

Rezumatul tezei de doctorat

Aceasta teza se ocupa cu optimizarea comportamentului dinamic al valturilor din masinile de tiparit flexografice, prin reducerea vibratiilor cauzate de contactul discontinuu dintre valturi cauzat de matrita de tiparit. Pentru a reduce aceste vibratii, este necesara dezvoltarea unor senzori piezoelectrice foarte flexibili si foarte subtiri care sa masoare fortele perturbatoare dintre valturi, precum si reducerea vibratiilor folosind metode active in lagare cu actuatore piezoelectrice.

Teza a fost dezvoltata in cadrul activitatii mele ca si inginer cercetator la Universitatea de Stiinte Aplicate din Germania si este structurata in 9 capitole, prezentate pe scurt in cele ce urmeaza.

Capitolul 1

In acest capitol "Introducere" se face o trecere in revista a tehnologiei industriei de tiparit cu ajutorul masinilor flexografice si evolutia procesului de tiparire cu aceste masini incepand cu 1445 si pana in zilele noastre, vorbind aici despre tipar inalt.

Sistemul de valturi considerat in aceasta lucrare este o unitate de tiparire din cadrul unei masini flexografice a firmei Windmüller & Hölscher din Lengerich Germania, care este unul dintre cei mai mari producatori de masini flexografice din lume. O astfel de masina are un valt de presiune cu un diametru foarte mare pe care este transportat materialul de imprimat. In jurul acestuia se afla intre 4 si 12 unitari de tiparire, pentru fiecare culoare cate una, in functie de performanta si complexitatea masinii flexografice. In figura 1.8 este prezentata schema de circulare a materialului de tiparit (linia albastra) intr-o masina de tiparit flexografica.

Sistemul de valturi care este considerat in aceasta lucrare include trei valturi prezentate in figura 1.9: valt de apasare, valt de tiparire si valt de presiune. Valtul de apasare preia culoarea de tiparit dintr-un rezervor si o transfera pe matrita de tiparit aflata pe valtul din mijloc, numit valt de tiparire.

De-a lungul timpului, calitatea matritei de tiparire a crescut, incepand de la un caciuc din care se frezau partile ce nu trebuiau tiparite, si pana la prelucrarea acesteia dintr-un material elastic numit fotopolimer, prelucrat computerizat prin expunerea la radiatii ultraviolete. Zonele de imprimat au o inaltime mai mare decat restul materialului. Dupa ce a preluat vopseaua, aceasta este imprimata pe materialul de tiparit, care poate fi: carton, hartie, folie, etc., masinile flexografice fiind foarte populare in special in domeniul tiparirii de ambalaje pentru diferite produse, chiar in cantitati relativ mici.

In figura 1.6 este prezentata alinierea valturilor pe o directie intr-o unitate de tiparire noua si reducerea numarului de valturi, pentru a micșora costurile de productie si automatizarea procesului de schimbare a matritei de tiparire. In masinile moderne, matrita se lipește pe o teava, construita dintr-un material elastic cu proprietati de amortizare denumit sleeve (prezentat in figura 1.10), care se aplica cu ajutorul unei presiuni mari de aer (se mărește astfel diametrul interior al manusii si se împinge pe valt unde ramane fixat dupa ce aerul cu presiune înalta nu mai este aplicat, fara a mai fi necesara fixarea acestuia prin lipire).

Din cauza discontinuitatilor aflate pe modelul de tiparit care este fixat pe valtul de tiparire apar vibratii in sistemul de valturi. Aceste vibratii cauzeaza distorsiuni ale

imaginii de tiparit si influenteaza astfel negativ calitatea produsului de tiparit. De asemenea, vibratiile in sistemele de valturi cresc pe masura ce valturile devin mai lungi, sau viteza de rotatie a valturilor creste pentru a mari productivitatea.

In subcapitolul 1.2 este descris scopul acestei lucrari, acela de a optimiza comportarea dinamica a sistemelor de valturi din masinile flexografice urmarind doua directii:

- dezvoltarea unor senzori piezoelectricsi, pe baza de vopsea piezoelectrica, pentru masurarea fortelor, cu aplicatie in masurarea fortelor in suprafata dintre valturi;
- reducerea vibratiilor valtului de tiparire folosind:
 - elemente active in lagare, si anume actuatori piezoelectricsi.
 - amortizarea semi-activa cu inele profilate

In aceasta teza de doctorat au fost introduse rezultate intermediare publicate in reviste de specialitate sau prezentate la conferinte nationale si internationale, precum si rezultate obtinute de studenti in cadrul proiectelor de licenta si lucrarilor de disertatie, sub indrumarea mea. In capitolul 8 este prezentata ideea amortizarii semi-activa a vibratiilor cu inele profilate, idee propusa spre brevetare. Propunerea [71] a fost postata pe internet si pe pagina de web a Institutului de Patentare German dpma.de si se afla in curs de verificare.

Aceasta teza este organizata in doua parti, fiecare parte reprezentand unul dintre telurile acestei lucrari si este structurata in noua capitole. Dupa introducerea din acest capitol, se face in capitolul 2 o trecere in revista a solutiilor existente pe piata in domeniul masurarii fortelor si presiunilor dintre valturi, precum si a posibilitatilor de amortizarea a vibratiilor valturilor. Capitolul 3 prezinta informatii generale despre senzori si actuati piezoelectricsi, elemente folosite in aceasta lucrare. Capitolul 4 descrie procesul de productie si dezvoltare a senzorilor piezoelectricsi pe baza de vopsea piezoelectrica, care urmeaza sa se aplice pe valturi sub matrita de imprimare pentru a masura fortele dintre valturi. In capitolul 5 este descrisa modelarea matematica a sistemului de valturi, precum si a elementelor care iau parte la bucla de reglare (senzori, actuatori, amplificatori). Simularea sistemului de valturi a fost facuta cu programul Matlab/Simulink. In capitolul 6 sunt prezentate doua modalitati de amortizare a vibratiilor, una folosind un controler proportional-derivativ determinat cu ajutorul modelului matematic si a doua, folosind o combinatie intre un controler in bucla deschisa determinat cu ajutorul unui algoritm de identificare a perturbatiilor periodice si de optimizare a fortelor compensatoare folosind metoda celor mai mici patrati si un controler proportional-derivativ.

Capitolul 2

Acest capitol trece in revista solutiile existente pe piata, precum si idei patentate care au legatura cu tema acestei teze, pentru a gasi solutii pentru optimizarea comportamentului dinamic al sistemelor de valturi.

Subcapitolul 2.1 prezinta posibilitati pentru masurarea fortelor si presiunii in sistemele de valturi din masinile de tiparit. Una dintre solutii este masurarea presiunii statice dintre valturi, in general dintre doua suprafete, prin folosirea unor folii cu particule de cerneala Prescale Fujifilm, care elimina cerneala proportional cu presiunea aplicata. Doua metode pentru masurarea dinamica a presiunii dintre valturi sunt prezentate in figurile 2.2 si 2.3, realizate cu ajutorul unor instalatii foarte scumpe. Aceste instalatii nu pot fi folosite in proiect, deoarece bugetul disponibil este limitat.

De aceea este cautata o alta metoda pentru masurarea fortelor dintre valturi la masinile de tiparit, cercetari care au dus la concluzia necesitatii folosirii unor senzori foarte subtiri, care sa nu influenteze procesul de tiparit. O solutie promitatoare prezinta senzorii piezoelectrice pe baza de lac acrilic in care a fost amestecata o cantitate mare de particule piezoelectrice, prezentati in subcapitolul 2.3. Acest lac piezoelectric a fost cercetat si dezvoltat sub conducerea profesorului Hale la Universitatea din New Castle. Acesta a folosit senzori pe baza de lac piezoelectric (sau vopsea piezoelectrica) pentru masurarea vibratiilor ce apar in diferite sisteme, pe principiul asemanator masuratorilor cu timbre tensometrice. Un exemplu este masurarea vibratiilor produse pe un pod foarte ingust din New Castle denumit Millennium Bridge.

Subcapitolul 2.2. prezinta solutii active, semi-active si pasive pentru reducerea vibratiilor la role aflate in miscare de rotatie. De exemplu, pe langa masurile standard care sunt luate pentru a micsora vibratiile, ca de exemplu balansarea dinamica a valturilor, se regasesc aici masuri dinamice, realizate cu ajutorul unor elemente active sau semi-active. De asemenea, sunt prezentate diferite lucrari care se ocupa cu dezvoltarea algoritmilor de reglare, pentru reducerea activa a vibratiilor prin intermediul sistemelor de comanda in timp real. Acestea pot fi aplicate folosind elemente active, ca de exemplu actuatoare piezoelectrice, magnetici sau hidraulici, in functie de dinamica necesara si sistemul in care se actioneaza. Actuatoarele piezoelectrice pot crea forte foarte mari si pot lucra la frecvente de ordinul kilohertziilor. Ei pot insa crea deplasari foarte mici, ceea ce ingreuneaza reducerea vibratiilor cu amplitudini mari.

In ultima parte a capitolului 2, respectiv in paragraful 2.4 sunt prezentate doua standuri industriale folosite in acest proiect. Unul dintre ele este prezentat in figura 2.24 si reprezinta modelul unei masini de acoperire a unui material cu un strat protector (de exemplu: acoperirea hartiei cu un strat de ulei special pentru obtinerea hartiei fotografice). Al doilea stand de incercare industrial se afla in centrul acestei teze si reprezinta o unitate de printare dintr-o masina de tiparit flexografica. Datele tehnice ale celor doua standuri de incercare arata asemanari in ceea ce priveste viteza de miscare a materialului de acoperit/imprimat, rezonantele valtului din mijloc (care prezinta cel mai mic diametru, fiind astfel primul valt ce incepe sa vibreze), precum si la alcatuirea sistemului de trei valturi. Diferente mari se regasesc la valorile de linie de incarcare, care este de circa 180 N/mm la masinile de acoperire si de numai 5-20 N/mm la masinile de tiparit. O alta diferenta consta in natura vibratiilor ce apar in aceste sisteme. La masinile de tiparit, o sursa suplimentara de vibratii este contactul variabil dintre valturi cauzat de matrita de tiparit. Aceste vibratii vor fi simulate in capitolul 5 si compensate in capitolul 6 si 8, cu ajutorul unor lagare cu actuatoare piezoelectrice, dezvoltati in capitolul 7.

Capitolul 3

Capitolul 3 prezinta o introducere in lumea senzorilor si actuatoarelor piezoelectrice, elemente care constituie focusul acestei lucrari. In figura 3.1 este prezentat ciclul prelucrarii elementelor pana la obtinerea efectului piezoelectric. Acest efect se obtine cu ajutorul unor materiale (de exemplu PZT -Plumb-Zirconiu-Titan) care constituie dielectricul intre doua placi conductoare, realizand astfel un condensator plan. Pentru a obtine un element piezoelectric, este necesar ca acesta sa fie polarizat, ceea ce inseamna ca se aplica o singura data un camp electric continuu cu valori

ridicate (între 1-15 kV/mm) pentru o anumita perioada de timp si la o temperatura care de obicei este inalta, pentru a da posibilitatea cristalelor sa se orienteze in directia dipolilor (figura 3.2).

Efectul piezoelectric inseamna ca la aplicarea unei sarcini mecanice (de exemplu o forta), are loc o deplasare de sarcina electrica si se genereaza in acest fel o tensiune electrica. Acest efect este folosit la senzori, pentru a percepe marimi dinamice ale unui sistem. Senzorii piezoelectrici realizati cu ajutorul cristalelor ceramice PZT pot prezenta trei efecte: efect longitudinal, transversal si de forfecare, care pot fi folosite in diverse aplicatii, in functie de necesitatea masurarii sau compensarii unei marimi. Aceste fenomene sunt exemplificate in figura 3.4 pe senzori piezoelectrici de la firma Kistler. Un element piezoelectric poate fi folosit ca senzor, cand in momentul aplicarii unei sarcini mecanice genereaza o sarcina electrica si prin acest lucru, o tensiune electrica. Daca la dipolii elementului piezoelectric se aplica o tensiune electrica alternativa, atunci aceste elemente, genereaza sarcini mecanice (de exemplu forte) proportionale cu tensiunea aplicata si se numesc actuatoare. Acest efect este folosit pentru reducerea vibratiilor in diferite aplicatii, datorita frecventelor inalte la care pot lucra si in acelasi timp a dinamicii bune a elementelor.

In general descrierea matematica a elementelor piezoelectrice se poate face prin doua ecuatii prezentate in forma matriceala in (3.1), una pentru descrierea elongatiei si una pentru calcularea deplasarii dielectrice. Aceste ecuatii sunt cuplate intre ele si sunt dependente de caracteristicile materialului, precum si de sarcina mecanica si campul electric.

In cadrul celor doua standuri de incercare descrise in capitolul 7 din aceasta lucrare (model si unitate de tiparire dintr-o masina flexografica), au fost folositi actuatoare piezoelectrice de la Firma Piezomechanik din Germania pentru amortizarea vibratiilor in sistemele de valturi. Acestea folosesc efectul longitudinal (figura 3.6) si pot genera forte pana la 1.800 N (stand de incercare mic), respectiv 30.000 N (stand de incercare industrial) si deplasari pana la 90 μ m, respectiv 200 μ m.

Capitolul 4

Acest capitol prezinta cercetarile pentru a realiza prima parte a scopului propus in aceasta teza de doctorat, acela de a dezvolta si realiza senzori pe baza de vopsea piezoelectrica care sa poata masura fortele dintre valturi in sistemele de imprimare. Aceasta este un lac acrylic pe baza de apa, in care sunt amestecate particule piezoelectrice (PZT), descoperit si patentat de profesorul Hale, dupa cum s-a specificat in capitolul 2.

In subcapitolul 2.3. au fost prezentate aplicatii realizate cu acesti senzori, care pana acum au fost folositi in mare parte pentru masurarea vibratiilor intr-un mod asemanator cu timbrele tensometrice. Realizarea acestor senzori cu ajutorul unui proces semi-automatizat, precum si folosirea lor ca si senzori pentru masurarea presiunii si a fortelor in general este noua, mai ales aplicarea acestora pe un valt.

Inainte de a incepe dezvoltarea senzorilor pe baza de lac piezoelectric, au fost cercetate diferite posibilitati de masurare a presiunii dintre valturi cu senzori aflati pe piata, dar care nu au avut pana in prezent o asemenea utilizare. Pentru acest lucru au fost aplicate pe un valt discuri ceramice piezoelectrice (figura 4.2 (1)), timbre tensometrice (figura 4.2 (2)) si filme piezoelectrice (figura 4.2 (3)). La masurarile efectuate cu acesti senzori a reiesit ca nu au calitatile corespunzatoare pentru aplicatia

propusa. De aceea s-a procedat la cercetarea senzorilor pe baza de lac piezoelectric.

Avantajul lacului piezoelectric este ca poate fi aplicat in strat foarte subtire (de cativa micrometri) pe diferite suprafete conductoare de tensiune electrica, chiar si pe suprafete care nu sunt plane.

Procesul de fabricatie al senzorilor pe baza de lac piezoelectric este realizat cu ajutorul unui robot KUKA, aflat in dotatia laboratorului. Au fost incercate mai multe metode de aplicare a lacului PZT pe o suprafata metalica constand din tabla de otel si folie de cupru flexibila, dar numai doua metode au putut fi urmarite in continuare: spreierea si raclarea vopselei (subcapitolul 4.4.). In cele din urma raclarea s-a dovedit a fi cea mai eficienta, deoarece lacul piezoelectric era pus la dispozitie numai in cantitati mici de Prof. Hale de la Universitatea din Anglia, iar prin aceasta metoda se risipeste foarte multa materie prima.

Senzorii obtinuti prin raclare sunt lasati la uscat timp de cel putin 24 de ore, dupa care se aplica un strat de vopsea cu argint care constituie a doua suprafata metalica. In urmatorul pas se polarizeaza senzorii prin conectarea dipolilor timp de cel putin 20 de minute la o sursa de tensiune continua inalta.

Semiautomatizarea procesului de fabricatie a senzorilor este importanta, deoarece grosimea substratului de lac piezoelectric obtinut trebuie sa fie relativ constanta pentru un senzor. Daca grosimea variaza foarte mult, la polarizare, campul electric variaza in diferite puncte ale senzorului si se obtine un scurt circuit, fapt care duce la distrugerea senzorului.

Fiind un proces foarte nou de productie precisa a senzorilor pe baza de lac piezoelectric, dupa prima sarja semi-automatizata, numai 21% din senzori au putut fi folositi pentru incercari, iar din a doua sarja, peste 60%.

In subcapitolul 4.5. sunt descrise metodele de masurare si standul de incercare pentru a caracteriza senzorul. Ca si comparatie pentru masuratori, a fost ales un senzor piezoelectric (IEPE) de la firma Bruel&Kjaer. In figurile 4.16 si 4.17 este prezentata cresterea liniara a semnalului de senzor raportat la prima masuratoare, in functie de cresterea fortei perturbatoare proportional cu cresterea amplitudinii tensiunii generate si transmise la amplificatorul pentru actuatorul piezoelectric.

Avand in vedere caracteristica dinamica a senzorului calibru si caracteristica senzorului dezvoltat pe parcursul experimentelor, a fost realizat raportul fortelor intr-un numar de 4 puncte (figurile 4.22, 4.26). Pe tot domeniul analizat de frecvente, raportul ramane aproximativ constant, ceea ce scoate in evidenta calitatea senzorului.

In figura 4.20 este reprezentata scaderea liniara a sensibilitatii senzorului cu cresterea grosimii stratului de lac piezoelectric, senzorii fiind polarizati cu aceeasi tensiune electrica de 175 V. Acest efect corespunde asteptarilor, deoarece sensibilitatea senzorilor ar trebui sa creasca odata cu cresterea campului electric aplicat dipolilor sai. In figurile 4.24 si 4.25 este reprezentata buna corelare a semnalului senzorului dezvoltat cu cel al senzorului calibru.

Din testele precedente a reiesit ca senzorii pe baza de lac piezoelectric indeplinesc calitatile necesare pentru a masura fortele ce apar intre valturi. S-au aplicat trei senzori pe valtul de tiparit din unitatea de printat si s-au facut masuratori cu acestia. Masurarea s-a dovedit a fi foarte complicata, deoarece nu a putut fi folosit decat un amplificator de sarcina electrica cu o constanta de timp mare, ceea ce poate cauza descarcarea inceata a senzorilor. In figura 4.27 sunt prezentate masuratorile cu senzorul aplicat in centrul valtului care prezinta o amplitudine absoluta aproape constanta. Semnalul insa prezinta un offset, ceea ce arata ca transportul acestuia prin intermediul foilor de cupru, fara izolare foarte mare (cum se intampla in cazul unui sistem industrial) trebuie imbunatatit, la fel ca si calitatea semnalului de pe valt.

Din cauza timpului limitat în proiect, aceste îmbunătățiri precum și testarea avansată a senzorilor, se desfășoară în prezent în proiectele de licență ale studenților și propuneri de teme pentru lucrările de disertație la masterat.

Capitolul 5

În acest capitol este descrisă modelarea matematică a unui sistem de trei valțuri care simulează o unitate de tipărire a unei prese flexografice, precum și a modelului construit în laborator după dimensiunile standului de încercare industrial. Fiecare valț este considerat la început ca element elastic continuu care trebuie discretizat pentru a putea obține un model ce urmează a fi implementat într-un software de simulare. Gradele de libertate ale unui valț sunt considerate săgeata și deplasarea unghiulară la încovoiere. Cu ajutorul metodei elementelor finite, au fost discretizate cele trei valțuri și au fost calculate pentru acestea matricea de masă și de elasticitate. Folosind ecuația de echilibru dinamic a lui Newton, este descris comportamentul dinamic al sistemului. Contactul dintre valțuri este asigurat prin matricea de prindat, care este modelat ca un element elastic cu o anumită amortizare. Elasticitatea matricei de prindat se împarte la numărul de elemente în care se asigură contact între valțuri, ca și cum ar fi construită din mai multe elemente elastice legate în paralel.

În ecuația dinamică a sistemului de valțuri (5.35), vectorul-coloană f conține forțele și momentele dinamice care sunt aplicate în fiecare grad de libertate al valțurilor. Fiecare poziție pară în vectorul f este zero, reprezentând momentul la încovoiere dinamic ce nu apare în acest sistem.

Deoarece valțurile sunt sprijinite pe lagare care prezintă o elasticitate proprie, valorile elasticității lor s-au adăugat în primul și penultimul element din matricea de elasticitate pentru fiecare valț, respectiv $C(1,1)$ și $C(2n-1,2n-1)$, n reprezentând numărul de discretizări.

Matricea de amortizare a întregului sistem a fost calculată proporțional cu matricea de elasticitate, folosind principiul lui Rayleigh.

Ecuația dinamică a sistemului a fost transformată în ecuația de stare (5.47), pentru a ușura simularea sistemului prin reducerea sistemului de ecuații diferențiale de ordinul doi la un sistem de ecuații diferențiale de ordinul unu. Astfel, vectorul de stare z conține gradele de libertate ale valțurilor și derivata acestora ca funcție de timp, având astfel un număr dublu de grade de libertate. În această ecuație, A reprezintă matricea de stare, B este matricea de control, u este matricea conținând forțele de perturbare (și de control în cazul simulării sistemului cu buclă închisă), iar C este matricea de ieșire, care definește valorile vectorului de ieșire y .

Deoarece numărul de grade de libertate este foarte mare și vectorii proprii, precum și valorile proprii ale sistemului sunt complexe, este nevoie de reducerea gradelor de libertate, fără a pierde din calitatea rezultatelor. În plus, prin matricile de masă și de elasticitate, săgețile și deplasările unghiulare sunt cuplate în ecuațiile dinamice și este necesară o decuplare a acestora, în așa fel încât fiecare grad de libertate să fie dependent numai de el însuși.

Decuplarea ecuațiilor dinamice și reducerea gradelor de libertate s-a realizat folosind analiza modală cu forma modificată. Prin această metodă, numerele complexe sunt separate în parte reală și parte imaginară care se pun într-un vector ca două elemente reale. În acest fel, se pot face operații numai cu numere reale, ceea ce reduce timpul de calcul.

Reducerea gradelor de libertate se realizeaza luand in calcul numai primele 6 frecvente proprii care pot aparea in testele de laborator, celelalte frecvente fiind neglijate, Numarul de grade de libertate este redus astfel la 12, reducand si timpul de calcul.

In a doua parte a acestui capitol (subcapitolul 5.4) este descrisa implementarea modelarii matematice a sistemului de valturi in programul de simulare Matlab/Simulink.

Modelul matematic este validat prin regasirea frecventelor proprii calculate analitic, in urma calcului cu metoda elementelor finite prin discretizarea valturilor intr-un numar de 20 de elemente, tinand cont de geometria si proprietatile materialului din valturi (otel). Al doilea pas in validarea modelului matematic, este compararea rezultatelor din simulare cu masuratorile statice realizate la valtul de printat industrial. Pe langa sistemul mecanic de valturi, au fost simulate si componentele corespunzatoare sistemului cu bucla inchisa: senzorii (timbrele tensometrice), actuatoare piezoelectrice si amplificatoarele de tensiune ale acestora.

Timbrele tensometrice sunt approximate folosind ecuatia matematica (5.81). Acestea masoara curbura valtului, aparuta in urma unei forte de apasare perturbatoare. Functiile de transfer ale amplificatoarelor de tensiune pentru actuatoare piezoelectrice (unul pentru model si unul pentru unitatea de printare) au fost determinate din ecuatia diferentiala de ordinul doi, determinata prin aproximare cu ajutorul caracteristicii amplificatorului pentru anumite actuatoare, furnizata de producator (figurile 5.15 si 5.16).

In subcapitolul 5.4.2 sunt prezentate rezultatele simularii valtului de printat din sistemul model de valturi, perturbat de o forta cu amplitudinea de 1.000 N in mijlocul valtului (figura 5.9), precum si de o forta dinamica ce actioneaza la o distanta de 150 mm de unul din lagare (figura 5.11). Acestea sunt situatii care pot aparea in cadrul procesului de tiparire, matrita de tiparit variind in functie de imaginea de printat si de culoarea folosita (pentru fiecare culoare este folosita o unitate de printare).

Capitolul 6

In acest capitol este prezentat conceptul si realizarea reducerii active a vibratiilor in sistemul de valturi prezentat in figura 6.1. Acest stand de incercare este modelul realizat dupa unitatea de printare dintr-o masina flexografica si este alcatuit din 3 valturi asezate in linie orizontala. Contactul dintre valturi este realizat cu ajutorul unui material elastic (3) (o parte dintr-o matrita de tiparit folosita la masinile flexografice). Valtul de tiparire aflat in mijloc este fixat cu lagare active cu actuatoare piezoelectrice pentru a-i amortiza vibratiile produse de matrita de tiparit. Masurarea vibratiilor se face folosind timbre tensometrice (2) ale caror semnale sunt amplificate, digitizate si inregistrate pe sistemul de operare in timp real dSpace. Semnalele senzorilor masurate in Volți constituie valorile de intrare in controler, care aici e determinat ca fiind proportional-derivativ. Acesta compara semnalele timbrelor tensometrice cu o valoare de referinta si transmite semnale optimizate la amplificatorul de tensiune al actuatorilor piezoelectrice. Actuatoarele genereaza forte proportionale cu tensiunea electrica primita si micsoreaza vibratiile valtului. Conceptul de reducere a vibratiilor este prezentat schematic in figura 6.2.

In prima parte a acestui capitol este prezentata simularea sistemului de valturi cu bucla inchisa, folosind un controler proportional-derivativ care a fost parametrizat utilizand modelul matematic descris in capitolul 5. Pentru a optimiza comportamentul

dinamic al valtului, s-a testat prin software amortizarea vibratiilor prin plasarea actuatorilor in diferite pozitii: in lagare, in partea exterioara a valtului (intre lagare si terminatia valtului) precum si in partea interioara a valtului (intre lagare si centrul valtului). Primele doua metode au adus cele mai bune rezultate in timpul simularii. Rezultatele reducerii vibratiilor cu actuatorii plasati in lagare sunt prezentate in figura 6.4 unde semnalul trimbrului tensometric este redus pana la o valoare minima accesibila. In 0,2 s de la inceputul simularii este aplicata o forta de 1.000 N. Se observa ca valtul vibreaza in acest timp simetric in jurul valorii de -0,02 V. Pana la activarea controlerului la 0,5 s, timp in care forta perturbatoare este inlaturata, valtul vibreaza simetric in jurul valorii 0. Prin activarea controlerului proportional-derivativ, se observa o reducere foarte mare a vibratiilor valtului de printare.

Matrița de tiparit prezinta forte perturbatoare care se repeta periodic cu fiecare rotatie a valtului. De aceea este prezentata in figura 6.7 efectul unei perturbatii periodice de 2.000 N. Asemănător cu graficul descris anterior, pe o rotatie, este aplicata pe circumferinta valtului o forta punctuala pe lungime, ce actioneaza sub un unghi de aproximativ 70°. Pana la activarea controlerului, valtul vibreaza simetric fata de o axa care se modifica cu timpul. Primele doua zone sunt asemanatoare cu exemplul anterior. In zona a treia se observa ca amplitudinea datorata fortei perturbatoare aplicata la a doua rotatie se adauga la amplitudinea din momentul aparitiei acesteia. Acelasi fenomen se repeta, de data aceasta insa este activat controlerul, care incepe sa reduca vibratiile. Reducerea optima nu este realizata de la prima rotatie, deoarece perturbatia a determinat deviatia punctului zero al senzorului. In final, se observa ca la fiecare rotatie, vibratia determinata de forta perturbatoare este redusa, generand astfel ideea compensarii vibratiilor in bucla deschisa. Aceasta se poate realiza folosind forte care sa fie identificate in prealabil si care sa creeze vibratii cu o amplitudine negativa fata de cea creata de forte perturbatoare. Acest efect este prezentat in figura 6.8, unde sunt reprezentate forta perturbatoare (linia rosie) si valoarea medie a fortelor compensatoare (linia albastra).

Urmărind aceste efecte determinate prin simulare, s-a pornind la realizarea unui concept de reducere a vibratiilor pentru standul model, realizat experimental. Acest concept introduce cele doua idei:

- compensarea vibratiilor ce apar periodic cu unghiul de rotatie datorate matritei de tiparit in bucla deschisa
- compensarea vibratiilor ce pot aparea intamplator, sau in cazul cedarii primului algoritm, prin folosirea unui controller proportional-derivativ, intr-un mod asemanator cu cel prezentat in subcapitolul anterior.

Compensarea vibratiilor periodice in bucla deschisa se realizeaza folosind un algoritm de optimizare a fortelor compensatoare cu metoda celor mai mici patrate.

Fortelor perturbatoare sunt approximate printr-o serie Fourier, dependenta de viteza unghiulara a valtului (formula (6.2)). Fortele compensatoare care trebuie generate periodic cu actuatorile piezoelectrice sunt considerate a fi functii armonice, folosind frecventa de rotatie a valtului si un numar de 4 frecvente armonice. Parametrii A_i si B_i pentru fiecare actuator sunt determinati prin minimizarea vectorului de eroare v in asa fel incat criteriul de calitate J definit in ecuatia (6.9) sa fie indeplinit. Algoritmul este implementat in Matlab/Simulink. Vibratiile valtului sunt masurate timp de 2 s cu ajutorul timbrelor tensometrice aplicate in pozitiile (2) din figura 6.1, dupa care fortele compensatoare determinate sunt activate pentru a reduce vibratiile. Restul vibratiilor ce apar sunt reduce cu ajutorul unui controller propotional-derivativ. Partea derivativa a controlerului introduce dinamica in sistem, care in anumite situatii poate dauna actuatorilor. De aceea se aplica o filtrare a frecventelor inalte cu ajutorul unui filtru low-pass cu o constanta de timp de 10 ms.

Asupra valtului au fost aplicate o suprapunere de doua vibratii perturbatoare cu frecvente diferite, pentru a testa algoritmul de identificare a fortelor compensatoare. In figura 6.17 este prezentata reducerea amplitudinii vibratiilor aplicate valtului de tiparit in proportie de peste 90%, la o aplicare a unor forte perturbatoare cu frecvente de 5 si 15 Hz. In figura 6.18 sunt aplicate forte perturbatoare cu frecvente de 10 si 30 Hz si se observa de asemenea o reducere semnificativa a vibratiilor.

Lucrarile de modificare a lagarelor valtului de tiparit din cadrul unitatii de printare a masinii flexografice si transformarea acestora in lagare active, s-au dovedit mult mai complicate decat s-a presupus la inceput. De aceea, prin rezultatele obtinute pe standul model s-a deschis ca obiectiv de cercetare in viitorul apropiat, testarea acestui algoritm pe standul de incercare industrial.

Capitolul 7

Acest capitol intitulat "Lagare active" prezinta doua standuri de incercare: unul industrial reprezentand o unitate de printare modificata, celaltalt construit in laborator ca model al standului de incercare industrial. Pentru amandoua standurile de incercare au fost construite lagare active cu actuatori piezoelectrice, pentru a amortiza dinamic vibratiile aparute in sistemul de valturi. Constructia lor este prezentata pe larg in cadrul acestui capitol, scotand in evidenta dificultatile si cerintele unui lagar activ, precum si conditiile impuse pentru protectia actuatorului si folosirea eficienta a deplasarilor mici ale acestora pentru reducerea vibratiilor. Aceste lagare au fost construite pentru valtul de tiparire, aflat in mijloc, deoarece acesta incepe prima data sa vibreze din cauza diametrului mic in comparatie cu celelate valturi, prima rezonanta aparand la aproximativ 83 Hz la standul model si 64 Hz la standul industrial. Diferenta de frecvente proprii se

datoreaza modificarii standului de incercare industrial de catre firma colaboratoare in proiect din cauza unor decizii interne, standul initial avand frecventa proprie de 84 Hz.

Dimensionarea si construirea standului de incercare model s-a facut tinand cont de frecventele proprii cunoscute initial despre unitatea de printare, precum si de dimensiunile geometrice ale valturilor (lungimea si raportul diametrelor valturilor) si de incarcarea in linie a valturilor (intre 5-20 N/mm). Modelul este prezentat in figura 7.1.

Constructia lagarelor active care sustin valtul de printare este foarte complicata si trebuie tinut cont de deplasările foarte mici pe care le pot realiza actuatorii si de conditia ca acestia sa fie supuse numai la forte de apasare. Momentele si fortele de extindere pot determina distrugerea actuatorilor prin deteriorarea ceramicilor PZT. In figura 7.2 este prezentat lagarul activ, construit din doua parti principale: statorul (2) si partea mobila (4). Partea mobila este dezvoltata si construita pentru a permite numai miscari in directie orizontala (directia liniei de contact dintre valturi), determinate de grinda din otel elastic (6). In figura 7.2 b este prezentata analiza de solicitare mecanica a partii mobile pentru o forta de apasare in lagar de 2 kN, care ajuta la dimensionarea grinzii (6) pentru ca actuatorul sa realizeze numai miscari in limita deplasarilor permise lui, in total de $90\text{ }\mu\text{m}$ ($\pm 45\text{ }\mu\text{m}$). S-a realizat o pretensionare externa a actuatorului cu ajutorul unor arcuri-placa, asigurand astfel contactul permanent al acestuia cu valtul. In acest fel, vibratiile valtului pot fi reduse generand cu actuatorii forte in ambele directii (extindere si contractie), amandoua directiile fiind acum posibile. Rezultatele obtinute folosind aceste lagare au fost prezentate in capitolul precedent.

In subcapitolul 7.2 sunt prezentate lagare active dezvoltate si construite pentru reducerea vibratiilor valtului de printare din cadrul standului de incercare industrial. Pentru a putea realiza miscarea valtului, au fost dimensionati actuatorii piezoelectrice care pot genera forte de pana la 30 kN si deplasari de $200\text{ }\mu\text{m}$. Din cauza spatiului limitat in care pot fi incorporate lagarele si de dimensiunile actuatorilor, a fost necesara dezvoltarea a doua lagare diferite, denumite lagar pe partea A si lagar pe partea B, dupa cum se poate vedea in figura 7.5 (cu albastru inchis).

Primul lagar mentionat este mai usor de realizat, deoarece spatiul de constructie permite fixarea actuatorului in asa fel incat sa apese direct pe valt pentru a genera forte compensatoare pentru reducerea vibratiilor (figura 7.6). Grinzile elastice „flexible beams” permit miscarea orizontala a lagarului in directia liniei de contact dintre valturi si impiedica in acelasi timp miscarea verticala a acestuia.

Pe partea B, lagarul nu a putut fi construit in acelasi mod din cauza constructiei standului de incercare. Dezvoltarea acestuia a necesitat alegerea solutiei optime, in asa fel incat sa poata fi realizat, ca actuatorul sa lucreze eficient, dar si din punct de vedere tehnologic. Dupa cum se poate vedea in figura 7.7, actuatorul este pozitionat deasupra valtului. El nu poate transmite direct forte valtului, dar prin miscarile efectuate, grinzile elastice „flexible beam” permit miscarea valtului in directie orizontala.

Pentru a evita fortele verticale si momentele asupra actuatorilor care ar putea apare in timpul functionarii standului de incercare, s-au folosit constructii cu suprafete sferice prezentati in figura 7.10 a, care permit miscarea minimala a lagarului si prin acest fapt, permit rearanjarea fortelor in directia actuatorului.

Functionarea lagarelor active a fost probata in bucla deschisa, urmarind in primul pas miscarea valtului cu ajutorul actuatorilor si asigurarea ca dezvoltarea lagarelor a fost facuta cu succes. Dupa cum s-a precizat si in capitolul precedent, din cauza lucrarilor

tehnologice pentru realizarea lagarului de pe partea B, precum si dimensionarea lagarelor care s-a dovedit a fi complicata, conceptul de reglare realizat pe standul model nu a putut fi probat pe standul industrial. Acest scop este insa urmarit in continuare, lucrarile desfasurandu-se in prezent si in viitorul apropiat, iar rezultatele vor fi prezentate la conferinte internationale.

Capitolul 8

Pornind de la ideea reducerii vibratiilor valturilor din masinile de tiparit cu ajutorul unor elemente active, ca de exemplu cu actuatore piezoelectrice, idee prezentata in capitolul 6 si figura 8.2, s-a observat ca anumite vibratii apar periodic datorita matritei de tiparit. Prin ridicaturile in materialul elastic care transmit vopseaua pe suportul de imprimat, acestea provoaca la fiecare rotire a valtului aceleasi vibratii. Aceste vibratii pot fi reduse cu ajutorul unor inele din material elastic, care sa genereze forte compensatoare. Ideea amortizarii vibratiilor cu inele pasive profilate (figura 8.1) folosind energia de rotatie a unui valt a fost propusa spre patentare [71] (denumita amortizare semiactiva). Inelele pot fi asezate pe valt in apropierea lagarelor (figura 8.4) sau in alta pozitie, in functie de necesitate si spatiu. O alta idee de a introduce forte compensatoare este prezentata in figura 8.5 unde o rola se roteste pe inelul compensator plasat in interiorul valtului. Necesitatea, locul si forma inelului compensator se pot determina cu ajutorul unui model matematic ce poate fi simulat cu diferite programe, de exemplu Matlab/Simulink.

Pentru testarea ideii amortizarii semiactive cu inele profilate, a fost construit un stand de incercare prezentat in figura 8.4. Pe un valt cu diametru mic (1) sunt asezate 3 greutati (2,3) pentru a reduce prima frecventa proprie a standului de incercare la o valoare de aproximativ 18 Hz. Greutatea din mijloc este construita din otel, iar celelate doua greutati sunt mai mici, fiind construite dintr-un material denumit POM (Polioximetilena) cu densitate redusa in comparatie cu otelul. Pe greutatea (2) sunt amplasate la distante egale pe circumferinta 4 proeminente dintr-un material elastic, care in contact cu o rola, creeaza patru forte perturbatoare. In acest fel, se poate reduce frecventa de rotatie a rolei la 4,5 Hz ca sistemul sa se afle in rezonanta. Masurand amplitudinile vibratiilor cu ajutorul unor senzori de proximitate optici de la firma Wenglor, sunt observate momentele cand trebuie aplicate fortele compensatoare. Standul de incercare este modelat matematic, dupa descrierea din capitoul 5 si simulat cu Matlab/Simulink. Dupa asimilarea rezultatelor simularii sistemului cu bucla deschisa (fara reglare) cu masuratorile efectuate (figura 8.10), a fost parametrizat un regulator proportional-derivativ pentru compensarea vibratiilor. Simularea sistemului cu bucla inchisa, folosind un asemenea regulator, a demonstrat ca in cazul prezentat in figura 8.7, vibratiile provocate pot fi cel mai bine reduse in urma aplicarii de forte elastice compensatoare in pozitiile in care se afla greutatile (3). Aceste greutati cu forma inelara (denumite si inele compenstatoare) se rotesc pe role fara profil, ce se afla amplasate pe sinele elastice (4). Aceste sine se pot misca, fiind fixate cu ajutorul unor arcuri elastice, ce poate permite crearea unor forte elastice definite ($F=k*x$) prin atingerea inelelor. Aceasta solutie a fost aleasa pentru a evita prelucrarea permanenta a inelelor (3) ceea

ce ar duce la consum de material foarte mare, precum si la timpi de prelucrare foarte lungi. Cu ajutorul regulatorului proportional-derivativ, au fost calculate fortele compensatoare necesare. Cunoscand rigiditatea arcurilor, au fost calculate abaterile necesare de la dimensiunile initiale ale inelelor (3), in functie de unghiul de rotire a rolei, pentru a reduce vibratiile. Rezultatele de la simularea cu Matlab/Simulink sunt exportate in software-ul de desen Catia V5 unde este generat profilul inelului compensator. Acest inel compensator este prezentat in figura 8.12. In figura 8.13 sunt prezentate fortele perturbatoare cu si fara inele profilate pentru compensare. Aceste forte au fost generate cunoscand amplitudinile vibratiilor care au fost masurate, pentru a ajunge la concluzia de la care a pornit ideea anuntata spre patentare, aceea ca vibratiile ce apar periodic pot fi compensate folosind elemente pasive in locul unor actuatoare foarte scumpi. Se observa o reducere de 85% a amplitudinii vibratiilor in acest caz.

Un dezavantaj al acestei idei de amortizare a vibratiilor este spatiul necesar aplicarii inelelor profilate, care de cele mai multe ori poate fi foarte mic, precum si eventualele schimbari constructive care pot aparea in acest caz. De aceea, la masinilor flexografice exista ideea de a include inelele perturbatoare in cadrul matritei de tiparit sau prelucrate impreuna cu aceasta, idee care nu a fost verificata pana in momentul incheierii acestei teze.

Capitolul 9

Acest capitolul prezinta concluziile tezei, contributiile personale aduse prin aceasta teza, precum si proiecte de viitor nascute din munca de cercetare la aceasta teza. Principalele contributii aduse sunt:

- Dezvoltarea unor sensori piezoelectrice pe baza de lac acrylic piezoelectric pentru a masura fortele din valturile de tiparit.
- Dezvoltarea modelului matematic al unitatii de printat flexografice si simularea acestuia cu softwareul Matlab/Simulink
- Determinarea unui algoritm de control cu reactie in simulare, care arata o reducere semnificativa a vibratiilor valtului de tiparire
- Construirea unui model a unitatii de printat flexografice
- Dezvoltarea si construirea unor lagare active cu actuatoare piezoelectrice pentru a reduce vibratiile
- Realizarea experimentală a unui sistem de control pentru modelul masinii flexografice. Acesta contine un sistem de control fara reactie pentru reducerea vibratiilor ce apar periodic cu unghiul de rotatie al valtului de tiparire in mod predictiv, precum si un sistem de control cu reactie pentru a diminua restul vibratiilor ce pot aparea. Controlul fara reactie este realizat cu ajutorul metodei de optimizare a celor mai mici patrute, iar controlul cu reactie foloseste un algoritm proportional-derivativ.
- Optimizarea comportamentului dinamic al valtului de printare din standul model, prin reducerea amplitudinii vibratiilor acestuia cu peste 85 %, folosind sistemul de control mentionat anterior.

- Dezvoltarea unor inele profilate pentru reducerea semi-activa a vibratiilor din sistemele de valvuri, prin generarea de forte elastice care actioneaza impotriva fortelor perturbatoare. Aceasta idee publicata spre brevetare arata inca o optimizare a dinamicii valvului de tiparire, prin reducerea vizibila a amplitudinii vibratiilor acestuia pe standul de incercare din laborator.
- Rezultatele au fost diseminate intr-o publicatie anuntata spre brevetare, precum si in 8 publicatii nationale si internationale, dintre care 2 sunt indexate ISI.

Proiecte si idei de cercetare pentru viitorul apropiat, dezvoltate din aceasta teza, care pot fi realizate in cadrul unor proiecte cu firme din industria germana, precum si in teze de bachelor si masterat:

- Transferul sistemului de control de pe standul model pe unitatea de printare flexografica
- Studii de fezabilitate pentru alte aplicatii ale senzorilor piezoelectrice dezvoltati
- Transferul reducerii vibratiilor inele profilate pe alte sisteme de rotatie cu perturbatii periodice cu unghiul de rotatie, ca de exemplu turbine si motoare.

Din cercetarile facute in cadrul acestei teze, s-au dezvoltat un proiect de cercetare, un studiu de fezabilitate si o teza de masterat.