

## DINAMICA MAȘINILOR DE RIDICAT. INFLUENȚA DINAMICII RIDICĂRII SARCINILOR ASUPRA STABILITĂȚII MACARALELOR TURN

### DYNAMICS OF LIFTING MACHINES. THE INFLUENCE OF LOAD LIFTING DYNAMICS ON THE STABILITY OF TOWER CRANES

Cristina SESCU-GAL<sup>1</sup>, Cătălin FRÂNCU<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universitatea Tehnică de Construcții București, Facultatea de Utilaj Tehnologic  
[cristina.sescu-gal@utcb.ro](mailto:cristina.sescu-gal@utcb.ro); [francu@utcb.ro](mailto:francu@utcb.ro)

**Rezumat:** Macaralele sunt instalații esențiale sectorului de construcții – montaj. Fie că vorbim de utilizarea clasică a acestora în construirea unui obiectiv, în activitatea de intervenții asupra construcțiilor, la montarea unor echipamente sau structuri dar și ca utilaje înglobate în sisteme BIM, cunoașterea comportării dinamice a acestora este importantă în egală măsură pentru proiectant cât și pentru utilizator. Scopul urmărit în cercetările din domeniu sunt caracteristicile stabilirii factorilor perturbatori datorat funcționării mecanismelor, a comportării structurii portante supusă solicitărilor dinamice precum și în asigurarea stabilității în exploatare. Prezenta lucrare este centrată pe determinarea modului în care mișcarea de ridicare a sarcinilor de pe o suprafață de sprijin influențează stabilitatea la răsturnare a acestor instalații. De reținut că o influență majoră asupra stabilității o constituie cazurile particulare regăsite în situația descărcării instantanee a sarcinii și în cazul acțiunii neuniforme a vântului, situații care fac obiectul unor tratate viitoare.

**Cuvinte cheie:** *dinamica macaralelor, stabilitate, model dinamic*

**Abstract:** Cranes are essential installations for the construction - assembly sector. Whether we are talking about their classic use in the construction of an objective, in the activity of interventions on constructions, in the installation of equipment or structures but also as equipment embedded in BIM systems, knowing their dynamic behavior is equally important for the designer and for user. The aim pursued in the researches in the field are characteristic for establishing the disturbing factors due to the functioning of the mechanisms, the behavior of the load-bearing structure subject to dynamic demands as well as in ensuring the stability in operation. This paper focuses on determining how the lifting movement of loads on a support surface influences the overturning stability of these installations. It should be noted that a major influence on stability is the particular cases found in the situation of instantaneous discharge and in the case of uneven action of the wind, situations which are the subject of future treaties.

**Keywords:** *crane dynamics, stability, dynamic model*

## 1. INTRODUCERE

Problema stabilității macaralelor neancorate a făcut obiectul cercetărilor de-a lungul timpului, fiind și azi actuală datorită modificărilor ce apar în normele de calcul dar și faptului că rezultatele obținute la încercări de tip experimental sunt de regulă nerepetitive, ceea ce a necesitat utilizarea analizelor statistice. Efectele dinamice ce apar în timpul ridicării sarcinilor sunt generate în principal de perioadele tranzitorii de funcționare ale mecanismului de ridicare, respectiv demarajul și frânarea mișcărilor de lucru. În practica curentă de proiectare, efectul dinamic la funcționarea mecanismului de ridicare se ia în considerare prin majorarea valorii greutateii sarcinii, utilizând coeficientul dinamic de ridicare, abordare care are avantajul

simplificării calculelor și este satisfăcător. Dezavantajul utilizării coeficienților conduce adesea la supradimensionarea structurilor portante ale macaralelor și scăderea performanțelor utilajului. În prezent, studiul asupra comportării dinamice a macaralelor în diferite situații beneficiază de metodele de calcul informatic cu limbaje specifice de modelare a comportărilor sub acțiunea factorilor dinamici.

## 2. STUDIUL DINAMIC AL MACARALELOR

### 2.1. Model dinamic utilizat pentru studiul macaralelor

În scopul analizelor dinamice ale macaralelor, în practica curentă se utilizează modele dinamice având numărul gradelor de libertate egal cu numărul parametrilor geometrici independenți necesari precizării poziției maselor constitutive aflate în mișcare sub acțiunea factorilor perturbatori. Referindu-ne la o macara turn modelul dinamic uzual este reprezentat în figura 2.1.

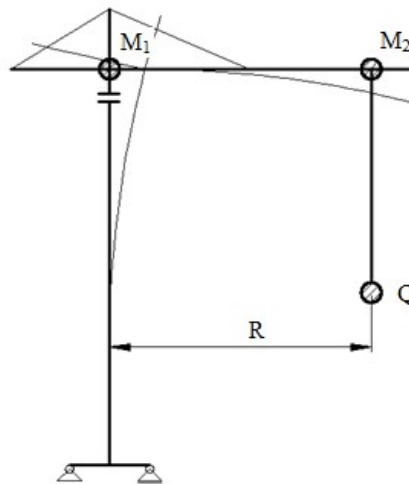


Figura 2.1. Model dinamic de bază al unei macarale turn cu braț orizontal [1]

Pentru modelul din figura 2.1., se consideră că terenul pe care sunt amplasate este rigid, iar în efectuarea analizei ca elemente elastice se apreciază structura metalică și palanul de ridicare a sarcinii. Această considerent nu este valabil în studiul stabilității dinamice la răsturnare deoarece în timpul răsturnării întreaga mașină basculează.

### 2.2. Studiul dinamic al ridicării sarcinilor

Forțele externe ale sistemului dinamic sunt definite de mișcările macaralei, astfel că putem considera mișcările de ridicare și coborâre a sarcinilor determinante pentru analiza asupra stabilității macaralelor, acestea fiind mișcările care se produc cu cea mai mare frecvență. În privința ridicării sarcinilor se întâlnesc două situații distincte, respectiv: situația în care se ridică o sarcină suspendată aflată în repaos la o anumită înălțime și ridicarea unei sarcini aflate pe o suprafață de sprijin. În prezenta lucrare se tratează cazul ridicării unei sarcini aflate pe sol, iar pentru simplificarea studiului se utilizează următoarele ipoteze simplificatoare [2]:

## Dinamica mașinilor de ridicat. Influența dinamicii ridicării sarcinilor asupra stabilității macaralelor turn

- se presupune că elementele mecanismului de ridicare sunt mai rigide decât structura metalică și cablul de ridicare;
- oscilațiile elastice ale structurii metalice și macaralei și ale sarcinii nu influențează legea de mișcare a motorului de acționare a mecanismului de ridicare;
- se neglijează influența variației tensiunii în cablu de ridicare a sarcinii datorită variației în timpul ridicării a lungimii palanului de ridicare;
- structura metalică a macaralei se consideră ca un sistem cu un singur grad de libertate (masa se reduce prin echivalență la o masă redusăpunctul de reducere fiind punctul de suspendare a sarcinii);
- oscilațiile se consideră ca fiind neamortizate.

Analiza dinamică a ridicării sarcinii se realizează pe etape, ilustrate în figura 2.2., reprezentând: a) cursa în gol a palanului de ridicare, b) creșterea efortului în palan, c) deplasarea maselor, d) deplasarea independentă a sarcinii ca urmare a slăbirii cablului de sarcină.

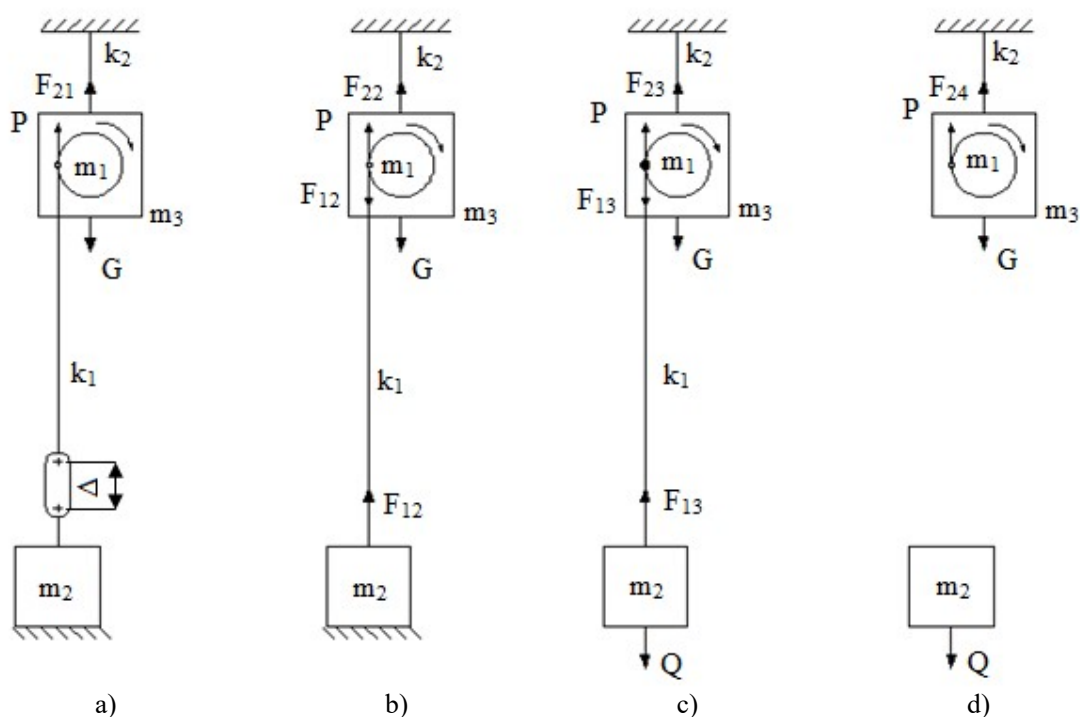


Figura 2.2. Model dinamic de bază al unei macarale turn cu braț orizontal [2]

Ecuțiile de mișcare corespunzătoare fiecărie etape sunt:

- a) cursa în gol a palanului de ridicare – viteza masei  $m_1$  la sfârșitul primei etape este (2.1.):

$$\dot{x}_{11f} = \dot{x}_{120} = \sqrt{\frac{2P\Delta}{m_1}} \quad (2.1)$$

- b) creșterea efortului în palan de la valoarea zero la valoarea corespunzătoare sarcinii  $Q$ ; masa  $m_2$  rămâne în stare de repaos, vitezele celorlalte mase au forma relațiilor (2.2.):

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_{12} &= P - F_{12} \\ m_3 \ddot{x}_{32} &= G + F_{12} - F_{22} \end{aligned} \quad (2.2)$$

c) deplasarea celor trei mase împreună – ecuațiile de mișcare au forma relațiilor (2.3):

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_{13} &= P - F_{13} \\ m_2 \ddot{x}_{23} &= F_{13} - Q + m_2 \ddot{x}_{23} \\ m_3 \ddot{x}_{33} &= G + F_{13} - F_{23} \end{aligned} \quad (2.3)$$

d) deplasarea independentă a sarcinii ca urmare a slăbirii cablului de sarcină datorită amplitudinii mari a sarcinii – ecuațiile de mișcare au forma relațiilor (2.4):

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_{14} &= P \\ m_2 \ddot{x}_{24} &= -Q \\ m_3 \ddot{x}_{34} &= G - F_{24} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Dezvoltând calculele pentru cazul analizat, se pot determina amplitudinile componentelor armonice, pulsațiile proprii sistemului și perioadele fiecărei etape.

### 3. INFLUENȚA DINAMICII RIDICĂRII SARCINILOR ASUPRA STABILITĂȚII MACARALELOR

Pe baza studiilor efectuate în domeniu stabilității macaralelor, s-au formulat următoarele principii general valabile:

a) oscilațiile reciproce ale maselor construcției metalice nu influențează procesul de deplasare al macaralei în raport cu muchia (latura) d erăsturnare;

b) forțele disipative nu influențează abaterile maxime ale maselor macaralei și a sarcinii de la poziția de echilibru în perioada pornirii sau frânării mecanismelor.

Astfel, în efectuarea analizelor macaraua se va considera ca un model energetic conservativ, neliniar, reprezentată în figura 3.1. Se presupune că sarcina este suspendată aproape de vârful brațului pentru una sau câteva părți sau la o anumită depărtare pentru a minimiza efectul arcului armonic rezultat asupra sistemului de ridicare. Forțele statice orizontale staționare datorate vântului sau forța centrifugă nu sunt prezentate în figura 3.1, dar vor fi incluse în momentul forțelor statice care acționează asupra macaralei. De asemenea rafalele de vânt nu sunt luate în considerare. Forțe dinamice (inerțiale) rezultate din accelerare sau decelerare produc o solicitare suplimentară asupra structurii. Cu cât macaraua este mai aproape de limita stabilității datorită sarcinilor sale statice, cu atât va fi mai sensibilă la perturbările dinamice.

Dinamica mașinilor de ridicat. Influența dinamicii ridicării sarcinilor asupra stabilității macaralelor turn

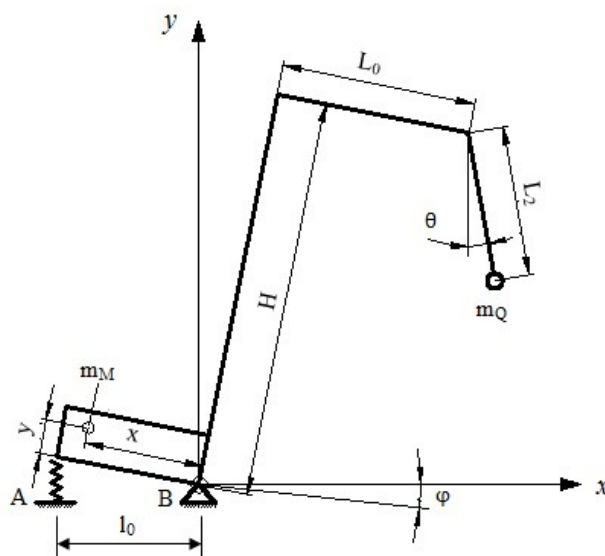


Figura 3.1. Schema de calcul a stabilității pentru o macara cu sarcină [2]

Ecuția de mișcare care descrie răspunsul macaralei încărcate din figura 3.1 la acțiunea forțelor dinamice de durată foarte scurtă sau după încetarea accelerării sau decelerării mecanismului de ridicare este (3.1):

$$J\ddot{\varphi} = F(\varphi) \quad (3.1)$$

unde:

$J$  este momentul de inerție al maselor macaralei și a sarcini față de punctul de răsturnare;

$\varphi$  este unghiul de înclinare al macaralei (pozitiv în sensul acelor de ceasornic);

$F(\varphi)$  este funcția neliniară care reflectă momentul aproximativ față de punctul de articulație a tuturor forțelor care acționează asupra macaralei.

Integrând ecuația (3.1) se obține:

$$J\dot{\varphi}^2/2 = \int_{\varphi_0}^{\varphi} F(\varphi)d(\varphi) \quad (3.2)$$

în care  $\varphi_0$  reprezintă unghiul poziției de echilibru sub încărcările statice; este unghiul de înclinare al macaralei în momentul apariției solicitărilor dinamice.

Se poate considera că ecuația (3.2) reprezintă exprimarea unei relații de bază în care partea stângă descrie energia cinetică a sistemului și integrala din partea dreaptă reflectă mișcarea pe care o are macaraua pe măsură ce se înclină de la  $\varphi_0$  la  $\varphi$ . Această interpretare dezvăluie că există o legătură directă între energia de intrare și înclinarea rezultată a macaralei. La limita sa superioară,  $\varphi$  va fi unghiul de echilibru instabil  $\varphi_p$ .

Notăm expresia generală pentru energia cinetică într-un sistem rotativ cu relația (3.3):

$$T = J\dot{\varphi}^2/2 \quad (3.3)$$

Considerăm că în stare liberă sistemul macara-sarcină de ridicat are o energie potențială oarecare  $\Pi_p$  determinată de poziția maselor și de deformația suprafeței de sprijin (sau de rulare) a macaralei. În urma pornirii respectiv a frânării mecanismului de ridicare

apare o excitație a oscilațiilor masei sistemelor și drept urmare apare o energie cinetică suplimentară  $E_C$ . Stabilitatea macaralei este asigurată atât timp cât energia totală dată de suma energiei potențiale și a energiei cinetice suplimentare,  $\Pi_p + E_C$  nu depășește energia potențială  $\Pi_{n,r}$  pe care o are sistemul în starea de echilibru instabil determinată prin egalitatea momentelor statice de stabilitate și răsturnare.

Condiția de stabilitate din punct de vedere energetic se poate exprima prin:

$$\Pi_p + E_C \leq \Pi_{n,r} \quad (3.4)$$

Sistemul analizat, are două grade de libertate a cărui energie potențială se poate exprima cu relația (3.5.):

$$\Pi = g \cdot (m_M \cdot y + m_Q \cdot H) \cdot \cos \varphi + g \cdot (m_M \cdot x - m_Q \cdot L_0) \cdot \sin \varphi - m_M \cdot g \cdot L_2 \cdot \cos \theta + \Phi(\varphi) \quad (3.5)$$

unde:

- $g$ - accelerația gravitațională;
- $m_M$  - masa macaralei;
- $m_Q = k_Q \cdot m_Q^o$ ;  $m_Q^o$  - masa sarcinii nominale;  $k_Q$  - coeficient de suprasarcină (luând în calcul posibilitățile macaralei de a ridica o sarcină care depășește sarcina nominală);
- $\Phi_\varphi$  - energia potențială a acumulată la baza de sprijin.

Energia potențială pentru starea de repaos a macaralei se determină prin includerea în formula (3.5) a variabilelor corespunzând poziției echilibrului stabil:

$$\theta = 0, \quad \varphi = \varphi_0 \quad (3.6)$$

în care  $\varphi_0$  este unghiul de înclinare a macaralei aflată în poziția de echilibru și care se poate exprima din ecuația de mișcare a sistemului:

$$\varphi_0 = \frac{C_0 \cdot \Delta_0 - M_{ST}}{C_0 - g \cdot (m_M \cdot y + m_Q \cdot H)} \quad (3.7)$$

cu

$$M_{ST} = M_{S,ST} - M_{R,ST} \quad (3.8)$$

unde:

- $M_{S,ST}$  - momentul static de stabilitate;
- $M_{R,ST}$  - momentul static de răsturnare;

Dinamica mașinilor de ridicat. Influența dinamicii ridicării sarcinilor asupra stabilității macaralelor turn

- $C_0$  - coeficient de elasticitate a suprafeței de sprijin (sau a căii de rulare); are valoarea  $C_0 = 1/\delta_0$
- $\delta_0$  reprezintă deplasarea unghiulară a părții inferioare a macaralei față de orizontală sub acțiunea momentului unitar;
- $\Delta_0$  - deplasarea unghiulară a părții inferioare a macaralei față de orizontală în limitele căreia reazemul posterior nu se desprinde de sol; se determină cu expresia (3.9):

$$\Delta_0 = -\frac{g \cdot (m_M + m_Q) \cdot l_0}{2 \cdot C_0} \quad (3.9)$$

Sistemul analizat din figura 3.1. are o infinitate de poziții de echilibru instabil, fiecare corespunzând unei combinații a coordonatelor generalizate. Funcția  $\Pi_{n,r}(\theta, \varphi)$  are valoarea minimă pentru  $\theta = 0$  (poziție caracteristică pentru cazul când palanul sarcinii este vertical), poziție careia îi corespunde unghiul  $\varphi = \varphi_p$  al echilibrului nestabil, prevăzându-se că:

$$\varphi_p = \frac{M_{ST}}{g \cdot (m_M \cdot y + m_Q \cdot H)} \quad (3.10)$$

- $\varphi_p$  reprezintă unghiul de înclinare al macaralei corespunzător  $(\Pi_{n,r})_{\min}$  la determinarea căreia este necesar adoptarea  $\Phi(\varphi) = 0$  deoarece în această stare de echilibru instabil valoarea  $\varphi_p \geq \Delta_0$ .

S-a demonstrat experimental că valorile unghiului  $\varphi_p$  nu depășesc 0.1 radiani, astfel încât pentru  $\varphi \ll \varphi_p$  se poate adopta:

$$\begin{aligned} \sin \varphi_0 &\approx \varphi_0; & \sin \varphi_p &\approx \varphi_p \\ \cos \varphi_0 &\approx 1 - \frac{1}{2} \varphi_0^2; & \cos \varphi_p &\approx 1 - \frac{1}{2} \varphi_p^2 \end{aligned} \quad (3.11)$$

Condiția de stabilitate a macaralei este exprimată de relația (3.12)

$$M_{ST} \geq \alpha \cdot M_{y,ST} \quad (3.12)$$

Sau, luând în considerație expresia (3.8):

$$M_{s,ST} \geq M_{r,ST} + \alpha \cdot M_{s,ST} \quad (3.13)$$

Expresia  $\alpha \cdot M_{ST}$  ia în considerare concomitent sarcina, deformarea structurii macaralei, a suprafeței de sprijin (sau a căii de rulare) precum și încărcările dinamice.

Coeficientul  $\alpha$  se poate reprezenta de forma:  $\alpha = \alpha_{ST} + \alpha_g$

unde:

$\alpha_{ST}$  - coeficient care ține seama numai de deformații;

$\alpha_g$  - coeficient care ține seama de influența încărcărilor dinamice.

Mărimea  $\alpha_g \cdot M_{S,ST}$  reprezintă sarcina statică echivalentă încărcărilor dinamice. Sub aspect fizic această echivalență reprezintă diferența minimă necesară dintre momentul static de stabilitate  $M_{S,ST}$  și cel static de răsturnare datorită căruia unghiul de înclinare al macaralei, preluând acțiunea forțelor dinamice de scurtă durată, nu depășește unghiul prin care echilibrul macaralei devine instabil.

Astfel, pentru determinarea coeficientului  $\alpha$  este necesar calculul energiei cinetice suplimentare  $E_C$  condiționată de oscilația maselor sistemului macara-sarcină.

#### 4. CONCLUZII

Exploatarea în condiții de siguranță a macaralelor neancorate, cu braț impune realizarea operațiilor de verificare a stabilității la răsturnare. Verificarea trebuie făcută prin calcule încă din faza de montaj și prin încercări, statice și dinamice, la fiecare loc de utilizare după montaj.

Determinarea solicitărilor dinamice ale funcționării mecanismelor este intens studiat, scopul fiind obținerea celui mai bun raport masă proprie – sarcină de ridicat. Cum stabilitatea la răsturnare a macaralelor este determinată de masa proprie (valoarea momentului de stabilitate) solicitările dinamice produse în perioada mișcărilor de ridicare/coborâre conduc la mărirea sarcinii de calcul prin introducerea unui coeficient dinamic.

Studiul stabilității din punct de vedere dinamic prezintă interes în special pentru macaralele de mare capacitate sau cele de producție serie, unde se pot obține economii mari de material cu acțiune directă asupra performanțelor și costurilor de fabricație.

#### BIBLIOGRAFIE

- [1] **M. H. Alămoreanu** – Introducere în Dinamica Mașinilor de Ridicat, Editura Conpress, București, 2003; ISBN 973-8165-74-1;
- [2] **C. Ionescu** – Studiu dinamicii mașinilor de ridicat în timpul funcționării mecanismului de ridicare a sarcinii, UTCB, Facultatea de Utilaj tehnologic, București, 2002;
- [3] **L.K. Shapiro, J. P. Shapiro** - Crane and Derricks, ediția a IV a, Mc Graw Hill, New York, 2011, ISBN: 978-0-07-162558-6;
- [4] **B Spruogis, A. Jakstas, V. Turla, I. Iljin, N. Sesok** - Dynamic reaction forces of an overhead crane on lifting, ; Transport, ISSN 1648-4142 print / ISSN 1648-3480 online, 2011 Volume 26(3): 279–283, doi:10.3846/16484142.2011.622144;
- [5] **R. Mijalovic** - Modelling the dynamic behaviour of the truck-crane, Transport ISSN 1648-4142 print / ISSN 1648-3480 online, 2011 Volume 26(4): 410–417, doi:10.3846/16484142.2011.642946.