

**CERCETARI TEORETICE PRIVIND COMPORTAREA DINAMICA, IN FAZA DE
DEMARARE, A UNUI AUTOVEHICUL PROPULSAT PE BAZA ENERGIEI HIDRAULICE
STOCATA IN ACUMULATORI HIDROPNEUMATICE**

Dr. Ing. Corneliu CRISTESCU*

**INOE 2000- IHP*

E-mail: cristescu.ihp@fluidas.ro

Keywords: dynamic behaviour, road vehicle, hydraulic driving, modelling and simulating, regenerative braking systems.

Cuvinte cheie: comportare dinamică, vehicule rutiere, acționare hidraulică, modelare și simulare, sisteme de recuperare a energiei de frânare.

1. Introducere

Se știe că resursele de combustibili fosili sunt limitate și neregenerabile și că, în acest secol, ele se vor epuiza. Cu toate acestea, **numarul de autovehicule** rutiere este din ce în ce mai mare, iar cantitatea **emisiilor de gaze**, care pun în pericol viața oamenilor și calitățile mediului, este în continuă creștere. Nu se poate vorbi, deocamdată, de reducerea numărului de autovehicule rutiere ci, dimpotrivă.

Preocuparea constructorilor de autovehicule pentru reducerea consumului de combustibil și reducerea emisiilor poluante s-a materializat, în ultimul deceniu, prin **dezvoltarea de vehicule puțin poluante** și cu **consum redus de combustibil**.

Din categoria acestora, pe lângă cele care utilizează gazul natural lichefiat, metanolul sau energia electrică, drept surse de energie, fac parte și **vehiculele hibride**.

Constructorii de autovehicule consideră că, în acest sens, una dintre soluțiile radicale este **schimbarea profundă a modului de propulsie al autovehiculelor, prin promovarea sistemelor hibride de propulsie**, considerate ca **soluții de viitor** pentru reducerea substanțială a consumului de combustibil și a emisiilor poluante.

Sistemele de propulsie care au în componența lor, pe lângă un sistem convențional cu **motor cu ardere internă, cel puțin încă unul capabil să furnizeze cuplu de tracțiune** la roțile automobilului și care **să recupereze o parte din energia cinetică** din fazele de decelerare, sunt cunoscute sub denumirea de **sisteme hibride regenerative**.

O caracteristică a **vehiculelor hibride regenerative** este aceea că ele includ componente care **stochează energia cinetică** a vehiculului pe durata procesului de frânare, pentru a fi folosită ulterior fie la accelerare, fie la deplasarea cu viteză constantă. Datorită faptului că energia poate fi extrasă din aceste acumulatori și utilizată din nou, se spune că avem de-a face cu sisteme „**regenerative**” de recuperare.

Sistemele de stocare a energiei cinetice, recuperate în fazele de frânare, sunt bazate pe acumulatori electrochimici, capacitivi, inerțiale, elasto-mecanice și **hidropneumatice**.

Sistemele de acționare pentru redarea energiei recuperate sunt de tipul: **hidromecanice** (hidrostatice sau hidrodinamice), electromecanice (curent continuu sau alternativ) și mecanice.

În prezent, o concurență deosebită se dezvoltă între **sistemul hibrid termo-electric**, care pe lângă motorul termic mai are și un sistem electric, și **sistemul hibrid termo-hidraulic**, care pe lângă motorul termic de acționare mai are și un sistem hidraulic de propulsie.

Pentru moment, în mod special pentru autovehicule grele, cursa pare a fi câștigată de varinta hidraulică, care beneficiază de componentele, deja, existente, dar, în viitor, pe măsura realizării componentelor specifice, mai ales pentru automobile mici, cursa va fi câștigată de hibridul termo-electric.

INOE 2000-IHP, împreună cu partenerii săi: Universitatea POLITEHNICA București, INCDMF București, INMA București și ROMFLUID București, este implicat în realizarea unui proiect de amploare, în cadrul Programului Cercetare de Excelență-CEEX, care vizează realizarea de sisteme mecatronice complexe pentru recuperarea energiei cinetice, în fazele de frânare, la autovehicule rutiere și redarea acesteia în fazele de denarare, în scopul reducerii substanțiale a consumului de combustibil și a poluării mediului.

2. Modelarea fizică a autovehiculului experimental

Așa cum s-a prezentat în numărul anterior al revistei [1], autovehiculului ales pentru realizarea experimentarilor este un autoturism tip **ARO 243, cu tracțiune 4x4.**

Acest autovehicul permite întreruperea lanțului de acționare termică a punții din spate, prin demontarea axului cardanic corespunzător, rămânând **acționarea termică doar pe puntea din față, de la motorul Diesel, MD și cutia de viteze CV**, prin intermediul transmisiei cu roți dințate și a axului cardanic existente, precum și a unui traductor de cuplu și turație TMR, adaptat special.

Acesta reprezintă **subsistemul termic de propulsie** al autovehiculului.

Prin montarea unui **subsistem mecano-hidro-pneumatic de acționare a punții din spate** a autovehiculului, s-a realizat **sistemul hibrid termo-hidraulic de propulsie.**

În esență, **subsistemul mecano-hidro-pneumatic de propulsie** se compune din următoarele părți principale:

- transmisia hidro-mecanică, formată dintr-o transmisie cu lanț prevăzută cu un traductor de cuplu și turație TMR și o unitate/mașină hidraulică UH, care funcționează ca pompă, în faza de frânare și ca motor în faza de demarare;
- stația hidraulică propriu-zisă, SH, care conține rezervorul de ulei și blocurile hidraulice cu aparatura necesară realizării funcțiilor necesare;
- bateria de acumuloare hidro-pneumatice, care permit stocarea energiei hidrostatice și alimentarea motorului hidraulic în faza de demarare a autovehiculului.

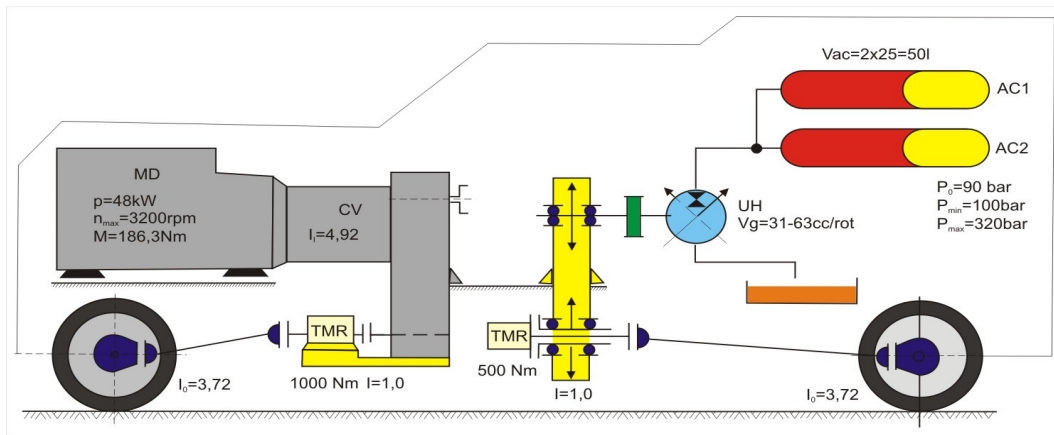


Fig. 1 Modelul fizic al sistemului hibrid termo-hidraulic de propulsie

Sistemul hibrid termo-hidraulic de propulsie, pe lângă cele două subsisteme prezentate, mai are un subsistem electronic de comandă și control și un sistem informatic de conducere a procesului, totul **realizat într-o concepție modernă, mecatronică.**

În **figura 1** se prezintă modelul fizic al sistemului hibrid termo-hidraulic de propulsie al autovehiculului ARO 243, care stă la baza cercetărilor teoretice, în faza de demarare, prezentate în cele ce urmează.

3. Modelarea matematică a fazei de demarare cu subsistemul mecano-hidraulic

Pentru cercetarea comportării dinamice a autovehiculului acționat hidraulice, în faza de demarare, se pornește de la ecuația de mișcare a autovehiculului.

Ecuația de mișcare simplificată, fără termenul care ține cont de rezistența aerului, la viteza mică de deplasare, conform literaturii [2], este data de relația:

$$\delta \cdot \frac{Ga}{g} \cdot \frac{dv_a}{dt} = F_R - G_a (f \cdot \cos \alpha + \sin \alpha), \text{ unde:}$$

- v_a este viteza autovehiculului;
- G_a este greutatea totală a autovehiculului;
- g este accelerația gravitațională;
- F_R este forța de tracțiune la roțile motoare;
- $\delta = 1,2 - 1,5$ este coeficient care ține cont de efectul inerțial al maselor aflate în mișcare de rotație;

- $f = 0,01 - 0,02$ este coeficientul de rezistență la rulare;
- α este unghiul rampei.

Dacă se consideră unghiul $\alpha = 0$, adică drumul este orizontul, ecuația de mișcare devine:

$$\delta \cdot \frac{Ga}{g} \cdot \frac{dv_a}{dt} = F_R - f \cdot Ga$$

În cazul unei acționări hidrostatice, momentul M_{MH} transmis de motorul hidraulic MHR cu cilindrul Vg și presiunea p , la roata motoare cu raza R , considerând și randamentul total al transmisiei η_t , va fi:

$$M_{MH} = 1,59 \cdot Vg \cdot p \cdot \eta_t,$$

iar forța la roată F_R , ținând cont de raportul de transmitere i_0 al diferențialului, va fi:

$$F_R = \frac{M_{MH} \cdot i_0 \cdot \eta}{R} = \frac{1,59 \cdot Vg \cdot p \cdot i_0 \cdot \eta_t}{R}$$

În cazul acționării hidrostatice, ecuația de mișcare a autovehiculului, va fi:

$$\delta \cdot \frac{Ga}{g} \cdot \frac{dv_a}{dt} = \frac{1,59 \cdot Vg \cdot p \cdot i_0 \cdot \eta_t}{R} - f \cdot G_a$$

În cele ce urmează, se va cerceta **comportarea dinamică** a autovehiculului experimental (ARO 243), dotat cu un sistem hidrostatic de propulsie compus, în principal, dintr-o mașină hidraulică, cu funcția de motor hidraulic în faza de demarare și 2 acumulatori hidropneumatici cuplate în paralel, pline cu ulei hidraulic la presiune maximă.

Sistemul hidrostatic funcționează de la presiunea maximă de 320 bar până la presiunea minimă admisă (100 sau, după caz, 50 bar).

Modelul matematic al acumulatorului hidropneumatic cu burduf este dat de ecuația de continuitate și ecuația de transformare adiabată a gazului (azotului) care, conform literaturii [3] și [4], cu simbolizările cunoscute, este:

$$Q_{ac} = \frac{dV}{dt} + \frac{V_0}{Ea} \cdot \frac{dp}{dt} + \frac{V}{Ea} \cdot \frac{dp}{dt}$$

$$p \cdot V^x = p_1 \cdot V_1^x$$

Din prelucrarea ecuațiilor de mai sus, rezultă că debitul furnizat de acumulator va fi:

$$Q_{ac} = \left\{ \frac{V_1}{Ea} \cdot \frac{p_1^{1/x}}{p^{1/x}} + \frac{V_0}{Ea} - \frac{V_1 \cdot p_1^{1/x}}{x \cdot p^{(x+1)/x}} \right\} \cdot \frac{dp}{dt}$$

Dacă se cunoaște unghiul de rotire θ al axului motorului hidraulic, iar ω viteza unghiulară de rotație, atunci volumul de ulei V_{MH} consumat de motorul hidraulic va fi:

$$V_{MH} = \frac{Vg}{2\pi} \cdot \theta = \frac{Vg}{2\pi} \cdot \omega t$$

Dacă se derivează relația de mai sus, se obține debitul de ulei Q_{MH} consumat de motorul hidraulic și care este egal cu debitul livrat de acumulator Q_{ac} :

$$Q_{MH} = \frac{dV_{MH}}{dt} = \frac{Vg}{2\pi} \cdot \omega = Q_{ac}$$

Cunoscând legea de variație a debitului livrat de acumulator motorului hidraulic, din relația debitului acumulatorului, prin integrare, se poate determina legea de variație a presiunii din acumulator, care permite, la rândul-i, determinarea variației momentului dat de motorul hidraulic și, respectiv, a forței de tracțiune la roată. Prin integrarea ecuației de mișcare se obține accelerația la demarare, viteză v și, respectiv, cursa x parcursă de autovehicul.

Folosind relații elementare cunoscute din literatură, se poate realiza un model matematic complet care, prin simulare pe calculator, permite cunoașterea variației tuturor parametrilor de interes. Simbolizările sunt următoarele: ω_{RM} – viteza unghiulară la roata motoare, respectiv, la motorul hidraulic, ω_{MH} , unghiul θ_{RM} și accelerația unghiulară ε_{RM} la roata motoare; v_{RM} , a_{RM} , n_{RM} , x_{RM} viteza, accelerația, turația și cursa la roata motoare, precum și numărul de rotiri al acesteia, N_{ROT} .

De asemenea, se calculează caracteristicile motorului hidraulic rotitor, notate cu simbolurile cunoscute cu indicele MH și anume: viteza unghiulară, accelerația unghiulară, turația, unghiul de rotire, puterea și energia la motorul hidraulic (MH), precum și energia cinetică a autovehiculului.

$$\omega_{RM} = \frac{\omega_{MH}}{i_{tot}}$$

$$n_{RM} = \frac{30}{\pi} \cdot \omega_{RM}$$

$$\varepsilon_{RM} = \frac{d\omega_{RM}}{dt}$$

$$N_{ROT} = \frac{x_{RM}}{2\pi R}$$

$$\theta_{RM} = \int \omega_{RM} \cdot dt$$

$$\omega_{MH} = \omega_{RM} \cdot i_0 \cdot i_{RED}$$

$$v_{RM} = \omega_{RM} \cdot R_{RM}$$

$$n_{MH} = \frac{30}{\pi} \cdot \omega_{MH}$$

$$a_{RM} = \frac{dv_{RM}}{dt}$$

$$\varepsilon_{MH} = \frac{d\omega_{MH}}{dt}$$

$$x_{RM} = \int v_{RM} \cdot dt$$

$$\theta_{MH} = \int \omega_{MH} \cdot dt$$

$$i_{TOT} = i_0 \cdot i_{RED}$$

$$P_{MH} = M_{MH} \cdot \omega_{MH}$$

$$M_{RM} = M_{MHR} \cdot i_{TOT}$$

$$E_{MH} = \int P_{MHR} \cdot dt$$

$$E_C = \frac{1}{2} \cdot M \cdot v^2$$

4. Modelarea sistemică a fazei de demarare cu sistemul mecano-hidraulic

Pe baza modelului matematic prezentat mai sus, s-a elaborat un model de simulare pe calculator a fazei de demarare a autovehiculului cercetat, propulsat de sistemul mecano-hidro- pneumatic descris mai sus. Modelul de simulare este prezentat în figura 2.

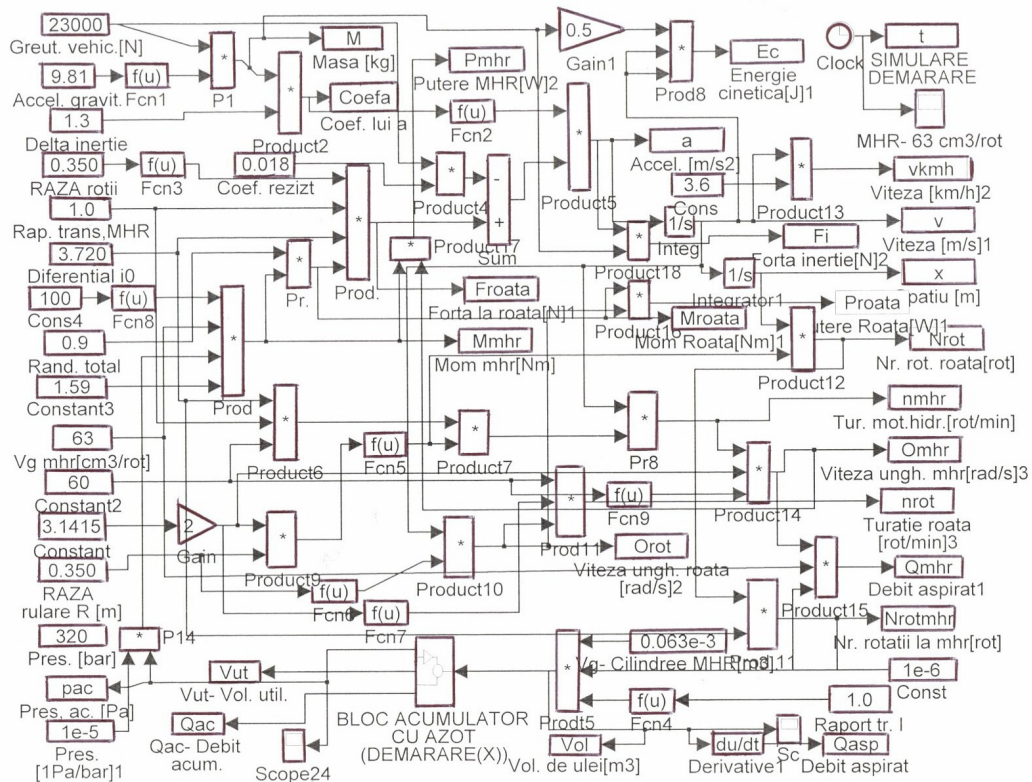


Fig. 2 – Modelul de simulare a fazei de demarare cu sistemul mecano-hidraulic

Modelul se compune din o serie de blocuri standard ale mediului de simulare utilizat, precum și blocuri special concepute și dedicate aplicației. Modelul a fost testat pe calculator, iar o parte din rezultate sunt prezentate în cele ce urmează.

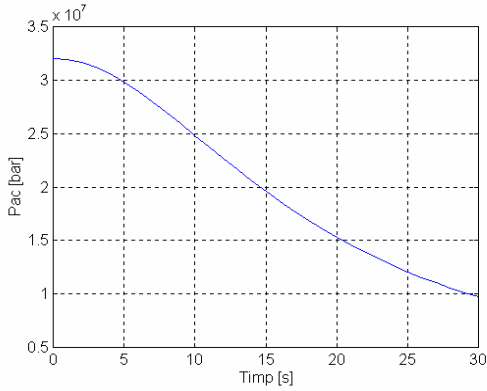


Fig. 3 – Variația presiunii în acumulator(t)

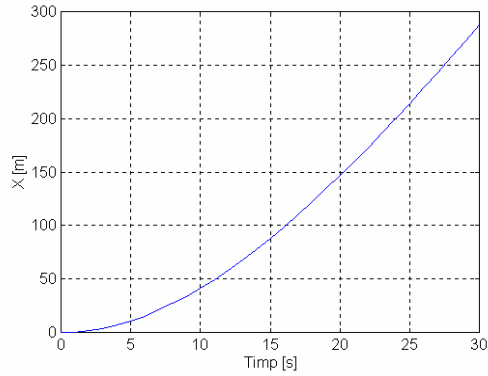


Fig. 7 – Variația cursei de demarare

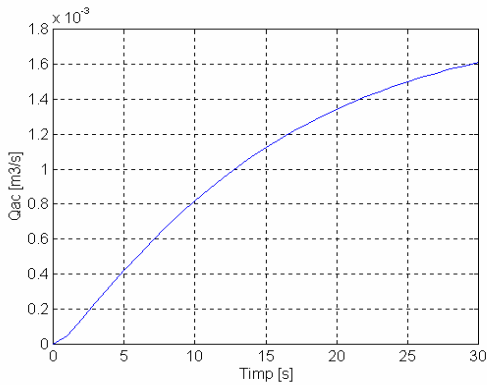


Fig. 4 – Variația debitului acumulatorului

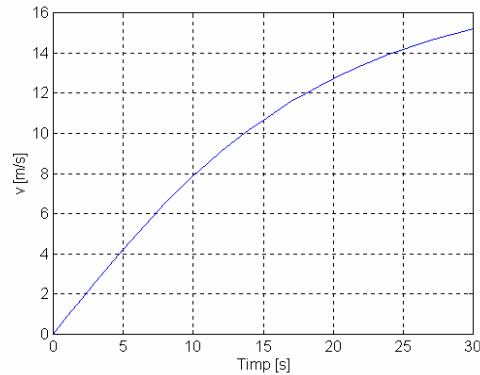


Fig. 8 – Variația vitezei la demarare, in m/s

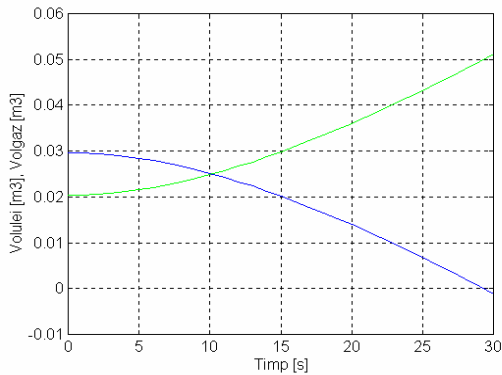


Fig. 5 – Variația volumelor de ulei și de azot

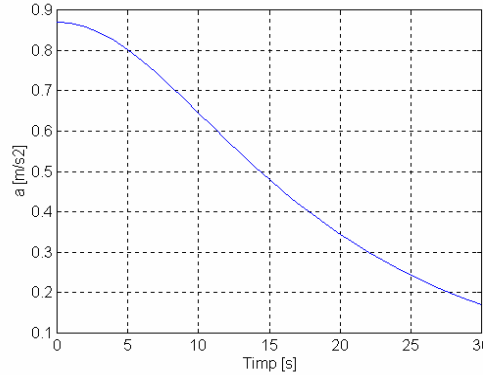


Fig. 9 – Variația accelerației la demarare

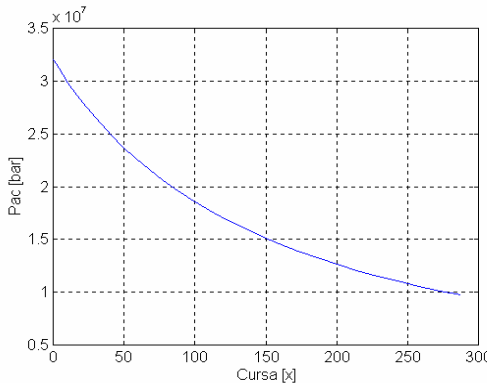


Fig. 6 – Variația presiunii în acumulator (x)

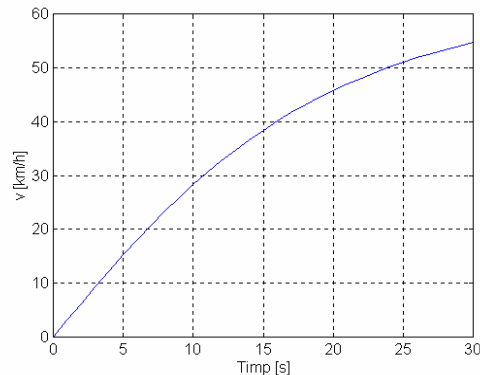


Fig. 10 – Variația vitezei de demarare, în km/h

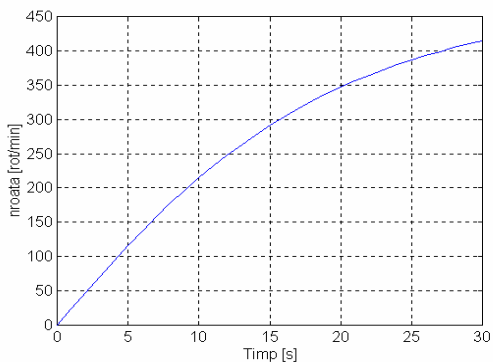


Fig. 11 – Variația turației la roata motoare

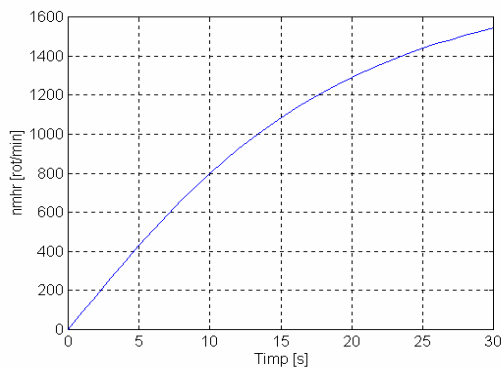


Fig. 15 – Variația turației la motorul hidraulic

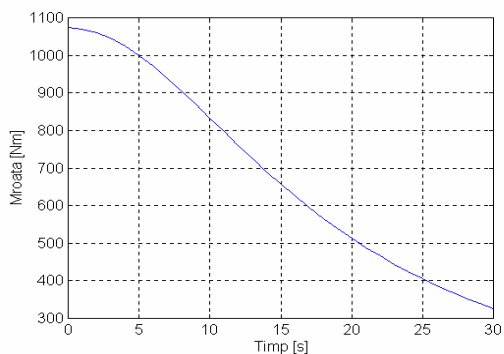


Fig. 12 – Variația momentului la roata motoare

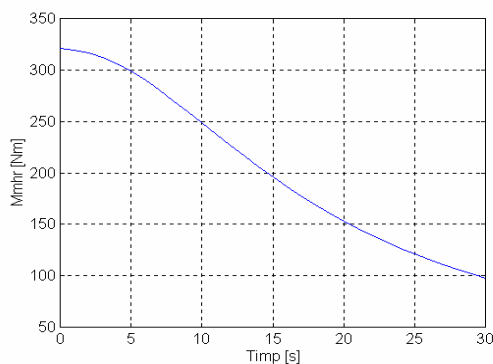


Fig. 16 – Variația momentului la motorul hidraulic

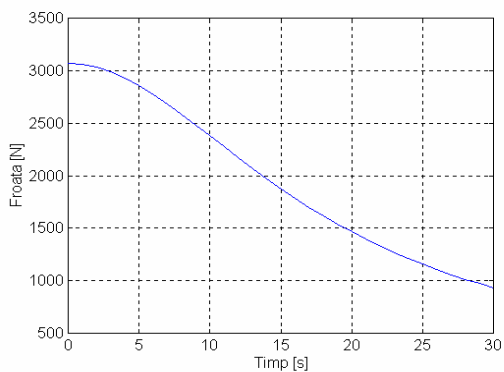


Fig. 13 – Variația forței de tracțiune la roata

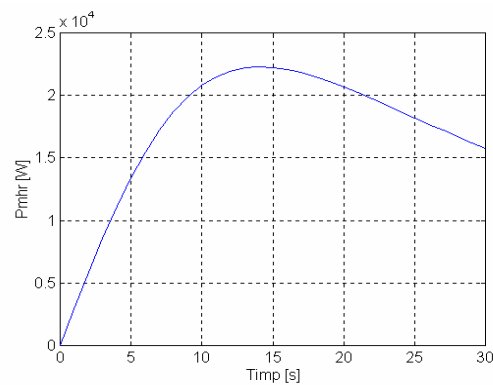


Fig. 17 – Variația puterii la motorul hidraulic

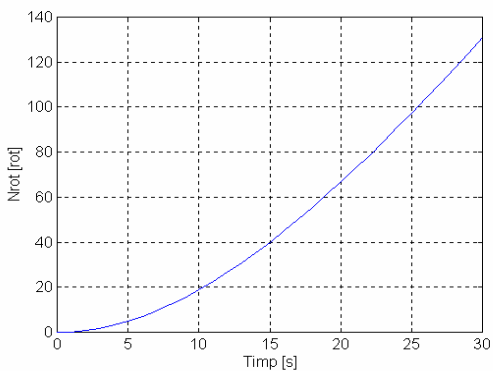


Fig. 14 - Variația numărului de rotiri ale roții motoare

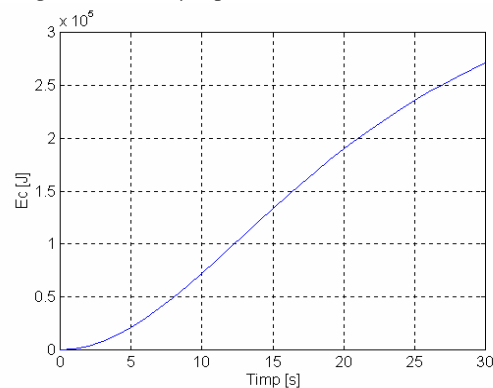


Fig. 18 – Variația energiei cinetice la demarare

5. Experimente de simulare pe calculator

Pentru cercetarea comportării dinamice a autovehiculului dotat cu subsistem mecano-hidro-pneumatic de propulsie, conform celor prezentate mai sus, pe baza modelului matematic prezentat, s-a elaborat un model informațional de simulare (fig. 2) care a fost testat, completat și îmbunătățit continuu până când rezultatele au putut fi validate logic și dimensional.

Pentru rularea pe calculator a programului de simulate elaborat, au fost utilizate datele constructiv-funcționale ale autovehiculului cercetat.

Simularea pe calculator s-a făcut în următoarele ipoteze:

- s-a considerat că, initial, acumulatorii hidropneumatici sunt plini cu ulei la presiunea maximă de 320 bar, iar sistemul lucrează până la presiunea minimă de 100 bar;

- autovehiculul având masa proprie plus și greutatea echipamentului mecano-hidraulic de propulsie, inclusiv personalul de cercetare, pornește de pe loc și accelerează până când presiunea din acumulatori atinge valoarea minimă stabilită (100 bar).

Cu aceste ipoteze de lucru, s-au realizat experimentele de simulare ale căror rezultate sunt prezentate, sub formă grafică, în cele ce urmează.

Astfel, în **figura 3** se prezintă variația presiunii în acumulatorii hidro-pneumatici în funcție de timpul de demarare, presiunea minimă fiind atinsă după circa 30 de secunde. În acest timp debitul de ulei livrat de acumulatori, prezentat în **figura 4**, are o creștere care tinde spre stabilizare o dată cu viteza de deplasare. În acest timp, așa cum se vede în **figura 5**, pe măsură ce este alimentat motorul hidraulic, volumul de ulei din acumulatori scade, locul acestuia fiind luat de azotul care se destinde, volumul lui crescând continuu.

În **figura 6** se prezintă variația presiunii din acumulatori în funcție de cursa de demarare care, așa cum se vede în **figura 7**, are o creștere mai lentă la început, iar după învingerea inerției, pe măsura creșterii vitezei, **figura 8**, are o creștere puternică. **Figura 9** ilustrează evoluția accelerației, respectiv a forței de inerție, care tinde spre zero o dată cu tendința de stabilizare a vitezei, a cărei evoluție (în km/h) se vede în **figura 10**.

Odată cu scăderea accelerației, respectiv a forțelor de inerție, turația roților motoare crește, **figura 11**, iar momentul de propulsie la roata motoare scade conform **figurii 12**, aceasta și datorită scăderii continue a presiunii din acumulatorii hidropneumatici. Aceeași evoluție o are și forța de tracțiune la roata motoare, cum se poate vedea în **figura 13**. În acest timp, roata motoare realizează un număr de rotații complete, conform **figurii 14**.

Variația turației și a momentului de rotire la arborele mașinii hidraulice, care în această fază funcționează în regim motor hidraulic se pot urmări în diagramele din **figurile 15 și 16**.

Puterea la motorul hidraulic are o variație interesantă, așa cum se vede în **figura 17**, alura curbei **prezentând un maxim**, după care, odată cu scăderea presiunii, respectiv a momentului, puterea are o scădere importantă, cu toate că turația continuă să crească..

Din experimentele de simulare făcute, au mai rezultat și alte aspecte interesante ale unor parametri funcționali. Dintre acestea, în **figura 18** se prezintă variația energiei cinetice acumulate de autovehicul în faza de demarare a autovehiculului cercetat.

6. Concluzii

În articol se prezintă preocupările constructorilor de autovehicule de a eficientiza autovehiculele rutiere, în sensul realizării unor economii substanțiale de combustibil, una din căi fiind promovarea sistemelor hibride de propulsie.

În această direcție se înscrie și preocupările institutului care, în cadrul unui proiect de C-D din Programul CEEEX, dezvoltă un sistem hibrid termo-hidraulic.

Din cercetările teoretice realizate până acum, în articol se prezintă comportarea dinamică în faza de demarare a unui autovehicul dotat cu un astfel de sistem.

O serie de aspecte specifice ale comportării dinamice au fost prezentate în capitolul anterior.

Ca o apreciere globală, se poate observa că sistemul hidraulic este mult mai elastic decât sistemul termic, mai ales cel cu motor Diesel [1] și, deci, răspunsul dinamic este mai puțin prompt, comparativ cu acesta. Este adevărat că este o diferență de putere, respectiv de moment, între cele două sisteme, dar timpul de răspuns este mult mai mare, iar accelerațiile imprimare autovehiculului sunt mult mai mici.

Cercetările teoretice vor continua cu analiza comportării dinamice în faza de frânare a autovehiculului dotat cu sistem hidraulic de propulsie, rezultatele urmând a fi prezentate într-un număr viitor al revistei.

Bibliografie

- [1] Cristescu, C. *Cercetări teoretice privind comportarea dinamică a unui autovehicul rutier, în scopul evaluării posibilităților de echipare cu sistem de recuperare a energiei de frânare.* În: HIDRAULICA nr. 2-3 (19), decembrie 2006, ISSN/1453-7303.
- [2] Untaru, M., Cîmpian, V., Hilo, C., Vărzescu, V. *Construcția și calculul autovehiculelor.* Editura Tehnică, 1974.
- [3] Oprean, A., Ionescu, Fl., Dorin, Al. *Acționări hidraulice. Elemente și sisteme.* Editura Tehnică, București, 1982.
- [4] Chiriță, C. *Acționări electrohidraulice.* Editura Tehnică, București, 1982.



Reprezentanța în România
PARKER HANNIFIN Co.
Bld. Ferdinand nr. 27
Sector 2
Tel/Fax: 004/021/252.13.82, 021/252.33.81

Prezentare Parker Hannifin Co.

Produsele firmei Parker sunt structurate pe 8 grupe de produse:

Aerospațiale, Conectori, Hidraulică, Climatizare și Control industrial, Garnituri, Filtrare, Instrumentație și Automatizări.

Toate produsele firmei sunt conforme standardelor ISO 9001 și 9002 și au un înalt grad de calitate și precizie.

În România există o rețea de 10 distribuitori și integratori cu elemente Parker, care acoperă teritoriul României.

Servicii oferite clienților

Servizare furtunuri hidraulice - avem stocuri de furtunuri și racorduri.

Proiectare sisteme și echipamente hidraulice și pneumatice.

Training pentru hidraulică și pneumatică conform nevoilor clientului.

Breadman îmbunătățire a logisticii și scăderea stocurilor la client prin livrarea diverselor componente direct la linia de asamblare.

Kitting livrare consolidată de sisteme sau diverse componente Parker sub un singur cod.

Garanție și post garanție pentru echipamente și produse.

Punere în funcțiune pentru echipamente.

ParkerStore magazin cu furtunuri, racorduri și alte elemente (garnituri, filtre, ulei hidraulic).

HTC- Hydraulic Technology Center - Centru de expertiză hidraulică (proiectare, asamblare, reparații, execuție, etc.)

