



MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE
UNIVERSITATEA DIN PETROȘANI
ȘCOALA DOCTORALĂ



TEZĂ DE DOCTORAT

-REZUMAT-

**CERCETĂRI PRIVIND STUDIUL PRIN MODELARE ȘI
SIMULARE A ORGANELOR DE LUCRU ALE UNOR MAȘINI
MINIERE DE DISLOCARE**

Coordonator:

Prof.univ.dr.ing. Popescu Florin Dumitru

Doctorand:

Ing.Mat. Marc Bogdan Ioan

2021

CUPRINS

INTRODUCERE

CAPITOLUL 1

CARACTERISTICILE LA TĂIEREA MECANICĂ A CĂRBUNELUI

- 1.1 Regimul de aşchiere a cărbunelui la tăierea mecanică
- 1.2 Caracterul aleatoriu al solicitărilor cuţitului aşchietor
- 1.3 Analiza regimului de desprindere a aşchiilor sub acţiunea sculelor miniere

Concluzii

CAPITOLUL 2

CERCETĂRI PRIVIND CINEMATICA ŞI DINAMICA EXCAVATOARELOR CU BRAŢ

- 2.1 Consideraţii generale asupra excavatoarelor cu o cupă
- 2.2 Transformări de coordonate
- 2.3 Matrice de transformare omogene elementare
- 2.4 Compunerea transformărilor
- 2.5 Transformarea Denavit Hartenberg
- 2.6 Analiza cinematică a manipuletoarelor 3D
- 2.7 Cinematica poziţională a excavatorului hidraulic
 - 2.7.1 Stabilirea parametrilor cinematici
 - 2.7.2 Analiza cinematică directă şi analiza cinematică inversă
- 2.8 Prezentarea modelului propus
- 2.9 Simularea cinematicii modelului braţului miniexcavatorului
- 2.10 Simularea dinamicii modelului braţului miniexcavatorului

Concluzii

CAPITOLUL 3

SIMULAREA ŞI MODELAREA PARAMETRILOR DE FUNCŢIONARE A ROTORULUI EXCAVATOARELOR ÎN TIMPUL PROCESULUI DE EXCAVARE

- 3.1 Excavatoarele cu rotor – Consideraţii generale
- 3.2 Rotorul cu cupe

- 3.3 Parametri de excavare și calculul acestora
- 3.4 Studiul cinematicii modelului excavatorului cu rotor EsRc 1400 prin metode numerice
- 3.5 Determinarea puterii de acționare a rotorului excavatorului pe baza energiei specifice de tăiere prin metode numerice
 - 3.5.1 Calculul caracteristicilor de forță și energetice
 - 3.5.2 Prezentarea metodei numerice de calcul a puterii de acționare a rotorului excavatorului

Rezultate

Concluzii

CAPITOLUL 4

REZULTATE ALE CERCETĂRILOR PRIVIND MODELAREA ȘI SIMULAREA ORGANELOR EXECUTOARE ALE COMBINELOR DE ABATAJ

- 4.1 Considerații generale asupra combinelor miniere
 - 4.1.1 Combinate de abataj
 - 4.1.2 Combinate de înaintare
- 4.2 Regimul de lucru al combinelor miniere
 - 4.2.1 Particularitățile regimului de tăiere a combinelor miniere de abataj
 - 4.2.2 Traectoria cuțitului și secțiunea longitudinală a așchiei
- 4.3 Cuțitele combinelor de abataj
- 4.4 Organul de execuție al combinelor de abataj
- 4.5 Calculul și alegerea parametrilor organelor de lucru ale combinelor de abataj
- 4.6 Modelarea numerică 3D a organelor de execuție ale combinelor de abataj
 - 4.6.1 Modelarea și simularea combinatei de abataj EL3000
 - 4.6.2 Dispozitiv virtual de control a poziției cuțitelor așchietoare
 - 4.6.3 Modelarea organului de execuție al combinatei de abataj CA-1
 - 4.6.4 Modelarea organului de execuție cu elice cu pas variabil axial-radial al combinatei de abataj CA-1
 - 4.6.5 Modelarea organului de execuție al combinatei de abataj CA-5
- 4.7 Concluzii

CONCLUZIILE GENERALE, CONTRIBUȚII PROPRII ȘI DIRECȚII DE CERCETARE
BIBLIOGRAFIE

Evoluția mașinilor de dislocare a cunoscut în ultimul timp dezvoltări deosebite, mai ales în ceea ce privește caracteristicile extensive și mai ales intensive ale parametrilor constructivi și funcționali. Cu toate acestea, există încă rezerve insuficient valorificate privind proiectarea și fabricația organelor executoare, mai ales din punct de vedere al durabilității și adaptabilității la diversitatea largă a condițiilor mediului tehnologic în care acestea trebuie să lucreze.

În acest sens, metodele clasice, bazate pe date experimentale de laborator și din teren, precum și pe teorii grevate de ipoteze simplificatoare conduc de cele mai multe ori la supradimensionare sau incompatibilități care sunt descoperite doar după punerea lor în fabricație.

Din aceste motive, se impune implementarea unor metode de modelare și simulare flexibile și ușor de adaptat la situațiile concrete pentru proiectarea și analiza interactivă a produselor respective. Din acest punct de vedere, tematica abordată în teză este deosebit de actuală.

Obiectivul urmărit în cadrul prezentei teze de doctorat este demonstrarea aplicabilității metodelor moderne de modelare și simulare în studiul, proiectarea și verificarea organelor executoare ale mașinilor de dislocat din industria minieră.

Originalitatea lucrării constă în faptul că, pornind de la constatările și rezultatele prezentate în literatura de specialitate și obținute în activități de cercetare anterioare a reușit să realizeze implementarea acestor metode teoretice și experimentale într-un sistem coerent, bazat pe aplicații informatice de uz general, adaptate necesităților de proiectare și verificare a acestui tip de utilaje.

Deoarece domeniul de aplicație este deosebit de vast, am limitat cercetarea la utilajele cu cea mai largă utilizare și cu potențial dovedit de evoluție tehnologică ulterioară. Atât dezvoltările teoretice cât și metodele de analiză propuse, exemplificate pe utilaje existente, sunt pretabile la generalizări și aplicații sustenabile în concordanță cu tendințele înregistrate de evoluție în viitor a acestor utilaje.

În lucrare am urmărit o filieră logică de la simplu la complex, pornind de la prezentarea elementelor teoretice și încheind cu aplicații concrete atât la nivelul fiecărui capitol, precum și în structura generală a lucrării.

Teza de doctorat este structurată în patru capitole de conținut, o introducere și un capitol de concluzii și contribuții personale.

Astfel, capitolul 1 intitulat "CARACTERISTICILE LA TĂIEREA MECANICĂ A CĂRBUNELUI", am analizat procesul de dislocare mecanică a rocilor, cu referire specială la tăierea cărbunelui.

Am concluzionat, pe baza celor prezentate faptul că studiul procesului de dislocare a rocilor prin aşchiere presupune stabilirea corelațiilor între parametrii care sunt specifici rocii extrase, parametrii constructivi ai cuțitelor, parametri organului de lucru, caracteristicile aşchiilor și parametrii funcționali ai utilajului, prin îmbinarea dezvoltărilor teoretice cu încercări experimentale pe stand, iar analiza trebuie făcută de la simplu la complex, de la interacțiunea unui cuțit cu masivul de rocă la interacțiunea de ansamblu între organul executor și masiv.

Pe parcursul capitolului am realizat modele grafico-informatiche ilustrative, originale, care reprezintă un preambul pentru modelele de simulare pe care le-am extins și dezvoltat pentru detalierea aspectelor referitoare la mașinile de extragere specializate analizate.

Al doilea capitol, cu titlul "CERCETĂRI PRIVIND CINEMATICA ȘI DINAMICA EXCAVATOARELOR CU BRAȚ", este consacrat cercetărilor realizate privind studiul prin modelare și simulare, utilizând aplicații informatice, al excavatoarelor cu braț și o singură cupă.

Caracteristica esențială a acestor mașini, utilizate pentru excavarea și încărcarea materialelor de tip minereu sau rocă, în minerit și în construcții, este aceea că, performanțele lor, ca de exemplu spațiul de lucru, forțele tehnologice, capacitatea de tăiere și încărcare, sunt strâns legate de structura și funcționarea, cinematica și dinamica mecanismului cupă - braț.

Pe baza teoriei manipuloarelor, preluată creativ și adaptată din literatura de specialitate, am realizat un model virtual al sistemului de excavare al unui excavator existent, în aplicația SOLIDWORKS.

Prin simulare, pe acest model, am realizat analiza cinematică și dinamică a acestui sistem, pentru un ciclu complet de excavare, cuprinzând succesiunea fazelor de coborâre a cupei, tăiere, ridicare, transport și descărcare a materialului excavat.

Ca rezultate ale simulării, am obținut traiectoria spațială a unui dinte de pe cupa excavatorului, am determinat mărimea volumului tehnologic și diagramele de variație în timp a vitezelor și accelerațiilor acestui punct caracteristic după cele trei direcții.

Pe același model, am realizat simularea dinamicii sistemului de excavare, respectiv am determinat puterea necesară realizării procesului de excavare în diferitele sale faze, luând în considerare, pentru fiecare parte componentă forțele tehnologice, inerțiale și de rezistență aferente, corespunzător regimului de funcționare.

În finalul capitolului am realizat o analiză a solicitării cupei excavatorului calculând tensiunea von Mises de la începutul mișcării cupei, până la finalizarea descărcării acesteia, ținând cont de toate forțele care acționează asupra cupei.

Cele prezentate în acest capitol, metodele de lucru folosite și rezultatele obținute, sunt de natură să confirme corectitudinea abordării prin modelare și simulare a aspectelor constructiv-funcționale a acestui tip de utilaj, caracterizat printr-o structură și o cinematică complexă.

Capitolul 3, intitulat ”SIMULAREA ȘI MODELAREA PARAMETRILOR DE FUNCȚIONARE A ROTORULUI EXCAVATOARELOR ÎN TIMPUL PROCESULUI DE EXCAVARE”, cuprinde rezultatele cercetărilor efectuate privind studiul funcționării excavatoarelor cu rotor.

Acest tip de utilaj de dislocare-încărcare-evacuare este folosit pe scară largă în exploatarea miniere de lignit la zi, mai ales în Europa, atât pentru extragerea, în flux continuu a utilului (lignitului) cât și pentru realizarea lucrărilor de descopertare în steril.

Excavatoarele cu rotor sunt echipamente complexe, costisitoare, cu putere instalată ridicată, iar funcționarea lor necorespunzătoare poate conduce la pierderi financiare sau avarii grave, motiv pentru care abordarea studiului lor prin metode moderne, care apelează la instrumente informatice, este deosebit de utilă.

Elementul structural-funcțional cel mai important al excavatoarelor cu rotor este echipamentul organului de lucru, care include rotorul (roata cu cupe), săgeata (brațul) și elementele de legătură la infrastructură.

Din acest motiv, în acest capitol am abordat în special aspectele legate de parametrii regimului de excavare, cu referire la acest echipament, sistematizând parametrii geometrici, cinematici și funcționali într-o succesiune logică și în interdependență cu parametrii de eficiență ai procesului de excavare, și anume capacitatea de excavare și consumul de energie.

Pentru derularea studiului, am realizat un model grafic informatic al rotorului și al ansamblului rotor-braț, în aplicația SOLIDWORKS, model care a permis simularea funcționării mecanismului de excavare, determinarea traiectoriilor și trasarea de diagrame de variație a mărimilor care caracterizează cinematica și dinamica rotorului.

Folosind acest model, am elaborat și aplicat, pentru un caz concret, o metodă numerică de calcul a puterii de acționare a rotorului excavatorului care utilizează modelarea computerizată.

Prin metoda numerică menționată, am stabilit corelația dintre înălțimea feliei excavate și viteza de pivotare a brațului, în vederea optimizării puterii de acționare a roții port cupe și a creșterii eficienței energetice a procesului de excavare, metodă care poate fi aplicată în practică pentru creșterea performanței excavatoarelor și reducerea costurilor de operare.

Capitolul 4, intitulat "REZULTATE ALE CERCETĂRILOR PRIVIND MODELAREA ȘI SIMULAREA ORGANELOR EXECUTOARE ALE COMBINELOR DE ABATAJ", se referă la principalul utilaj de dislocare folosit în exploatarea subterană de cărbune, și anume combinele de abataj.

În cadrul acestui capitol am elaborat o metodă interactivă, grafico-numerică de construire, modelare și simulare a organului executor al combinelor de abataj bazat pe realizarea, în prima fază a unui model 3D simplificat al tamburului pe care se construiesc elicoidele (elicele) pe care se amplasează cuțitele.

Am exemplificat metoda propusă pe organul de lucru al unei combine moderne, aflată în fabricație, care este foarte larg utilizată în minele de cărbune pe plan mondial.

Pentru modelarea și simularea organului de lucru de tip tambur melc care echipează această combină am folosit aplicația SOLIDWORKS care prin facilitățile de modelare simulare și vizualizare s-a dovedit a fi foarte utilă și adecvată scopului urmărit.

Pe baza specificațiilor rezultate din modelul de tambur realizat în această analiză, folosind componenta CAM a aplicației SOLIDWORKS, am materializat, prin printare 3D un model fizic la scară al tamburului. Acest lucru dovedește faptul că studiul bazat pe modelare și simulare cu instrumente informatice poate fi continuat până la faza de fabricație asistată de calculator (CAM), cu mențiunea că, dacă se dispune de echipamente de fabricație adecvate, se pot realiza rapid prototipuri ale sistemelor proiectate și analizate pentru a fi încercate în condiții reale de exploatare.

În scopul analizării eficienței schemelor de amplasare a cuțitelor la organele de lucru existente sau proiectate, am elaborat un dispozitiv virtual, care permite verificarea parametrilor schemelor de amplasare a cuțitelor pe organul de lucru al combinelor de abataj, care poate fi utilizat și pentru analiza geometrico-cinematică a organelor executoare ale combinelor de înaintare, a căror analiză este mai dificil de realizat cu metodele clasice, datorită geometriei și cinematicii mai complexe.

Folosind modelul 3D al unui tamburului și schema de amplasare a cuțitelor, am propus o metodă de realizare a schemei de tăiere, în care așchiile sunt reprezentate în 3D, astfel putând fi determinat volumul real al fiecărei așchii și volumul total extras la o rotație completă a tamburului, metodă care este o perfecționare a metodei clasice de construire a schemei desfășurate de tăiere.

Am utilizat aplicația realizată pentru modelarea organelor de execuție a unor combine de abataj a căror proiectare și realizare a făcut obiectul preocupărilor mai vechi ale Departamentului de inginerie mecanică industrială și transporturi a Universității din Petroșani și au fost realizate cu mijloace clasice grafice și analitice, fapt care a reprezentat un grad ridicat de dificultate și a oferit o precizie limitată în calculul parametrilor și stabilirea specificațiilor tehnice pentru fabricație, mai ales în cazul elicelor cu pas variabil radial-axial.

CONCLUZIILE GENERALE, CONTRIBUȚII PROPRII ȘI DIRECȚII DE CERCETARE

CONCLUZII

- studiul procesului de dislocare a rocilor prin așchiere presupune stabilirea corelațiilor între parametrii care sunt specifici rocii extrase, parametrii constructivi ai cuțitelor, parametri organului de lucru, caracteristicile așchiilor și parametrii funcționali ai utilajului, prin îmbinarea dezvoltărilor teoretice cu încercări experimentale pe stand, iar analiza trebuie făcută de la simplu la complex, de la interacțiunea unui cuțit cu masivul de rocă la interacțiunea de ansamblu între organul executor și masiv;

- caracteristica esențială a excavatoarelor cu braț și o cupă, utilizate pentru excavarea și încărcarea materialelor de tip minereu sau rocă, în minerit și în construcții, este aceea că, performanțele lor, ca de exemplu spațiul de lucru, forțele tehnologice, capacitatea de tăiere și încărcare, sunt strâns legate de structura și funcționarea, cinematica și dinamica mecanismului cupă-braț, care pot fi studiate pe baza teoriei manipuletoarelor, preluată creativ și adaptată pentru construirea unui model virtual;

- metodele de lucru folosite și rezultatele obținute, confirmă corectitudinea abordării prin modelare și simulare a aspectelor constructiv-funcționale ale excavatorului cu braț și o cupă, utilaj caracterizat printr-o structură și o cinematică complexă;

- excavatoarele cu rotor sunt echipamente complexe, costisitoare, cu putere instalată ridicată, iar funcționarea lor necorespunzătoare poate conduce la pierderi financiare sau avarii grave, motiv pentru care abordarea studiului lor prin metode moderne, care apelează la modelare și simulare folosind instrumente informatice, este deosebit de utilă;

- studiul parametrilor regimului de excavare al excavatoarelor cu rotor necesită sistematizarea parametrilor geometrici, cinematici și funcționali într-o succesiune logică și în interdependență cu parametrii de eficiență ai procesului de excavare, și anume capacitatea de excavare și consumul de energie;

- problema asigurării echidistanței dintre liniile de tăiere și a amplasării cuțitelor pe liniile de tăiere și pe muchia elicelor, este cel mai dificil de realizat cu precizie în metoda clasică de proiectare a organelor executoare a combinelor de abataj;

- prin simularea pe model a organelor de lucru a combinelor de abataj, folosind aplicația realizată și prezentată, se poate vizualiza în mod dinamic funcționarea organului de lucru respectiv a întregii combine, pentru analiza comportării în exploatare a unui utilaj existent, în condiții date, sau de verificare a funcționalității unui utilaj în faza de proiectare;

- studiul bazat pe modelare și simulare cu instrumente informatice poate fi continuat până la faza de fabricație asistată de calculator (CAM), cu mențiunea că, dacă se dispune de echipamente de fabricație adecvate, se pot realiza rapid prototipuri ale sistemelor proiectate și analizate pentru a fi încercate în condiții reale de exploatare;

- modelul elaborat pentru simularea organelor executoare ale combinelor de abataj poate fi extins și pentru analiza geometrico-cinematică a organelor executoare ale combinelor de înaintare, a căror analiză este mai dificil de realizat cu metodele clasice, datorită geometriei și cinematicii mai complexe.

CONTRIBUȚII PROPRII

- realizarea unor modele grafico-informatiche ilustrative, originale, care constituie baza de plecare pentru modelele de simulare extinse și dezvoltate ulterior pentru detalierea aspectelor referitoare la mașinile de extragere specializate analizate;

- realizarea un model virtual al sistemului de excavare al unui excavator cu braț și cupă existent, în aplicația SOLIDWORKS;

- realizarea analizei cinematice și dinamice, prin simulare, pe acest model, a sistemului menționat, pentru un ciclu complet de excavare, cuprinzând succesiunea fazelor de coborâre a cupei, tăiere, ridicare, transport și descărcare a materialului excavat;

- construirea, prin simulare pe modelul realizat, a traiectoriei spațiale a unui dinte de pe cupa excavatorului;

- determinarea mărimii volumului tehnologic și trasarea diagramelor de variație în timp a vitezelor și accelerațiilor unui punct caracteristic după cele trei direcții;

- prin simularea pe model a dinamicii sistemului de excavare, am determinat puterea necesară realizării procesului de excavare în diferitele sale faze, luând în considerare, pentru fiecare parte componentă forțele tehnologice, inerțiale și de rezistență aferente, corespunzător

regimului de funcționare;

- realizarea unei analize a solicitării cupei excavatorului calculând tensiunea von Mises de la începutul mișcării cupei, până la finalizarea descărcării acesteia, ținând cont de toate forțele care acționează asupra cupei;

- realizarea unui model grafic informatic al rotorului și al ansamblului rotor-braț, în aplicația SOLIDWORKS;

- simularea pe acest model a funcționării mecanismului de excavare și determinarea pe această cale a traiectoriilor dinților și a diagramelor de variație a mărimilor care caracterizează cinematica și dinamica rotorului;

- elaborarea și aplicarea, pentru un caz concret, a unei metode numerice de calcul a puterii de acționare a rotorului excavatorului, prin modelare computerizată;

- stabilirea, prin metoda numerică menționată, a corelației dintre înălțimea feliei excavate și viteza de pivotare a brațului;

- diagrama rezultată poate fi aplicată în practică pentru optimizarea puterii de acționare a roții port cupe și a creșterii eficienței energetice a procesului de excavare;

- am elaborat o metodă interactivă, grafico-numerică de construire, modelare și simulare a organului executor al combinelor de abataj;

- am materializat, prin printare 3D un model fizic la scară al tamburului unei combine reale, care a făcut obiectul analizei, pe baza exportării specificațiilor rezultate din model, folosind componenta CAM a aplicației SOLIDWORKS;

- am elaborat un dispozitiv virtual, realizat cu mijloace informatice, care permite verificarea parametrilor schemelor de amplasare a cuțitelor pe organul de lucru al combinelor de abataj, la organele de lucru existente sau proiectate;

- am propus o metodă de realizare a schemei spațiale de tăiere, în care așchiile sunt reprezentate în 3D, astfel putând fi determinat volumul real al fiecărei așchii și volumul total extras la o rotație completă a tamburului, metodă care este o perfecționare a metodei clasice de construire a schemei desfășurate de tăiere;

- modelarea organelor de execuție a unor combine de abataj a căror proiectare și realizare a fost realizată inițial cu mijloace clasice grafice și analitice, oferind o precizie mai ridicată în calculul parametrilor și stabilirea specificațiilor tehnice pentru fabricație, mai ales în cazul elicelor cu pas variabil radial-axial.

DIRECȚII DE CERCETARE

-se pot continua cercetările în vederea realizării unui sistem integrat stand-sistem de măsurare - înregistrare - sistem informatic, de tip sistem expert, care să realizeze, pe baza forțelor măsurate și scanarea 3D a urmelor cuțitelor, determinarea parametrilor tăierii cu un singur cuțit, cu diferiți parametri geometrici (rezistența specifică la tăiere, volumul așchiilor), să stocheze rezultatele într-o bază de date, din care sistemul informatic să preia datele și să realizeze, interactiv modelul optimizat al organului de tăiere proiectat, eventual să anticipeze parametrii funcționali ai combinei în condiții reale de lucru;

-pe baza celor menționate anterior, se poate realiza un simulator de abataj, care să utilizeze bazele de date create astfel și să ofere prin realitate virtuală sau augmentată o simulare realistă a funcționării combinei în condiții date;

-materializarea prototipului organului de lucru al combinei prin tehnologii CAM, comandate de aplicația de modelare-simulare;

-pentru excavatoarele cu braț și o singură cupă, se poate extinde analiza, pe baza metodei prezentate în teză, la nivelul dinților de pe cupă, cu luarea în considerare a forțelor de tăiere pe baza caracteristicilor materialului excavat, determinate pe standuri de tăiere sau încercări standard de mecanica rocilor, dacă se elaborează un sistem de corelare a proprietăților fizico-mecanice standard cu cele referitoare la comportarea la tăiere a rocilor;

-pentru excavatoarele cu rotor, se poate realiza un simulator de excavare, prin realitate virtuală și/sau augmentată care să simuleze procesul de excavare pe baza comenzilor dintr-o cabină de comandă reală;

-prin utilizarea bazelor de date privind zăcămintul exploatat, și a sistemului expert realizat pe baza modelelor prezentate, se poate estima (prognoza) consumul de energie pentru dislocare/ excavare și se poate realiza optimizarea în timp real a proceselor de excavare, respectiv de tăiere;

-aplicarea în paralel cu sau în locul analizei statistice clasice a variabilității procesului de dislocare/tăiere a unor metode mai noi de tratare a incertitudinii, de tip soft computing sau inteligență artificială, ca de exemplu mulțimile FUZZY, algoritmi genetici și altele.