|  |  |
| --- | --- |
| Universitatea Politehnica din Timișoara  Facultatea de Mecanică, Dpt. MMUT  Bd. Mihai Viteazu 1, Timişoara, RO-300222, Romania | Description: logo_UPT.jpg |

Rezumatul tezei de doctorat

“***Hidrodinamica nestaţionară a tubului de aspiraţie***

***al turbinelor hidraulice***”

Elaborată de drd.ing. Cosmin-Marian IGHIŞAN

# În prezentul rezumat sunt punctate aspectele ce sunt considerate a fi cele mai importante din cadrul tezei de doctorat.

# Capitolul 1 tratează problematica actuală a turbinelor hidraulice. Începe cu o abordare a aspectelor generale ale hidroenergeticii, cum ar fi proporţia tipurilor de energii care intră în sistem (fig.1.1).

# Se continuă cu motivaţia alegerii temei, argumentele fiind:

# Cerinţele de funcţionare ale turbinelor hidraulice s-au modificat substanţial în ultimele decenii, de la operarea doar în vecinătatea punctului de proiectare (sau de randament maxim) la operarea pe o plajă largă de regimuri, de la sarcină parţială la suprasarcină.

* La regimuri departe de cel optim apar fenomene hidrodinamice suplimentare, care cresc pierderile hidraulice, reducând randamentul global al maşinii, sau care generează solicitări dinamice periculoase (zgomote şi vibraţii) cu potenţial risc de distrugere al unor componente (lagăre, palete rotorice).
* Pentru turbinele Francis de cădere joasă – medie, principala cauză a scăderii randamentului odată cu îndepărtarea de regimul optim o reprezintă creşterea semnificativă a pierderilor din tubul de aspiraţie, însoţită şi de instabilităţi hidrodinamice resimţite sub forma unor fluctuaţii (uneori severe) de presiune.
* Proiectarea şi retehnologizarea turbinelor hidraulice moderne necesită o *abordare cuplată a tandemului rotor – tub de aspiraţie*, astfel încât să poată fi estimată cât mai precis comportarea turbinei pe o plajă largă de regimuri de funcţionare în fazele preliminare de analiză a soluţiilor tehnice, şi în particular, *înainte de a se proiecta propriu – zis rotorul*.
* Analiza şi optimizarea curgerii cu rotaţie la ieşirea din rotor, *înainte de proiectarea paletelor rotorice*, necesită un model al curgerii care este ulterior ingerată de tubul de aspiraţie, model care să ofere o apreciere cât mai realistă a performanţelor tubului de aspiraţie.
* Dezvoltarea, validarea şi evaluarea acurateţii unui astfel de model reprezintă unul din obiectivele principale ale tezei.
* Această abordare nouă, modernă, care combină elemente de hidrodinamică avansată a turbomaşinilor, cu algoritmi de calcul pentru soluţionarea problemelor cu cu condiţii la limită aferente este *motivată* în primul rând de faptul că utilizarea simulării numerice directe a curgerii tridimensionale turbulente în turbină necesită timp şi resurse hardware care limitează dramatic numărul de versiuni ce pot fi analizate pentru a identifica pe cea optimă. În plus, înţelegerea aprofundată a principalelor mărimi care influenţează evoluţia curgerii în turbină şi parametrizarea lor corespunzătoare, nu este dificil de realizat doar prin experimente numerice care evidenţiază multe detalii de importanţă secundară pentru decizii în procesul de proiectare şi optimizare.

Rolul funcţional al turbinei hidraulice, acela de a extrage energia de la fluid cu ajutorul unei părţi în mişcare de rotaţie, denumit rotor s-a expus în §1.2. S-au amintit şi principalii parametri fundamentali ai unei turbine hidraulice: debitul , căderea , puterea , turaţia , randamentul , înălţimea geometrică de aspiraţie  şi coeficientul de cavitaţie .

§1.5. tratează fenomenele hidrodinamice asociate regimurilor de funcţionare departe de cel optim. Sunt prezentate rolul funcţional şi forma constructivă a principalelor tipuri de tuburi de aspiraţie.

Fig.1.14 din §1.5.2. este un argument solid în efortul de a optimiza sau îmbunătăţi curgerea în tubul de aspiraţie. În această figură este prezentată distribuţia pierderilor hidraulice în traseul hidraulic al unei turbine Francis. Ponderea cea mai însemnată o au pierderile în tubul de aspiraţie (comparativ cu celelalte componente: cameră spirală, rotor şi aparat director) odată cu deplasarea punctului de funcţionare de la punctul optim sau de randament maxim către debite parţiale sau către suprasarcină.

# Sunt trecute în revistă mai multe cercetări efectuate pe turbinele hidraulice, în special în tubul de aspiraţie al acestora. Acestea s-au efectuat fie pe standuri pe care au fost montate turbine la scară redusă, fie pe generatoare de curgere cu vârtej. De asemenea s-au exemplificat şi cercetări numerice pentru această tematică.

Principalele efecte ale instabilităţii curgerii au fost şi ele menţionate: zgomote, vibraţii, variaţii de putere, mişcări verticale ale arborelui şi rotorului, pulsaţii de presiune în tubul de aspiraţie, dar şi în amonte de acesta.

Se poate ajunge la fisuri sau ruperi ale paletelor rotorice, dar în unele cazuri, şi la catastrofe, exemplul dat fiind accidentul de la Sayano – Shushenskaya.

În §1.5.5 sunt enumerate şi descrise măsuri practice pentru atenuarea efectelor instabilităţii curgerii: impulsuri de presiune, injecţie cu jeturi tangenţiale la perete, injecţie cu jet axial în conul tubului de aspiraţie, admisie de aer, introducerea unor stâlpi în conul tubului de aspiraţie, caneluri pe peretele conului, aripioare montate pe peretele conului, prelungiri ale ogivei, diafragmă poziţionată în zona inferioară a difuzorului conic şi implementarea unui inel intermediar.

În §1.5.6 s-a argumentat importanţa potrivirii rotorului cu tubul de aspiraţie.

# Capitolul 2 descrie investigarea numerică a turbinei Francis. S-a optat pentru modelul de turbină cunoscut în literatura de specialitate sub denumirea de GAMM. În prima parte a acestui capitol este descrisă amănunţit geometria distribuitorului şi a rotorului acestei turbine.

Pentru a putea dezvolta modele simplificate pentru curgerea cu rotaţie avem nevoie de un set de rezultate de referinţă pentru validare. Acestea au fost obţinute în urma analizei numerice a curgerii în distribuitorul şi rotorul turbinei Francis GAMM şi au fost validate cu date experimentale pentru 3 regimuri de funcţionare în §2.3.

Au fost efectuate un set de 12 analize numerice ale curgerii pe distribuitor şi rotor.

Procedeul de alegere al celor 12 regimuri de funcţionare la cădere constantă este enunţat în §2.2.2.

Construcţia domeniilor de analiză pentru rotor şi distribuitor a fost şi ea tratată în §2.2.2, în timp ce în §2.2.3 s-a expus discretizarea celor două componente ale turbinei.

Alegerea modelului de turbulenţă *k-ω SST* a fost pe scurt argumentată în §2.2.4.

§2.2.5 expune condiţiile pe frontieră impuse.

În §2.2.7 s-a descris cu lux de amănunte algoritmul iterativ pentru condiţiile pe interfaţa de amestec. Acesta reprezintă o metodă ce cuplează curgerea pe interfaţa distribuitor-rotor cu ajutorul căreia se poate calcula curgerea separat pe cele două domenii (distribuitor şi rotor).

Construcţia secţiunilor de analiză a curgerii s-a enunţat în §2.2.8.

O parte importantă a acestui capitol tratează şi extragerea datelor prin mediere circumferenţială de pe aceste secţiuni. Principalele rezultate, expuse şi grafic, sunt componentele vitezei şi presiunea totală.

# Capitolul 3 este dedicat prezentării şi discutării mărimilor primare şi a celor derivate pentru modelarea şi analiza curgerii cu rotaţie în turbomaşini.

Mărimile primare sunt componentele vitezei şi presiunea totală.

# Sunt prezentate şi calculate funcţia de curent , circulaţia şi presiunea totală , considerate ca fiind derivate.

Analiza dependenţelor  şi  relevă modul de funcţionare la regimuri diferite de cel optim. S-a pus în evidenţă că aceste dependenţe rămân neschimbate pentru un punct de funcţionare dat, în zona nepaletată din aval de rotor. Este evidenţiată şi conservarea presiunii totale relative pe tuburile de curent ce traversează paletajul rotoric.

Capitolul 4 prezintă un model matematic ce permite calculul curgerii la ieşire din rotor – intrarea în tubul de aspiraţie, fără a fi necesar calculul curgerii în rotor.

Modelul este prezentat şi utilizat în două forme de dezvoltare succesivă.

În §4.1 este descris un model dezvoltat pentru curgerea pe suprafeţe plane sau conice. S-a detaliat fundamentul matematic al acestuia dar şi modul de utilizare a programului în care este implementat algoritmul numeric. Rezultatele furnizate de modelul simplificat au fost validate cu cele corespunzătoare datelor numerice mediate circumferenţial. (Fig.4.7.)

În §4.2 este descrisă o evoluţie a modelului anterior. Acesta tratează curgerea pe o secţiune de analiză arbitrară. Generatoarea secţiunii de analiză uneşte coroana cu inelul şi este poziţionată în imediata vecinătate a bordului de fugă al paletei rotorice (Fig.4.8). Evoluţia acestui model se vede prin comparaţia profilelor obţinute pe cale analitică cu datele de referinţă din simularea curgerii în rotor.

Capitolul 5 a fost dedicat simulării numerice a curgerii turbulente tridimensionale într-un tub de aspiraţie tipic turbinelor Francis moderne cu ax vertical. Au fost examinate două variante ale formei secţiunii de intrare (corespunzătoare celor două modele pentru curgerea la ieşirea din rotor). Figura 5.3 pune în evidenţă faptul că micile diferenţe ale proflelor deviteză prezise de modelul simplificat pe suprafaţa conică pot conduce la diferenţe considerabile în valorile pierderilor hidraulice. Aceasta este o dovadă foarte clară a sensibilităţii performanţelor energetice ale tubului de aspiraţie la modificări mici ale curgerii cu rotaţie la intrarea în acesta.

§5.1.2 înfăţişează examinarea curgerii într-o secţiune meridiană. Se poate vedea clar sensibilitatea curgerii decelerate cu rotaţie în conul şi cotul tubului de aspiraţie. S-a concluzionat faptul că indicatorul de concordanţă între rezultatele modelelor simplificate şi datele din simularea curgerii trebuie să fie valoarea pierderii în tubul de aspiraţie.

Rezultatele din figura 5.20 afişeaă o îmbunătăţire remarcabilă.

Putem trage concluzia că modelele simplificate pentru determinarea curgerii cu rotaţie la intrarea în tubul de aspiraţie pentru diverse regimuri de funcţionare reprezintă varianta foarte avantajoasă pentru a înlocui simularea curgerii în rotor care devine foarte costisitoare atunci când se doreşte îmbunătăţirea (modificarea) geometriei paletelor rotorului.

Capitolul 6 se ocupă cu examinarea curgerii nestaţionare în tubul de aspiraţie.

În prima parte este prezentată o amplă sinteză a nestaţionarităţii curgerii, prezentând diferite remarci şi concluzii la care au ajuns diferiţi cercetători în urma analizelor numerice sau experimentale de-a lungul timpului cu referire la instabilitatea curgerii în tubul de aspiraţie.

Simularea numerică a curgerii nestaţionare, tridimensionale şi turbulente în tubul de aspiraţie a fost dezbătută. Alegerea modelului de turbulenţă s-a argumentat prin trecerea în revistă a mai multor abordări ale modelării acesteia, şi a prezentării potenţialului modelului SAS cuplat cu *k-ω SST*, un model recent, în diferite probleme test.Trebuie menţionat că alegerea modelului de turbulenţă în cazul simulării curgerii nestaţionare turbulente tridimensionale reprezintă încă un subiect deschis şi nu există un consens asupra celui mai potrivit.

Ecuaţiile care guvernează curgerea tridmensională şi vâscoasă (de continuitate şi Navier Stokes) au fost enunţate.

Cercetarea corespunzătoare din acest capitol nu s-a axat pe studiul influenţei modelului de turbulenţă, al reţelei de discretizare, sau al pasului de timp în analiza numerică, de aceea doar s-a făcut referire la ele.

Rezultatele obţinute surprind corect, din punct de vedere calitativ aspectul curgerii în tubul de aspiraţie, cu evidenţierea vârtejului elicoidal cu mişcare de precesie la debite parţiale.

Analiza câmpului de viteză nestaţionar s-a efecftuat atât cu indicatorul *Q-criterion*, dar şi cu evidenţierea filamentelor de vârtej utilizând tensorul gradient al câmpului vectorial de viteză. Se demonstrează astfel apariţia nestaţionarităţii în conul tubului de aspiraţie odată cu reducerea debitului turbinat.

Pulsaţiile de presiune pentru intrarea şi ieşirea din tubul de aspiraţie au fost şi ele reprezentate. După ce au fost mediate, s-a putut trece la calculul pierderilor hidraulice în tub.

Capitolul 7 sumarizează concluziile, contribuţiile personale şi perspectivele.

Prezenta teză de doctorat tratează curgerea în turbina hidraulică de tip Francis. Sunt abordate mai multe direcţii ale cercetării, care sunt strâns legate între ele:

* calculul şi analiza numerică în distribuitorul şi rotorul turbinei Francis GAMM,
* calculul unor mărimi necesare pentru modelul matematic surogat capabil să genereze profile de viteze aval de rotorul turbinei Francis,
* modelarea matematică a curgerii aval de rotorul unei turbine Francis,
* analiza numerică a curgerii în tubul de aspiraţie al unei turbine de tip Francis,
* hidrodinamica nestaţionară a curgerii în tubul de aspiraţie.

Modelul matematic îşi propune înlocuirea calculului efectiv al curgerii amonte de tubul de aspiraţie. Principalul ţel este de a optimiza curgerea cu rotaţie înainte de a proiecta geometria rotorului. S-a ales o zonă aval de rotor, cât mai aproape de bordul de fugă al acestuia, deoarece curgerea de la ieşire din rotor (care este considerată intrarea în tubul de aspiraţie) influenţează într-un mod dramatic curgerea în tubul de aspiraţie. Un argument elocvent este graficul pierderilor hidraulice pe fiecare componentă a traseului [156], prezentat în primul capitol.

Pentru a putea modela matematic curgerea aval de rotorul turbinei a fost nevoie de un set de mărimi, care au fost obţinute în urma simulării curgerii cuplate distribuitor-rotor folosind algoritmul mixing interface.

Datele sunt rezultate din aşa-zisele mărimi primare (componentele vitezei şi presiunea). După ce acestea au fost adimensionalizate s-a trecut la calculul mărimilor derivate.

Rezultatele acestui model matematic surogat pentru rotor sunt profilele de viteză de la ieşirea din rotor.

Eficacitatea modelului a fost testată folosind aceste profile ca şi condiţii de intrare în simularea numerică a curgerii în tubul de aspiraţie. Pierderile hidraulice calculate din tubul de aspiraţie au fost comparate cu cele rezultate în urma simulării numerice a curgerii în tub folosind profile de viteză rezultate din simulări numerice.

Contribuţiile personale:

* Analiza numerică a curgerii în distribuitorul şi rotorul turbinei Francis GAMM pe un set de 12 regimuri de funcţionare;
* Extragerea şi calculul unor mărimi de pe mai multe secţiuni de analiză în scopul folosirii modelului matematic pentru rotor;
* Demonstrarea unor ipoteze simplificatoare pe care se bazează acest surogat de rotor;
* Participarea la dezvoltarea, validarea şi evaluarea modelului matematic simplificat al curgerii în cele două versiuni succesive ale sale;
* Analiza performanţelor energetice ale tubului de aspiraţie pentru testarea eficacităţii modelului;
* Analiza curgerii nestaţionare în tubul de aspiraţie.

Perspectivele:

Continuarea cercetării poate continua pe mai multe direcţii. Câteva dintre acestea sunt:

* testarea modelului matematic în ambele variante prezentate în teza de doctorat pe alte modele de turbină Francis,
* testarea modelului matematic surogat (în ambele versiuni) pe diferite secţiuni aval de rotor pe aceeaşi turbină,
* adaptarea şi testarea modelului pentru turbine de tip Kaplan,
* elaborarea unei metodologii de optimizare a curgerii, modificând direcţia curgerii în plan tangenţial  funcţie de coordonata curbilinie .

Urmează după concluzii 3 anexe, mai precis componentele solverului cu ajutorul căreia se generează profilele de viteze la ieşirea din rotor, mai precis prima variantă a acestuia.

* Anexa 1 prezintă forma fişierului de intrare (input) pentru un regim de fncţionare.
* Anexa 2 prezintă codul sursă al solverului.
* Anexa 3 etalează forma principalului fişier de ieşire, adică cel al componentelor vitezei.

Bibliografia cuprinde 165 de referinţe.