

**UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA
FACULTATEA DE MECANICĂ**

**CERCETĂRI ASUPRA UNOR
MECANISME DE REGLARE DE LA
TURBINELE HIDRAULICE**

- REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT -

Doctorand:

Ing. Danel Petre Semenescu

Conducător științific:

Prof. univ. dr. ing. Nicolae Dumitru

- 2010 -

Necesitatea proiectării și producerii unor mașini hidraulice cu performanțe superioare în vederea reabilitării/retehnologizării hidroagregatelor existente în exploatare, adaptate specificului fiecărei amenajări hidroelectrice, a impus utilizarea modelării CAD a ansamblelor și reperelor ce intră în componența mașinilor hidraulice, a modelării și optimizării formei părților paletate din componența mașinilor hidraulice, a analizei cu element finit a curgerii hidrodinamice și optimizării traseului hidraulic și a perfecționării unor soluții constructive, prin studierea câmpului de tensiuni cu metoda elementului finit.

Prezenta teză de doctorat se înscrie pe această linie, așa după cum se vede în descrierea de mai jos.

Obiective:

1. Modelarea cinematică prin metode bazate pe un formalism matricial ușor de implementat pe calculator, cu posibilități multiple de considerare a particularităților geometrice ale elementelor cinemate.
2. Modelarea dinamică a mecanismului aparatului director prin considerarea într-un sistem integrat: modele matematice - experiment – procesare numerică.
3. Modelare geometrică complexă, în limbajul proiectării asistate, în regim parametrizat pe sisteme 2D și 3D, a mecanismului aparatului director, al turbinei de tip Francis FVM 61.5-234, a hidroagregatului de la CHE Tismana Subteran.
4. Prototiparea virtuală a mecanismului aparatului director cu simulări numerice și grafice.
5. Dezvoltarea unui algoritm de optimizare în regim dinamic pe sisteme mecanice mobile.
6. Diagnosticarea și identificarea experimentală a parametrilor dinamici ai mecanismului aparatului director de la turbina hidraulică Francis cu ax vertical tip FVM 61,5-234, din cadrul CHE Tismana Subteran, pentru trei regimuri de funcționare: pornire, funcționare la parametri normali și oprire.

În **capitolul 1** este prezentat stadiul actual al cercetărilor și se justifică importanța temei abordate.

Stadiul actual al cercetărilor este structurat cu referințe bibliografice pe următoarele segmente importante:

- modelarea dinamică a sistemelor mecanice;
- realizări și cercetări teoretice și experimentale în domeniul turbinelor hidraulice;
- modelarea cu elemente finite a sistemelor mecanice mobile;
- metode privind optimizarea sistemelor;
- prezentarea generală a mecanismului aparatului director de la turbina Francis.

Capitolul 2 tratează analiza dinamică a mecanismului aparatului director.

Este un capitol laborios la care problemele de dinamică sunt studiate și analizate într-un sistem integrat de tipul model matematic – experiment – procesare și simulare numerică.

Acest capitol cuprinde:

- O metodă generală pentru modelarea cinematică a sistemelor mecanice mobile, bazată pe un formalism matricial flexibil, ușor de implementat în programele de calcul numeric (MAPLE în

acest caz), cu posibilitatea considerării relativ ușoare a geometriei elementelor cinematice, prin introducerea matricilor de conversie;

- Modelarea cinematică a mecanismului aparatului director de la turbina Francis;
Mecanismul aparatului director este compus din următoarele părți principale:
 - Sistemul de 16 palete directe cu mișcare de rotație în jurul axei proprii, care asigură pe poziția deschis accesul fluidului către rotorul turbinei;
 - Mecanismul de transmitere a mișcării care se compune dintr-un inel de reglare, furca filetată stânga-dreapta cu posibilitatea modificării lungimii și o pârghie solidară cu subansamblul paletă directe;
 - Două servomotoare liniare cu o cursă maximă de 300 mm care comandă prin intermediul inelului de reglare închiderea sau deschiderea aparatului director.

Sistemul parametrizat de concepție a modelelor geometrice, cu respectarea riguroasă a condițiilor de contur dintre fiecare element și subansamblu, a creat condiții optime pentru modelarea dinamică a mecanismului, cu considerarea elementelor cinematice rigide sau flexibile, și, mai ales, pentru optimizarea întregului sistem în regim dinamic.

Modelarea geometrică a aparatului director al turbinei hidraulice de tip Francis FVM 61.5 – 234, a hidro-agregatului de la CHE Tismana Subteran, este prezentată în Fig. 1 și Fig. 2

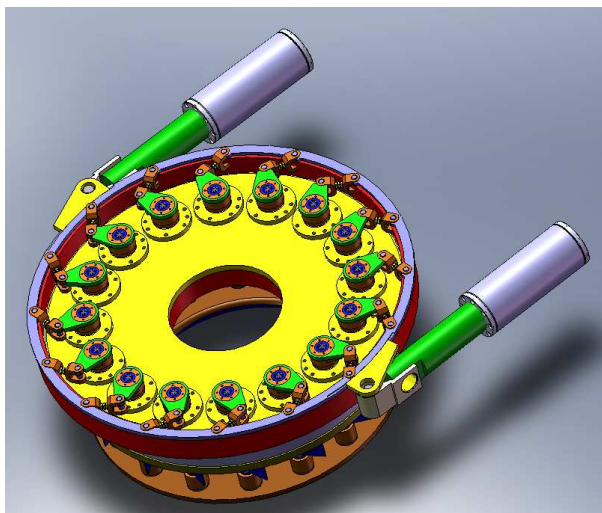


Fig.1 Modelul 3D al aparatului director de la turbina FVM 61,5-234

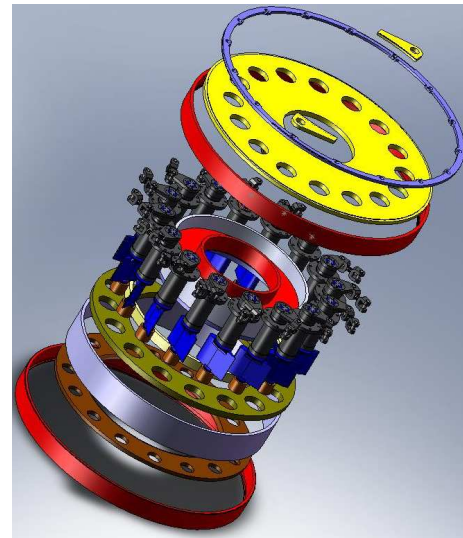


Fig. 2 Francis Vederea explodată a aparatului director

- Analiza dinamică inversă cuprinde:
 - considerarea ecuațiilor în formalismul Newton-Euler, presupunând elementele cinematice rigide;
 - elaborarea modelelor matematice pentru identificarea legilor de variație ale forțelor de legătură în regim dinamic, când s-au considerat următoarele sisteme de referință:
 - sistemul de referință global $T_0(X_0, Y_0, Z_0)$;
 - sistemele de referință mobile $T_i'(x_i', y_i', z_i')$, $T_j'(x_j', y_j', z_j')$, solidare cu elementele cinematice i și j ; $i = \overline{1,7}$;

- o sistemele de referință $T_i^K(x_i^K, y_i^K, z_i^K)$ și $T_j^K(x_j^K, y_j^K, z_j^K)$, centrate în cupla cinematică K și solidare cu elementele cinematice i și j .

Forțele de legătură se pot exprima în fiecare din sistemele de referință amintite anterior, cu considerarea matricilor de transformare a coordonatelor.

Pentru analiza dinamică inversă s-au parcurs următoarele etape:

- determinarea sistemului de ecuații care definește configurația cinematică a mecanismului;
- identificarea elementelor structurale care definesc ecuațiile de mișcare în formalismul Newton-Euler: vectorul coordonatelor generalizate \vec{q} , matricea maselor care definește proprietățile inerțiale ale sistemului mecanic, Jacobianul J_q corespunzător coordonatelor generalizate q și matricea forțelor generalizate active Q^a ;
- calculul multiplicatorilor lui Lagrange ;
- determinarea legilor de variație în timp în regim dinamic ale forțelor de legătură din cuplele cinematice.

Datele de intrare cu caracter dinamic pentru procesarea numerică au fost identificate pe cale experimentală (cursa pistonului și forța rezistentă pe paletă).

A fost elaborat un program pentru procesarea numerică a modelelor matematice care definesc legile de variație în timp pentru forțele de legătură din cuplele cinematice.

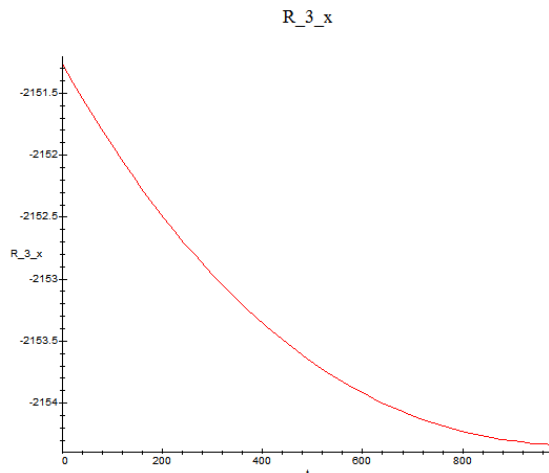


Fig. 3 Legea de variație a componentei forței de legătură, R_{3x}



Fig. 4 Modelul 3D pentru mecanismul aparatului director importat în ADAMS; cupla C, simulare 3D.

- Modelarea și simularea mecanismului aparatului director cu programul ADAMS.

S-au parcurs următoarele etape:

- transferul bazei de date din programul SOLIDWORKS în programul ADAMS, cu considerarea elementelor cinematice ca subansamble definite prin masă și proprietăți inerțiale; această bază de date importată corect în ADAMS va constitui modelul virtual care va governa procesul de prototipare virtuală
- construirea modelului cinematic al ansamblului virtual importat prin definirea elementelor cinematice, a cuplelor cinematice, aplicarea constrângerilor și considerarea expresiei matematice pentru legea de variație în timp a coordonatei

generalizate stabilite pe cale experimentale (cursa pistonului sau unghiul de variație în timp a poziției inelului de reglare);

- construirea modelului dinamic prin considerarea cuplei motoare cu elementele definitorii pentru o analiză dinamică, respectiv coeficient de amortizare, rigiditate și elementul de acționare (forță sau moment), când cunoaștem forțele exterioare care acționează (în acest caz forța rezistentă pe paletă, stabilită experimental).
- testarea modelului, într-o primă fază prin simulare, vizualizarea animației și a rezultatelor numerice;
- validarea modelului construit în ADAMS prin raportarea datelor măsurate experimental (forța rezistentă, legea de variație a cursei pistonului, forța motoare din piston sau momentul din cupla centrală a inelului de reglare H) și compararea rezultatelor teoretice cu cele experimentale;
- parametrizarea modelului prin definirea variabilelor de proiectare necesare ulterior procesului de optimizare a mecanismului.
- simularea tri-dimensională a funcționării mecanismului aparatului director în condiții cinematice și dinamice.

În finalul capitolului 2 sunt prezentate legile de variație în timp pentru poziții, viteze și accelerații, liniare sau unghiulare, pentru mai multe elemente cinematice sau pentru unele puncte caracteristice considerate ca puncte de interes pentru funcționarea sau exploatarea aparatului director.

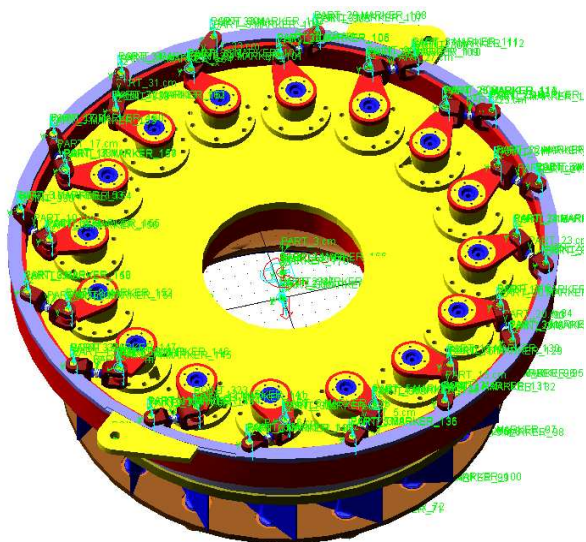


Fig. 5 Modelul 3D al mecanismului, cu identificarea cuplelor și elementelor cinematice.

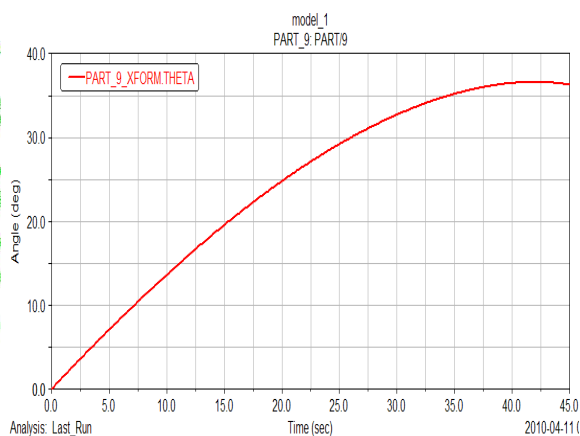


Fig. 6 Legea de variație în timp a poziției unghiulare pentru elementul 5 (part 9), în grade

Capitolul 3 prezintă modelarea cu elemente finite a mecanismului aparatului director și este structurat în trei părți:

- elaborarea modelului dinamic pentru o analiză cu elemente finite la cazul cel mai general;
- analiza dinamică a paletii aparatului director folosind metoda elementului finit;
- analiza dinamică a întregului mecanism cu considerarea elementelor cinematice deformabile.

Pentru analiza dinamică a paletii cu metoda elementului finit, aceasta se încarcă cu forța rezistentă variabilă în timp F_r , care este generată de curgerea fluidului pe suprafața activă a paletii, la închiderea sau deschiderea acesteia.

Această forță este stabilită pe cale experimentală și reprezintă, de fapt, sarcina distribuită în timp care solicită elementul final condus al aparatului director.

Se identifică legile de variație în timp pentru tensiuni, deformații și deplasări, care vor permite dezvoltarea unui proces de optimizare a paletelor în care funcția obiectivă să fie forma sau gabaritul (volumul, greutatea) paletii, iar restricția să fie definită printr-o valoare maximă a tensiunilor, deformațiilor și deplasărilor.

Modelarea geometrică parametrizată a fiecărui element component al acestui mecanism, prin procedura descrisă anterior, permite dezvoltarea în condiții de precizie maximă a procesului de optimizare geometrică, cinematică sau dinamică.

Pentru analiza elastodinamică a mecanismului aparatului director se procedează la modelarea cu elemente finite.

Este analizat în regim dinamic fiecare element cinematic considerat ca un subsansamblu cu proprietăți elastocinematice.

Din analiza cu elemente finite a mecanismului s-a constatat că valoarea maximă a tensiunilor este pentru boltul de forfecare, care are rol de protecție la suprasarcini.

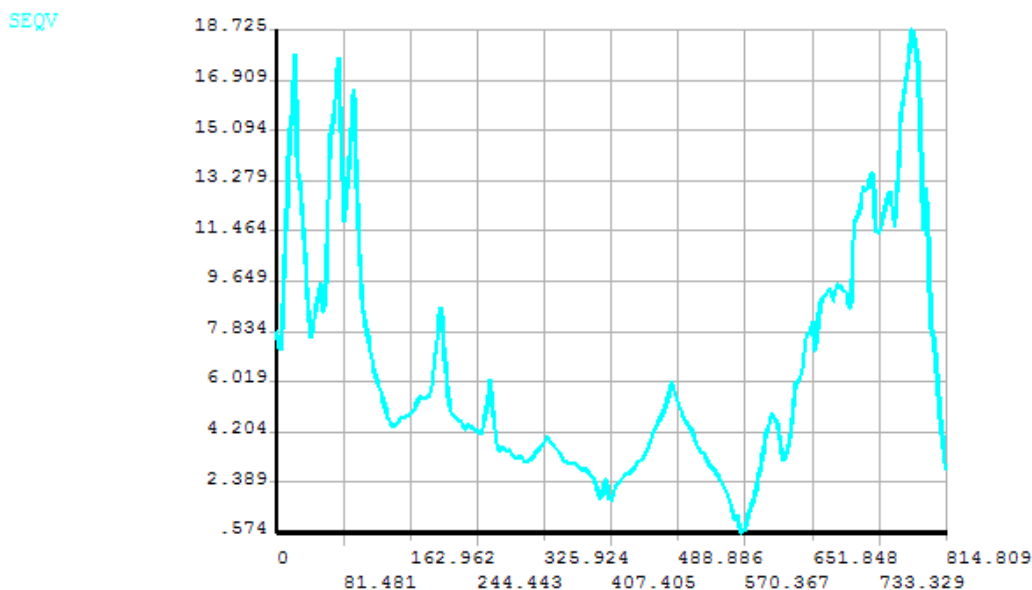


Fig. 7 Distribuția tensinilor echivalente von Mises, în zona concentratorilor de tensiune

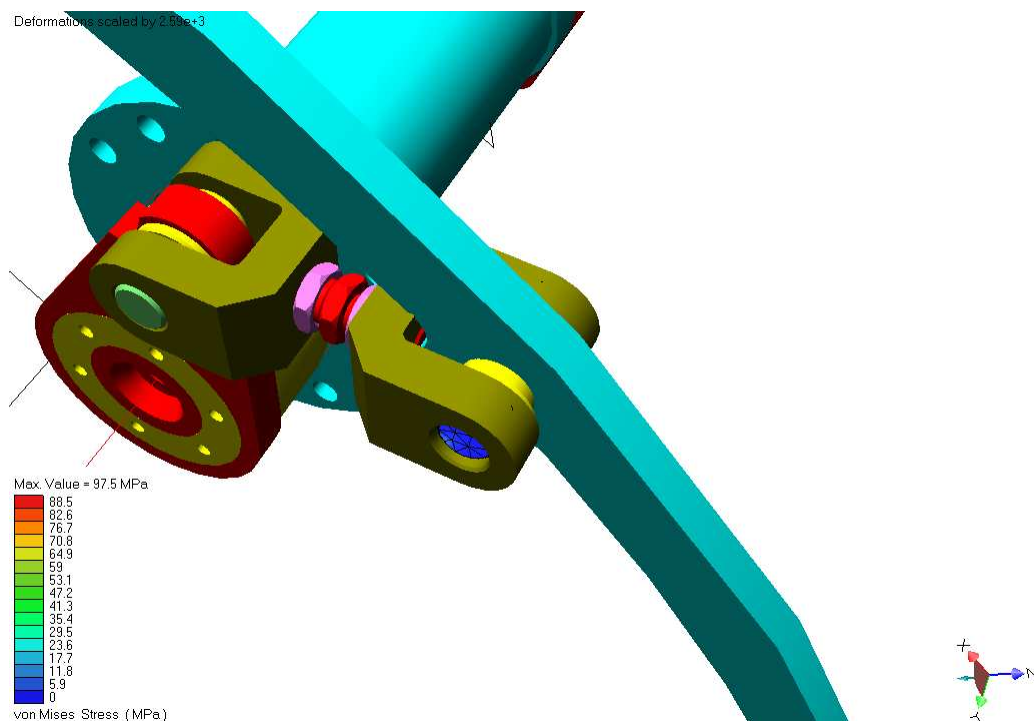


Fig. 8 Distribuția tensiunilor echivalente von Mises pentru bolțul de forfecare

În **capitolul 4** se realizează optimizarea mecanismului aparatului director cu programul ADAMS.

Optimizarea mecanismului aparatului director în ADAMS constă din parcurgerea următoarelor etape: parametrizarea modelului; definirea variabilelor de proiectare; definirea funcției obiectiv de optimizat; efectuarea studiilor de proiectare pentru identificarea variabilelor de proiectare principale, cu influență semnificativă asupra funcțiilor obiectiv; optimizarea propriu-zisă a sistemului mecanic pe baza variabilelor principale.

În prima parte a acestui capitol este descrisă foarte exact fiecare etapă care participă la optimizarea sistemului mecanic.

Pentru optimizarea răspunsului dinamic al mecanismului interesează momentul din cupla cinematică centrală H. Răspunsul dinamic optimal trebuie să respecte cu strictețe scopul pentru care a fost proiectat mecanismul aparatului director, respectiv unghiul de închidere sau deschidere a paletii.

Funcția obiectiv constă în minimizarea momentului din cupla cinematică H.

Pe paletă acționează o forță rezistentă a cărei lege de variație a fost stabilită pe cale experimentală.

Se consideră ca restricție de proiectare legea de variație în timp a unghiului de închidere sau deschidere a paletii, care guvernează funcționarea corectă a mecanismului aparatului director.

Se determina diagramele de variație în timp pentru funcția obiectiv pe parcursul a 3 iterații și diagrama finală a funcției obiectiv când se modifică variabilele principale de proiectare.

Analizând aceste diagrame s-a constatat că pe parcursul studiului de proiectare, o influență semnificativă asupra funcției obiectiv o are variabila DV_2. Este o observație importantă care a condus la ideea modificării lungimii bielei mecanismului. Din punct de vedere

organologic, biela 4 este concepută în sistem modular, tocmai pentru a permite această modificare de lungime.

Prin acest proces se urmărește evoluția finală în timp a funcției obiectiv la modificarea variabilelor principale de proiectare cu păstrarea variației unghiulare a paletelor în limitele impuse de rolul funcțional al mecanismului.

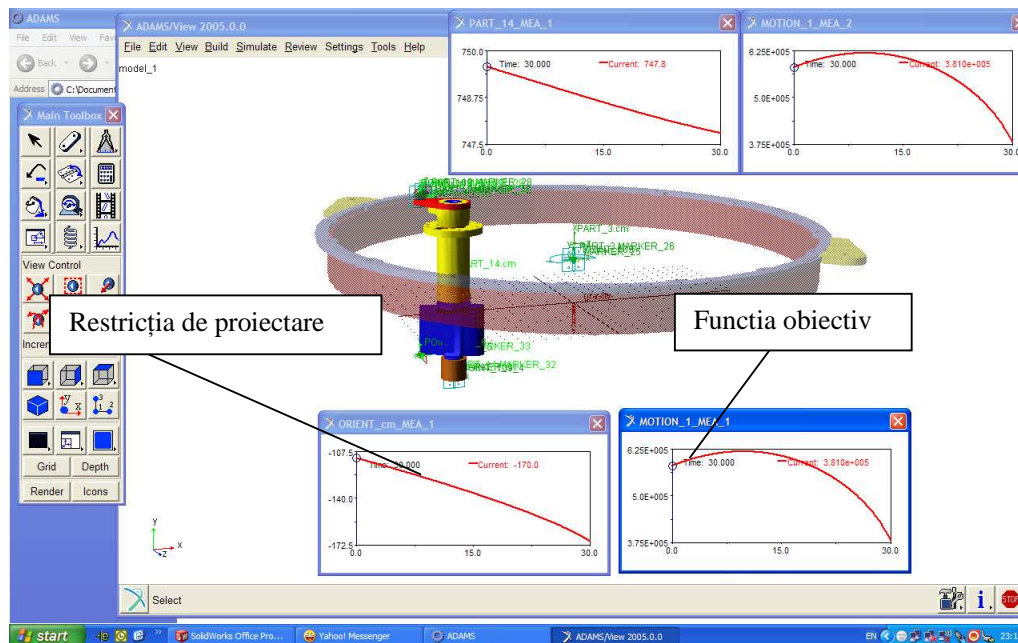


Fig. 9 Identificarea legilor de variație în timp pentru parametrii procesului de optimizare

Capitolul 5 tratează analiza experimentală a mecanismului aparatului director și a unor componente importante ale turbinei Francis.

1.1.1 Aparatura de măsură și traductoare utilizate:

- Sistem de achiziție Spider 8, rezoluție 12 biti;
- Condiționar de semnal NEXUS 2692-A-0I4, liniaritate 0.01%;
- Accelerometre Bruel & Kjaer tip 4391 (3 buc.), liniaritate 2%;
- Traductor inductiv de cursă liniară WA300, liniaritate 2%;
- Traductor potențiomtric de rotație tip T127PA, 5 k Ω , liniaritate 2%;
- Traductor de forță H4450-23, liniaritate 3%;
- Notebook IBM ThinkPad R51.

1.1.2 Parametrii înregistrați:

- F_tr(N) – Forța de tracțiune la nivelul furcii H4450-23 a aparatului director;
- Rot_Pal(grd) – Unghiul de rotație al paletelor directoare;
- Crs_Lin(mm) – Cursa liniară a pistonului de acționare;
- AccO_Pal(m/s²) – Accelația pe direcția orizontală a lagărului superior al paletelor directoare;
- AccV_Pal(m/s²) – Accelația pe direcția verticală a lagărului superior al paletelor directoare;

- AccO_Lag(m/s²) – Accelerația pe direcția orizontală a lagărului superior al turbinei.



Fig. 10 Măsurarea cursei liniare a pistonului de acționare

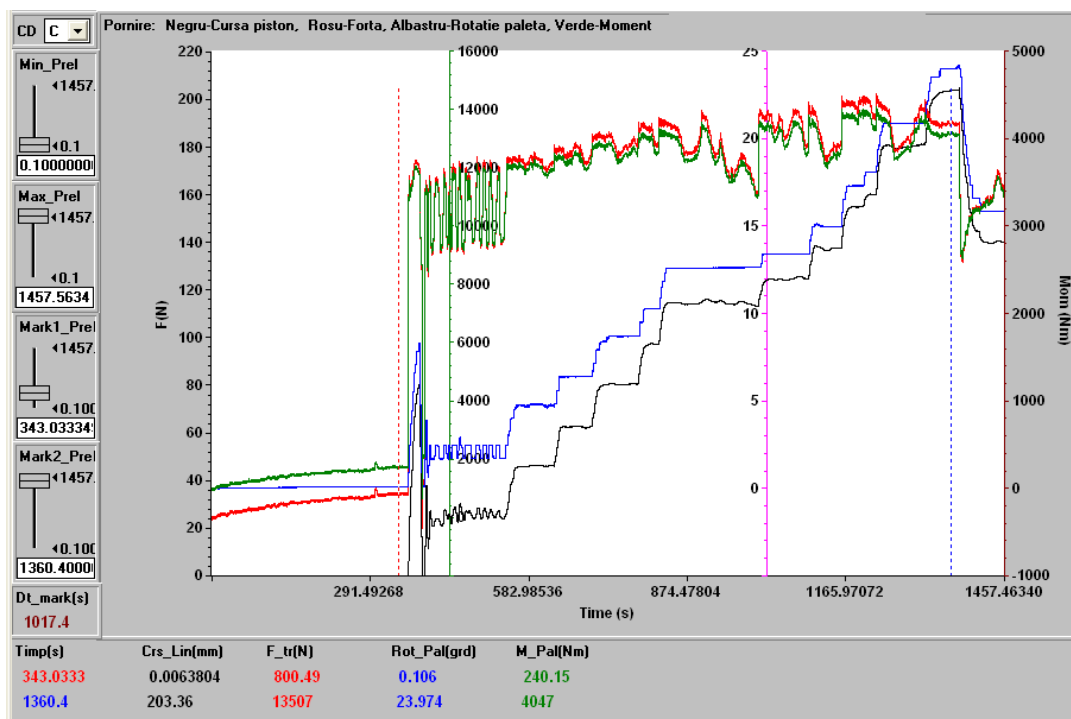


Fig. 11 Evoluția parametrilor funcționali la pornirea grupului hidro.

Concluzii privind experimentările efectuate pe aparatul director al turbinei Francis de 50 MW

Cercetările experimentale au analizat dinamica și stabilitatea aparatului director al turbinei Francis de 50 MW la manevrele de pornire, încărcare la sarcina nominală și oprire ale grupului hidro de la SH Tismana. Ca parametri caracteristici ai dinamicii aparatului director, au fost măsurati sau determinați prin calcul: forța de tracțiune la nivelul furcii, unghiul de rotație al paletii directoare, cursa liniară a pistonului de acționare, momentul de acționare a furcii aparatului director.

Măsurarea și analiza vibrațiilor generate de grupul hidro, cu identificarea surselor de vibrații, s-a făcut în scopul evaluării stării tehnice a aparatului director și a grupului hidro.

Din analiza înregistrărilor efectuate la manevrele de pornire, încărcare electrică și oprire grup se desprind concluzii importante, dintre care reținem următoarele:

1. La pornirea grupului, momentul admisiei apei în turbină se face cu instabilitate mare în controlul cursei pistonului de acționare, instabilitate care conduce la variația puternică a forței și momentului de acționare al paletelor aparatului director.

2. Pe durata funcționării în gol, există mici instabilități în menținerea turației de sincronism, instabilități care se evidențiază în variații ale cursei pistonului de acționare, ale unghiului de rotație al paletii directoare și se regăsesc în variații ale forței și momentului de acționare a paletelor.

3. Din analiza dependenței cursei de rotație a paletelor ca funcție de cursa liniară a pistonului de acționare, la pornirea și la oprirea grupului hidro, se observă o foarte bună liniaritate, cu o mică histereză dată de diferența dintre cursele la pornire și la oprire, explicabilă prin faptul că jetul de apă opune un moment rezistent la închiderea paletelor directoare.

4. Din analiza caracteristicilor putere electrică-accelerație de vibrație, se desprinde concluzia că, din puncte de vedere vibratoriu, turbina funcționează optim la un regim de încărcare electrică de 30 – 50MW. În zona 15 – 25 MW grupul hidro prezintă vibrații mai mari, motiv pentru care nu este recomandat lucrul în această zonă de încărcare electrică

5. Vibrațiile generate la oprirea grupului hidro sunt de nivel mai mic decât cele generate la pornire și încărcare electrică. Pe durata manevrei de oprire, nivelul vibrațiilor generate la turbină este mai mare decât nivelul vibrațiilor generate la nivelul aparatului director.

CONTRIBUȚII ORIGINALE

1. Bază de date cu metode și modele matematice, rezultate experimentale și referințe bibliografice despre modelarea dinamică și optimizarea sistemelor mecanice mobile, în general, și a mecanismelor de reglare de la turbinele hidraulice, în special.
2. Modele cinematice pentru mecanismul aparatului director, bazate pe un formalism matricial ușor de implementat pe calculator, cu posibilități multiple de considerare a unor configurații cinematice complexe, oferite de introducerea matricilor de conversie.
3. Modelare geometrică complexă, în limbajul proiectării asistate, pe sisteme 2D și 3D, a mecanismului aparatului director, al turbinei de tip Francis FVM 61.5-234, a hidroagregatului de la CHE Tismana Subteran.
4. Considerarea elementelor cinematice ca subansamble pe modele 2D cu respectarea riguroasă a condițiilor impuse de prototiparea virtuală.
5. Elaborarea procedurii și a modelelor matematice pentru analiza dinamică inversă a mecanismului aparatului director.

6. Programe pentru procesarea numerică a modelelor matematice cu identificarea legilor de variație în timp ale parametrilor cinematici și pentru forțele de legătură din cuplele cinematice în regim dinamic.
7. Modelarea mecanismului aparatului director în regim cinematic și dinamic cu programul ADAMS.
8. Analiza dinamică a paletii mecanismului aparatului director cu programul ANSYS.
9. Modelarea parametrizată a elementelor cinematice pentru optimizarea structurală cu metoda elementului finit.
10. Analiza elastodinamică cu metoda elementului finit a mecanismului aparatului director, considerat ca un ansamblu format din elemente cinematice deformabile.
11. Identificarea pe cale experimentală a legilor de variație în timp pentru parametrii dinamici necesari procesării analizei dinamice inverse a mecanismului.
12. Algoritm și metodă pentru optimizarea în regim dinamic a mecanismului aparatului director cu programul ADAMS.
13. Model experimental redus, cu respectarea structurii și a funcționalității mecanismului aparatului director de la turbina Francis.
14. Analiza experimentală complexă a mecanismului aparatului director, al turbinei hidraulice de la CHE Tismana Subteran, pentru următoarele regimuri de funcționare:
 - pornire grup cu încărcare electrică în trepte de palier constant până la 50MW, 1457s;
 - regim de funcționare la putere constantă;
 - oprire grup, 328s.
15. Identificarea experimentală a legilor de variație în timp pentru următorii parametri dinamici:
 - forța de tracțiune la nivelul furcii;
 - unghiul de rotație al paletii directoare;
 - cursa liniară a pistonului de acționare;
 - momentul de acționare al furcii aparatului director.
16. Diagnosticarea comportării dinamice a mecanismului aparatului director și a întregului hidroagregat printr-o analiză experimentală complexă a vibrațiilor.
17. Considerarea cercetărilor într-un sistem integrat model cinematic – proiectare asistată parametrizată – experiment a creat condițiile optime pentru prototiparea virtuală a mecanismului aparatului director de la turbina CHE Tismana Subteran.

**UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA
FACULTATEA DE MECANICĂ**

**CERCETĂRI ASUPRA UNOR
MECANISME DE REGLARE DE LA
TURBINELE HIDRAULICE**

- REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT -

Doctorand:

Ing. Danel Petre Semenescu

Conducător științific:

Prof. univ. dr. ing. Nicolae Dumitru

- 2010 -

Necesitatea proiectării și producerii unor mașini hidraulice cu performanțe superioare în vederea reabilitării/retehnologizării hidroagregatelor existente în exploatare, adaptate specificului fiecărei amenajări hidroelectrice, a impus utilizarea modelării CAD a ansamblelor și reperelor ce intră în componența mașinilor hidraulice, a modelării și optimizării formei părților paletate din componența mașinilor hidraulice, a analizei cu element finit a curgerii hidrodinamice și optimizării traseului hidraulic și a perfecționării unor soluții constructive, prin studierea câmpului de tensiuni cu metoda elementului finit.

Prezenta teză de doctorat se înscrie pe această linie, așa după cum se vede în descrierea de mai jos.

Obiective:

1. Modelarea cinematică prin metode bazate pe un formalism matricial ușor de implementat pe calculator, cu posibilități multiple de considerare a particularităților geometrice ale elementelor cinematice.
2. Modelarea dinamică a mecanismului aparatului director prin considerarea într-un sistem integrat: modele matematice - experiment – procesare numerică.
3. Modelare geometrică complexă, în limbajul proiectării asistate, în regim parametrizat pe sisteme 2D și 3D, a mecanismului aparatului director, al turbinei de tip Francis FVM 61.5-234, a hidroagregatului de la CHE Tismana Subteran.
4. Prototiparea virtuală a mecanismului aparatului director cu simulări numerice și grafice.
5. Dezvoltarea unui algoritm de optimizare în regim dinamic pe sisteme mecanice mobile.
6. Diagnosticarea și identificarea experimentală a parametrilor dinamici ai mecanismului aparatului director de la turbina hidraulică Francis cu ax vertical tip FVM 61,5-234, din cadrul CHE Tismana Subteran, pentru trei regimuri de funcționare: pornire, funcționare la parametri normali și oprire.

În **capitolul 1** este prezentat stadiul actual al cercetărilor și se justifică importanța temei abordate.

Stadiul actual al cercetărilor este structurat cu referințe bibliografice pe următoarele segmente importante:

- modelarea dinamică a sistemelor mecanice;
- realizări și cercetări teoretice și experimentale în domeniul turbinelor hidraulice;
- modelarea cu elemente finite a sistemelor mecanice mobile;
- metode privind optimizarea sistemelor;
- prezentarea generală a mecanismului aparatului director de la turbina Francis.

Capitolul 2 tratează analiza dinamică a mecanismului aparatului director.

Este un capitol laborios la care problemele de dinamică sunt studiate și analizate într-un sistem integrat de tipul model matematic – experiment – procesare și simulare numerică.

Acest capitol cuprinde:

- O metodă generală pentru modelarea cinematică a sistemelor mecanice mobile, bazată pe un formalism matricial flexibil, ușor de implementat în programele de calcul numeric (MAPLE în

acest caz), cu posibilitatea considerării relativ ușoare a geometriei elementelor cinematice, prin introducerea matricilor de conversie;

- Modelarea cinematică a mecanismului aparatului director de la turbina Francis;
Mecanismul aparatului director este compus din următoarele părți principale:
 - Sistemul de 16 palete directe cu mișcare de rotație în jurul axei proprii, care asigură pe poziția deschis accesul fluidului către rotorul turbinei;
 - Mecanismul de transmitere a mișcării care se compune dintr-un inel de reglare, furca filetată stânga-dreapta cu posibilitatea modificării lungimii și o pârghie solidară cu subansamblul paletă directe;
 - Două servomotoare liniare cu o cursă maximă de 300 mm care comandă prin intermediul inelului de reglare închiderea sau deschiderea aparatului director.

Sistemul parametrizat de concepție a modelelor geometrice, cu respectarea riguroasă a condițiilor de contur dintre fiecare element și subansamblu, a creat condiții optime pentru modelarea dinamică a mecanismului, cu considerarea elementelor cinematice rigide sau flexibile, și, mai ales, pentru optimizarea întregului sistem în regim dinamic.

Modelarea geometrică a aparatului director al turbinei hidraulice de tip Francis FVM 61.5 – 234, a hidro-agregatului de la CHE Tismana Subteran, este prezentată în Fig. 1 și Fig. 2

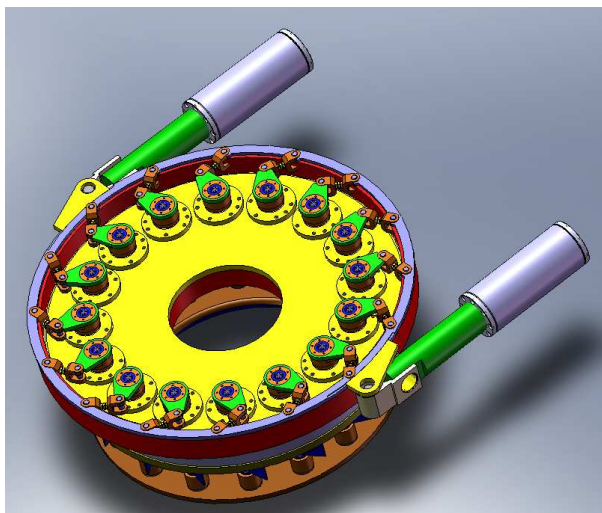


Fig.1 Modelul 3D al aparatului director de la turbina FVM 61,5-234

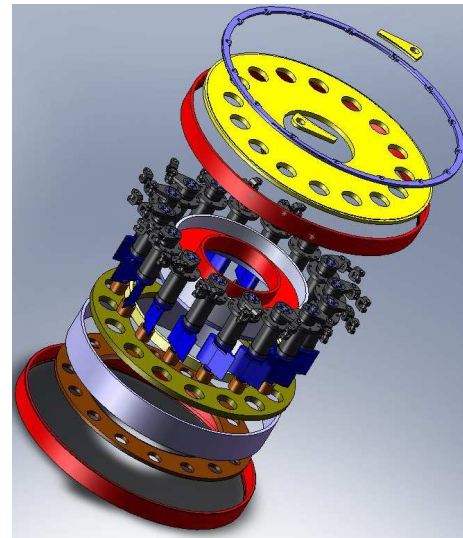


Fig. 2 Francis Vederea explodată a aparatului director

- Analiza dinamică inversă cuprinde:
 - considerarea ecuațiilor în formalismul Newton-Euler, presupunând elementele cinematice rigide;
 - elaborarea modelelor matematice pentru identificarea legilor de variație ale forțelor de legătură în regim dinamic, când s-au considerat următoarele sisteme de referință:
 - sistemul de referință global $T_0(X_0, Y_0, Z_0)$;
 - sistemele de referință mobile $T_i'(x_i', y_i', z_i')$, $T_j'(x_j', y_j', z_j')$, solidare cu elementele cinematice i și j ; $i = \overline{1,7}$;

- o sistemele de referință $T_i^K(x_i^K, y_i^K, z_i^K)$ și $T_j^K(x_j^K, y_j^K, z_j^K)$, centrate în cupla cinematică K și solidare cu elementele cinematice i și j .

Forțele de legătură se pot exprima în fiecare din sistemele de referință amintite anterior, cu considerarea matricilor de transformare a coordonatelor.

Pentru analiza dinamică inversă s-au parcurs următoarele etape:

- determinarea sistemului de ecuații care definește configurația cinematică a mecanismului;
- identificarea elementelor structurale care definesc ecuațiile de mișcare în formalismul Newton-Euler: vectorul coordonatelor generalizate \vec{q} , matricea maselor care definește proprietățile inerțiale ale sistemului mecanic, Jacobianul J_q corespunzător coordonatelor generalizate q și matricea forțelor generalizate active Q^a ;
- calculul multiplicatorilor lui Lagrange ;
- determinarea legilor de variație în timp în regim dinamic ale forțelor de legătură din cuplele cinematice.

Datele de intrare cu caracter dinamic pentru procesarea numerică au fost identificate pe cale experimentală (cursa pistonului și forța rezistentă pe paletă).

A fost elaborat un program pentru procesarea numerică a modelelor matematice care definesc legile de variație în timp pentru forțele de legătură din cuplele cinematice.

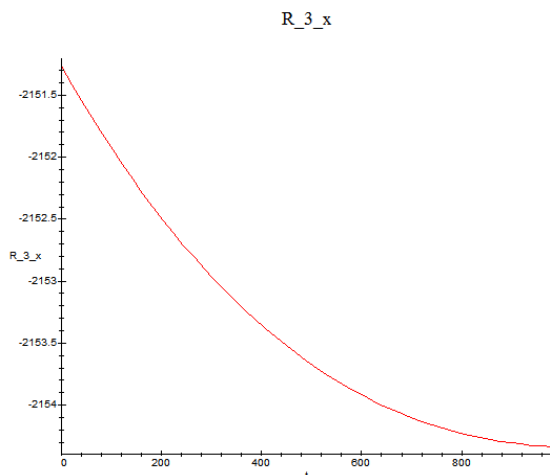


Fig. 3 Legea de variație a componentei forței de legătură, R_{3x}



Fig. 4 Modelul 3D pentru mecanismul aparatului director importat în ADAMS; cupla C, simulare 3D.

- Modelarea și simularea mecanismului aparatului director cu programul ADAMS.

S-au parcurs următoarele etape:

- transferul bazei de date din programul SOLIDWORKS în programul ADAMS, cu considerarea elementelor cinematice ca subansamble definite prin masă și proprietăți inerțiale; această bază de date importată corect în ADAMS va constitui modelul virtual care va governa procesul de prototipare virtuală
- construirea modelului cinematic al ansamblului virtual importat prin definirea elementelor cinematice, a cuplelor cinematice, aplicarea constrângerilor și considerarea expresiei matematice pentru legea de variație în timp a coordonatei

generalizate stabilite pe cale experimentale (cursa pistonului sau unghiul de variație în timp a poziției inelului de reglare);

- construirea modelului dinamic prin considerarea cuplei motoare cu elementele definitorii pentru o analiză dinamică, respectiv coeficient de amortizare, rigiditate și elementul de acționare (forță sau moment), când cunoaștem forțele exterioare care acționează (în acest caz forța rezistentă pe paletă, stabilită experimental).
- testarea modelului, într-o primă fază prin simulare, vizualizarea animației și a rezultatelor numerice;
- validarea modelului construit în ADAMS prin raportarea datelor măsurate experimental (forța rezistentă, legea de variație a cursei pistonului, forța motoare din piston sau momentul din cupla centrală a inelului de reglare H) și compararea rezultatelor teoretice cu cele experimentale;
- parametrizarea modelului prin definirea variabilelor de proiectare necesare ulterior procesului de optimizare a mecanismului.
- simularea tri-dimensională a funcționării mecanismului aparatului director în condiții cinematice și dinamice.

În finalul capitolului 2 sunt prezentate legile de variație în timp pentru poziții, viteze și accelerații, liniare sau unghiulare, pentru mai multe elemente cinematice sau pentru unele puncte caracteristice considerate ca puncte de interes pentru funcționarea sau exploatarea aparatului director.

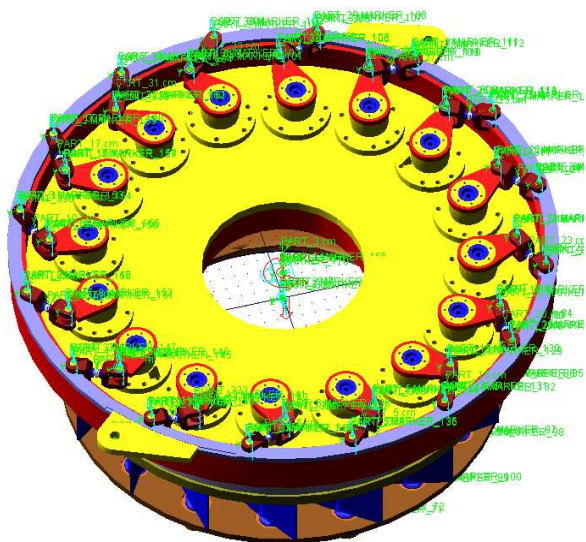


Fig. 5 Modelul 3D al mecanismului, cu identificarea cuplelor și elementelor cinematice.

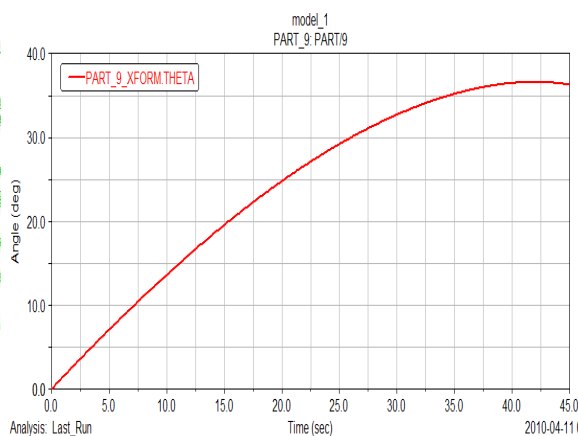


Fig. 6 Legea de variație în timp a poziției unghiulare pentru elementul 5 (part 9), în grade

Capitolul 3 prezintă modelarea cu elemente finite a mecanismului aparatului director și este structurat în trei părți:

- elaborarea modelului dinamic pentru o analiză cu elemente finite la cazul cel mai general;
- analiza dinamică a paletii aparatului director folosind metoda elementului finit;
- analiza dinamică a întregului mecanism cu considerarea elementelor cinematice deformabile.

Pentru analiza dinamică a paletii cu metoda elementului finit, aceasta se încarcă cu forța rezistentă variabilă în timp F_r , care este generată de curgerea fluidului pe suprafața activă a paletii, la închiderea sau deschiderea acesteia.

Această forță este stabilită pe cale experimentală și reprezintă, de fapt, sarcina distribuită în timp care solicită elementul final condus al aparatului director.

Se identifică legile de variație în timp pentru tensiuni, deformații și deplasări, care vor permite dezvoltarea unui proces de optimizare a paletelor în care funcția obiectivă să fie forma sau gabaritul (volumul, greutatea) paletii, iar restricția să fie definită printr-o valoare maximă a tensiunilor, deformațiilor și deplasărilor.

Modelarea geometrică parametrizată a fiecărui element component al acestui mecanism, prin procedura descrisă anterior, permite dezvoltarea în condiții de precizie maximă a procesului de optimizare geometrică, cinematică sau dinamică.

Pentru analiza elastodinamică a mecanismului aparatului director se procedează la modelarea cu elemente finite.

Este analizat în regim dinamic fiecare element cinematic considerat ca un subsansamblu cu proprietăți elastocinematice.

Din analiza cu elemente finite a mecanismului s-a constatat că valoarea maximă a tensiunilor este pentru boltul de forfecare, care are rol de protecție la suprasarcini.

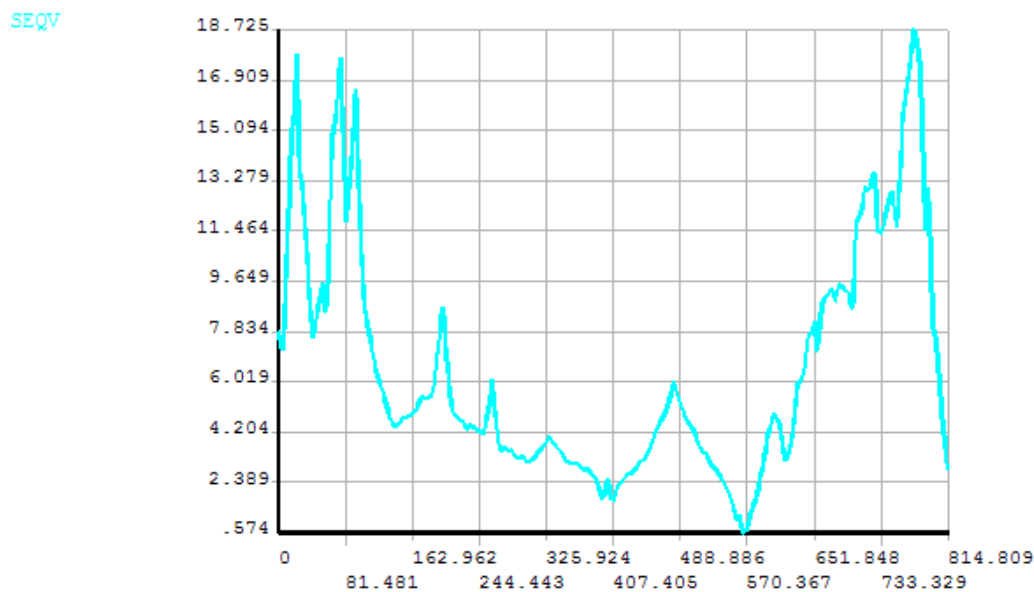


Fig. 7 Distribuția tensinilor echivalente von Mises, în zona concentratorilor de tensiune

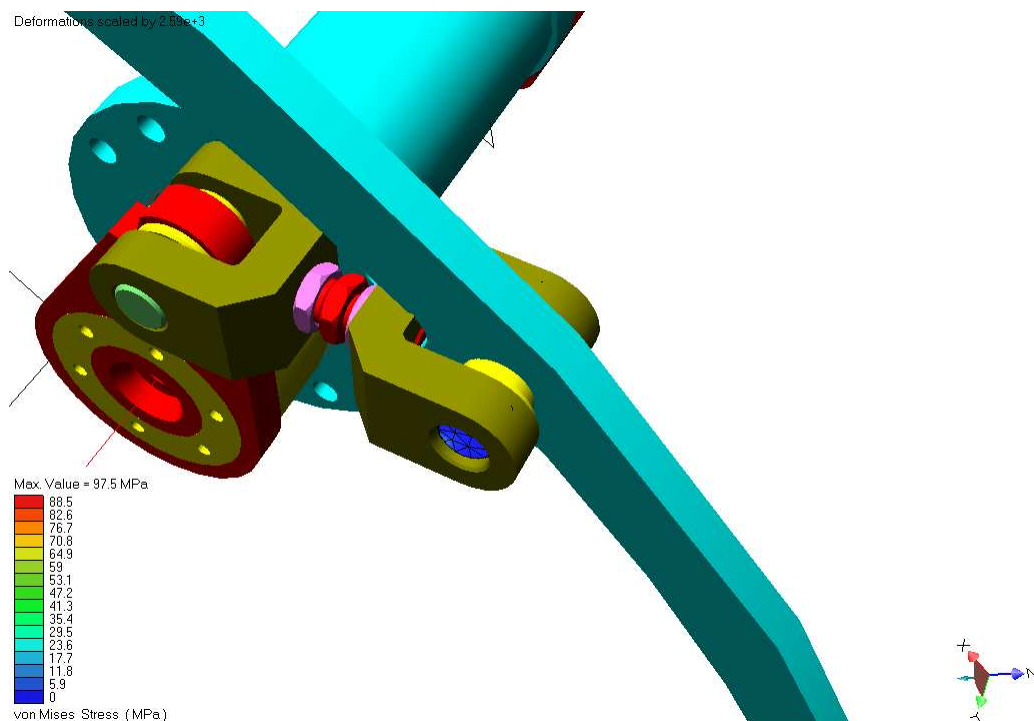


Fig. 8 Distribuția tensiunilor echivalente von Mises pentru bolțul de forfecare

În **capitolul 4** se realizează optimizarea mecanismului aparatului director cu programul ADAMS.

Optimizarea mecanismului aparatului director în ADAMS constă din parcurgerea următoarelor etape: parametrizarea modelului; definirea variabilelor de proiectare; definirea funcției obiectiv de optimizat; efectuarea studiilor de proiectare pentru identificarea variabilelor de proiectare principale, cu influență semnificativă asupra funcțiilor obiectiv; optimizarea propriu-zisă a sistemului mecanic pe baza variabilelor principale.

În prima parte a acestui capitol este descrisă foarte exact fiecare etapă care participă la optimizarea sistemului mecanic.

Pentru optimizarea răspunsului dinamic al mecanismului interesează momentul din cupla cinematică centrală H. Răspunsul dinamic optimal trebuie să respecte cu strictețe scopul pentru care a fost proiectat mecanismul aparatului director, respectiv unghiul de închidere sau deschidere a paletei.

Funcția obiectiv constă în minimizarea momentului din cupla cinematică H.

Pe paletă acționează o forță rezistentă a cărei lege de variație a fost stabilită pe cale experimentală.

Se consideră ca restricție de proiectare legea de variație în timp a unghiului de închidere sau deschidere a paletei, care guvernează funcționarea corectă a mecanismului aparatului director.

Se determina diagramele de variație în timp pentru funcția obiectiv pe parcursul a 3 iterații și diagrama finală a funcției obiectiv când se modifică variabilele principale de proiectare.

Analizând aceste diagrame s-a constatat că pe parcursul studiului de proiectare, o influență semnificativă asupra funcției obiectiv o are variabila DV_2. Este o observație importantă care a condus la ideea modificării lungimii bielei mecanismului. Din punct de vedere

organologic, biela 4 este concepută în sistem modular, tocmai pentru a permite această modificare de lungime.

Prin acest proces se urmărește evoluția finală în timp a funcției obiectiv la modificarea variabilelor principale de proiectare cu păstrarea variației unghiulare a paletelor în limitele impuse de rolul funcțional al mecanismului.

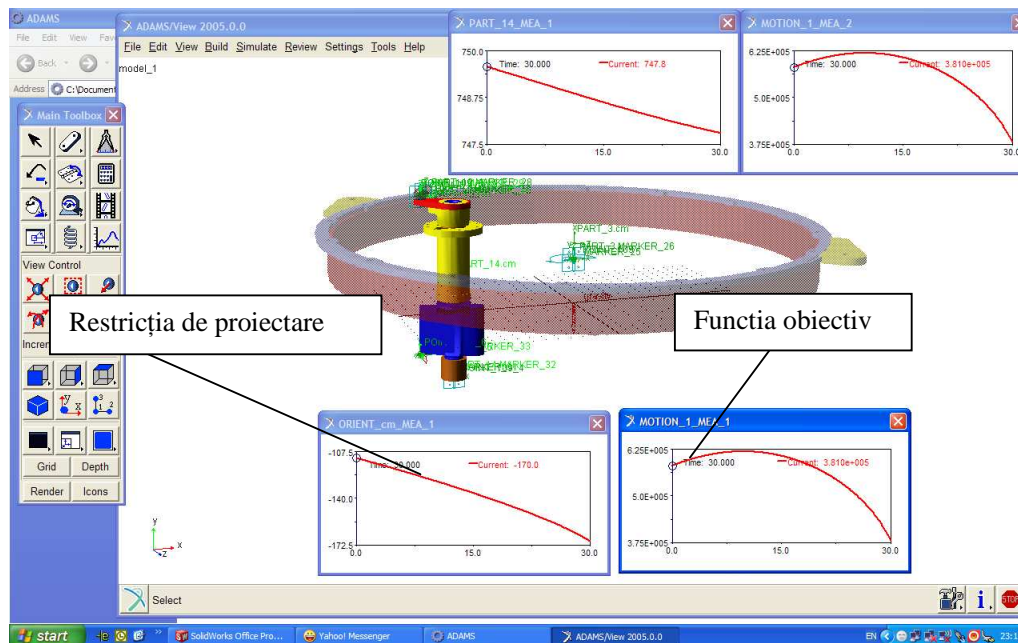


Fig. 9 Identificarea legilor de variație în timp pentru parametrii procesului de optimizare

Capitolul 5 tratează analiza experimentală a mecanismului aparatului director și a unor componente importante ale turbinei Francis.

1.1.1 Aparatura de măsură și traductoare utilizate:

- Sistem de achiziție Spider 8, rezoluție 12 biti;
- Condiționar de semnal NEXUS 2692-A-0I4, liniaritate 0.01%;
- Accelerometre Bruel & Kjaer tip 4391 (3 buc.), liniaritate 2%;
- Traductor inductiv de cursă liniară WA300, liniaritate 2%;
- Traductor potențiomtric de rotație tip T127PA, 5 k Ω , liniaritate 2%;
- Traductor de forță H4450-23, liniaritate 3%;
- Notebook IBM ThinkPad R51.

1.1.2 Parametrii înregistrați:

- F_tr(N) – Forța de tracțiune la nivelul furcii H4450-23 a aparatului director;
- Rot_Pal(grd) – Unghiul de rotație al paletelor directoare;
- Crs_Lin(mm) – Cursa liniară a pistonului de acționare;
- AccO_Pal(m/s²) – Accelația pe direcția orizontală a lagărului superior al paletelor directoare;
- AccV_Pal(m/s²) – Accelația pe direcția verticală a lagărului superior al paletelor directoare;

- AccO_Lag(m/s²) – Accelerația pe direcția orizontală a lagărului superior al turbinei.



Fig. 10 Măsurarea cursei liniare a pistonului de acționare

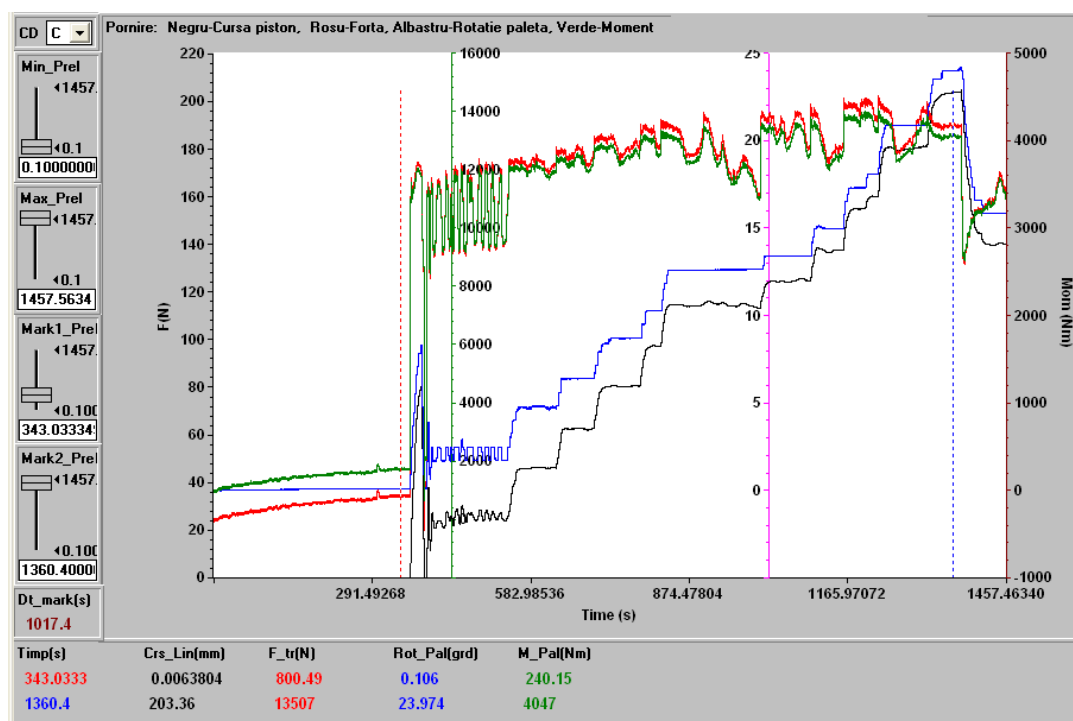


Fig. 11 Evoluția parametrilor funcționali la pornirea grupului hidro.

Concluzii privind experimentările efectuate pe aparatul director al turbinei Francis de 50 MW

Cercetările experimentale au analizat dinamica și stabilitatea aparatului director al turbinei Francis de 50 MW la manevrele de pornire, încărcare la sarcina nominală și oprire ale grupului hidro de la SH Tismana. Ca parametri caracteristici ai dinamicii aparatului director, au fost mășurați sau determinați prin calcul: forța de tracțiune la nivelul furcii, unghiul de rotație al paletii directoare, cursa liniară a pistonului de acționare, momentul de acționare a furcii aparatului director.

Măsurarea și analiza vibrațiilor generate de grupul hidro, cu identificarea surselor de vibrații, s-a făcut în scopul evaluării stării tehnice a aparatului director și a grupului hidro.

Din analiza înregistrărilor efectuate la manevrele de pornire, încărcare electrică și oprire grup se desprind concluzii importante, dintre care reținem următoarele:

1. La pornirea grupului, momentul admisiei apei în turbină se face cu instabilitate mare în controlul cursei pistonului de acționare, instabilitate care conduce la variația puternică a forței și momentului de acționare al paletelor aparatului director.

2. Pe durata funcționării în gol, există mici instabilități în menținerea turației de sincronism, instabilități care se evidențiază în variații ale cursei pistonului de acționare, ale unghiului de rotație al paletii directoare și se regăsesc în variații ale forței și momentului de acționare a paletelor.

3. Din analiza dependenței cursei de rotație a paletelor ca funcție de cursa liniară a pistonului de acționare, la pornirea și la oprirea grupului hidro, se observă o foarte bună liniaritate, cu o mică histereză dată de diferența dintre cursele la pornire și la oprire, explicabilă prin faptul că jetul de apă opune un moment rezistent la închiderea paletelor directoare.

4. Din analiza caracteristicilor putere electrică-accelerație de vibrație, se desprinde concluzia că, din puncte de vedere vibratoriu, turbina funcționează optim la un regim de încărcare electrică de 30 – 50MW. În zona 15 – 25 MW grupul hidro prezintă vibrații mai mari, motiv pentru care nu este recomandat lucrul în această zonă de încărcare electrică

5. Vibrațiile generate la oprirea grupului hidro sunt de nivel mai mic decât cele generate la pornire și încărcare electrică. Pe durata manevrei de oprire, nivelul vibrațiilor generate la turbină este mai mare decât nivelul vibrațiilor generate la nivelul aparatului director.

CONTRIBUȚII ORIGINALE

1. Bază de date cu metode și modele matematice, rezultate experimentale și referințe bibliografice despre modelarea dinamică și optimizarea sistemelor mecanice mobile, în general, și a mecanismelor de reglare de la turbinele hidraulice, în special.
2. Modele cinematice pentru mecanismul aparatului director, bazate pe un formalism matricial ușor de implementat pe calculator, cu posibilități multiple de considerare a unor configurații cinematice complexe, oferite de introducerea matricilor de conversie.
3. Modelare geometrică complexă, în limbajul proiectării asistate, pe sisteme 2D și 3D, a mecanismului aparatului director, al turbinei de tip Francis FVM 61.5-234, a hidroagregatului de la CHE Tismana Subteran.
4. Considerarea elementelor cinematice ca subansamble pe modele 2D cu respectarea riguroasă a condițiilor impuse de prototiparea virtuală.
5. Elaborarea procedurii și a modelelor matematice pentru analiza dinamică inversă a mecanismului aparatului director.

6. Programe pentru procesarea numerică a modelelor matematice cu identificarea legilor de variație în timp ale parametrilor cinematici și pentru forțele de legătură din cuplele cinematice în regim dinamic.
7. Modelarea mecanismului aparatului director în regim cinematic și dinamic cu programul ADAMS.
8. Analiza dinamică a paletii mecanismului aparatului director cu programul ANSYS.
9. Modelarea parametrizată a elementelor cinematice pentru optimizarea structurală cu metoda elementului finit.
10. Analiza elastodinamică cu metoda elementului finit a mecanismului aparatului director, considerat ca un ansamblu format din elemente cinematice deformabile.
11. Identificarea pe cale experimentală a legilor de variație în timp pentru parametrii dinamici necesari procesării analizei dinamice inverse a mecanismului.
12. Algoritm și metodă pentru optimizarea în regim dinamic a mecanismului aparatului director cu programul ADAMS.
13. Model experimental redus, cu respectarea structurii și a funcționalității mecanismului aparatului director de la turbina Francis.
14. Analiza experimentală complexă a mecanismului aparatului director, al turbinei hidraulice de la CHE Tismana Subteran, pentru următoarele regimuri de funcționare:
 - pornire grup cu încărcare electrică în trepte de palier constant până la 50MW, 1457s;
 - regim de funcționare la putere constantă;
 - oprire grup, 328s.
15. Identificarea experimentală a legilor de variație în timp pentru următorii parametri dinamici:
 - forța de tracțiune la nivelul furcii;
 - unghiul de rotație al paletii directoare;
 - cursa liniară a pistonului de acționare;
 - momentul de acționare al furcii aparatului director.
16. Diagnosticarea comportării dinamice a mecanismului aparatului director și a întregului hidroagregat printr-o analiză experimentală complexă a vibrațiilor.
17. Considerarea cercetărilor într-un sistem integrat model cinematic – proiectare asistată parametrizată – experiment a creat condițiile optime pentru prototiparea virtuală a mecanismului aparatului director de la turbina CHE Tismana Subteran.

**UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA
FACULTATEA DE MECANICĂ**

**CERCETĂRI ASUPRA UNOR
MECANISME DE REGLARE DE LA
TURBINELE HIDRAULICE**

- REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT -

Doctorand:

Ing. Danel Petre Semenescu

Conducător științific:

Prof. univ. dr. ing. Nicolae Dumitru

- 2010 -

Necesitatea proiectării și producerii unor mașini hidraulice cu performanțe superioare în vederea reabilitării/retehnologizării hidroagregatelor existente în exploatare, adaptate specificului fiecărei amenajări hidroelectrice, a impus utilizarea modelării CAD a ansamblelor și reperelor ce intră în componența mașinilor hidraulice, a modelării și optimizării formei părților paletate din componența mașinilor hidraulice, a analizei cu element finit a curgerii hidrodinamice și optimizării traseului hidraulic și a perfecționării unor soluții constructive, prin studierea câmpului de tensiuni cu metoda elementului finit.

Prezenta teză de doctorat se înscrie pe această linie, așa după cum se vede în descrierea de mai jos.

Obiective:

1. Modelarea cinematică prin metode bazate pe un formalism matricial ușor de implementat pe calculator, cu posibilități multiple de considerare a particularităților geometrice ale elementelor cinematice.
2. Modelarea dinamică a mecanismului aparatului director prin considerarea într-un sistem integrat: modele matematice - experiment – procesare numerică.
3. Modelare geometrică complexă, în limbajul proiectării asistate, în regim parametrizat pe sisteme 2D și 3D, a mecanismului aparatului director, al turbinei de tip Francis FVM 61.5-234, a hidroagregatului de la CHE Tismana Subteran.
4. Prototiparea virtuală a mecanismului aparatului director cu simulări numerice și grafice.
5. Dezvoltarea unui algoritm de optimizare în regim dinamic pe sisteme mecanice mobile.
6. Diagnosticarea și identificarea experimentală a parametrilor dinamici ai mecanismului aparatului director de la turbina hidraulică Francis cu ax vertical tip FVM 61,5-234, din cadrul CHE Tismana Subteran, pentru trei regimuri de funcționare: pornire, funcționare la parametri normali și oprire.

În **capitolul 1** este prezentat stadiul actual al cercetărilor și se justifică importanța temei abordate.

Stadiul actual al cercetărilor este structurat cu referințe bibliografice pe următoarele segmente importante:

- modelarea dinamică a sistemelor mecanice;
- realizări și cercetări teoretice și experimentale în domeniul turbinelor hidraulice;
- modelarea cu elemente finite a sistemelor mecanice mobile;
- metode privind optimizarea sistemelor;
- prezentarea generală a mecanismului aparatului director de la turbina Francis.

Capitolul 2 tratează analiza dinamică a mecanismului aparatului director.

Este un capitol laborios la care problemele de dinamică sunt studiate și analizate într-un sistem integrat de tipul model matematic – experiment – procesare și simulare numerică.

Acest capitol cuprinde:

- O metodă generală pentru modelarea cinematică a sistemelor mecanice mobile, bazată pe un formalism matricial flexibil, ușor de implementat în programele de calcul numeric (MAPLE în

acest caz), cu posibilitatea considerării relativ ușoare a geometriei elementelor cinematice, prin introducerea matricilor de conversie;

- Modelarea cinematică a mecanismului aparatului director de la turbina Francis;
Mecanismul aparatului director este compus din următoarele părți principale:
 - Sistemul de 16 palete directe cu mișcare de rotație în jurul axei proprii, care asigură pe poziția deschis accesul fluidului către rotorul turbinei;
 - Mecanismul de transmitere a mișcării care se compune dintr-un inel de reglare, furca filetată stânga-dreapta cu posibilitatea modificării lungimii și o pârghie solidară cu subansamblul paletă directe;
 - Două servomotoare liniare cu o cursă maximă de 300 mm care comandă prin intermediul inelului de reglare închiderea sau deschiderea aparatului director.

Sistemul parametrizat de concepție a modelelor geometrice, cu respectarea riguroasă a condițiilor de contur dintre fiecare element și subansamblu, a creat condiții optime pentru modelarea dinamică a mecanismului, cu considerarea elementelor cinematice rigide sau flexibile, și, mai ales, pentru optimizarea întregului sistem în regim dinamic.

Modelarea geometrică a aparatului director al turbinei hidraulice de tip Francis FVM 61.5 – 234, a hidro-agregatului de la CHE Tismana Subteran, este prezentată în Fig. 1 și Fig. 2

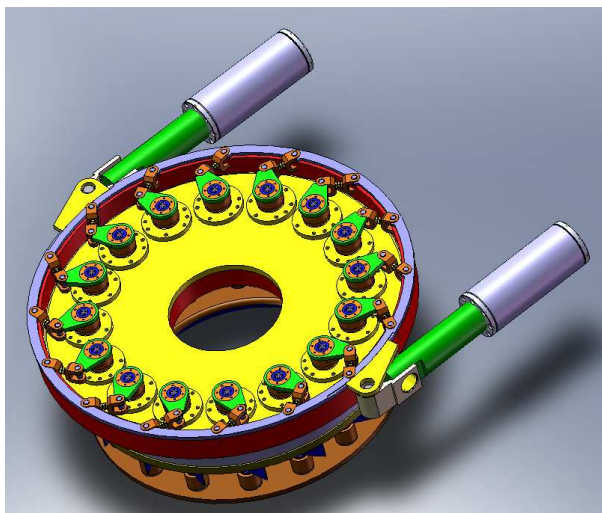


Fig.1 Modelul 3D al aparatului director de la turbina FVM 61,5-234

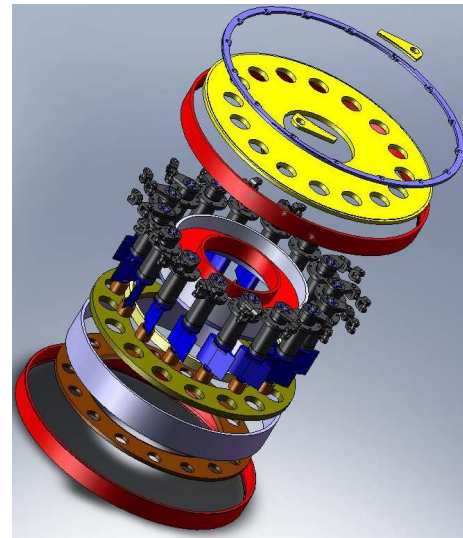


Fig. 2 Francis Vederea explodată a aparatului director

- Analiza dinamică inversă cuprinde:
 - considerarea ecuațiilor în formalismul Newton-Euler, presupunând elementele cinematice rigide;
 - elaborarea modelelor matematice pentru identificarea legilor de variație ale forțelor de legătură în regim dinamic, când s-au considerat următoarele sisteme de referință:
 - sistemul de referință global $T_0(X_0, Y_0, Z_0)$;
 - sistemele de referință mobile $T_i'(x_i', y_i', z_i')$, $T_j'(x_j', y_j', z_j')$, solidare cu elementele cinematice i și j ; $i = \overline{1,7}$;

- o sistemele de referință $T_i^K(x_i^K, y_i^K, z_i^K)$ și $T_j^K(x_j^K, y_j^K, z_j^K)$, centrate în cupla cinematică K și solidare cu elementele cinematice i și j .

Forțele de legătură se pot exprima în fiecare din sistemele de referință amintite anterior, cu considerarea matricilor de transformare a coordonatelor.

Pentru analiza dinamică inversă s-au parcurs următoarele etape:

- determinarea sistemului de ecuații care definește configurația cinematică a mecanismului;
- identificarea elementelor structurale care definesc ecuațiile de mișcare în formalismul Newton-Euler: vectorul coordonatelor generalizate \vec{q} , matricea maselor care definește proprietățile inerțiale ale sistemului mecanic, Jacobianul J_q corespunzător coordonatelor generalizate q și matricea forțelor generalizate active Q^a ;
- calculul multiplicatorilor lui Lagrange ;
- determinarea legilor de variație în timp în regim dinamic ale forțelor de legătură din cuplele cinematice.

Datele de intrare cu caracter dinamic pentru procesarea numerică au fost identificate pe cale experimentală (cursa pistonului și forța rezistentă pe paletă).

A fost elaborat un program pentru procesarea numerică a modelelor matematice care definesc legile de variație în timp pentru forțele de legătură din cuplele cinematice.

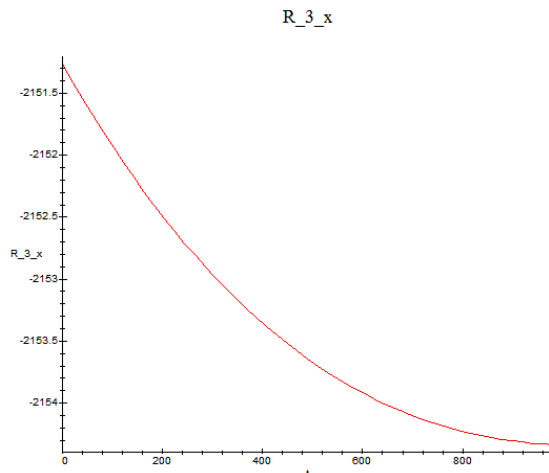


Fig. 3 Legea de variație a componentei forței de legătură, R_{3x}



Fig. 4 Modelul 3D pentru mecanismul aparatului director importat în ADAMS; cupla C, simulare 3D.

- Modelarea și simularea mecanismului aparatului director cu programul ADAMS.

S-au parcurs următoarele etape:

- transferul bazei de date din programul SOLIDWORKS în programul ADAMS, cu considerarea elementelor cinematice ca subansamble definite prin masă și proprietăți inerțiale; această bază de date importată corect în ADAMS va constitui modelul virtual care va governa procesul de prototipare virtuală
- construirea modelului cinematic al ansamblului virtual importat prin definirea elementelor cinematice, a cuplelor cinematice, aplicarea constrângerilor și considerarea expresiei matematice pentru legea de variație în timp a coordonatei

generalizate stabilite pe cale experimentale (cursa pistonului sau unghiul de variație în timp a poziției inelului de reglare);

- construirea modelului dinamic prin considerarea cuplei motoare cu elementele definitorii pentru o analiză dinamică, respectiv coeficient de amortizare, rigiditate și elementul de acționare (forță sau moment), când cunoaștem forțele exterioare care acționează (în acest caz forța rezistentă pe paletă, stabilită experimental).
- testarea modelului, într-o primă fază prin simulare, vizualizarea animației și a rezultatelor numerice;
- validarea modelului construit în ADAMS prin raportarea datelor măsurate experimental (forța rezistentă, legea de variație a cursei pistonului, forța motoare din piston sau momentul din cupla centrală a inelului de reglare H) și compararea rezultatelor teoretice cu cele experimentale;
- parametrizarea modelului prin definirea variabilelor de proiectare necesare ulterior procesului de optimizare a mecanismului.
- simularea tri-dimensională a funcționării mecanismului aparatului director în condiții cinematice și dinamice.

În finalul capitolului 2 sunt prezentate legile de variație în timp pentru poziții, viteze și accelerații, liniare sau unghiulare, pentru mai multe elemente cinematice sau pentru unele puncte caracteristice considerate ca puncte de interes pentru funcționarea sau exploatarea aparatului director.

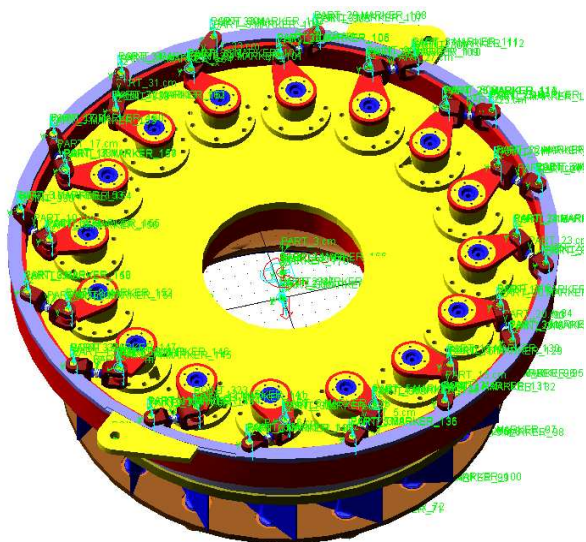


Fig. 5 Modelul 3D al mecanismului, cu identificarea cuplelor și elementelor cinematice.

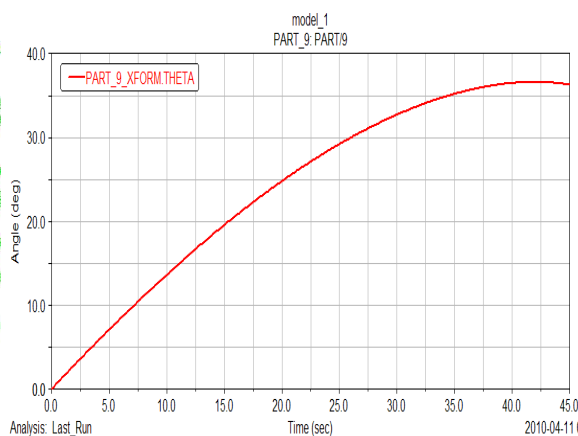


Fig. 6 Legea de variație în timp a poziției unghiulare pentru elementul 5 (part 9), în grade

Capitolul 3 prezintă modelarea cu elemente finite a mecanismului aparatului director și este structurat în trei părți:

- elaborarea modelului dinamic pentru o analiză cu elemente finite la cazul cel mai general;
- analiza dinamică a paletii aparatului director folosind metoda elementului finit;
- analiza dinamică a întregului mecanism cu considerarea elementelor cinematice deformabile.

Pentru analiza dinamică a paletii cu metoda elementului finit, aceasta se încarcă cu forța rezistentă variabilă în timp F_r , care este generată de curgerea fluidului pe suprafața activă a paletii, la închiderea sau deschiderea acesteia.

Această forță este stabilită pe cale experimentală și reprezintă, de fapt, sarcina distribuită în timp care solicită elementul final condus al aparatului director.

Se identifică legile de variație în timp pentru tensiuni, deformații și deplasări, care vor permite dezvoltarea unui proces de optimizare a paletelor în care funcția obiectivă să fie forma sau gabaritul (volumul, greutatea) paletii, iar restricția să fie definită printr-o valoare maximă a tensiunilor, deformațiilor și deplasărilor.

Modelarea geometrică parametrizată a fiecărui element component al acestui mecanism, prin procedura descrisă anterior, permite dezvoltarea în condiții de precizie maximă a procesului de optimizare geometrică, cinematică sau dinamică.

Pentru analiza elastodinamică a mecanismului aparatului director se procedează la modelarea cu elemente finite.

Este analizat în regim dinamic fiecare element cinematic considerat ca un subsansamblu cu proprietăți elastocinematice.

Din analiza cu elemente finite a mecanismului s-a constatat că valoarea maximă a tensiunilor este pentru boltul de forfecare, care are rol de protecție la suprasarcini.

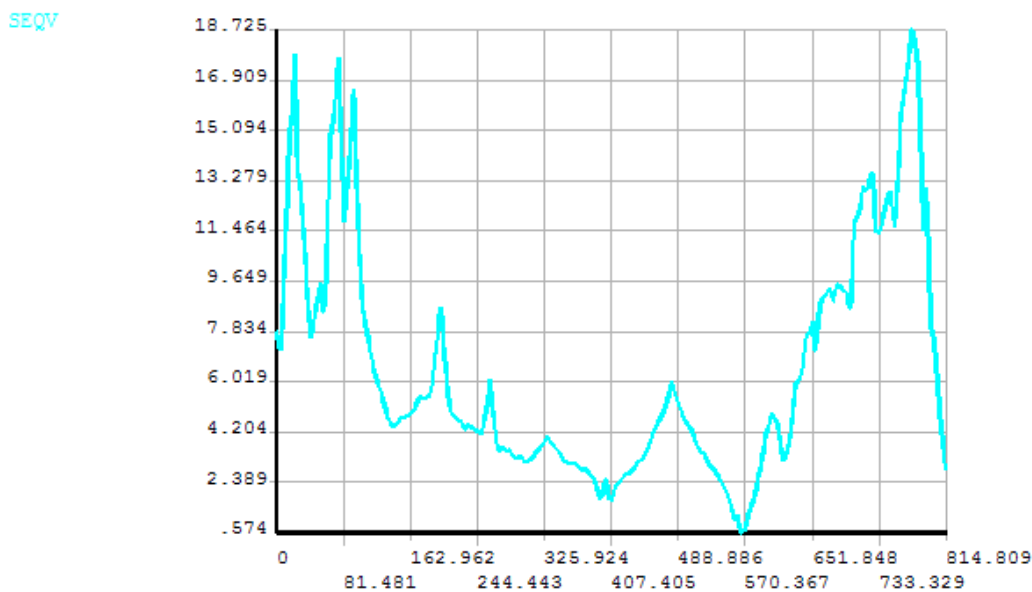


Fig. 7 Distribuția tensinilor echivalente von Mises, în zona concentratorilor de tensiune

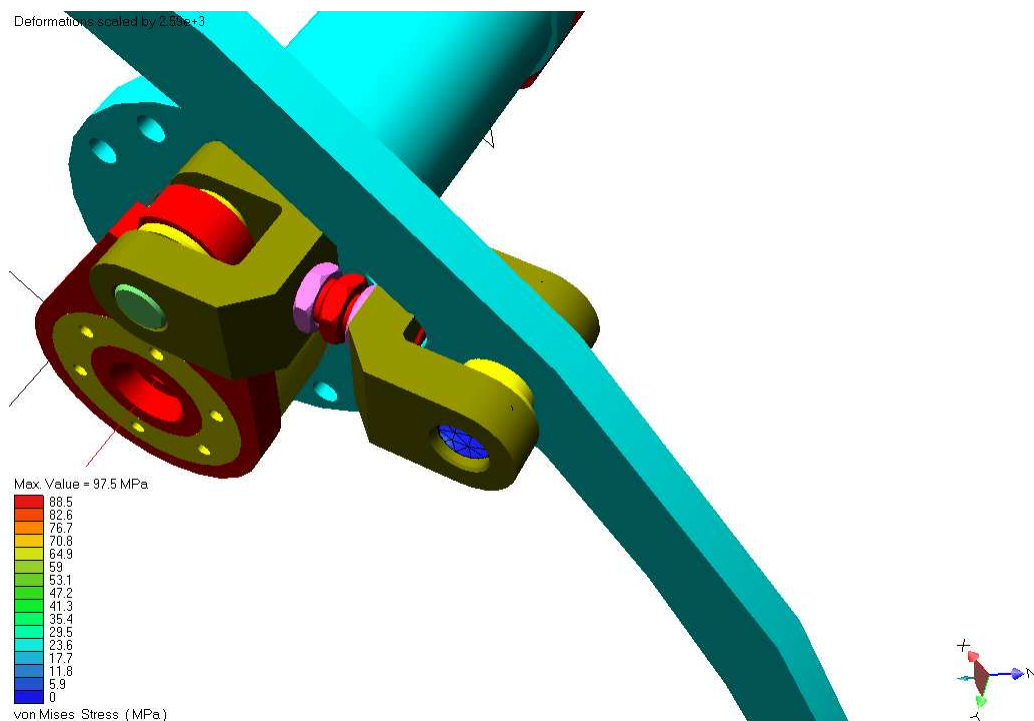


Fig. 8 Distribuția tensiunilor echivalente von Mises pentru bolțul de forfecare

În **capitolul 4** se realizează optimizarea mecanismului aparatului director cu programul ADAMS.

Optimizarea mecanismului aparatului director în ADAMS constă din parcurgerea următoarelor etape: parametrizarea modelului; definirea variabilelor de proiectare; definirea funcției obiectiv de optimizat; efectuarea studiilor de proiectare pentru identificarea variabilelor de proiectare principale, cu influență semnificativă asupra funcțiilor obiectiv; optimizarea propriu-zisă a sistemului mecanic pe baza variabilelor principale.

În prima parte a acestui capitol este descrisă foarte exact fiecare etapă care participă la optimizarea sistemului mecanic.

Pentru optimizarea răspunsului dinamic al mecanismului interesează momentul din cupla cinematică centrală H. Răspunsul dinamic optimal trebuie să respecte cu strictețe scopul pentru care a fost proiectat mecanismul aparatului director, respectiv unghiul de închidere sau deschidere a paletii.

Funcția obiectiv constă în minimizarea momentului din cupla cinematică H.

Pe paletă acționează o forță rezistentă a cărei lege de variație a fost stabilită pe cale experimentală.

Se consideră ca restricție de proiectare legea de variație în timp a unghiului de închidere sau deschidere a paletii, care guvernează funcționarea corectă a mecanismului aparatului director.

Se determina diagramele de variație în timp pentru funcția obiectiv pe parcursul a 3 iterații și diagrama finală a funcției obiectiv când se modifică variabilele principale de proiectare.

Analizând aceste diagrame s-a constatat că pe parcursul studiului de proiectare, o influență semnificativă asupra funcției obiectiv o are variabila DV_2. Este o observație importantă care a condus la ideea modificării lungimii bielei mecanismului. Din punct de vedere

organologic, biela 4 este concepută în sistem modular, tocmai pentru a permite această modificare de lungime.

Prin acest proces se urmărește evoluția finală în timp a funcției obiectiv la modificarea variabilelor principale de proiectare cu păstrarea variației unghiulare a paletelor în limitele impuse de rolul funcțional al mecanismului.

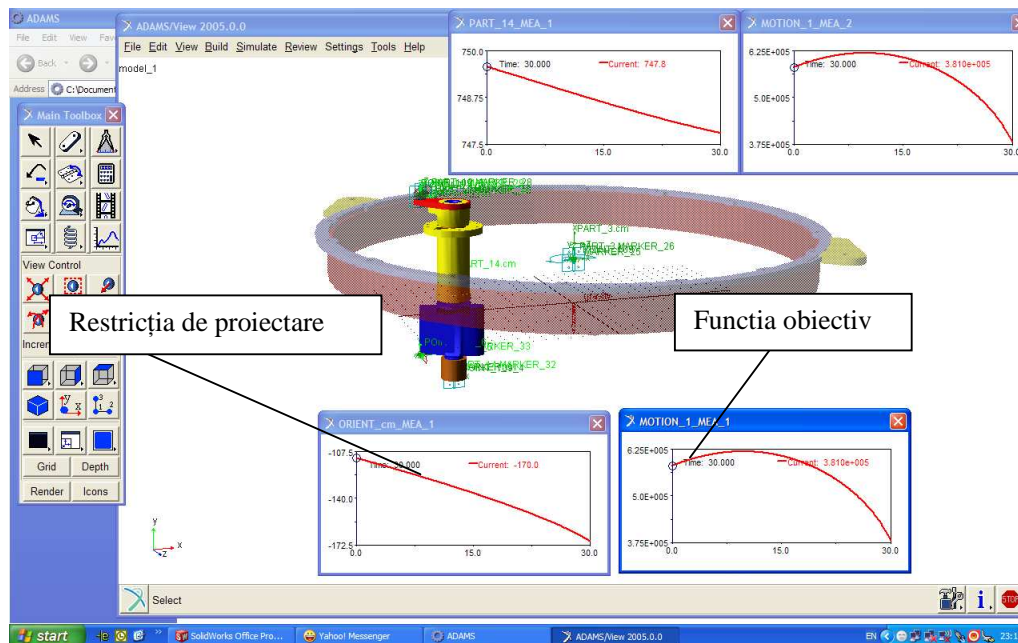


Fig. 9 Identificarea legilor de variație în timp pentru parametrii procesului de optimizare

Capitolul 5 tratează analiza experimentală a mecanismului aparatului director și a unor componente importante ale turbinei Francis.

1.1.1 Aparatura de măsură și traductoare utilizate:

- Sistem de achiziție Spider 8, rezoluție 12 biti;
- Condiționar de semnal NEXUS 2692-A-0I4, liniaritate 0.01%;
- Accelerometre Bruel & Kjaer tip 4391 (3 buc.), liniaritate 2%;
- Traductor inductiv de cursă liniară WA300, liniaritate 2%;
- Traductor potențiomtric de rotație tip T127PA, 5 k Ω , liniaritate 2%;
- Traductor de forță H4450-23, liniaritate 3%;
- Notebook IBM ThinkPad R51.

1.1.2 Parametrii înregistrați:

- F_tr(N) – Forța de tracțiune la nivelul furcii H4450-23 a aparatului director;
- Rot_Pal(grd) – Unghiul de rotație al paletelor directoare;
- Crs_Lin(mm) – Cursa liniară a pistonului de acționare;
- AccO_Pal(m/s²) – Accelația pe direcția orizontală a lagărului superior al paletelor directoare;
- AccV_Pal(m/s²) – Accelația pe direcția verticală a lagărului superior al paletelor directoare;

- AccO_Lag(m/s²) – Accelerația pe direcția orizontală a lagărului superior al turbinei.



Fig. 10 Măsurarea cursei liniare a pistonului de acționare

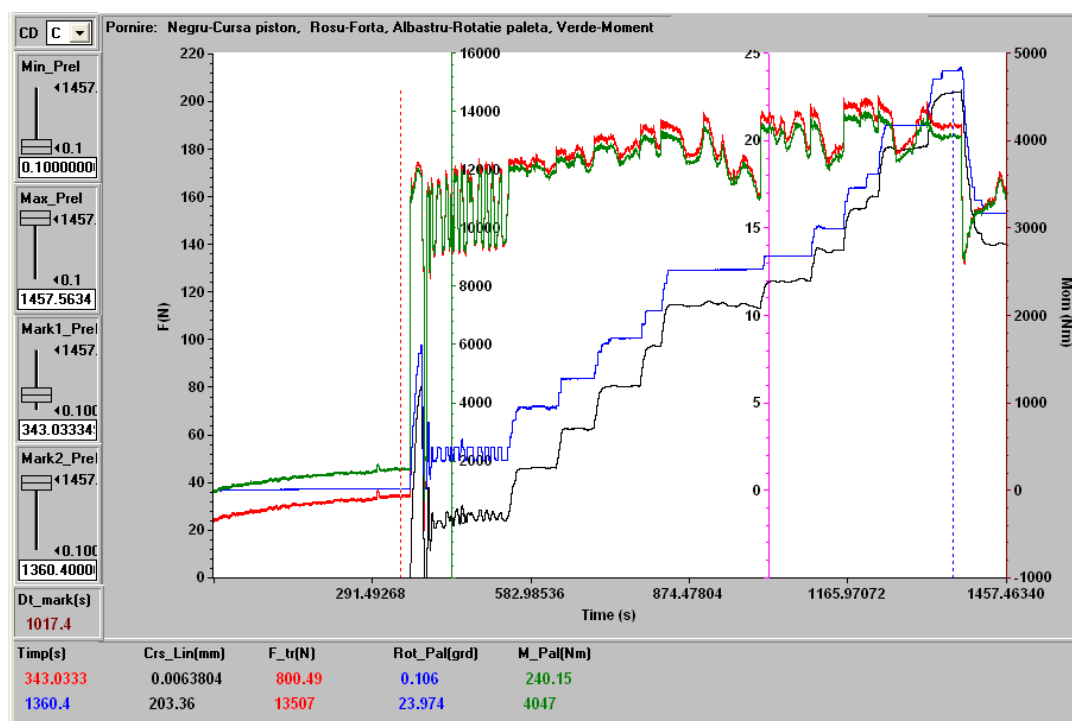


Fig. 11 Evoluția parametrilor funcționali la pornirea grupului hidro.

Concluzii privind experimentările efectuate pe aparatul director al turbinei Francis de 50 MW

Cercetările experimentale au analizat dinamica și stabilitatea aparatului director al turbinei Francis de 50 MW la manevrele de pornire, încărcare la sarcina nominală și oprire ale grupului hidro de la SH Tismana. Ca parametri caracteristici ai dinamicii aparatului director, au fost măsurati sau determinați prin calcul: forța de tracțiune la nivelul furcii, unghiul de rotație al paletei directoare, cursa liniară a pistonului de acționare, momentul de acționare a furcii aparatului director.

Măsurarea și analiza vibrațiilor generate de grupul hidro, cu identificarea surselor de vibrații, s-a făcut în scopul evaluării stării tehnice a aparatului director și a grupului hidro.

Din analiza înregistrărilor efectuate la manevrele de pornire, încărcare electrică și oprire grup se desprind concluzii importante, dintre care reținem următoarele:

1. La pornirea grupului, momentul admisiei apei în turbină se face cu instabilitate mare în controlul cursei pistonului de acționare, instabilitate care conduce la variația puternică a forței și momentului de acționare al paletelor aparatului director.

2. Pe durata funcționării în gol, există mici instabilități în menținerea turației de sincronism, instabilități care se evidențiază în variații ale cursei pistonului de acționare, ale unghiului de rotație al paletei directoare și se regăsesc în variații ale forței și momentului de acționare a paletelor.

3. Din analiza dependenței cursei de rotație a paletelor ca funcție de cursa liniară a pistonului de acționare, la pornirea și la oprirea grupului hidro, se observă o foarte bună liniaritate, cu o mică histereză dată de diferența dintre cursele la pornire și la oprire, explicabilă prin faptul că jetul de apă opune un moment rezistent la închiderea paletelor directoare.

4. Din analiza caracteristicilor putere electrică-accelerație de vibrație, se desprinde concluzia că, din puncte de vedere vibratoriu, turbina funcționează optim la un regim de încărcare electrică de 30 – 50MW. În zona 15 – 25 MW grupul hidro prezintă vibrații mai mari, motiv pentru care nu este recomandat lucrul în această zonă de încărcare electrică

5. Vibrațiile generate la oprirea grupului hidro sunt de nivel mai mic decât cele generate la pornire și încărcare electrică. Pe durata manevrei de oprire, nivelul vibrațiilor generate la turbină este mai mare decât nivelul vibrațiilor generate la nivelul aparatului director.

CONTRIBUȚII ORIGINALE

1. Bază de date cu metode și modele matematice, rezultate experimentale și referințe bibliografice despre modelarea dinamică și optimizarea sistemelor mecanice mobile, în general, și a mecanismelor de reglare de la turbinele hidraulice, în special.
2. Modele cinematice pentru mecanismul aparatului director, bazate pe un formalism matricial ușor de implementat pe calculator, cu posibilități multiple de considerare a unor configurații cinematice complexe, oferite de introducerea matricilor de conversie.
3. Modelare geometrică complexă, în limbajul proiectării asistate, pe sisteme 2D și 3D, a mecanismului aparatului director, al turbinei de tip Francis FVM 61.5-234, a hidroagregatului de la CHE Tismana Subteran.
4. Considerarea elementelor cinematice ca subansamble pe modele 2D cu respectarea riguroasă a condițiilor impuse de prototiparea virtuală.
5. Elaborarea procedurii și a modelelor matematice pentru analiza dinamică inversă a mecanismului aparatului director.

6. Programe pentru procesarea numerică a modelelor matematice cu identificarea legilor de variație în timp ale parametrilor cinematici și pentru forțele de legătură din cuplele cinematice în regim dinamic.
7. Modelarea mecanismului aparatului director în regim cinematic și dinamic cu programul ADAMS.
8. Analiza dinamică a paletii mecanismului aparatului director cu programul ANSYS.
9. Modelarea parametrizată a elementelor cinematice pentru optimizarea structurală cu metoda elementului finit.
10. Analiza elastodinamică cu metoda elementului finit a mecanismului aparatului director, considerat ca un ansamblu format din elemente cinematice deformabile.
11. Identificarea pe cale experimentală a legilor de variație în timp pentru parametrii dinamici necesari procesării analizei dinamice inverse a mecanismului.
12. Algoritm și metodă pentru optimizarea în regim dinamic a mecanismului aparatului director cu programul ADAMS.
13. Model experimental redus, cu respectarea structurii și a funcționalității mecanismului aparatului director de la turbina Francis.
14. Analiza experimentală complexă a mecanismului aparatului director, al turbinei hidraulice de la CHE Tismana Subteran, pentru următoarele regimuri de funcționare:
 - pornire grup cu încărcare electrică în trepte de palier constant până la 50MW, 1457s;
 - regim de funcționare la putere constantă;
 - oprire grup, 328s.
15. Identificarea experimentală a legilor de variație în timp pentru următorii parametri dinamici:
 - forța de tracțiune la nivelul furcii;
 - unghiul de rotație al paletii directoare;
 - cursa liniară a pistonului de acționare;
 - momentul de acționare al furcii aparatului director.
16. Diagnosticarea comportării dinamice a mecanismului aparatului director și a întregului hidroagregat printr-o analiză experimentală complexă a vibrațiilor.
17. Considerarea cercetărilor într-un sistem integrat model cinematic – proiectare asistată parametrizată – experiment a creat condițiile optime pentru prototiparea virtuală a mecanismului aparatului director de la turbina CHE Tismana Subteran.