

## **Raport stiintific**

*privind implementarea proiectului in perioada octombrie – decembrie 2011*

### **A. SINTEZĂ GENERALĂ ASUPRA PROIECTULUI**

Echipe de cercetare care a desfășurat activități de cercetare în cadrul proiectului “Noi tehnici de îmbunătățire a performanțelor sistemelor de reglare automata utilizand acordarea parametrilor bazata pe experimente”, contract de finanțare nr. 167 / 05.10.2011, codul de depunere PN-II-ID-PCE-2011-3-0109, este cea nominalizată în cererea de finanțare: prof.dr.ing. Radu-Emil Precup (director de proiect), prof.dr.ing. Stefan Preitl, conf.dr.ing. Florin Drăgan, as.dr.ing. Daniel Iercan, dr.ing. Mircea-Bogdan Rădac, dr.ing. Claudia-Adina Dragoș, drd.ing. Alexandra-Lulia Stînean, drd.ing. Lucian-Ovidiu Fedorovici.

**Principalele obiective** urmărite în cadrul proiectului au fost îndeplinite conform planului de activitate și sunt grupate în cele ce urmează:

- (1) Analiza, dezvoltarea și implementarea a noi tehnici IFT îmbunătățite. Activitățile desfășurate pentru atingerea acestui obiectiv se referă la:
  - 1.1. Analiza stadiului actual privind cercetările teoretice și aplicațiile practice ale Iterative Feedback Tuning (IFT) prin studiul critic al posibilităților de îmbunătățire a tehnicilor existente în vederea generării de tehnici noi de acordare bazată pe experimente a parametrilor reguletoarelor. A fost efectuată analiza menționată și în capitolul B sunt prezentate date sintetice aferente acestei analize, însoțite de bibliografia aferentă prezentată în capitolul D.
  - 1.2. Dezvoltarea unor noi tehnici IFT prin îmbunătățirea aspectelor particulare ale tehnicii IFT privind convergența algoritmului de căutare, stabilitatea sistemului de reglare automată de-a lungul iterațiilor, obținerea informațiilor necesare asigurării performanțelor robuste prin extragerea lor din date experimentale obținute în mod neinvaziv și pe cât posibil în jurul unor puncte de funcționare nominale. A fost propusă o soluție nouă de garantare a stabilității sistemelor de reglare automată (SRA) de-a lungul iterațiilor IFT folosind un cadru specific analizei de robustețe a SRA, cu reprezentări de tip incertitudini ale regulatorului supus acordării și folosind teorema aplicărilor mici pentru sisteme în timp discret, cu detalii prezentate în capitolul C.
  - 1.3. Implementarea și validarea noilor tehnici pe echipamente de laborator. Noile tehnici au fost validate atât prin simulări cât și prin experimente efectuate pe un servosistem modular din laboratorul în care își desfășoară activitatea echipa de cercetare.
- (2) Exploatarea și diseminarea rezultatelor. Activitățile desfășurate pentru atingerea acestui obiectiv se referă la:
  - 2.1. Publicarea de lucrări în reviste cu factor de impact ridicat. În perioada de implementare a fost primit acceptul de publicare al lucrării [R1] care este publicată online în 2011 și va primi volum și număr de pagini în 2012 în revista IEEE Transactions on Neural Networks, cotate ISI, cu factorul de impact 2.624.
  - 2.2. Participarea și prezentarea de lucrări la manifestări științifice vizibile. Drd.ing. Alexandra-Lulia Stînean a prezentat lucrarea [S1] (care va fi indexată IEEE Xplore și INSPEC) în cadrul 12<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics CINTI 2011, Budapest, Hungary, 21-22 Nov. 2011. Lucrarea [P1] este prezentată în cadrul 2011 Online Conference on Soft Computing in Industrial Applications WSC 16, 5-16 Dec. 2011.

**Principalele rezultate** obținute în cadrul proiectului sunt:

- Raport de cercetare.
- Trei lucrări publicate: lucrarea [R1] într-o revistă cotate ISI cu factorul de impact 2.624 și scorul relativ de influență 2.34368, situată în zona roșie (conform clasificării UEFISCDI) de la subdomeniile ISI “Computer science, artificial intelligence”, “Computer science, hardware & architecture”, “Computer science, theory & methods” și “Engineering, electrical & electronic”, lucrarea [S1] cu indexare în bazele de date internaționale IEEE Xplore și INSPEC, lucrarea [P1] care va face parte dintr-un volum de carte publicat în 2012 în editura Springer în seria Advances in Intelligent and Soft Computing.
- Opt lucrări trimise spre publicare la: revista International Journal of Systems Science (cotate ISI, cu factor de impact, Taylor and Francis), revista International Journal of Artificial Intelligence (indexată SCOPUS, CESER), revista Facta Universitatis, Series Automatic Control and Robotics (University of Nis), 2012 IEEE International

Conference on Industrial Technology IEEE ICIT 2012 (Kos Island, Greece), 1<sup>st</sup> IFAC Conference on Embedded Systems, Computational Intelligence and Telematics in Control IFAC CESCIT 2012 (Würzburg, Germany), IFAC Conference on Advances in PID Control IFAC PID'12 (Brescia, Italy), 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference I2MTC 2012 (Graz, Austria).

- Două capitole care vor fi incluse în rapoartele de cercetare cu rezultate intermediare ale cercetării (de susținut în septembrie 2012) de cei doi doctoranzi din echipa de cercetare, drd.ing. Alexandra-Iulia Stînean și drd.ing. Lucian-Ovidiu Fedorovici.

#### **Remarci:**

1. În acest raport științific figurile și parțial relațiile au fost preluate din lucrările elaborate de echipa de cercetare. Din acest motiv pot apare adnotări în limba engleză și, în unele cazuri, notații puțin diferite de la capitol la capitol. De fiecare dată sunt aduse însă precizările necesare pentru a face interpretările cât mai clare. La unele relații va fi păstrată numerotarea din raportul de cercetare.

2. Toate lucrările publicate sau în curs de publicare și care conțin rezultate de cercetare obținute în cadrul acestui proiect au menționat sprijinul CNCS – UEFISCDI în secțiunea de Acknowledgements, alături de specificarea codului de depunere a cererii de finanțare.

## **B. ANALIZA STADIULUI ACTUAL PRIVIND CERCETĂRILE TEORETICE ȘI APLICAȚIILE PRACTICE ALE IFT**

Cele două direcții de cercetare predominante care au la bază tehnica IFT sunt: dezvoltările teoretice ale tehnicii și validarea experimentală pe procese industriale reale. Aceste direcții au mers în paralel încă de la începutul IFT în 1994.

Pe prima direcție, dacă primii opt ani de preocupări legate de IFT au fost dedicați adaptării IFT pentru o gamă largă de aplicații, perioada 2002-prezent este dedicată îmbunătățirii aspectelor particulare ale tehnicii, combinării cu alte structuri de reglare automată, plasării IFT în contextul mai general al tehnicilor bazate pe experimente pentru a oferi o viziune unificată a acestora. Aceste necesități de abordare au emanat din conștientizarea faptului că efectuarea unei acordări experimentale nu este suficientă ci este adiacentă ca și scop asigurării performanțelor prin prisma asigurării stabilității SRA, a performanțelor robuste, etc. Aceste deziderate nu pot fi îndeplinite fără o anumită cantitate de informație din interiorul buclei de reglare deci automat cunoașterea unor aspecte legate de procesul condus. S-a încercat astfel evitarea unei identificări directe a procesului condus și extragerea informațiilor semnificative prin alte abordări. În sensul definit anterior, în cele ce urmează sunt analizate sintetic câteva lucrări marcante pentru această direcție.

În [D4] se încearcă analiza convergenței algoritmului de căutare specific IFT și lărgirea domeniului de atracție prin procedura de „cost function shaping”. Această procedură are ca și grade de libertate în proiectare modelul de referință și intrarea de prescriere a SRA. Fără un model aproximativ al funcției de sensibilitate a buclei închise nu se poate asigura unicitatea minimumului global în cadrul domeniului de atracție al algoritmului de căutare.

În [D5] stabilitatea de-a lungul iterațiilor IFT este asigurată prin asigurarea condiției suficiente ca distanța Vinnicombe („mu-gap metric”) dintre regulatorul curent și cel viitor să fie mai mică decât rezerva de stabilitate generalizată. Calculul acestor indicatori se face folosind modele neparametrice în domeniul frecvență pentru bucla închisă (deci neidentificând direct procesul condus) obținute prin analiză spectrală de corelație a semnalelor în timp discret.

În [D6] este prezentată o metodă experimentală de a estima norma infinită a unor sisteme, abordare care poate fi folosită la asigurarea stabilității SRA în timpul acordărilor iterative prin tratarea într-un cadru de analiză de stabilitate robustă.

Lucrările [D7] și [D8] sunt dedicate îmbunătățirii convergenței algoritmului de căutare al IFT folosind semnalul de referință ca și grad de libertate în proiectarea unor SRA destinate rejectării perturbațiilor.

Lucrarea [D9] este de asemenea dedicată validării stabilității SRA folosind două tipuri de teste pe bucla închisă, din care se extrag datele necesare: un test folosind răspunsul la semnal treaptă al SRA și un test folosind un criteriu similar cu criteriul Nyquist în domeniul frecvență.

În [D10] este folosit un cadru de analiză de stabilitate robustă pentru tehnici neiterative (sau într-o iterație, în genul VRFT). Sunt găsite condiții suficiente pentru asigurarea stabilității SRA folosind o versiune a teoremei amplificărilor mici, folosind de asemenea o estimare a normei infinite a unui sistem din date experimentale.

Pe direcția de cercetare care vizează aplicarea IFT, sunt amintite câteva dintre lucrările semnificative din ultimii cinci ani. IFT a fost aplicată la servosisteme (hard-disk [D11], mașini unelte [D12], control de poziție/viteză la

motoare [D13], industria semiconductorilor pentru fabricarea integreatelor [D17]), chimie (coloane de distilare [D16],[D19], actuatori de tip „Ionic Polymer Metal Composite” (IPMC) [D15],[D20]), controlul raportului aer/combustibil la motoarele cu ardere internă [D18].

### C. SOLUȚIE NOUĂ DE GARANTARE A STABILITĂȚII SRA DE-A LUNGUL ITERAȚIILOR IFT

În perioada octombrie-decembrie 2011 a fost efectuată analiza stabilității SRA de-a lungul iterațiilor IFT. Este propusă o soluție nouă și simplă, problema fiind pusă într-un context specific analizei de robustețe. Astfel, regulatorul cu un grad de libertate supus acordării este reprezentat ca un element cu incertitudine și în acest scop este aplicată o variantă a teoremei amplificărilor mici pentru sistemele în timp discret. Sunt estimate margini superioare pentru amplificarea sistemelor implicate în analiza de stabilitate folosind modele neparametrice de tipul funcțiilor de răspuns în frecvență (FRF), motivația fiind faptul că acestea sunt mai ușor de obținut decât modelele parametrice. Nu este utilizat un model de tip FRF al procesului condus deoarece pe de-o parte este dificilă analiza efectelor de răspândire a incertitudinilor modelului FRF, iar pe de altă parte modelele de tip FRF pentru SRA sunt în general mai simple, având caracter de tip filtru trece jos pentru marea majoritate a SRA.

Procesul condus este modelat matematic sub form SISO LTI

$$y(k) = P(z)u(k) + v(k), \quad (1)$$

în care  $u$  este intrarea (comanda),  $y$  este ieșirea reglată și  $v$  este zgomotul de măsură. Algoritm de reglare cu timp discret este exprimat sub următoarea formă care pune în evidență funcția de transfer (f.d.t.) a regulatorului numeric  $C(z)$ :

$$u(k) = C(z)(r(k) - y(k)), \quad (2)$$

în care  $r$  este referința. Legea de actualizare a parametrilor din cadrul IFT are expresia

$$\mathbf{p}_{k+1} = \mathbf{p}_k + \Delta_k, \quad \Delta_k = -\gamma_k \hat{d}\mathbf{J}(\mathbf{p}_k), \quad (3)$$

în care:  $\mathbf{p}_k$  și  $\mathbf{p}_{k+1}$  – vectorul parametrilor la iterația curentă și respectiv următoare,  $\hat{d}\mathbf{J}$  – estimatul gradientului funcției obiectiv (f.o.)  $J(\mathbf{p})$  în raport cu  $\mathbf{p}$ ,  $\gamma_k$  – coeficientul de scalare a pasului,  $\Delta_k$  – termen de corecție care include atât estimatul gradientului cât și coeficientul de scalare a pasului.

F.o. este definită de regulă sub formă generală de criteriu de tip LQG:

$$J(\mathbf{p}) = 1/(2N)E\left\{\sum_{k=1}^N [(y(k, \mathbf{p}) - y^d(k))^2 + \lambda u^2(k, \mathbf{p})]\right\}, \quad (4)$$

în care  $y^d(k)$  este traiectoria dorită a modelului de referință,  $\lambda$  ponderează comanda și operatorul speranță matematică  $E\{\}$  este calculat în raport cu perturbațiile stohastice aplicate conform relației (1).

În cele ce urmează este propusă o soluție de IFT stabilă dezvoltată în cadrul teoretic al stabilității robuste în care acordarea parametrilor reguletoarelor este privită ca o incertitudine de tip factor coprim conform definiției din [D1]. Soluția este concentrată asupra calculului coeficientului de scalare din relația (3). Se presupune că există un regulator inițial stabilizator reprezentat sub formă de filtru rațional prin f.d.t.

$$C(z) = B(z)/A(z) = \left[\sum_{i=1}^m b_i z^{-i}\right] / \left[\sum_{i=0}^n a_i z^{-i}\right]. \quad (5)$$

Regulatorul este parametrizat prin vectorul  $\mathbf{p} = [b_1 \dots b_m a_0 \dots a_n]^T$ , care este inclus în schema de acordare pe bază de IFT prezentată în relația (3). Termenul de corecție  $\Delta_k$  definit în (3) poate fi descompus în următoarele două componente reprezentând corecții pentru numărătorul respectiv numitorul f.d.t. a regulatorului:

$$\Delta_k = [\delta_B \delta_A]^T, \quad (6)$$

care sunt private de incertitudini. Ca efect dorit al aplicării algoritmului IFT se obține următoarea legătură între regulatorul de la iterația curentă (cu indicele  $k$ ) și cel de la iterația următoare (cu indicele  $k+1$ ):

$$C_{k+1}(z) = \frac{\sum_{i=1}^m b_i z^{-i} + \sum_{i=1}^m \delta_{B_i} z^{-i}}{\sum_{i=0}^n a_i z^{-i} + \sum_{i=0}^n \delta_{A_i} z^{-i}} = \frac{B(z) + B_{\Delta}(z)}{A(z) + A_{\Delta}(z)} = \frac{C_k(z) + \Delta_B(z)}{1 + \Delta_A(z)}, \quad C_k(z) = B(z)/A(z), \quad (7)$$

$$\Delta_B(z) = B_{\Delta}(z)/A(z), \quad \Delta_A(z) = A_{\Delta}(z)/A(z).$$

Toate f.d.t. din ultima formă prezentată în (7) sunt stabile. Introducerea regulatorului următor în SRA împreună cu perturbațiile aplicate numărătorului și numitorului pot fi manipulate conform Fig. 1 (a) prin algebra schemelor bloc. Apoi polinoamele de incertitudine pot fi grupate sub forma matricei de transfer (matrice linie)

$$\Delta_{AB}(z) = [-\Delta_A(z) \quad \Delta_B(z)] \quad (8)$$

conform Fig. 1 (b).

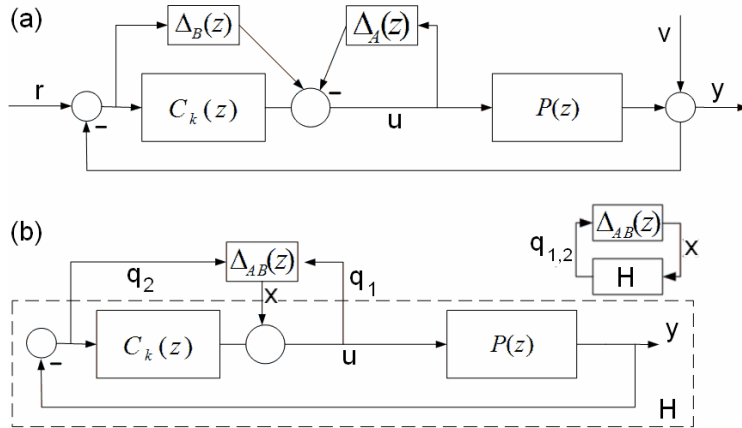


Fig. 1. Regulatorul următor construit ca incertitudine pentru cel curent (a) și transformarea sub formă standard LFT superioară (b).

Condiția suficientă de stabilitate a SRA care rezultă în urma dezvoltărilor succesive este:

$$\|\Delta_{AB}(z)\|_{\infty} < 1/\alpha, \quad (9)$$

soluția de IFT stabilă putând fi considerată și ca metodă pentru că este organizată sub forma pașilor 1), 2) și 3):

1) Se proiectează și se acordează un regulator inițial care asigură un SRA stabil.

2) La fiecare iterație se execută următoarele:

- Experimentul normal.
- Experimentele următoare necesare estimării gradientului f.o. și eventual hessianului f.o.
- Un experiment suplimentar pentru estimarea lui  $\alpha$ . Se obține  $\gamma_k > 0$  care satisface (9) și se calculează următorul vector al parametrilor utilizând relația (3). Întrucât regulatorul curent stabilizează SRA, se garantează că și regulatorul următor va face acest lucru datorită aplicării teoremei amplificărilor mici.

3) Se testează condiția de terminare a procesului iterativ de calcul aferent algoritmului IFT care este exprimată prin îmbunătățiri minore ale valorii f.o. sau/și prin calculul hessianului f.o. în apropierea punctului deminimum. Dacă această condiție este îndeplinită atunci algoritmul este terminat; în caz contrar se face un salt la pasul 2).

Concluzionând, modelele de tip FRF pot fi obținute fie din analiza Fourier a semnalelor rezultând un estimator empiric al FRF, fie din analiză spectrală și de corelație. Rezultatele prezentate în cadrul acestui capitol sunt validate prin simulări numerice pe un studiu de caz prezentat în [D3]. Ideea de bază propusă de colectivul de cercetare este deosebit de avantajoasă deoarece poate fi generalizată fără mari dificultăți la orice schemă iterativă de acordare cum sunt Iterative Regression Tuning (IRT), Correlation-based Tuning (CbT), Frequency-domain Tuning (FdT) și Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation (SPSA).

#### D. BIBLIOGRAFIE

- [D1] H. Kwakernaak "Robust control and  $H_{\infty}$  optimization - Tutorial paper," Automatica, vol. 29, pp. 255–273, March 1993.
- [D2] H. Bourslès "A local small gain theorem for discrete-time systems," in Proc. 33<sup>rd</sup> IEEE Conf. Decision and Control, Lake Buena Vista, FL, USA, 1994, vol. 3, pp. 2137–2138.
- [D3] M.-B. Rădac, R.-E. Precup, E. M. Petriu, St. Preitl, and R.-C. David, "Stable Iterative Feedback Tuning method for servo systems," in Proc. 20<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2011), Gdansk, Poland, 2011, pp. 1943–1948.
- [D4] A.S. Bazanella, M. Gevers, L. Miskovic, and B.D.O. Anderson, "Iterative minimization of  $H_2$  control performance criteria," Automatica, vol. 44, pp. 2549-2559, Oct. 2008.

- [D5] L.C. Kammer, "Stability assessment for cautious iterative controller tuning," *Automatica*, vol. 41, pp. 1829-1834, Oct. 2005.
- [D6] B. Wahlberg, M. Barenthin Syberg, and H. Hjalmarsson, "Non-parametric methods for  $L_2$ -gain estimation using iterative experiments," *Automatica*, vol. 46, pp. 1376-1381, Aug. 2010.
- [D7] J. K. Huusom, H. Hjalmarsson, N.K. Poulsen, and S.B. Jorgensen, "A design algorithm using external perturbation to improve Iterative Feedback Tuning convergence," *Automatica*, vol. 47, pp. 2665-2670, 2011.
- [D8] J.K. Huusom, N.K. Poulsen, and S.B. Jørgensen, "Improving convergence of Iterative Feedback Tuning," *Journal of Process Control*, vol. 19, pp. 570-578, Apr. 2009.
- [D9] A. Dehghani, A. Lecchini-Visintini, A. Lanzon, and B.D.O. Anderson, "Validating Controllers for Internal Stability Utilizing Closed-Loop Data," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 54(11), pp. 2719-2725, 2009.
- [D10] K. van Heusden, A. Karimi, D. Bonvin, "Data-driven model reference control with asymptotically guaranteed stability," *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, vol. 25(4), pp. 331-351, 2011.
- [D11] A. Al Mamun, W.Y. Ho, W.E. Wang, and T.H. Lee, "Iterative Feedback Tuning (IFT) of hard disk drive head positioning servomechanism," in *Proc. 33<sup>rd</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2007)*, Taipei, Taiwan, 2007, pp. 769-774.
- [D12] A.E. Graham, A.J. Young, and S.Q. Xie, "Rapid tuning of controllers by IFT for profile cutting machines," *Mechatronics*, vol. 17, pp. 121-128, Mar.-Apr. 2007.
- [D13] S. Kissling, Ph. Blanc, P. Myszkowski and I. Vaclavik, "Application of Iterative Feedback Tuning (IFT) to speed and position control of a servo drive," *Control Engineering Practice*, vol. 17, pp. 834-840, Jul. 2009.
- [D14] F.N. Koumboulis, M.P. Tzamtzi, and C.E. Economakos, "Control of a constant turning force system via step-wise safe switching Iterative Feedback Tuning," in *Proc. 2008 IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2008)*, Hamburg, Germany, 2008, pp. 1416-1424.
- [D15] A.J. McDaid, K.C. Aw, S.Q. Xie, and E. Haemmerle, "Gain scheduled control of IPMC actuators with 'model-free' Iterative Feedback Tuning," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 164, pp. 137-147, Dec. 2010.
- [D16] J.K. Huusom, N.K. Poulsen, and S.B. Jørgensen, "Iterative feedback tuning of uncertain state space systems," *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 27, pp. 461-472, Sep. 2010.
- [D17] M. Heertjes, D. Hennekens, and M. Steinbuch, "MIMO feed-forward design in wafer scanners using a gradient approximation-based algorithm," *Control Engineering Practice*, vol. 18(5), pp. 495-506, 2010.
- [D18] D. Rupp and L. Guzzella, "Iterative Tuning of Internal Model Controllers With Application to Air/Fuel Ratio Control," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 18(1), pp. 177-184, 2010.
- [D19] S. Sommer, P. Muller, and A. Kienle, "Iterative Feedback Tuning of PID Controllers for Reactive Distillation Processes: a Comparison with Relay Feedback Tuning," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 50(16), pp. 9821-9828, 2011.
- [D20] D. Liu, A.J. McDaid, K.C. Aw, and S.Q. Xie, "Position control of an Ionic Polymer Metal Composite actuated rotary joint using Iterative Feedback Tuning," *Mechatronics*, vol. 21(1), pp. 315-328, 2011.

## **E. BIBLIOGRAFIE PROPRIE**

- [P1] Precup, R.-E., David, R.-C., Petriu, E. M. and Preitl, St. (2011): Optimal fuzzy controllers tuned by charged system search algorithms. 2011 Online Conference on Soft Computing in Industrial Applications WSC 16, 10 pp.
- [R1] Rădac, M.-B., Precup, R.-E., Petriu, E. M. and Preitl, St. (online first in 2011): Application of IFT and SPSA to servo system control. *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. PP, no. 99, pp. 1-13, DOI: 10.1109/TNN.2011.2173804, ISI Science Citation Index impact factor = 2.624.
- [S1] Stînean, A.-I., Preitl, St., Precup, R.-E., Dragoș, C.-A., Rădac, M.-B. and Petriu, E. M. (2011): State feedback fuzzy control solution for BLDC drives. *Proceedings of 12<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics CINTI 2011*, Budapest, Hungary, pp. 85-90.

Director proiect,  
Prof.dr.ing. Radu-Emil Precup