



UNIVERSITATEA DIN PETROȘANI
ȘCOALA DOCTORALĂ



TEZĂ DE DOCTORAT

**STUDIUL PRIN MODELARE ȘI SIMULARE A REGIMULUI
TERMIC AL FRÂNELOR CU SABOȚI LA INSTALAȚIILE DE
EXTRACȚIE MINIERE**

Coordonator:

Prof.univ.dr.ing. Popescu Florin Dumitru

Doctorand:

Ing. Budilică (Andrei) Daniela Ioana

2022

CUPRINS

INTRODUCERE

CAPITOLUL 1

NOȚIUNI GENERALE PRIVIND INSTALAȚIILE DE EXTRACȚIE MINIERE	12
1.1 Clasificarea instalațiilor de extracție – ansamblul constructiv	12
1.2 Clasificarea mașinilor de extracție	14
1.2.1 Mașini de extracție cu tobe	15
1.2.2 Mașini de extracție cu roți motoare	15
1.3 Sistemele de frânare ale instalațiilor de extracție	18
1.4 Cerințele funcționale ale sistemelor de frânare	19
1.5 Mecanismul de execuție al sistemelor de frânare	20
1.5.1 Mecanismul de execuție cu pârghii și saboți al sistemelor de frânare	20
1.5.2 Mecanismul de execuție al frânelor fără pârghii	24

CAPITOLUL 2

CINEMATICA INSTALAȚIILOR DE EXTRACȚIE MINIERE	27
2.1 Cinematica instalațiilor de extracție cu colivii nebasculante	27
2.1.1 Instalații de extracție acționate cu motor electric asincron	28
2.1.2 Instalații de extracție acționate cu motor electric de curent continuu	30
2.2 Cinematica instalațiilor de extracție cu schipuri	33
2.2.1 Tahograma cu cinci faze cu accelerații constante	33
2.2.2 Tahogramă asimetrică cu cinci faze și accelerație variabilă în prima fază.	36
2.2.3 Tahogramă cu cinci faze cu variația accelerației în faza a doua	37
2.2.4 Tahograma cu patru faze	38
2.2.5 Tahograma cu șase faze	39
2.3 Tahograme diverse utilizate la instalațiile de extracție	40
2.4 Influența cinematicii asupra șocurilor în timpul mișcării vaselor de extracție	43
2.5 Calculul tahogramei instalației de extracție supusă modelării și simulării	47

CAPITOLUL 3

DINAMICA INSTALAȚIILOR DE EXTRACȚIE MINIERE	50
3.1 Instalații de extracție cu vase nebasculante	50
3.1.1 Ecuația generală a dinamicii instalațiilor de extracție	50
3.1.2 Variația forțelor și a puterilor în cazul acționării cu motor asincron	59
3.1.3 Variația forțelor și a puterilor în cazul acționării cu motor de c.c.	63

3.2	Instalații de extracție cu schipuri și colivii basculante	64
3.2.1	Ecuția generală a dinamicii	64
3.2.2	Variația forțelor și a puterilor de acționare	65
CAPITOLUL 4		
REGIMUL TERMIC AL FRÂNELOR CU SABOȚI ALE MAȘINILOR DE		
EXTRACȚIE MINIERE		
4.1	Transferul de căldură – noțiuni teoretice	71
4.1.1	Transferul de căldură prin conducție	71
4.1.2	Transferul de căldură prin radiație	73
4.1.3	Transferul de căldură către fluide	75
4.1.4	Convecția naturală	76
4.1.5	Puterea specifică și transmisivitatea ca mărimi globale	77
4.1.6	Medii solide limitate de plane paralele	78
4.2	Regimul termic al frânelor mașinilor de extracție	80
4.2.1	Considerații teoretice	80
4.2.2	Studiul analitic al regimului termic al instalațiilor de extracție	84
4.2.3	Utilizarea metodelor numerice de calcul a regimului termic al frânelor instalațiilor de extracție	85
4.2.4	Premizele calcului regimului termic al frânelor cu saboți a instalațiilor de extracție	88
4.2.5	Prezentarea sistemului de frânare al mașinii de extracție MK 5x2	92
CAPITOLUL 5		
SIMULAREA CU APLICAȚIA SOLIDWORKS A REGIMULUI TERMIC AL		
FRÂNELOR CU SABOȚI LA INSTALAȚIILE DE EXTRACȚIE		
5.1	Construirea modelului roții motoare a instalației de extracție MK 5x2	96
5.1.1	Toba modelului organului de antrenare a cablurilor	96
5.1.2	Obada modelului organului de antrenare a cablurilor	98
5.1.3	Realizarea ansamblului organului de antrenare a cablurilor	99
5.2	Simularea regimului termic la frânarea de siguranță a instalației de extracție MK 5x2 cu aplicația SOLIDWORKS	100
5.2.1	Tipul simulării și solicitările termice	100
5.2.2	Realizarea geometriei cu elemente finite, rezultatele simulării	103

CAPITOLUL 6

SIMULAREA CU APLICAȚIA COMSOL A REGIMULUI TERMIC AL FRÂNELOR

CU SABOȚI LA INSTALAȚIILE DE EXTRACȚIE	121
6.1 Construirea modelului roții motoarea a instalației de extracție MK 5x2	121
6.2 Simularea regimului termic la frânarea de siguranță a instalației de extracție MK 5x2 cu aplicația COMSOL	123
6.2.1 Stabilirea parametrilor simulării	123
6.2.2 Stabilirea elementelor specifice transferului de căldură	126
6.2.3 Realizarea geometriei cu elemente finite, rezultatele simulării	128
CONCLUZII	149
BIBLIOGRAFIE	156

În cele mai multe cazuri exploatarea zăcămintelor subterane, fie că este vorba de minereuri sau cărbune presupune transportul acestora la suprafața solului prin puțuri de extracție care pot fi verticale sau înclinate. Transportul pe puțuri este asigurat de instalațiile de extracție miniere. Acestea sunt un ansamblu de echipamente electromecanice care pe lângă scoaterea la suprafață a zăcămintului sunt utilizate și la transportul echipamentelor necesare dislocării acestuia, a materialelor și a personalului muncitor.

Ca la orice alt mijloc de transport și în cazul instalațiilor de extracție miniere un rol determinant în buna funcționare a acestora îl are sistemul de frânare. Astfel instalațiile de extracție miniere sunt dotate cu două tipuri de sisteme de frânare: sistemul de frânare cu obadă și saboți și sistemul de frânare cu disc și plăcuțe. În timpul funcționării sistemele de frânare ale instalațiilor de extracție sunt utilizate fie la reducerea vitezei în funcție de parametrii tehnologici de exploatare (frânarea de manevră), fie pentru oprirea de urgență atunci când în funcționarea instalației de extracție apar situații care pot determina daune materiale majore sau chiar pierderea de vieți omenești (frânarea de urgență sau de siguranță).

Indiferent de sistemul de frânare care intră în componența instalației de extracție, frânarea de urgență sau de siguranță trebuie să se producă automat fără intervenția factorului uman atunci când a fost depășită viteza maximă de transport cu 15%, s-a depășit protecția la supraîncălzirea vaselor de transport sau a fost declanșată protecția la suprasarcină și scurtcircuit a instalației electrice de forță a mașinii de extracție.

Frânarea determină o creștere a temperaturii datorată frecării dintre plăcuțe sau saboți cu discul sau obada aflate în mișcare de rotație. Astfel are loc transformarea energiei cinetice în căldură. Temperatura ridicată a elementelor în frecare poate determina reducerea performanței sistemului de frânare sau uzura prematură a elementelor pasive (obadă sau disc) și active (saboți sau plăcuțe) ale acestuia.

În teza de doctorat s-a abordat studiul regimului termic al sistemelor de frânare de mari dimensiuni ale instalațiilor de extracție miniere. La acestea, comparativ cu sistemele de frânare ale vehiculelor auto sau feroviare, elementele pasive (obada sau discul) au viteze de rotație reduse.

Studiul s-a realizat prin modelarea sistemului de frânare cu saboți al instalației de extracție miniere MK 5x2 și simularea regimului termic al acestuia la frânarea de urgență atât cu aplicația SOLIDWORKS cât și cu aplicația COMSOL Multiphysics, ca instrumente de modelare FEM. Pentru ambele Software-uri s-au efectuat simulări pentru decelerații de 3, 3,5, 4 și 4,5 m/s².

Rezultatele obținute vizează reducerea costurilor operaționale și de întreținere, dar și creșterea performanțelor, fiabilității și a capacității de transport a instalațiilor de extracție

miniere. Totodată acestea pot fi valorificate în activitatea de proiectare și fabricație a sistemelor de frânare a instalațiilor de extracție sau a altor sisteme de transport industrial.

Validarea rezultatelor obținute pentru frânarea de siguranță permite ulterior utilizarea atât a modelului propus cât și a metodei de simulare adoptată pentru studiul regimului termic corespunzător frânării de manevră. Acest regim de frânare poate sta la baza cercetărilor ulterioare referitoare la oboseala elementelor pasive ale sistemului de frânare.

În Teză, indiferent de aplicația utilizată pentru simulare am urmărit o filieră logică care pornește de la simplu la complex, prin prezentarea inițială a elementelor teoretice și finalizând cu aplicații concrete.

Teza de doctorat este structurată în 5 capitole de conținut, o introducere și un capitol de concluzii și contribuții personale.

Astfel, în Capitolul 1 intitulat *NOȚIUNI GENERALE PRIVIND INSTALAȚIILE DE EXTRACȚIE MINIERE* am arătat pentru început importanța pe care o au instalațiile de extracție în exploatarea zăcămintelor subterane precum și principalele componente ale acestora. În continuare am făcut o clasificare a acestor instalații în funcție de destinație, poziția puțului de extracție, tipul vasului de transport, numărul cablurilor de extracție, gradului de echilibrare, geometriei organului de antrenare a cablurilor, modului de acționare, locului de amplasare al instalației și locului de amplasare al mașinii de extracție în raport cu turnul de extracție. Au fost prezentate caracteristicile mașinilor de extracție cu tobe și a celor cu roată motoare (Kope). Pentru mașinile de extracție cu roată motoare (de fricțiune) s-au analizat avantajele și dezavantajele utilizării roților motoare monocablu și multicablu.

O parte semnificativă a acestui capitol este destinată prezentării sistemelor de frânare ale instalațiilor de extracție. A fost prezentat rolul important pe care aceste sisteme îl joacă în funcționarea în siguranță a instalațiilor de extracție, cerințele funcționale, structura, precum și natura și sursa de generare a forței de frânare. Deoarece teza de doctorat își propune simularea regimului termic al sistemelor de frânare cu saboți în continuare s-a insistat pe descrierea modului de funcționare a acestora, prezentându-se cerințele funcționale, mecanismul de execuție cu pârgă și saboți precum și mecanismul de execuție al frânelor fără pârgă.

Al doilea capitol, cu titlul *CINEMATICA INSTALAȚIILOR DE EXTRACȚIE MINIERE* este consacrat așa cum indică și titlul cinematicii instalațiilor de extracție. Pentru început este evidențiată funcționarea ciclică în conformitate cu o tahogramă a acestor instalații. Sunt evidențiați factorii care determină forma tahogramei: adâncimea de extracție, modul de acționare, condițiile de exploatare și cerințele de siguranță în exploatare. Sunt analizate cinematica instalațiilor de extracție cu colivii nebasculante pentru cazul acționării cu motor electric asincron și cu motor electric de curent continuu. Acest tip de tahogramă stă la baza

analizei și calculului majorității celorlalte tahograme. La finalul capitolului se efectuează calculul tahogramei cu șase faze pentru instalația de extracție căreia i se va modela sistemul de frânare în vederea simulării regimului termic la frânarea de siguranță.

Capitolul 3, intitulat *DINAMICA INSTALAȚIILOR DE EXTRACȚIE MINIERE*, cuprinde elementele teoretice necesare calculelor de verificare și dimensionare a instalațiilor de extracție din punct de vedere al dinamicii. Astfel am prezentat și analizat forțele statice, forțele de frecare și forțele cu caracter dinamic care apar în timpul funcționării precum și relația de calcul aproximativ a masei reduse a elementelor în mișcare. Au fost trasate diagramele de variație a parametrilor cinematici și dinamici în timpul unui ciclu de extracție pentru instalațiile cu colivii nebasculante acționate cu motor asincron și cu motor de curent continuu.

Capitolul 4, intitulat *REGIMUL TERMIC AL FRÂNELOR CU SABOȚI ALE MAȘINILOR DE EXTRACȚIE MINIERE*, cuprinde în prima parte o serie de noțiuni teoretice generale referitoare la transferul de căldură. Astfel a fost prezentat transferul de căldură prin conducție, prin radiație, transferul de căldură către lichide, convecția naturală, puterea specifică și transmisivitatea ca mărimi globale și transferul de căldură între medii solide limitate de plane paralele. În continuarea capitolului am arătat că frecarea dintre elementele pasive și active determină încălzirea sistemelor de frânare ale instalațiilor de extracție. Am arătat că există două situații distincte în care prin acționarea frânei se produce oprirea mașinii de extracție: frânarea de manevră când oprirea se face în conformitate cu tahograma prestabilită și frânarea de urgență când oprirea se face brusc fără intervenția factorului uman (mecanicul instalației de extracție). În ambele cazuri energia cinetică transformată în căldură este aceeași, diferența dintre cele două situații fiind dată de timpul în care această energie se transformă în căldură. Acesta este mult mai mic în cazul frânării de urgență, ceea ce înseamnă că la frânarea de urgență puterea transmisă prin frecare este mai mare decât în cazul frânării de manevră. Deoarece încălzirea elementelor componente ale sistemelor de frânare depinde de raportul dintre cantitatea de căldură degajată pe suprafețele de frecare și cantitatea de căldură evacuată de pe aceste suprafețe prin conducție, convecție și radiație, rezultă că la frânarea de urgență încălzirea acestora este mai mare. Am propus în cadrul acestui capitol o schemă logică secvențială pentru analiza regimului termic al frânelor instalațiilor de extracție prin metoda elementului finit, schemă care poate fi utilizată pentru oricare din software-urile care au implementate module adecvate. Premizele calcului regimului termic al frânelor cu saboți a instalațiilor de extracție constituie o parte semnificativă a acestui capitol. A fost calculată energia cinetică maximă a maselor în mișcare. S-au considerat patru scenarii de calcul care corespund unor decelerații de 3, 3,5, 4 și 4,5 m/s². Ținând cont de viteza maximă

de transport admisibilă, pentru fiecare valoare a decelerației am calculat timpii de oprire, puterea totală și puterea de frânare corespunzătoare unei obade. La sfârșitul capitolului au fost prezentați parametrii geometrici ai instalației de extracție pentru care se face simularea precum și caracteristicile tehnice ale frânelor mașinii de extracție MK 5x2.

În Capitolul 5 intitulat *SIMULAREA CU APLICAȚIA SOLIDWORKS A REGIMULUI TERMIC AL FRÂNELOR CU SABOȚI LA INSTALAȚIILE DE EXTRACȚIE* am construit pentru început un model CAD la scara 1:1 al roții motoare a mașinii de extracție MK 5x2. Modelul este un ansamblu constituit din două părți: toba și obada de frânare. Pe suprafața exterioară a obadei a fost delimitată suprafața de contact a acesteia cu saboții de frânare, această suprafață fiind cea prin care are loc transformarea energiei cinetice în căldură. Urmând pașii specifici simulării termice ai aplicației SOLIDWORKS am calculat regimul termic pentru puterile de frânare corespunzătoare celor patru valori ale decelerației. Simularea a fost de tip tranzitoriu cu durata de șase secunde și un pas al iterației de 0,05 secunde. Puterea transmisă suprafeței de frecare a fost descrisă ca o funcție dependentă de timp, diagramele de variație ale acesteia fiind în concordanță cu momentul în care viteza este nulă. În urma simulării s-a obținut variația în timp a temperaturii și distribuția acesteia pe suprafața obadei. Pentru punctul cu temperatura cea mai mare indicat de software am trasat variația în timp a temperaturii pentru toate decelerațiile considerate. Decelerația de $4,5 \text{ m/s}^2$ produce cea mai mare încălzire a obadei. Această observație m-a determinat să analizez pentru acest caz variația gradientilor de temperatură și a fluxului de căldură în timp și spațiu. Totodată am determinat și am trasat ca funcții de timp, la scară logaritmică, diagramele cantităților de căldură produsă și disipată prin convecție, în intervalul de timp $0 \dots 3,1$ secunde, interval care corespunde timpului de oprire a instalației de extracție la o decelerație de $4,5 \text{ m/s}^2$.

Considerând rezultatele obținute în urma simulării termice ca fiind solicitări într-o simulare mecanică de tip static am putut determina tensiunea von Mises și deformările corespunzătoare momentului de timp în care temperatura a atins valoarea maximă.

Capitolul 6 al Tezei de doctorat se intitulează *SIMULAREA CU APLICAȚIA COMSOL A REGIMULUI TERMIC AL FRÂNELOR CU SABOȚI LA INSTALAȚIILE DE EXTRACȚIE*. Deoarece rezultatele obținute în Capitolul 5 au evidențiat că la frânarea de urgență se produce o încălzire semnificativă doar a obadei de frânare, regimul termic al tobei rămânând nemodificat, în cadrul acestui capitol am utilizat un model simplificat al sistemului de frânare a cărui geometrie CAD a fost realizată tot în aplicația SOLIDWORKS. Modelul este construit sub forma unui ansamblu în componența căruia de această dată intră și saboții de frânare. Geometria astfel realizată a fost importată prin facilitatea de link dinamic dintre aplicația în

care s-a realizat geometria și aplicația în care se va efectua simularea regimului termic al frânării de urgență.

Și de această dată s-au urmat pașii specifici simulării unui regim termic rezultat în urma frânării. Am definit parametrii simulării, iar pornind de la valorile acestora a fost descrisă viteza ca o funcție dependentă de timp. Aici sunt esențiale momentele corespunzătoare începerii simulării, anclanșării frânei, opririi (viteza devine nulă) și cel al sfârșitului simulării. Durata simulării este de 6 secunde cu un pas al iterațiilor de 0,02 secunde. Decelerația este definită ca fiind derivata în funcție de timp a vitezei. Au fost implementate aceleași caracteristici termice și mecanice materialelor din care sunt construite părțile componente ale ansamblului supus simulării.

Un prim rezultat obținut în urma simulării este distribuția temperaturii pe suprafața obadei de frânare. În vederea unei analize și a unei imagini cât mai clare a regimului termic au fost definite trei puncte, situate pe suprafața obadei în zona mediană a suprafeței de frecare dintre obadă și saboți, unul la extremitatea caldă, altul la extremitatea rece iar al treilea în zona centrală a porțiunii aflate în contact cu sabotul de frânare. Astfel s-a putut trasa variația în funcție de timp a temperaturii, gradientului de temperatură, fluxului de căldură, tensiunii von Mises și a deformării corespunzătoare celor trei puncte definite.

Pentru momentul de timp corespunzător atingerii temperaturii maxime au fost realizate imagini ale distribuției în spațiu a mărimilor mai sus amintite atât la suprafața obadei de frânare cât și în secțiuni transversale.

Și de această dată pentru a avea o imagine a raportului dintre căldura generată și cea disipată în aer s-au calculat integralele căldurii produse și disipate în funcție de timp, rezultatele obținute fiind prezentate grafic la scară logaritmică.

Luând în considerare conținutul Tezei, modul de abordare, relevanța rezultatelor obținute și diseminarea acestora, consider că lucrarea de față contribuie la avansarea cunoașterii în domeniul studiului temperaturii sistemelor de frânare ale instalațiilor industriale de mari dimensiuni și reprezintă un punct de pornire pentru cercetările viitoare.

Contribuțiile personale aduse la realizarea prezentei teze de doctorat sunt:

- realizarea unui studiu teoretic bine documentat referitor la transferul căldurii prin conducție, radiație și convecție;
- realizarea unei analize aprofundate a regimului termic al sistemelor de frânare pentru instalațiile de extracție;
- propunerea unei scheme logice structurale de analiză prin metode numerice de modelare și simulare a regimului termic al sistemelor de frânare în general și al celor corespunzător instalațiilor de extracție în particular;

- construirea în SOLIDWORKS a unui model la scara 1:1 al organului de antrenare a cablurilor pentru instalația de extracție MK 5x2 în vederea studiului regimului termic al sistemului de frânare;
- simularea regimului termic tranzitoriu al frânelor cu saboți ai instalației de extracție MK 5x2 la frânarea de siguranță, cu aplicația SOLIDWORKS;
- construirea în SOLIDWORKS a unui model la scara 1:1 al organului simplificat de antrenare a cablurilor pentru instalația de extracție MK 5x2, în vederea studiului regimului termic al sistemului de frânare;
- simularea regimului termic tranzitoriu al frânelor cu saboți ai instalației de extracție MK 5x2 la frânarea de siguranță, cu aplicația COMSOL Multiphysics;
- implementarea studiului regimului termic pentru punctele distincte de la suprafața obadei de frânare cu referire specială la analiza temporală;
- realizarea unei baze teoretice și aplicative de documentare care poate fi utilizată pentru studiul altor sisteme de frânare cu saboți.

Direcțiile viitoare de cercetare vizează realizarea unui studiu al oboselii obadei de frânare, oboseală generată de regimul termic intermitent datorat funcționării ciclice a instalațiilor de extracție precum și extinderea acestor studii și pentru sistemele de frânare cu disc ale instalațiilor de extracție.