

## COMPENSAREA CUPLULUI PARAZIT DE AGĂȚARE FOLOSIND UN OBSERVATOR DE PERTURBAȚII

Ștefan-Aurelian NICOLESCU<sup>1</sup>, Aurelian SARCA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Technosoft International S.R.L.

<sup>2</sup>Universitatea Politehnica București

stefan.nicolescu@technosoftmotion.com<sup>1</sup>, aurelian.sarca@upb.ro<sup>2</sup>

**Rezumat.** Un număr semnificativ de aplicații din sectorul acționărilor electrice folosesc, pentru optimizarea costurilor, motoare sincrone cu magneți permanenți având cupluri parazite de agățare relativ mari și senzori de poziție cu rezoluție mică. În aceste condiții, urmărirea a unei comenzi de mică viteză, sub 100rpm, este dificilă, implicând de cele mai multe ori erori mari. Soluția propusă în această lucrare reduce semnificativ efectul acestor perturbații de cuplu, realizând identificarea și compensarea lor în timp real folosind un observator de perturbații.

### 1. INTRODUCERE

Într-un sistem tipic de control al unui motor electric, urmărirea comenzilor de mișcare se realizează făcând comparația dintre acestea și răspunsul real al sistemului. O metodă des întâlnită este controlul în cascadă de tip poziție - viteză - curent, unde o comandă dată buclei exterioare de poziție este convertită pe rând în una de viteză, de curent, și în final de tensiune. Fiecare buclă este responsabilă pentru generarea unei comenzi noi pentru bucla imediat următoare, folosind structuri de reglare de tip PI sau PID. Astfel, la o acordare suficient de bună a tuturor reguletoarelor, eroarea dintre poziția reală al sistemului și comanda dată inițial va fi minimă.

În situații unde se dorește controlul precis al vitezei, în special la comenzi de viteză suficient de mici (sub 100 rpm), gradul de performanță obținut este puternic influențat de efectele diverselor perturbații care acționează asupra sistemului. Acestea pot fi interne, precum cele cauzate de particularități constructive ale motorului controlat, sau externe, precum încărcări bruște în sarcină. Articolul pune accent pe compensarea cuplului parazit de agățare al motoarelor sincrone, care apare în urma interacțiunii magnetice dintre magneții permanenți de pe rotor și dinții statorului. Efectul direct este o mișcare sacadată la nivelul rotorului, cu sau fără alimentarea motorului. Astfel, acesta lucrează în detrimentul unui control bun de viteză/poziție și mărește efortul reguletoarelor în cascadă.

În industria servo, problema cuplului parazit de agățare este una cunoscută [1][2]. Compensarea sa se poate realiza încă din etapa de proiectare a motorului, precum și după, prin algoritmi avansați de control. Compensarea prin proiectare se referă la modificarea diverselor aspecte ale geometriei motorului, precum modificarea raportului dintre numărul de magneți permanenți de pe rotor și golurile de pe stator, modificarea formei și dimensiunilor extremităților dinților statorici sau alungirea lor pe diagonală [3]. Compensarea prin metode software include scheme de control adaptiv bazate pe analiza răspunsului în frecvență [4], control prin învățare iterativă și injecție armonică [5], observatoare de perturbații bazate pe poziție [6][7] și multe altele.

Acest articol prezintă o soluție de diminuare a efectului cuplului parazit de agățare folosind un observator de perturbații modificat. Pe lângă posibilitatea de identificare și compensare în timp real, acesta poate furniza simultan o estimare a vitezei de rezoluție sporită pentru beneficii suplimentare în ceea ce privește nivelul de zgomot și robustețea sistemului, în special în situații unde principalul factor restrictiv este rezoluția senzorului de poziție. Capitolul



În comparație cu majoritatea structurilor de observator folosite în industrie, în cazul de față se utilizează o eroare de viteză, nu de poziție - această diferență permite eliminarea părții derivate din regulator, necesară de altfel pentru stabilitatea buclei de reglare. În acest fel, acordarea regulatorului PI este mai facilă, folosind strategii consacrate precum plasarea polilor în funcție de o bandă de frecvență cerută. Pe de altă parte, viteza folosită este derivată din informația de poziție de la encoder, ceea ce generează un nivel de zgomot sesizabil în sistemele cu senzori low-cost. Pentru rezolvarea acestor situații, structura include filtre suplimentare trece-jos de ordinul I, prin blocurile *LP filter*.

### 3. VALIDARE PRIN SIMULĂRI

Validarea soluției s-a realizat în MATLAB Simulink folosind un control de viteză în cascadă, similar cu cel din Figura 1. Pentru simplitate, motorul modelat este un motor de curent continuu cu parametrii din Tabelul 1. Asupra acestuia se aplică suplimentar o perturbăție periodică de cuplu parazit de agățare achiziționată experimental de la un motor sincron cu magneți permanenți la o viteză mică de rotație. Rezoluția senzorului de poziție simulat este 2000 de pulsuri pe rotație (ppr), iar frecvențele buclelor de control sunt setate la 10 kHz pentru bucla de curent, respectiv 1 kHz pentru bucla de viteză.

*Tabelul 1*

| PARAMETRII MOTORULUI MODELAT |                                  |
|------------------------------|----------------------------------|
| Rezistență $R$               | $0.8 \Omega$                     |
| Inductivitate $L$            | $1.2 \text{ mH}$                 |
| Curent nominal $I_N$         | $3.5 \text{ A}$                  |
| Inerția totală $J_T$         | $70 \cdot 10^{-7} \text{ kgm}^2$ |
| Constanta de cuplu $K_T$     | $0.035 \text{ Nm/A}$             |

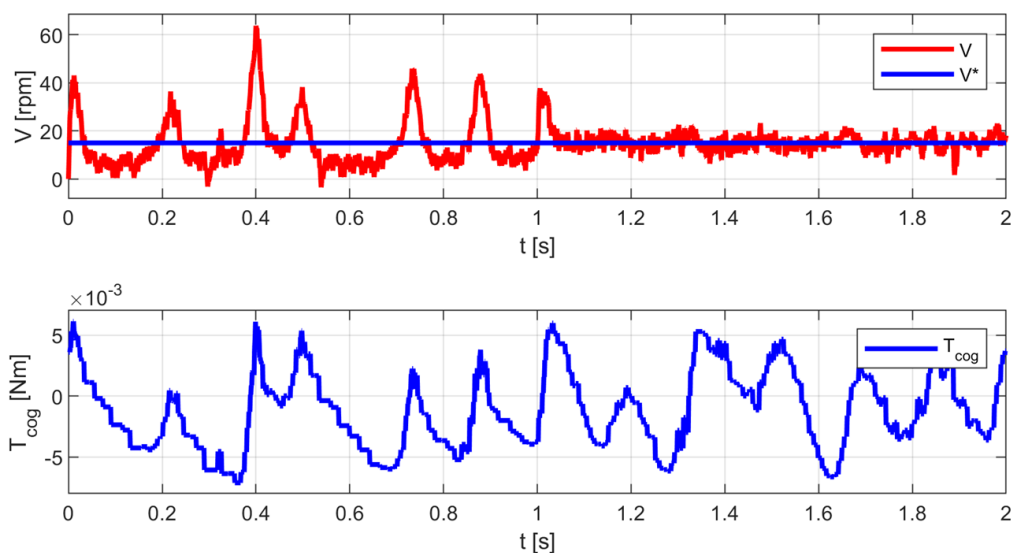


Fig. SEQ Figura \\* ARABIC 2 – Control de viteză, comandă 15 rpm, fără și cu observator de perturbații.

Testele au comandat motorul în viteză la o referință de 15 rpm, un prag suficient pentru a putea percepe efectul cuplului parazit de agățare în mișcare. Se caută să se minimizeze eroarea de viteză, atât în condiții de operare în gol, cât și la aplicarea bruscă a unor trepte de cuplu, cu sarcina egală cu un sfert din cuplul nominal  $T_N$ .

Figura 2 evidențiază efectul cuplului parazit de agățare asupra unei comenzi de 15 rpm în gol. În intervalul  $0 \text{ s} \leq t < 1 \text{ s}$ , eroarea de viteză este mare, cu vârfuri ce depășesc repetat  $40 \text{ rpm}$ , și un maxim  $V_{max} = 60 \text{ rpm}$ . Dupa  $t > 1 \text{ s}$ , DOB este activat. Acesta identifică în

timp real perturbația  $T_{cog}$  și injectează un semnal de compensare corespunzător în comanda de curent a motorului. În consecință, banda de eroare este redusă semnificativ, la aproximativ  $\epsilon = 10 \text{ rpm}$ .

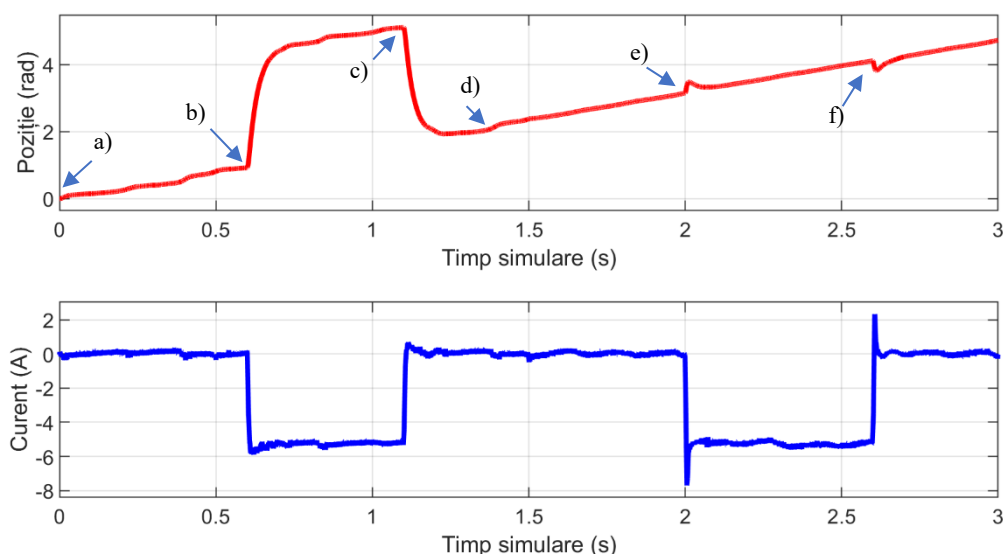


Fig. SEQ Figura \\* ARABIC 3 – Compensarea perturbațiilor de cuplu: a) mers în gol, fără DOB b) încărcare în sarcină fără DOB c) ieșire din sarcină, fără DOB d) mers în gol, cu DOB e) încărcare în sarcină, cu DOB f) ieșire din sarcină, DOB.

În Figura 3 se pot urmări diverse faze de mișcare - la momentul  $0 \text{ s} \leq t < 0.6 \text{ s}$  (faza A), motorul urmărește referința de 15 rpm în mod deficitar, dovadă fiind riplul în semnalul de poziție. Între  $0.6 \text{ s} \leq t \leq 1.1 \text{ s}$  (faza B), motorul este încărcat în sarcină. La momentul aplicării bruște a treptei de cuplu apare o abatere importantă a vitezei de la comandă, regimul tranzitoriu menținându-se aproximativ 100 ms. După ieșirea din sarcină, fazele A și B sunt repetate în timp ce observatorul de cuplu este activ. Între  $1.5 < t < 2 \text{ s}$ , observatorul de cuplu reușește să îmbunătățească semnificativ eroarea de viteză. În mod similar, între  $2 \text{ s} \leq t \leq 2.6 \text{ s}$  este aplicată aceeași încărcare în sarcină de la prima fază B. Efectul este din nou minimizarea erorii de viteză, iar durata regimurilor tranzitorii de intrare și ieșire din sarcină este redusă la mai puțin de jumătate. Urmărind forma de undă a curentului prin motor pe parcursul celor 4 faze se pot identifica cu ușurință regimurile de lucru descrise. Odată activat, efectul observatorului este vizibil prin alterarea formei de undă a curentului și prin vârfurile de curent corespunzătoare aplicării și eliminării treptelor de cuplu.

#### 4. REZULTATE EXPERIMENTALE

Experimentele practice au fost realizate cu standul din Fig. 2. Un microcontroller Technosoft iPOS 4810 MZ-CAT, alimentat la o sursă de tensiune de 24 V, realizează controlul de viteză al unui motor sincron cu magneți permanenți cu aceiași parametri ca în Tabelul 1 și 4 perechi de poli. Senzorul de poziție este un encoder incremental de 2000 ppr, iar frecvențele buclor de control sunt setate la 10 kHz pentru bucla de curent, respectiv 5 kHz pentru bucla de viteză - cea din urmă este setată de 5 ori mai rapid față de cazul simulării pentru a ilustra problema cuantizării vitezei atunci când aceasta este calculată prin derivarea poziției de la un encoder de rezoluție mică.

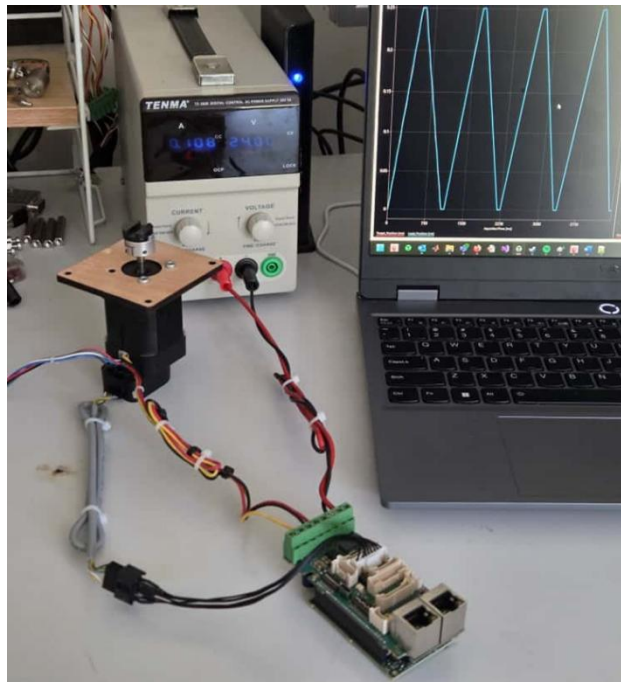


Fig. SEQ Figura \\* ARABIC 4 – Stand experimental.

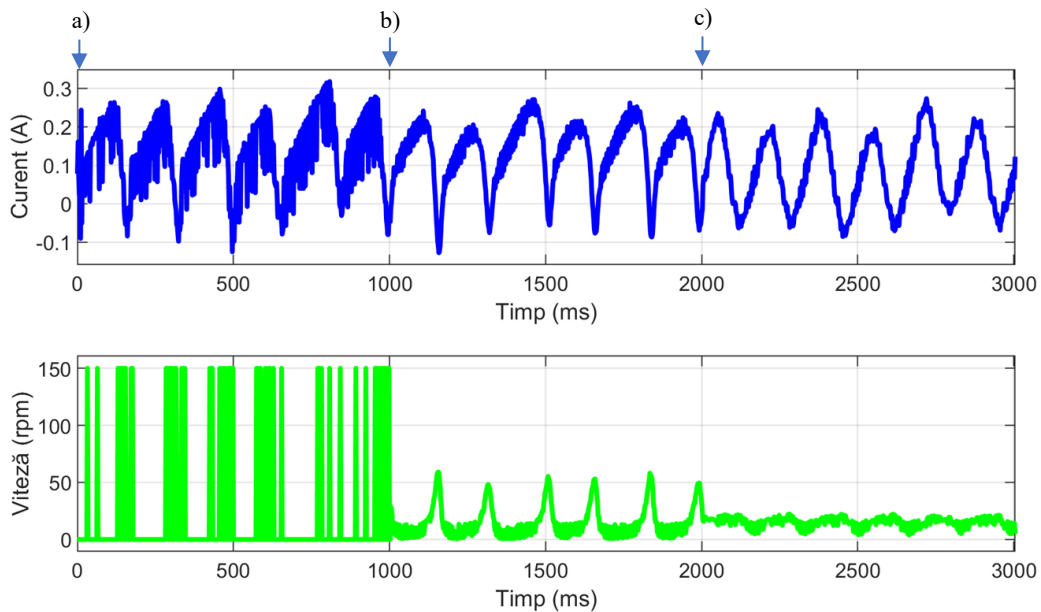


Fig. SEQ Figura \\* ARABIC 5 – Tranziții ale observatorului: a) dezactivat b) de viteză c) de cuplu și viteză.

Figura 5 exemplifică tranziția dintre diversele moduri de lucru cu observatorul. În prima fază,  $0\text{ s} \leq t < 1\text{ s}$ , acesta este complet dezactivat pentru a indica neajunsurile controlului de viteză clasic la o comandă de 15 rpm, atunci când bucla de viteză este eșantionată la 5 kHz. Viteza derivată din informația de poziție prezintă un nivel de cuantizare semnificativ de 150 rpm per count din cauza rezoluției de 2000 ppr, motiv pentru care nu se poate constata cu ușurință magnitudinea erorii de viteză. Deoarece comanda de curent este direct proporțională cu acest semnal de viteză, curentul prin motor are un nivel de zgomot ridicat, al cărui efect acustic este sesizabil. Între  $1\text{ s} \leq t < 2\text{ s}$  se activează estimarea de rezoluție ridicată a vitezei de către observator și folosirea ei ca viteză de feedback în cascadă. Efectul imediat vizibil este

reducerea globală a zgomotului de la pasul anterior. Ca urmare, cuplul parazit de agățare devine clar în forma de undă a vitezei, care indică o eroare de aproximativ 50 rpm față de comandă. După  $t \geq 2\text{ s}$  este activat și observatorul de perturbații, a cărui consecință este atenuarea considerabilă a variației vitezei într-o fereastră de  $\epsilon = 10\text{ rpm}$ , rezultat similar cu cel din simulare, indicând faptul că perturbația a fost identificată și compensată cu succes.

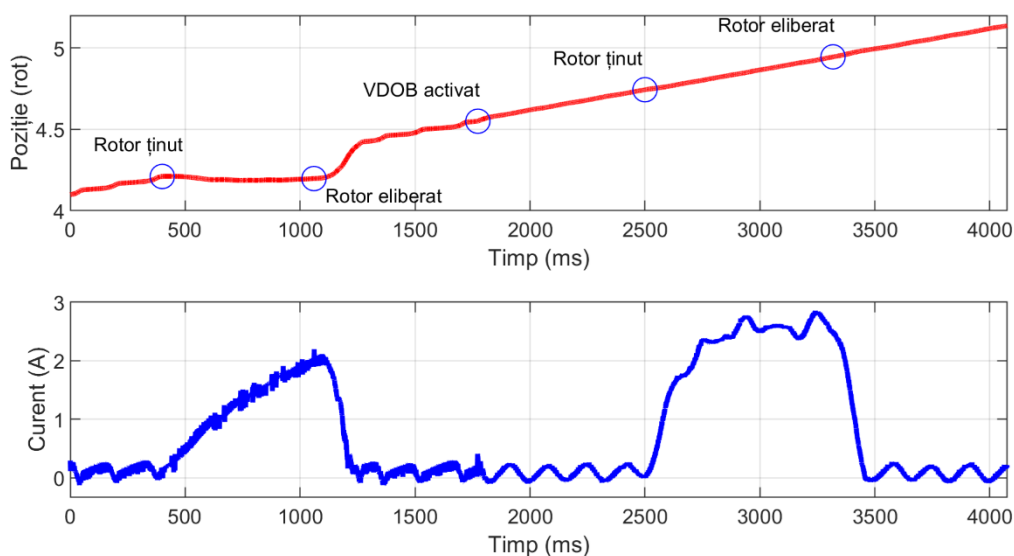


Fig. SEQ Figura \\* ARABIC 6 – Compensarea perturbațiilor de cuplu.

Rezultatele din Fig. 6 demonstrează abilitatea observatorului de a gestiona perturbații de cuplu nedorite de diverse naturi, în mod similar cu simularea realizată în Fig. 3. În controlul clasic, fără DOB, efectul cuplului parazit de agățare este evident în riplul de poziție. Odată ce se aplică o treaptă de cuplu (simplificată prin încercarea de blocare a rotorului, din exterior) se observă oprirea la o valoare a poziției, indicând o viteză nulă, și o incapacitate a sistemului de a-și corecta traiectoria. La deblocarea rotorului viteza revine în banda uzuală de eroare în aproximativ 100 ms. Odată ce se activează VDOB se observă restrângerea riplului în poziție, indicând compensarea efectului cuplului parazit de agățare. Totodată, încercarea de blocare a rotorului are efect insesizabil datorită compensării rapide și robuste în timp real. În final, forma de undă a curentului evidențiază scăderea considerabilă a nivelului de zgomot.

## 5. OBSERVAȚII ȘI CONCLUZII

Lucrarea prezintă o metodă de compensare a cuplului parazit de agățare a motoarelor sincrone cu magneți permanenți, folosind o structură modificată a unui observator de perturbații. Acesta se bazează pe eroarea de viteză pentru a furniza un semnal de compensare și totodată furnizează o estimare de viteză mai precisă, pentru a spori robustețea întregului sistem. Structura a fost validată prin teste în MATLAB Simulink, iar experimentele practice au dovedit îmbunătățiri considerabile în control de viteză, în prezența cuplului parazit de agățare și a altor perturbații externe. În ciuda rezoluției scăzute a senzorului de poziție, procesul de identificare și compensare este rapid și eficient. În mod suplimentar, utilizarea ieșirii de viteză a observatorului ca feedback poate spori calitatea controlului prin reducerea zgomotului acustic și ridicarea marginilor de stabilitate ale sistemului. Filtrarea suplimentară a semnalelor de intrare și ieșire ale observatorului este importantă în special în aplicații low-cost și trebuie ajustată atent pentru a asigura un nivel de zgomot acceptabil fără a sacrifica câștigul în performanță.

## CONFIRMARE

Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'XXI, ediția 2025.

## BIBLIOGRAFIE

1. Md. Y. Arafat et al. *Impacts of Cogging Torque and Its Reduction for an External Rotor Permanent Magnet Alternator*, 2016
2. Y. Lu, C. Wang, J. Huang, *Investigation and Analysis of Cogging Torque for Axial Flux Permanent Magnet Machines*, 2024
3. D.C. Hanselman, *Brushless permanent magnet motor design*, Magna Physics Publishing, 2006.
4. T. Kmecik, P. Girovsky, T. Basarik, D. Gordan, *Computationally Efficient Methods for Cogging Torque Identification and Compensation in BLDC and PMSM Motors*, EDPE 2025
5. W. Huang et al, *Comparison of Cogging Torque Compensation Methods for a Flux-Switching Permanent Magnet Motor by Harmonic Current Injection and Iterative Learning Control*, IEEE, 2019
6. G. Ellis, *Observers in Control Systems - A Practical Guide*, Academic Press, pp. 186-187, 2002
7. S. Park, S. Lee, *Disturbance Observer based robust control for industrial robots with flexible joints*, International Conference on Control, Automation and Systems, October 2007