelig å teste alle de mulige scenarioer via den numeriske strømningsmodell. I denne sammenheng, kan bruk av den eksperimentelle designmetode gjøre det mulig å konstruere en forenklet modell av strømningssimulatoren som en funksjon av et redusert antall parametere. Eksperimentelle design gjør det mulig å bestemme antallet og lokaliseringen i rommet av parametrene av de simuleringer som skal utføres, for å ha en maksimum mengde av relevante data til den lavest mulige kostnad. Denne enkle modellen omformer oppførselen til en gitt respons (f.eks. 10 års kumulativ oljeproduksjon) som en funksjon av enkelte parametere. Dens konstruksjon fordrer et redusert antall av simuleringer tydeligere definert ved hjelp av en eksperimentell design.

Under trinnet med prediksjon av produksjonen, brukes den forenklede modell, fordi den er enkel og analytisk, og hver simulering som fremskaffes med denne modellen er derfor umiddelbar. Dette sparer betydelig tid. Bruk av denne modellen gjør det mulig for reservoaringeniøren å teste så mange scenarioer som han ønsker, uten at han må bry seg om den tid som er påkrevd for å utføre en numerisk strømningsmodellering.

De metoder som er presentert i fransk dokument FR-2,855,631 og FR-2,855,633 bruker forenklede modeller for å optimalisere produksjonen av et oljereservoar eller som en beslutningsstøtte for å forvalte et oljereservoar, ved tilstedeværelsen av usikkerheter.

Den forenklede modell som fremskaffes ved hjelp av eksperimentelle design innebærer at den respons som fremskaffes ved hjelp av modellen, er en lineær funksjon av de parametere som tas med i beregningen. I de fleste tilfeller er dette imidlertid ikke korrekt. Når det område som en parameter (permeabilitet, porøsitet, ...) kan utvikle seg innenfor er relativt begrenset, og dens bidrag er fornuftig, kan dens oppførsel antas å være lineær. Men når dette området blir for bredt og når bidraget til parameteren ikke lenger er lineært, påvirker linearitetshypotesen kunnskapen om oljereservoaret til feil oppfatning.

Det er derfor nødvendig å sette et kriterium som gjør det mulig å detektere ikke-lineariteter og å etablere en effektiv og hurtig metodologi som gjør det mulig på en effektiv måte å forutsi ikke-lineære responsoppførseler.

Den foreliggende oppfinnelse er ment for å modellere et oljereservoar ved hjelp av iterative justeringer, for på beste måte å reprodusere oppførselen til oljereservoaret, under styring av antallet simuleringer.

Oppsummering

Generelt uttrykt vedrører den foreliggende oppfinnelse en fremgangsmåte for simulering av produksjonen til et oljereservoar, hvor de følgende trinn utføres:

a) konstruering av en strømningsmodell fra fysiske data målt i oljereservoaret,

b) bestemmelse av en første analytisk modell som uttrykker produksjonen fra reservoaret som en funksjon av tid, ved å ta hensyn til parametere som har en innvirkning på produksjonen fra reservoaret, idet den første modell best justeres til

et endelig antall av produksjonsverdier som er fremkommet ved hjelp av strømningssimulatoren,

c) valg av minst én ny produksjonsverdi som er assosiert med et punkt som er lokalisert i et område av reservoaret valgt som en funksjon av ikke-lineariteten til reservoarets produksjon i dette område, idet denne nye verdi fremskaffes ved hjelp av strømningssimulatoren,

d) bestemmelse av en annen modell ved justering av den første modell, slik at responsen til den annen modell ved punktet korresponderer til den nye produksjonsverdi.

I henhold til oppfinnelsen, i trinn c), kan de følgende trinn utføres:

- bestemmelse av en delmodell som best justeres til det endelige antall av produksjonsverdier, unntatt for en testverdi som er valgt blant det endelige antall av produksjonsverdier,

- beregning av en prediksjonsresidue som er assosiert med testverdien ved utførelse av differansen mellom responsen i delmodellen og testverdien,

- beregning av den prediksjonsresidue som er assosiert med hver og en av prediksjonsverdiene ved gjentakelse av de forutgående to trinn ved at det til testverdien suksessivt tilordnes hver og en av de verdier som befinner seg i det endelige antall av produksjonsverdier,

- valg av den nye produksjonsverdi i et område av reservoaret nær det punkt som er assosiert med den produksjonsverdi som har den største prediksjonsresidue.

Den nye produksjonsverdi kan velges ved å ta gradienten til produksjonen ved det punkt som er assosiert med den produksjonsverdi som har den største prediksjonsresidue med i beregningen.

Videre kan en ny verdi velges i trinn c) og trinn d) kan utføres forutsatt at den største prediksjonsresidue er større enn en tidligere satt verdi.

Ifølge en variant av oppfinnelsen kan de følgende trinn utføres i trinn c):

- bestemmelse av en første krigingvarians for den første modell for det endelige antall produksjonsverdier som er fremskaffet ved hjelp av strømningssimulatoren,

- valg av et første pilotpunkt i reservoaret på det sted hvor den første krigingvarians er maksimum,

- bestemmelse av en annen krigingvarians for den første modell for det endelige antall av produksjonsverdier som er fremkommet ved hjelp av strømningssimulatoren og det første pilotpunkt,

5 - valg av et annet pilotpunkt i reservoaret på det sted hvor den annen krigingvarians er maksimum,

- tilordning av en verdi til hver og en av pilotpunktene ved utføring av de følgende fem operasjoner for hvert pilotpunkt:

• bestemmelse av en delmodell som best justeres til det endelige antall av produksjonsverdier og til den verdi som er assosiert med én av pilotpunktene, unntatt for en testverdi som er valgt blant det endelige antall av produksjonsverdier og den verdi som er assosiert med pilotpunkt,

• beregning av en prediksjonsresidue som er assosiert med testverdien ved utførelse av differansen mellom responsen i delmodellen og testverdien,

• beregning av den prediksjonsresidue som er assosiert med hver og en av delmodellresponsene ved gjentakelse av de forutgående to operasjoner ved at det til testverdien suksessivt tilordnes hver og en av de verdier som befinner seg i det sett som består av det endelige antall av produksjonsverdier og den verdi som er assosiert med pilotpunkt,

• beregning av summen av absoluttverdier av de prediksjonsresiduer som er beregnet for hver testverdi,

• tilordning av den verdi som minimaliserer denne summen til pilotpunkt,

- bestemmelse av en annen delmodell som best justeres til det endelige antall av produksjonsverdier og til verdiene av pilotpunktene,

- for hvert pilotpunkt, utførelse av differansen mellom responsen i den annen delmodell og responsen i den første modell,

- assosiering av den nye produksjonsverdi i trinn c) med det pilotpunkt som differansen er størst for.

Videre, i trinn d), kan den annen modell bestemmes ved justering av den første modell, slik at responsen i den annen modell ved det valgte pilotpunkt korresponderer til den nye produksjonsverdi, og videre til de verdier som er tilordnet til de andre pilotpunkter.

I henhold til en annen variant av oppfinnelsen, kan de følgende trinn utføres i trinn c):

- bestemmelse av en analytisk modell som uttrykker den deriverte av reservoarproduksjonen som en funksjon av tid, idet modellen best justeres til de deriverte ved de punkter som er assosiert med de produksjonsverdier som er brukt i trinn b),

- 5 - fra modellen som uttrykker den deriverte, valg av minst én ny produksjonsverdi som er assosiert med et punkt hvis respons i modellen som uttrykker den deriverte er null.

10 Det er mulig å velge en ny verdi i trinn c) og trinn d) kan utføres, forutsatt at prediksjonsresiduen for den nye verdi som er valgt er større enn en tidligere satt verdi.

 I henhold til oppfinnelsen, utføres de følgende trinn etter trinn d):

- 15 - bestemmelse av en tredje analytisk modell som uttrykker den deriverte av reservoarproduksjonen som en funksjon av tid, idet den tredje modell best justeres til de deriverte ved de punkter som er assosiert med det endelige antall av produksjonsverdier og de produksjonsverdier som er valgt i trinn c),

 - hvis responsen i den tredje analytiske modell ved det punkt som er valgt i trinn c) er større enn null, bestemmelse av et punkt som er assosiert med maksimumsverdien av responsen i den annen modell i nærheten av det punkt som er valgt i trinn c),

- 20 - hvis responsen i den tredje analytiske modell ved det punkt som er valgt i trinn c) er mindre enn null, bestemmelse av et punkt som er assosiert med minimumsverdien av responsen i den annen modell i nærheten av det punkt som er valgt i trinn c),

- 25 - bestemmelse av en ny produksjonsverdi ved hjelp av strømnings-simulatoren ved det punkt som er assosiert med den tidligere bestemte minimums- eller maksimumsverdi,

 - bestemmelse av en fjerde modell ved justering av den annen modell, slik at responsen i den fjerde modell korresponderer til den nye verdi som er bestemt i det forutgående trinn.

- 30 Ifølge oppfinnelsen kan trinn c) og d) gjentas.

 I trinn b), kan produksjonsverdiene velges ved bruk av en eksperimentell design.

I trinn b), kan den første modell justeres ved bruk av én av de følgende approksimasjonsmetoder: polynomial, approksimasjon, nevrale nettverk, støttevektormaskiner.

I trinn d), kan én av de følgende interpolasjonsmetoder brukes: kriging-metode og spline-metode.

Fremgangsmåten ifølge oppfinnelsen forsyner således reservoaringeniøren med en enkel og billig formalisme med henblikk på numerisk simulering for scenarioforvaltning og optimalisering av produksjonsplanen, som en støtte for beslutningstaking for å minimalisere risikoer.

Kort beskrivelse av figurene

Andre trekk og fordeler ved oppfinnelsen vil fremgå av en gjennomlesing av den følgende beskrivelse, med henvisning til de ledsagende figurer, hvor:

- fig. 1 skjematisk viser fremgangsmåten i henhold til oppfinnelsen,
- fig. 2 skjematisk viser en "kamel"-funksjon og approksimasjonen til denne funksjon ved hjelp av modeller som er fremkommet gjennom eksperimentelle design,
- fig. 3 skjematisk viser forbedringen i approksimasjonen til "kamel"-funksjonen ved implementering av oppfinnelsen.

Detaljert beskrivelse

Fremgangsmåten ifølge oppfinnelsen er vist med diagrammet på fig. 1.

Trinn 1: Konstruksjon av reservoarstrømningssimulatoren

Oljereservoaret modelleres ved hjelp av en numerisk reservoarsimulator. Reservoarsimulatoren eller strømningssimulatoren gjør det særlig mulig å beregne produksjonen av hydrokarboner eller av vann i tid som en funksjon av tekniske parametere, så som antallet lag i reservoaret, permeabiliteten til lagene, akviferkraften, posisjonen til oljebrønnene, osv. Videre beregner strømningssimulatoren den deriverte av produksjonsverdien ved det punkt som betraktes.

Den numeriske simulator konstrueres fra karakteristikkdata for oljereservoaret. For eksempel fremskaffes dataene ved hjelp av målinger som ut-

føres i laboratoriet på kjerner og fluider som er tatt fra oljereservoaret, ved logging, brønntester, osv.

Trinn 2: Approksimasjon til strømningssimulatoren

5 Da strømningssimulatoren er kompleks og beregningstiden er tidkrevende, konstrueres en forenklet modell av oppførselen til oljereservoaret.

Parametere som har en innvirkning på hydrokarbon- eller vannproduksjonsprofilene for reservoaret velges. Valg av parametrene kan gjøres enten gjennom fysisk kunnskap om oljereservoaret, eller ved hjelp av en sensitiv-

10 tetsanalyse. Det er f.eks. mulig å bruke en statistisk Student- eller Fischer-test.

Enkelte parametere kan være iboende for oljereservoaret. For eksempel, kan de følgende parametere betraktes: en permeabilitetsmultiplikator for visse reservoarlag, akviferkraften, restoljemetningen etter vanninjeksjon.

Enkelte parametere kan korrespondere til valgmuligheter for utvikling av reservoaret. Disse parametere kan være posisjonen til en brønn,

15 kompletteringsnivået, boreteknikken.

Punkter som de numeriske strømningssimuleringer vil bli utført for, velges i den eksperimentelle domene. Disse punkter brukes til å konstruere en forenklet modell som best reproducerer reservoarstrømningssimulatoren. Disse punkter

20 velges ved hjelp av den eksperimentelle designmetode, hvilken gjør det mulig å bestemme antallet og lokaliseringen av simuleringene som skal utføres, for å ha en maksimum mengde av informasjon til den lavest mulige kostnad, og således å bestemme en pålitelig modell som best uttrykker produksjonsprofilen. Det kan

25 påpekes at valg av denne eksperimentelle plan er svært viktig: den initiale eksperimentelle design spiller en vesentlig rolle i utarbeidelsen av modelleringen av den første modell, og resultatene avhenger sterkt av mønsteret for eksperimenteringene.

Valg av simuleringspunktene kan gjøres ved hjelp av forskjellige eksperimentelle typer av design, f.eks. faktorielle design, komposittdesign, Latin

30 hyperkubus, design med maksimum distanse, osv. Det er mulig å bruke de eksperimentelle design som er beskrevet i følgende dokumenter:

1. Dejean, J.P. og Blanc, G., "Managing uncertainties on production predictions using integrated statistical methods", SPE 56696, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, USA, 3-6 oktober, 1999.
2. Box, G.E.P. og Hunter, J.S., "The 2k-p fractional factorial designs", Part I, Technometrics, 2, 311-352, 1961a.
3. Box, G.E.P. og Hunter, J.S., "The 2k-p fractional factorial designs", Part II, Technometrics, 3, 449-458, 1961b.
4. Box, G.E.P. og Wilson, K.B., "On the experimental attainment of optimum conditions", Journal of the Royal Statistical Society, Series B, 13, 1-45.
5. Draper, N. R., "Small composite designs", Technometrics, 27, 173-180, 1985.
6. Atkinson, A.C. og Donev, A.N., "Optimum experimental designs", Oxford University press, 1992.

Etter konstruksjonen av denne første eksperimentelle design og når de numeriske simuleringer utføres, brukes en approksimasjonsmetode til å bestemme en første modell som gir en tendens for oppførselen til responsfunksjonen, dvs. som approksimeres til strømningssimulatoren.

Den første modell uttrykker et produksjonskriterium som studeres over tid, idet dette kriterium uttrykkes som en funksjon av de valgte parametere. Produksjonskriteriet kan være oljeutvinningen, vanninnstrømmingen, produksjonsmengden. Den første analytiske modell konstrueres ved bruk av de tidligere valgte verdier av dette kriterium som er fremskaffet ved hjelp av strømningssimulatoren.

Ved henvisning til approksimasjonsmetodene, betrakter vi polynomer av den første eller annen orden, nevrale nettverk, støttevektormaskiner eller eventuelt polynomer av en høyere orden enn to. Valg av denne modell avhenger på den ene side av det maksimale antall av simuleringer som brukeren kan se for seg, og på den annen side av den initiale eksperimentelle design som brukes.

Trinn 3: Justering av den første modell

Det kan være en differanse mellom den produksjonsverdi som gis av den første analytiske modell som fremskaffes i trinn 2 og de simulerte produksjonsverdier som brukes til å konstruere denne første modell.

I dette tilfelle bestemmer vi residuene ved de forskjellige simuleringspunkter. Residuene korresponderer til differansen mellom responsen i den første

modell og den verdi som fremskaffes ved hjelp av reservoarstrømnings-simulatoren. Deretter interpoleres residuene. En hvilken som helst n-dimensjonal interpolasjonsmetode er egnet. Kriging- eller spline-metoden kan særlig brukes. Disse metoder er forklart i boken med tittel "Statistics for spatial Data" av Cressie, N., Wiley, New York 1991.

Residueinterpolasjonsstrukturen egner seg godt til denne sekvensielle løsningsmøte, fordi den deles opp i to deler: en lineær modell, som korresponderer til den første modell som er bestemt i trinn 2, og et "korrigerings"-uttrykk som gjør det mulig å legge til differansen mellom prediksjonen i den første modell og simuleringspunktet. I tilfelle hvor den analytiske modell skulle være tilfredsstillende, er det ikke nødvendig å addere dette "korrigerings"-uttrykket. I det motsatte tilfelle gjør det det mulig å interpolere responsene, og således å ta hensyn til ikke-linearitetene som detekteres ved overflaten.

En justert annen modell bestemmes således ved å addere resultatene av interpoleringene av residuene til den første modell som er bestemt i trinn 2.

Trinn 4: Modellprediktivitetstest og valg av ytterligere simuleringspunkter

Ved dette trinn av modelleringsprosedyren interpolerer den annen modell simuleringene eksakt, justering av responsfunksjonen er derfor optimal. Betrakt interpolasjonsmetoden er eksakt, de "konvensjonelle" residuer er null. Ifølge oppfinnelsen er vi derfor interessert i prediksjonsresiduene. Vi gransker derfor prediktiviteten for modellen for punktene på utsiden av den eksperimentelle design. Prediksjonene må være så nøyaktige som mulig. Det utføres følgelig en modellprediktivitetstest for å evaluere approksimasjonens kvalitet, for å bedømme om hvorvidt en forbedring er nødvendig ved å addere nye punkter til den initiale design.

To kriterier er involvert i prediktivitetstesten:

- a priori prediktivitetsberegning med beregning av prediksjonsresiduer.
- a posteriori prediktivitetsberegning med bruk av bekreftelsespunkter.

A priori prediktivitet

Prediksjonsresiduene er de residuer som fremskaffes ved et punkt i designen ved utførelse av justering av den første modell uten dette punkt. Fjerning av et punkt og ny estimering av modellen vil gjøre det mulig å bestemme om hvor-

vidt dette punkt (eller den sone av designen som er nær dette punkt) tilveiebringer avgjørende informasjon eller ikke. Beregning av disse prediksjonsresiduer utføres for hvert punkt i den initiale eksperimentelle design. I nærheten av de punkter som betraktes som de minst prediktive i den inneværende design, dvs. de punkter som har den største prediksjonsresidue, simuleres nye punkter. En del-samplingssone defineres derfor i nærheten av punktene. Addering av disse punkter kan betinges av den kjensgjerning at residuene er større enn en verdi som settes av brukeren.

Størrelsen av denne del-samplingssonen kan defineres ved bruk av informasjonen om gradientene til produksjonen ved punktene og/eller verdien av prediksjonsresiduene. Faktisk uttrykker en høy gradientverdi en høy variasjon av responsen. Det kan være informativt å addere et nytt punkt nær det eksisterende. På den annen side viser en lav gradientverdi i en gitt retning at det ikke er noen irregulariteter i denne retningen. Det er derfor ikke nødvendig å undersøke et bredt variasjonsområde i denne retning. Tvert imot, variasjonsområdet for én av parametrene er enda bredere når verdien av gradienten er høy i denne retning. Denne løsningsmåten gjør det mulig å eliminere visse retninger (hvor verdien av gradienten ikke er signifikant) og således redusere antallet simuleringer som skal utføres. Denne del-samplingen kan f.eks. være et resultat av konstruksjonen av en ny eksperimentell design som er definert i denne sonen. Valg av denne eksperimentelle design (faktoriell design, komposittdesign, Latin hyperkubus) er et resultat av det nødvendige kompromiss mellom kostnader og kvalitet ved modelleringen.

Alternativt kan pilotpunktmetoden brukes til å forbedre den annen modell.

For et gitt antall eksperimenteringer er det et stort antall estimatorer (eksakte interpolatorer) som går gjennom alle eksperimenteringene og som angår den romlige struktur (forventning og kovarians) for prosessen. I denne klasse av estimatorer som angår dataene, søker vi den estimator som maksimerer den a priori prediktivitet. For å gå gjennom denne klasse av estimatorer, adderer vi fiktiv informasjon, dvs. at vi adderer pilotpunkter til de simulerte eksperimenteringer. Disse pilotpunkter anses deretter å være data, selv om ingen simulering har blitt utført og de vil gjøre det mulig å gå gjennom alle de estimatorer som passerer gjennom alle eksperimenteringene. Målet er å velge den interpolator som maksi-

merer den a priori prediktivitetskoeffisient i modellen, dvs. at pilotpunktene er slik posisjonert at den maksimale prediktivitsrealisering fremkommer.

Lokaliseringen av et pilotpunkt bestemmes ved å ta de følgende to kriterier med i beregningen:

5 - kapasiteten til pilotpunkt til å redusere differansen mellom observasjonene og resultatene av numeriske strømningssimuleringer.

- bidraget til pilotpunkt til reduksjonen av usikkerhetene i den inneværende approksimasjonsmodell.

10 For at dette valget skal kunne gjøres på en optimal måte, må innvirkningen fra et mulig pilotpunkt på hver og en av disse to kriterier kvantifiseres.

For å fjerne prediksjonsusikkerheten på lite representerte steder, er det interessant å påføre lokale perturbasjoner på sonene med en høy krigingvarians (fravær av observasjoner). Et pilotpunkt plasseres således der hvor krigingvariansen er maksimum. Metoder til å bestemme krigingvariansen er beskrevet i boken
15 med tittel "Statistics for spatial Data" av Cressie, N., Wiley, New York 1991.

De følgende operasjoner utføres for å bestemme lokaliseringen av et pilotpunkt:

20 - bestemmelse av krigingvariansen i usikkerhetsdomenen i den annen modell som er bestemt i trinn 3 for det endelige antall av produksjonsverdier som fremskaffes ved hjelp av strømningssimulatoren,

- plassering av et første pilotpunkt der hvor krigingvariansen er maksimum.

25 Vi antar at, i tillegg til de produksjonsverdier som er fremskaffet ved hjelp av strømningssimulatoren, et visst antall av pilotpunkter allerede har blitt posisjonert i usikkerhetsdomenen og at nye pilotpunkter må posisjoneres for å forbedre modellens prediktivitet. De eksisterende pilotpunkter anses da som lokale data med null varians. Det er for å ta hensyn til lokaliseringen av allerede eksisterende punkter at vi optimaliserer lokaliseringen av pilotpunktene sekvensielt.

Således, for å bestemme lokaliseringen av et annet pilotpunkt, utføres de følgende operasjoner:

30 - bestemmelse av krigingsvariansen for den første modell for det endelige antall av produksjonsverdier som fremskaffes ved hjelp av strømningssimulatoren og det første pilotpunkt,

- bestemmelse av lokaliseringen av et annet pilotpunkt der hvor krigingvariansen er maksimum.

Flere pilotpunkter kan adderes ved gjentakelse av de forutgående to operasjoner.

5 Man velger fortrinnsvis å addere et antall pilotpunkter som er mindre enn eller lik antallet av reelle eksperimenter, for ikke å perturbere modellen. Så snart den optimale lokalisering av pilotpunktene er bestemt, må en "fiktiv" responsverdi tilordnes ved disse punkter.

10 Da målet med adderingen av pilotpunktene er å forbedre den a priori prediktivitet av modellen, må vil definere verdien av pilotpunktene fra en objektiv funksjon som måler denne prediktivitet. Da kriging er en eksakt interpolasjonsmetode, er de "konvensjonelle" residuer null. De tilveiebringer derfor ingen informasjon om prediktiviteten og følgelig vurderes prediksjonsresiduene. Det det vises til som a priori prediktivitet er beregningen av prediksjonsresiduene ved hvert

15 punkt i den initiale eksperimentelle design. Prediksjonsresiduene er de residuer som fremskaffes ved et punkt i den initiale eksperimentelle design ved justering av den første modell uten dette punkt.

De følgende trinn kan utføres for å bestemme den produksjonsverdi som er assosiert med én av de pilotpunkter hvis lokalisering tidligere har blitt bestemt:

20 - bestemmelse av en delmodell som justeres til det endelige antall av produksjonsverdier og til den verdi som er assosiert med pilotpunkt, unntatt for en testverdi som er valgt blant det endelige antall av produksjonsverdier og den verdi som er assosiert med pilotpunkt,

25 - beregning av en prediksjonsresidue som er assosiert med testverdien ved utførelse av differansen mellom delmodellresponsen og denne testverdien,

30 - beregning av den prediksjonsresidue som er assosiert med hver respons i prediksjonsdelmodellen ved gjentakelse av de forutgående to trinn ved at det til testverdien suksessivt tilordnes hver og en av de verdier som befinner seg i det endelige antall av produksjonsverdier og den verdi som er assosiert med pilotpunkt,

- beregning av summen av absoluttverdier eller av kvadratene av prediksjonsresiduene som er bestemt for hver testverdi og

- tilordning av den verdi som minimaliserer denne sum til pilotpunkt.

Fjerning av et punkt og ny estimering av modellen gjør det mulig å bestemme om hvorvidt dette punkt eller sonen i den eksperimentelle domene nær dette punkt tilveiebringer avgjørende informasjon eller ikke. Beregning av prediksjonsresiduen utføres i nærheten av de pilotpunkt som skal optimaliseres.

5 Vi setter initiale verdier for pilotpunktene, deretter betrakter vi disse data som reelle, og vi varierer verdien av pilotpunkt for å fremskaffe en modell som er så prediktiv som mulig, dvs. at vi ønsker å minimalisere den midlere prediksjonsfeil for modellen.

Bestemmelse av den optimale verdi for pilotpunkt utføres således for å
10 minimalisere den midlere prediksjonsfeil for modellen gjennom hele den usikre domene. Tilsvarende, kan denne bestemmelse av den optimale verdi av pilotpunkt utføres for å minimalisere den lokale prediksjonsfeil i modellen (dvs. i nærheten av pilotpunkt, uten hensyn til de andre prediksjonsfeil).

Så snart verdien og posisjonen til pilotpunktene er bestemt, tester vi
15 modellens sensitivitet overfor de nye punkter som er tilføyd, deretter utføres simuleringer ved de punkter som synes å være svært sensitive i approksimasjonen. Vi sammenlikner derfor den estimator som er fremskaffet uten pilotpunkter med den estimator som er fremskaffet ved hjelp av kriging med pilotpunkter (dvs. maksimum prediktivrealisasjon).

20 De punkter som oppviser den største uoverensstemmelse, dvs. med den største differanse, omformer en høy approksimasjonsinstabilitet. Det er følgelig essensielt å forbedre approksimasjonskvaliteten på disse steder. Simuleringen som korresponderer til punktene med den største uoverensstemmelse utføres således for å stabilisere approksimasjonen.

25 For å velge de pilotpunkter som en simulering vil bli utført for, kan de følgende trinn utføres:

- bestemmelse av en delmodell fra pilotpunktene og det endelige antall av produksjonsverdier,

- for hvert pilotpunkt, beregning av differansen mellom responsen for denne
30 delmodellen og responsen for den annen modell som er bestemt i trinn 3.

I henhold til en første variant:

Valg av det pilotpunkt som differansen mellom responsen for delmodellen og responsen for den annen modell er størst for. Det er det punkt som er valgt for

å forbedre den første modell, de andre pilotpunkter ignoreres deretter i resten av prosedyren.

Ifølge en annen variant:

5 Valg av én eller flere pilotpunkter som prediktiviteten er dårligst for (mindre enn en terskel under 1), siden denne lave prediktivitet uttrykker en høy sensitivitet i punktet. I resten av prosedyren tar vi på den ene side hensyn til de produksjonsverdier som er assosiert med de pilotpunkter som er valgt, idet disse produksjonsverdier fremskaffes ved hjelp av strømmingssimulatoren, og på den annen side de produksjonsverdier som er assosiert med de andre pilotpunkter som har
10 en prediktivitet som er bedre, idet disse produksjonsverdier korresponderer til de verdier som estimeres i henhold til den ovennevnte av priori prediktivitet.

Ifølge den annen variant, hvis prosedyren gjentas, så må den lokale prediktivitet ved de ikke-simulerte pilotpunkter deretter evalueres igjen, for å sørge for at denne verdien fremdeles korresponderer til en tilfredsstillende stabilisering.
15 Hvis dette ikke er tilfelle, blir det ikke-simulerte pilotpunkt ikke lenger betraktet i den nye estimering.

Tilføyelsen av disse nye simuleringer gjør det da mulig å studere residuene. Det som det her vises til som residuer er, for hvert pilotpunkt, differansen mellom den simulerte verdi og den verdi som fremkommer ved optimalisering av
20 pilotpunktene.

Som tidligere, hvis residuene er for store, er det en uoverensstemmelse mellom den inneværende approksimasjon med pilotpunktene og simuleringene; dette uttrykker en prediktivitetsdefekt ved modellen. I dette tilfelle må den inneværende modell forbedres, hvilket igjen krever nye simuleringer. Én eller flere nye
25 iterasjoner må derfor utføres.

På den annen side, hvis residuene er små, er prediksjonen ved disse punkter god, og modellen synes derfor å være prediktiv i domener som betraktes. Den globale prediktivitet for modellen må imidlertid bekreftes, vi foreslår derfor tilføyelse av bekreftelsespunkter. Disse nye simuleringer gjør det mulig å bestemme
30 om hvorvidt iterasjonsprosedyren må fortsette eller ikke.

A posteriori prediktivitet

Det er mulig å tilføye bekreftelsespunkter, dvs. produksjonsverdier som fremskaffes ved hjelp av strømningsmodulatoren som ble konstruert i trinn 1, til den eksperimentelle design ve å granske den deriverte av produksjonsverdiene.

5 Faktisk kan et simuleringsaddisjonskriterium baseres på: verdien av den deriverte av de produksjonsverdier som fremskaffes ved hjelp av strømningsmodulatoren, direkte identifikasjon av punkter hvis produksjonsverdi er maksimum eller direkte identifikasjon av punkter hvis produksjonsverdi er minimum.

10 Vi bestemmer en modell som nærmer seg verdiene av de deriverte ved de punkter som er valgt ved hjelp av den eksperimentelle design i trinn 2. Deretter tilføyes et nytt simuleringspunkt på det sted hvor responsen for den deriverte modell er null, forutsatt at dette punkt har en tilstrekkelig avstand fra de simuleringer som allerede er utført. Disse bekreftelsespunkter gjør det mulig å teste prediktiviteten for den annen modell, i denne nye utforskede sone. Hvis de prediksjonsresiduer 15 som er beregnet ved de nye valgte punkter overstiger en verdi som er satt av brukeren, brukes disse nye punkter til å utføre et nytt interpolasjonstrinn.

Tilføyelse av simuleringer til den inneværende plan, uansett om hvorvidt dette er følgen av en mangel på a priori eller a posteriori prediktivitet, gjør det mulig å øke kvaliteten og kvantiteten av informasjon om responsfunksjonen, for å 20 fremskaffe en mer representativ sampling.

Trinn 5: Konstruksjon og justering av en tredje modell

Fra den annen modell, som er bestemt i trinn 2, bestemmer vi residuene ved de simuleringspunkter som er valgt i trinn 4. Residuene korresponderer til 25 differansen mellom responsen for den første modell og den simuleringsverdi som er fremskaffet ved hjelp av reservoarets strømningsmodulator. Deretter interpoleres residuene. En hvilken som helst n-dimensjonal interpolasjonsmetode er egnet. For eksempel kan kriging- eller spline-metoden brukes.

30 Residue-interpolasjonsstrukturen deles opp i to deler: den første modell som er bestemt i trinn 2, og et "korrigerings"-uttrykk som gjør det mulig å legge til differansen mellom prediksjonen i den første modell og den eller de nye simuleringer som er valgt i trinn 4. Den nye simulering gjør det mulig å interpolere

responsene, og således ta hensyn til de ikke-lineariteter som detekteres ved overflaten.

En justert annen modell bestemmes ved å addere resultatene fra interpolasjonen av residueene til den første modell som er bestemt i trinn 2.

5

Iterasjon

Det er videre, i henhold til oppfinnelsen, mulig å forbedre modellen iterativt ved gjentakelse av trinn 4 og 5.

I dette tilfelle, under det nye trinn 4, adderes simuleringspunkter i forhold til den modell som er bestemt under det forutgående trinn 5. Under det nye trinn 5, blir en ny modell konstruert og justert med utgangspunkt fra de simuleringspunkter som er valgt i det nye trinn 4, og ved justering av den første modell som er bestemt i trinn 2.

15 Trinn 6: Søking av infleksjonspunkter

Hvis den a posteriorimetode har blitt brukt i trinn 4, kan modellen som er bestemt i trinn 5 forbedres ved tilføyelse av simuleringspunkter ved utførelse av de følgende trinn:

- bestemmelse av en analytisk modell som uttrykker den deriverte av reservoarproduksjonen som en funksjon avtid, idet modellen best justeres til de deriverte ved de punkter som er assosiert med de produksjonsverdier som er valgt i trinn 2 og 4,

- sjekking at, ved det punkt som er tilføyd i trinn 4, responsen for den analytiske modell som uttrykker den deriverte av reservoarproduksjonen er null,

25 hvis responsen er større enn 0, bestemmelse av maksimum av den tredje modell som er bestemt i trinn 5 i nærheten av det punkt som er tilføyd i trinn 4,

hvis responsen er mindre enn 0, bestemmelse av minimum av den tredje modell som er bestemt i trinn 4 i nærheten av det punkt som er tilføyd i trinn 4,

- bestemmelse av verdien av minimum eller av maksimum ved hjelp av strømningssimulatoren,

30

- bestemmelse av en ny modell ved justering av den tredje modell, slik at responsen i den nye modell korresponderer til den nye minimums- eller maksimumsverdi som er fremkommet ved hjelp av strømningssimulatoren.

Fordelen med fremgangsmåten i henhold til oppfinnelsen illustreres heretter i forbindelse med fig. 2 og 3.

Den sterkt ikke-lineære analytiske funksjon som studeres omfatter to parametre x og y , for bedre å visualisere resultatene. Det er "kamel"-funksjonen som karakteriseres ved hjelp av sin høye ikke-linearitet. Uttrykket i denne funksjonen er som følger:

$$F(x, y) = 4x^4 - \frac{21}{10}x^4 + \frac{1}{3}x^6 + xy - 4y^2 + 4y^4$$

Den er grafisk representert i enhetskuben $[-1, 1]^2$ som bærer referanse A på fig. 2.

Referanse B på fig. 2 er grafen for estimeringen av "kamel"-funksjonen ved hjelp av en lineær modell som er fremkommet fra en fire-simulering faktoriell design. Referanse C på fig. 2 er grafen for estimeringen av "kamel"-funksjonen ved hjelp av et polynom av den annen orden som er fremskaffet fra en 9-simulering sentrert kompositt design.

Forskjellen for resultatene mellom, på den ene side, den funksjon som skal modelleres (kubus A) og, på den annen side, modellene (kubusene B og C) bekrefter grensene for teorien for konvensjonelle eksperimentelle design for modellering av ikke-lineære funksjoner.

Fig. 3 illustrerer optimaliseringen, i henhold til vår oppfinnelse, av modellen som nærmer seg "kamel"-funksjonen. Den funksjon som er representert i enhetskubusen $[-1, 1]^2$ som bærer referanse D fremkommer ved utførelse av trinn 2 og 3 fra en latin hyperkubus med en initial maksimin distanse som inneholder ni tester. Deretter, de funksjoner som er representert i enhetskubusen $[-1, 1]^2$ som bærer referanser E, F og G fremskaffes ved justering av den funksjon som er fremskaffet fra en latin hyperkubus og ved tilføyelse av sju simuleringspunkter. Trinn 4 og 5 gjentas tre ganger.

Ved sammenlikning av funksjon G på fig. 3 med "kamel"-funksjonen A på fig. 2, legger vi merke til at kurvene er relativt nær hverandre, idet ikke-linearitetene klart har blitt detektert. Den evolutive fremgangsmåte i henhold til denne oppfinnelse er egnet og resultatene er svært tilfredsstillende.

PATENTKRAV

1. Fremgangsmåte for simulering av produksjonen fra et oljereservoar, karakterisert ved at de følgende trinn utføres:

5 a) konstruering av en strømningsimulator fra fysiske data som er målt i oljereservoaret,

b) bestemmelse av en første analytisk modell som uttrykker produksjonen fra reservoaret som en funksjon av tid, ved å ta hensyn til parametere som har en innvirkning på produksjonen fra reservoaret, idet den første modell best justeres til et endelig antall av produksjonsverdier som er fremskaffet ved hjelp av strømnings-
10 ningssimulatoren,

c) valg av minst én ny produksjonsverdi som er assosiert med et punkt som er lokalisert i et område av reservoaret som er valgt som en funksjon av ikke-lineariteten til reservoarproduksjonen i dette område, idet denne nye verdi
15 fremskaffes ved hjelp av strømningssimulatoren,

d) bestemmelse av en annen modell ved justering av den første modell, slik at responsen fra den annen modell ved punktet korresponderer til den nye produksjonsverdi.

20 2. Fremgangsmåte som angitt krav 1, karakterisert ved at, i trinn c), de følgende trinn utføres:

- bestemmelse av en delmodell som best justeres til det endelige antall av produksjonsverdier, unntatt for en testverdi som er valgt blant det endelige antall av produksjonsverdier,

25 - beregning av en prediksjonsresidue som er assosiert med testverdien ved utførelse av differansen mellom responsen for delmodellen og testverdien,

- beregning av den prediksjonsresidue som er assosiert med hver og en av prediksjonsverdiene ved gjentakelse av de forutgående to trinn ved at det til testverdien suksessivt tilordnes hver og en av de verdier som befinner seg i det
30 endelige antall av produksjonsverdier,

- valg av den nye produksjonsverdi i et område av reservoaret nær det punkt som er assosiert med den produksjonsverdi som har den største prediksjonsresidue.

3. Fremgangsmåte som angitt i krav 2,
karakterisert ved at den nye produksjonsverdi velges ved å ta hensyn
til produksjonsgradienten ved det punkt som er assosiert med den produksjons-
verdi som har den største prediksjonsresidue.
- 5
4. Fremgangsmåte som angitt i et av kravene 2 og 3,
karakterisert ved at en ny verdi velges i trinn c) og trinn d) utføres,
forutsatt at den største prediksjonsresidue er større enn en tidligere satt verdi.
- 10
5. Fremgangsmåte som angitt i krav 1,
karakterisert ved at, i trinn c), de følgende trinn utføres:
- bestemmelse av en første krigingvarians for den første modell for det
endelige antall av produksjonsverdier som er fremkommet ved hjelp av strøm-
ningssimulatoren,
 - 15 - valg av et første pilotpunkt i reservoaret på det sted hvor den første
krigingvarians er maksimum,
 - bestemmelse av en annen krigingvarians for den første modell for det
endelige antall av produksjonsverdier som er fremkommet ved hjelp av strøm-
ningssimulatoren og det første pilotpunkt,
 - 20 - valg av et annet pilotpunkt i reservoaret på det sted hvor den annen
krigingvarians er maksimum,
 - tilordning av en verdi til hver og et av pilotpunktene ved utførelse av de
følgende fem operasjoner for hvert pilotpunkt:
 - bestemmelse av en delmodell som best justeres til det endelige antall av
25 produksjonsverdier og til den verdi som er assosiert med ett av pilotpunktene,
unntatt for en testverdi som er valgt blant det endelige antall av produksjonsverdier
og den verdi som er assosiert med pilotpunkt,
 - beregning av en prediksjonsresidue som er assosiert med testverdien
ved utførelse av differansen mellom responsen i delmodellen og testverdien,
 - 30 • beregning av den prediksjonsresidue som er assosiert med hver og en
av delmodellresponsene ved gjentakelse av de forutgående to operasjoner ved at
det til testverdien suksessivt tilordnes hver og en av de verdier som befinner seg i

det sett som består av det endelige antall av produksjonsverdier og den verdi som er assosiert med pilotpunkt,

- beregning av summen av absoluttverdier av de prediksjonsresiduer som er beregnet for hver testverdi,

5 • tilordning av den verdi som minimaliserer denne summen til pilotpunkt,

- bestemmelse av en annen delmodell som best justeres til det endelige antall av produksjonsverdier og til verdiene av pilotpunktene,

- for hvert pilotpunkt, utførelse av differansen mellom responsen i den annen delmodell og responsen i den første modell,

10 - assosiering av den nye produksjonsverdi i trinn c) med det pilotpunkt som differansen er størst for.

6. Fremgangsmåte som angitt i krav 5,

15 k a r a k t e r i s e r t v e d a t, i trinn d), den annen modell bestemmes ved justering av den første modell, slik at responsen i den annen modell ved pilotpunkt som er valgt korresponderer til den nye produksjonsverdi, og, videre, til den verdi som er tilordnet til de andre pilotpunkter.

7. Fremgangsmåte som angitt i et av kravene 1 til 6, hvor, i trinn c), de

20 følgende trinn utføres:

- bestemmelse av en analytisk modell som uttrykker den deriverte av reser-voarproduksjonen som en funksjon av tid, idet modellen best justeres til de deri-verte ved de punkter som er assosiert med de produksjonsverdier som brukes i trinn b),

25 - fra modellen som uttrykker den deriverte, valg av minst én ny produk-sjonsverdi som er assosiert med et punkt hvis respons i modellen som uttrykker den deriverte er null.

8. Fremgangsmåte som angitt i krav 7,

30 k a r a k t e r i s e r t v e d a t en ny verdi velges i trinn c) og trinn d) utføres, forutsatt at prediksjonsresiduen for den nye verdi som velges er større enn en tidligere satt verdi.

9. Fremgangsmåte som angitt i et av kravene 7 og 8,

karakterisert ved at, etter trinn d), de følgende trinn utføres:

- bestemmelse av en tredje analytisk modell som uttrykker den deriverte av reservoarproduksjonen som en funksjon av tid, idet den tredje modell best justeres til de deriverte ved de punkter som er assosiert med det endelige antall av produksjonsverdier og de produksjonsverdier som velges i trinn c),

- hvis responsen i den tredje analytiske modell, ved det punkt som er valgt i trinn c) er større enn null, bestemmelse av et punkt som er assosiert med maksimumsverdien av responsen i den annen modell i nærheten av det punkt som er valgt i trinn c),

- hvis responsen i den tredje analytiske modell ved det punkt som velges i trinn c) er mindre enn null, bestemmelse av et punkt som er assosiert med minimumsverdien av responsen i den annen modell i nærheten av det punkt som er valgt i trinn c),

- bestemmelse av en ny produksjonsverdi ved hjelp av strømningssimulatoren ved det punkt som er assosiert med den tidligere bestemte minimums- eller maksimumsverdi,

- bestemmelse av en fjerde modell ved justering av den annen modell, slik at responsen i den fjerde modell korresponderer til den nye verdi som bestemmes i det forutgående trinn.

10. Fremgangsmåte som angitt i et av de foregående krav,

karakterisert ved at trinnene c) og d) gjentas.

11. Fremgangsmåte som angitt i et av de foregående krav,

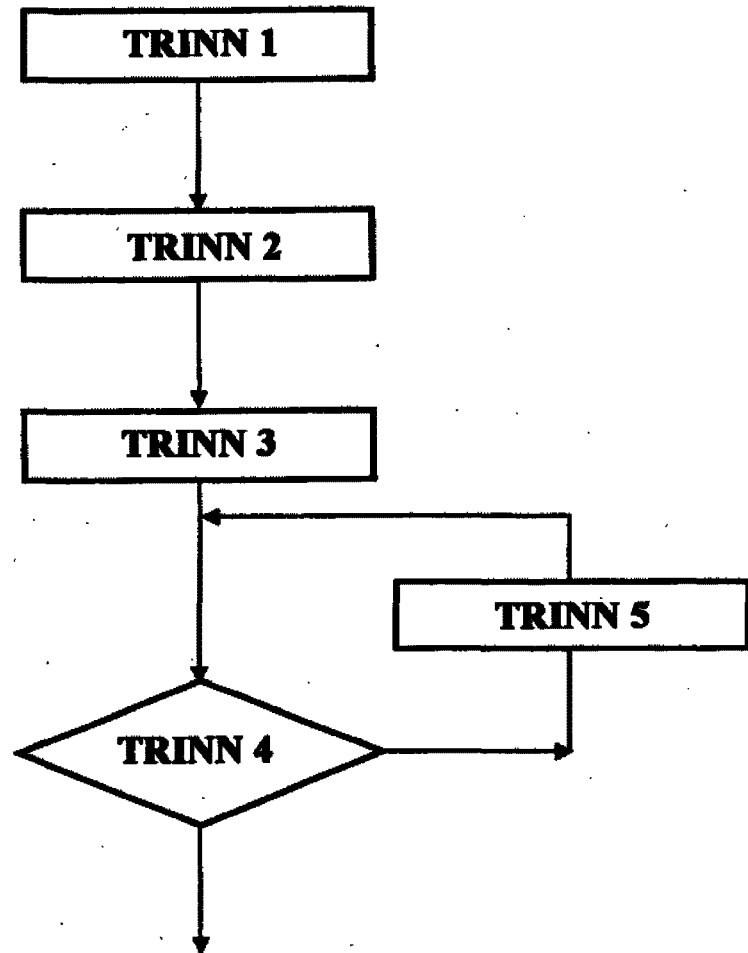
karakterisert ved at, i trinn b), produksjonsverdiene velges ved bruk av en eksperimentell design.

12. Fremgangsmåte som angitt i et av de foregående krav,

karakterisert ved at, i trinn b), den første modell justeres ved bruk av én av de følgende approksimasjonsmetoder: polynomial approksimasjon, nevrale nettverk, støttevektormaskiner.

13. Fremgangsmåte som angitt i et av de foregående krav, karakterisert ved at, i trinn d), én av de følgende interpolasjonsmetoder brukes: krigingmetode og splinemetode.

1/2

**FIG.1**

2/2

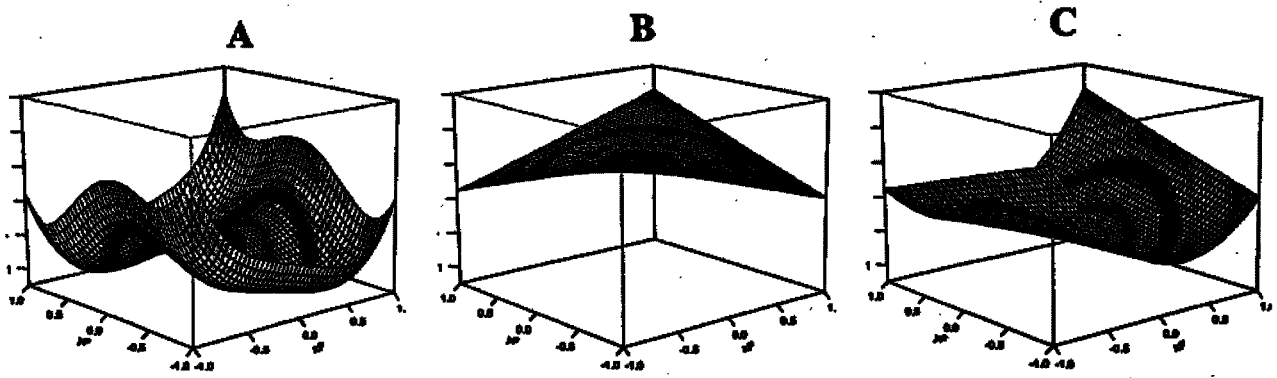


FIG.2

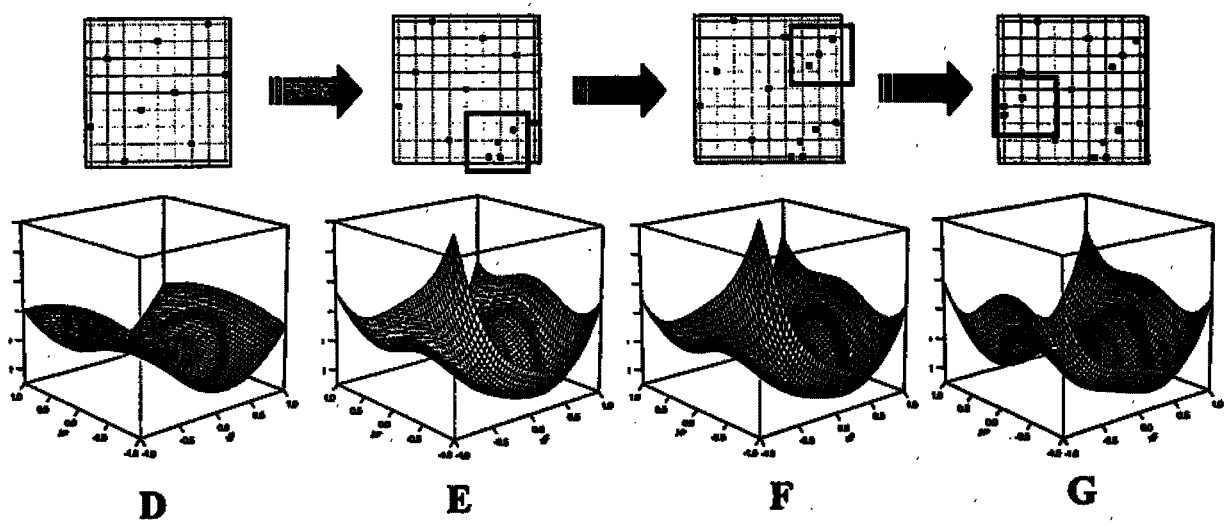


FIG.3