

EFICIENTIZAREA PROCESULUI DE OMOGENIZARE LA MALAXOARELE CU AX VERTICAL, PRIN MODIFICAREA SISTEMULUI ELASTIC BRAȚ- PALETĂ

THE HOMOGENIZATION PROCESS IMPROVEMENT AT VERTICAL AXIS MIXERS, BY MODIFYING THE ELASTIC ARM-BLADE SYSTEM

Virgil ENESCU¹, Polidor BRATU², Cristian PAVEL³

¹Universitatea Tehnică de Construcții București, Calea Plevnei 59, București, România,
e-mail :virgil-constantin.enescu@phd.utcb.ro

²Institutul de Cercetări pentru Echipamente și Tehnologii în Construcții- ICECON S.A.,
Șoseaua Pantelimon 266, București, România,
e-mail:icecon@icecon.ro

³Universitatea Tehnică de Construcții București, Calea Plevnei 59, București, România,
e-mail: cpcristianpavel@gmail.com

Rezumat: Procesul de omogenizare a amestecului preparat la malaxoarele cu ax vertical este influențat de mișcarea de auto-vibrație a paletelor ca urmare a încovoierii alternative a brațului de malaxor, modelat ca o bară elastică încastrată. În vederea modelării matematice a procesului de amestecare, se consideră cazul unui malaxor cu ax vertical cu capacitate de 3,0 mc, pentru care s-au determinat forțele de încovoiere, pulsațiile proprii ale paletelor, constantele elastice cât și amplitudinile mișcării vibratorii. În scopul creșterii randamentului procesului de omogenizare, se modifică succesiv, forma constructivă și implicit modulul de rezistență și elasticitatea sistemului braț-paletă, urmărindu-se obținerea de pulsații proprii cât mai apropiate de pulsația de excitație a sistemului și implicit de amplitudini ale mișcării cât mai mari. Lucrarea își propune deci o analiză a variației parametrilor mișcării de auto-vibrație a sistemului braț-paletă, cu variația elasticității acestuia, în scopul eficientizării procesului de omogenizare la malaxoarele cu ax vertical.

Cuvinte cheie: malaxor, bară elastică, auto-vibrație, paletă, formă constructivă

Abstract: The homogenization process of the prepared mixture is influenced by the blades self-vibration movement as a result of the alternating bending of the mixer arm, modeled as an embedded elastic bar. In order to mathematically model of the mixing process, the case of a vertical axis mixer with capacity of 3.0 mc are considered, for which the bending forces, the blades own pulsations, the elastic constants as well as the vibratory movement amplitudes were determined. In order to make the homogenization process more efficient, the constructive shape and implicitly the resistance module and the elasticity of the arm-blade system are successively modified, aiming to obtain proper pulsations as close as possible to the excitation pulsation of the system and implicitly with amplitudes of movement as high as possible. The paper therefore proposes an analysis of the parameters variation of the the arm-blade system self-vibration movement, with variation of its elasticity, in order to improve the homogenization process for mixers with vertical axis.

Keywords: mixer, elastic bar, self-vibration, blade, constructive shape

1. INTRODUCERE

Modelarea matematică a mișcării de auto-vibrație a sistemului braț-paletă la malaxorul cu ax vertical are la bază asimilarea acestui fenomen unor vibrații libere ale sistemelor cu amortizare vâscoasă supuse la excitații armonice [1]. Considerând brațul de malaxor ca fiind o grindă încastrată supusă acțiunii de încovoiere, încovoiere produsă de masele de beton aflate în fața paletelor și a brațului pe durata procesului de malaxare, asupra fiecărui sistem braț-paletă, va acționa o forță armonică de tipul $F_i = F_{0i} \sin \omega t$, în care F_{0i} este forța maximă de încovoiere pentru paleta i , iar ω reprezintă pulsația sistemului sub efectul forței armonice [1,7,9,10].

Procesul de omogenizare a betonului poate fi modelat matematic prin determinarea maselor și forțelor de încovoiere, a pulsațiilor proprii ale paletelor, a constantelor elastice și a amplitudinilor mișcării vibratorii, pentru fiecare sistem braț-paletă al malaxorului.

Eficiența omogenizării amestecului considerată cu atât mai bună cu cât pulsațiile proprii ale paletelor au valori mai apropiate de pulsația de excitație (a rotorului) și cu cât amplitudinile mișcării sunt mai mari, poate fi influențată în mod direct de gradul de elasticitate al sistemului braț-paletă [9,10]. În vederea îmbunătățirii elasticității sistemului, brațul de malaxor poate fi modificat succesiv, atât ca formă constructivă cât și ca diametru, rezultând module de rezistență mai mici, pulsații din ce în ce mai apropiate de pulsația rotorului și amplitudini din ce în ce mai mari.

Modificarea constructivă și dimensională a sistemului braț-paletă efectuată în două cazuri succesive, urmată de calculele efectuate și de reprezentarea grafică a amplitudinilor mișcării funcție de pulsație, evidențiază următoarele: variația amplitudinilor paletelor în sensul creșterii acestora odată cu creșterea elasticității sistemului braț-paletă, modul de amortizare a mișcării paletelor pornind de la paleta cea mai îndepărtată de rotor, variația pulsațiilor paletelor și raportarea pulsațiilor sistemelor braț-paletă la valoarea pulsației de excitație a rotorului, precum și creșterea randamentului de amestecare al malaxorului.

2. MODELAREA MATEMATICĂ A PROCESULUI DE OMOGENIZARE LA MALAXOARELE CU AX VERTICAL

2.1 DETERMINAREA MASELOR ȘI SĂGEȚILOR DE ÎNCOVOIERE LA SISTEMELE BRAȚ-PALETĂ

Pentru malaxorul cu ax vertical cu palete, prezentat schematic în figura 1, se consideră sistemul braț-paletă ca o grindă încastrată și supusă încovoierii cu forța compusă F (figura 2), rezultată ca efect al maselor de beton aflate în fața paletelor și a porțiunii de braț din interiorul betonului, la care se adaugă masele proprii ale paletelor și ale porțiunii respective de braț [2-4].

Masa totală de încovoiere a sistemului braț-paletă la malaxorul din figura 1 se poate determina cu relația: $M_1 = m_p + m_b + m_1 + m_2$, (1), în care:

- m_p este masa paletelor;

- m_b este masa porțiunii de braț introdusă în material;

- m_1 reprezintă masa de beton aflată în fața paletelor, în timpul procesului de malaxare;

- m_2 reprezintă masa de beton aflată în fața brațului paletelor în timpul procesului de malaxare.

EFICIENTIZAREA PROCESULUI DE OMOGENIZARE LA MALAXOARELE CU AX VERTICAL, PRIN MODIFICAREA SISTEMULUI ELASTIC BRAȚ- PALETĂ

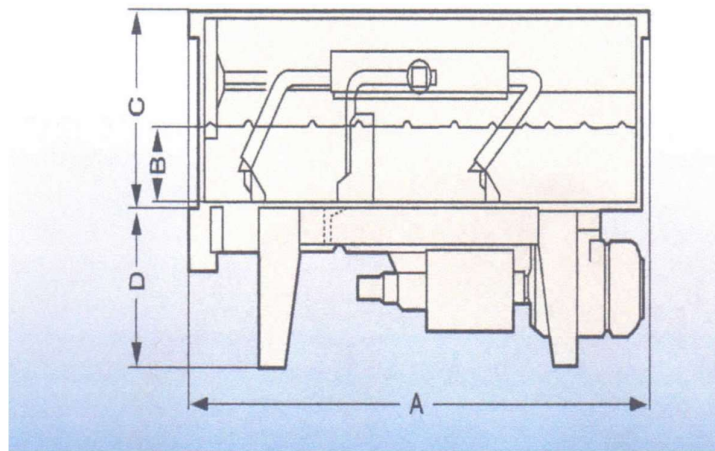


Figura 1

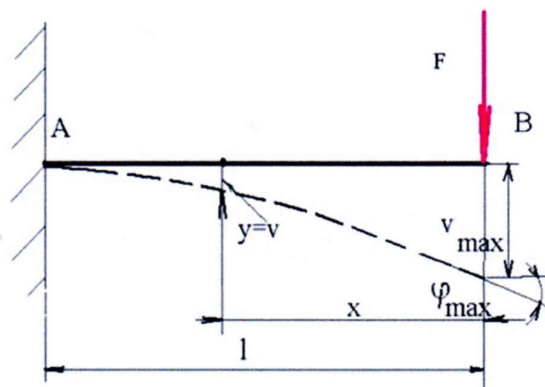


Figura 2

Relațiile de calcul pentru determinarea celor patru mase sunt următoarele:

$$m_p = q_m \times S_p \times g_p \quad (2),$$

în care S_p și g_p reprezintă suprafața și grosimea paletelor, iar q_m densitatea oțelului, $q_m = 7,85 \text{ kg/dm}^3$

$$m_b = (h_m - h_p) \times \frac{\pi d^2}{4} \times q_m \quad (3),$$

în care: $h_m = B$, este înălțimea stratului de beton din malaxor, h_p este înălțimea paletelor de malaxor iar d este diametrul brațului de malaxor;

$$m_1 = S_p \times q_b \times 2 \pi \times R_i \quad (4),$$

în care: q_b este densitatea betonului în stare proaspătă, iar R_i este raza paletelor; $q_b = 2200 \text{ kg/m}^3$

$$m_2 = (h_m - h_p) \times \frac{\pi d}{2} \times 2 \pi \times R_i \times q_b \quad (5)$$

Pentru cazul sistemul braț-paletă considerat ca fiind o grindă încastrată de lungime l , supusă acțiunii forței F produsă de masele de încovoiere (figura 2), săgeata maximă, se exprimă prin relația:

$$v_{max} = f = \frac{Fl^3}{3EI_z} \quad (6) \quad [2-4]$$

2.2 DETERMINAREA PULSAȚIILOR PROPRII ALE PALETELOR, A CONSTANTELOR ELASTICE ALE SISTEMULUI BRAȚ-PALETĂ ȘI A AMPLITUDINILOR MIȘCĂRII[9,10]

Forța perturbatoare: $F = mg = kf \quad (7)$

Constanta elastică a sistemului este $k = m\omega^2 \quad (8) \quad [1,7, 8,9]$

Din relațiile (6), (7) și (8) rezultă relația pentru pulsație:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{f}} = \sqrt{\frac{3E}{ml^3}} \quad (9),$$

în care : m este masa totală de încovoiere iar $l = R$ (raza) pentru fiecare paletă în parte, E este modulul de elasticitate al oțelului $E = 2,1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, iar $I = I_z$ este modulul de rezistență axial, determinat cu relația:

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (10) \quad [2-4]$$

Relația de calcul a amplitudinii pentru fiecare paletă este următoarea :

$$A_1 = \frac{F_{01}}{\sqrt{(k_1 - m_1\omega^2)^2 + c^2\omega^2}} \quad (11) \quad [1]$$

Pentru fiecare paletă se consideră forțele armonice $F_i = F_{0i} \sin \omega t$, iar amplitudinea forței pentru paleta i , este $F_{0i} = M_i g$, în care M_i reprezintă masa totală de încovoiere.

Constantele elastice pentru fiecare paletă sunt date de relația:

$$k_i = M_i \omega_i^2 \quad (12),$$

În relația (11) constanta $c = 2\xi\sqrt{km} \quad (13)$, în care $\xi = 0,2$ este factorul de amortizare a mișcării [1].

3. CAZUL MALAXORULUI CU AX VERTICAL DE 3,0 MC CAPACITATE

Caracteristici tehnice pentru malaxorul prezentat în figurile 3 și 4[10]: capacitatea utilă 3,0 mc, puterea motorului 132 kW, turația rotorului 20,7 rot/min, 2 agitatoare, număr de palete active 4 bucăți.

Caracteristici constructive și geometrice malaxor[11]:

- diametrul cuvei: $A = 3922 \text{ mm}$;
- înălțimea cuvei: $C = 1013 \text{ mm}$;
- razele paletelor: $R_1 = 1730 \text{ mm}$; $R_2 = 1605 \text{ mm}$; $R_3 = 1480 \text{ mm}$; $R_4 = 1305 \text{ mm}$;
- diametrul brațului de malaxor: $d = 64 \text{ mm}$;
- modulul de rezistență axial: $I = I_z = 82,31 \times 10^4 \text{ mm}^4$;
- suprafața paletei: $S_p = 27,4 \text{ cm} \times 13,2 \text{ cm} = 361,7 \text{ cm}^2$;

EFICIENTIZAREA PROCESULUI DE OMOGENIZARE LA MALAXOARELE CU AX VERTICAL, PRIN MODIFICAREA SISTEMULUI ELASTIC BRAȚ- PALETĂ

- înălțimea stratului de material: $h_m = B = 462 \text{ mm}$;
- masa paletei calculată cu relația (2), considerând $g_p = 2,2 \text{ cm}$, rezultă $m_p = 6,2 \text{ kg}$;
- masa brațului calculată cu relația (3), rezultă $m_b = 8,32 \text{ kg}$;

Pulsația de excitație a sistemului (a rotorului) este: $\omega_r = \frac{\pi n_r}{30} \quad (14)$

din care rezultă $\omega_r = 2,17 \text{ rad/s}$.

În figura 5 este reprezentat brațul de malaxor, ca o grindă încastrată în rotor, în varianta inițială, fără modificări constructive.

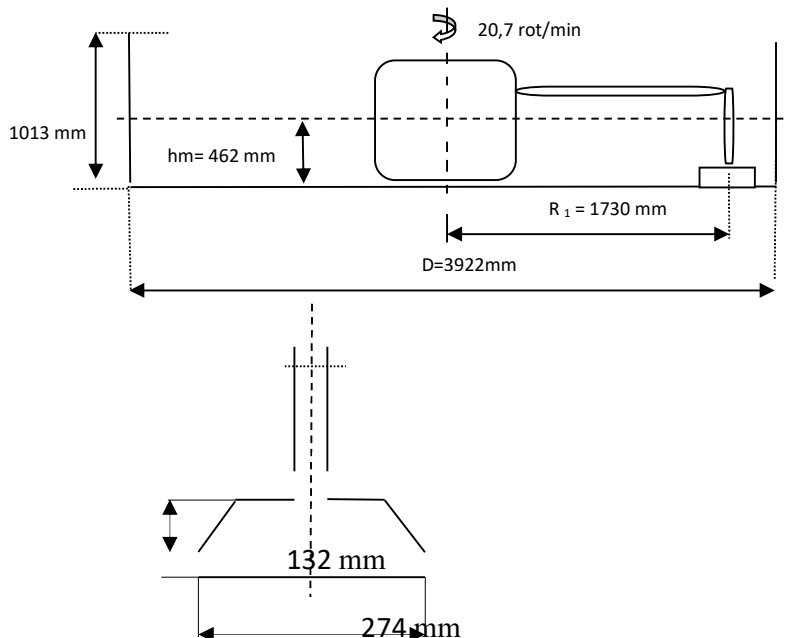


Figura 3



Figura 4

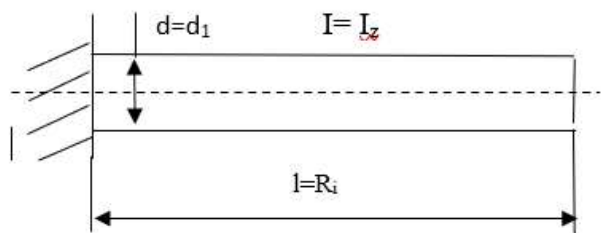


Figura 5

Aplicând relațiile (1)-(13) pentru malaxorul cu ax vertical de 3,0 mc capacitate, pentru determinarea parametrilor mișcării de auto-vibrație a paletelor, obținem valorile din tabelul 1.

Tabelul 1. Valorile parametrilor pentru sistemul braț-paletă la malaxorul de 3,0 mc, fără modificări constructive

Nr. paletă	Masa $M_i(\text{kg})$	Pulsatia proprie ω_i (rad/s)	Constanta elastică a sistemului k_i (N/m)	Amplitudinea A_i (m)
1	1671,5	7,74	100135,5	0,42
2	1551,8	8,99	125416,6	0,31
3	1432,1	10,57	159994	0,22
4	1264,4	13,59	233582	0,13

4. CREȘTEREA ELASTICITĂȚII SISTEMULUI BRAȚ-PALETĂ LA MALAXORUL CU AX VERTICAL DE 3,0 MC PRIN MODIFICAREA CONSTRUCTIVĂ A BRAȚULUI[8,9]

4.1 CAZUL 1

Sistemul braț-paletă se modifică prin reproiectarea brațului de malaxor după cazul prezentat în figura 6, în care elementul de braț de diametru d_2 și lungimea $3l/4$ are modulul de rezistență axial egal cu jumătate din valoarea I_z . Brațul de malaxor nu a fost modificat în diametru în zona de încastrare în rotor, ci numai pe porțiunea dinspre paletă, pentru a se putea asigura rezistența mecanică necesară și fiabilitatea în funcționare a sistemului braț-paletă în regim de lucru (inclusiv pentru malaxarea betoanelor cu grad ridicat de consistență).

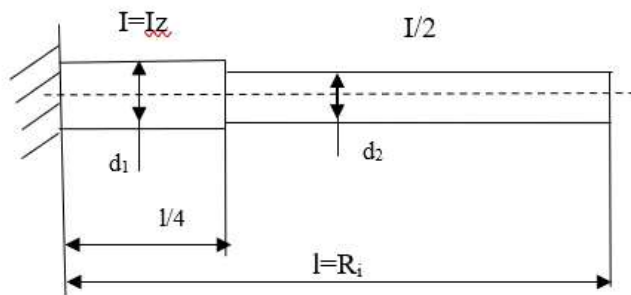


Figura 6

EFICIENTIZAREA PROCESULUI DE OMOGENIZARE LA MALAXOARELE CU AX VERTICAL, PRIN MODIFICAREA SISTEMULUI ELASTIC BRAȚ- PALETĂ

Această creștere a elasticității brațului conduce la recalcularea noii săgeți a sistemului braț-paletă (compusă din însumarea săgeților celor două elemente rezultate), după relația:

$$f = f_1 + f_2 = \frac{F(l/4)^3}{EI} + \frac{F(3l/4)^3}{EI/2} = \frac{55Fl^3}{64EI} \quad (15)$$

Pulsația proprie se determină în acest caz prin relația:

$$\omega = \sqrt{\frac{64EI}{55 M_i l_i^3}} \quad (16)$$

Din relația pentru modulul de rezistență axial , se obține pentru I/2: $d_2=54$ mm

Aplicând relațiile (1)-(13) pentru malaxorul cu ax vertical de 3,0 mc capacitate, pentru determinarea parametrilor mișcării de auto-vibrație a paletelor pentru cazul 1 , obținem valorile din tabelul 2.

Tabelul 2. Valorile parametrilor pentru sistemul braț-paletă la malaxorul de 3,0 mc, în cazul 1- braț modificat

Nr. paletă	Masa M_i (kg)	Pulsația proprie ω_i (rad/s)	Constanta elastică a sistemului k_i (N/m)	Amplitudinea A_i (m)
1	1545,3	5,01	38854	1,00
2	1434,5	5,82	48590	0,74
3	1323,7	6,85	62111,3	0,53
4	1168,6	9,02	94734	0,30

4.2 CAZUL 2

Sistemul braț-paletă se modifică prin reproiectarea brațului de malaxor după cazul prezentat în figura 7, în care elementul de braț de diametru d_3 și lungimea $3l/4$ are modulul de rezistență axial egal cu o treime din valoarea I_z . Brațul de malaxor nu a fost modificat în diametru în zona de încastrare în rotor , ci numai pe porțiunea dinspre paletă, pentru a se putea asigura rezistența mecanică necesară și fiabilitatea în funcționare a sistemului braț-paletă în regim de lucru (inclusiv pentru malaxarea betoanelor cu grad ridicat de consistență).

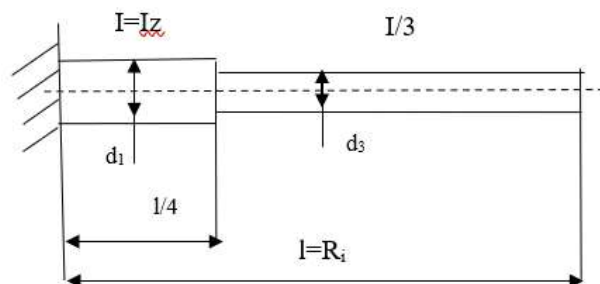


Figura 7

Această creștere a elasticității brațului conduce la recalcularea noii săgeți a sistemului braț-paletă (compusă din însumarea săgeților celor două elemente rezultate), după relația:

$$f = f_1 + f_2 = \frac{F(l/4)^3}{EI} + \frac{F(3l/4)^3}{EI/3} = \frac{82Fl^3}{64EI} \quad (17)$$

Pulsația proprie se determină în acest caz prin relația:

$$\omega = \sqrt{\frac{64EI}{82 M_i l_i^3}} \quad (18)$$

Din relația pentru modulul de rezistență axial , se obține pentru $l/3$: $d_3=48$ mm

Aplicând relațiile (1)-(13) pentru malaxorul cu ax vertical de 3,0 mc capacitate, pentru determinarea parametrilor mișcării de auto-vibrație a paletelor pentru cazul 2 , obținem valorile din tabelul 3.

Tabelul 3. Valorile parametrilor pentru sistemul braț-paletă la malaxorul de 3,0 mc, în cazul 2- braț modificat

Nr. paletă	Masa M_i (kg)	Pulsația proprie ω_i (rad/s)	Constanta elastică a sistemului k_i (N/m)	Amplitudinea A_i (m)
1	1469,7	4,21	26049	1,41
2	1364,3	4,90	32755	1,04
3	1259	5,75	41632	0,75
4	1111,4	7,40	60853	0,45

5. VARIAȚIA AMPLITUDINII MIȘCĂRII DE AUTO-VIBRAȚIE ÎN RAPORT CU PULSAȚIA PALETELOR, PENTRU MALAXORUL CU AX VERTICAL DE 3,0 MC[8,9]

În figurile 8-10 sunt date reprezentările grafice ale variației amplitudinii mișcării de auto- vibrație funcție de pulsația sistemelor braț-paletă pentru malaxorul cu ax vertical de 3,0 mc, în varianta inițială- figura 8 și în variantele cu brațul de malaxor reproiectat (figura 9, caz 1 și figura 10, caz 2). În graficele respective a fost reprezentată și pulsația de excitație a sistemului (pulsația rotorului ω_r) pentru a se scoate în evidență raportarea valorilor amplitudinii paletelor față de această pulsație.

Reprezentările grafice au scos în evidență următoarele aspecte despre modelarea funcționării în regim de sarcină a sistemelor braț-paletă ale malaxorului:

- 1.modul de amortizare a mișcării de auto-vibrație , reliefat de descreșterea amplitudinilor de la paleta 1 cea mai îndepărtată de rotor și până la paleta 4, cea mai apropiată de acesta;
2. influența creșterii elasticității sistemului braț-paletă asupra gradului de amortizare a mișcării vibratorii în sensul descreșterii acestuia cu reducerea rigidității brațului de malaxor, implicit asupra eficienței de amestecare;
3. influența creșterii elasticității sistemului braț-paletă asupra valorilor pulsațiilor proprii ale paletelor, în sensul de apropiere a acestora de pulsația rotorului, fenomen care conduce la îmbunătățirea omogenizării la malaxare;
4. reproiectarea brațului de malaxor respectă cerințele de rezistență și fiabilitate la funcționarea în sarcină a sistemului braț-paletă, conducând totodată la creșterea eficienței de omogenizare a betonului, datorită creșterii amplitudinor mișcării și scăderii pulsațiilor la valori apropiate de pulsația de excitație a sistemului.

EFICIENTIZAREA PROCESULUI DE OMOGENIZARE LA MALAXOARELE CU AX VERTICAL, PRIN MODIFICAREA SISTEMULUI ELASTIC BRAȚ- PALETĂ

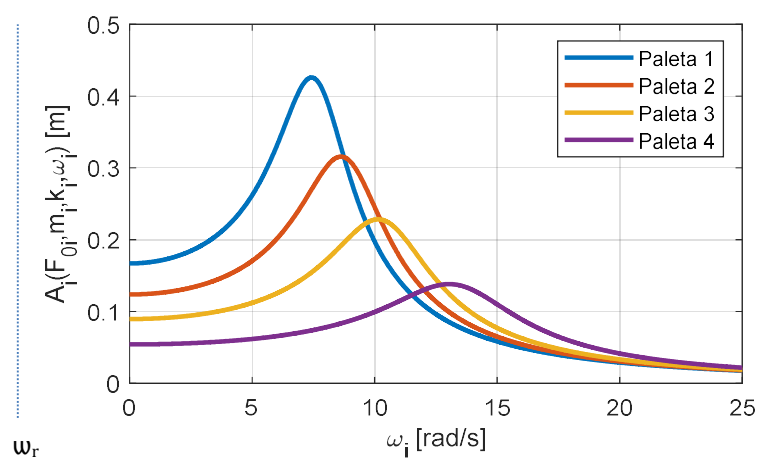


Figura 8

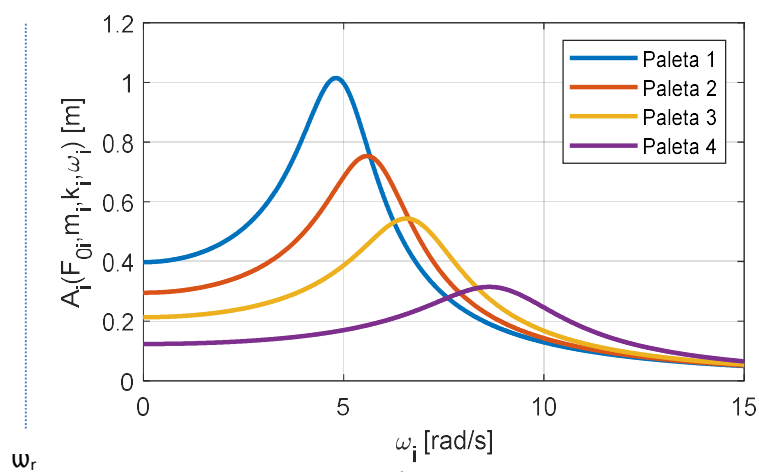


Figura 9

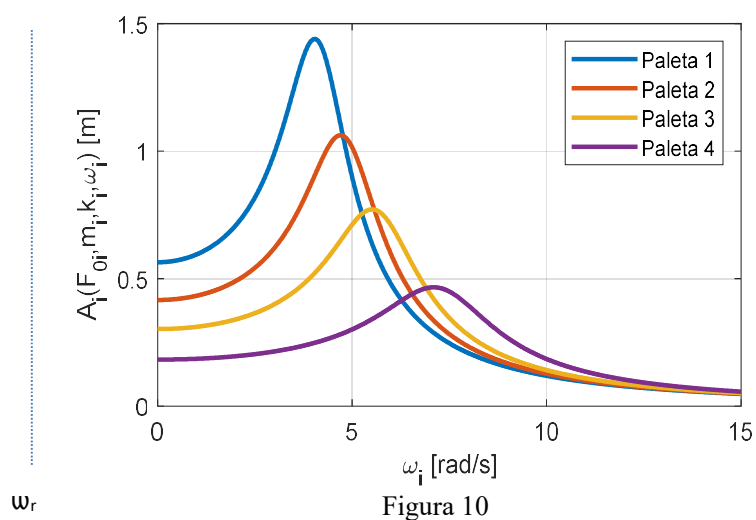


Figura 10

6. CONCLUZII

În conformitate cu rezultatele prezentate în tabelele 1-3 și graficele din figurile 8-10, se poate concluziona că modificarea elasticității sistemului braț-paletă la malaxorul cu ax vertical de 3,0 mc a influențat valorile parametrilor mișcării de auto-vibrație a paletelor, în sensul scăderii gradului de amortizare a mișcării și implicit a creșterii performanței de omogenizarea a betoanelor de consistență normală.

Creșterea amplitudinilor mișcării de auto-vibrație, concomitent cu reducerea pulsațiilor proprii ale paletelor la valori apropiate de pulsația de excitație a sistemului, este pusă în evidență de inversarea aproximativă a valorilor parametrilor amplitudine și pulsație pentru paletele 1 și 4, în urma creșterii succesive a elasticității sistemului braț-paletă.

Eficiențizarea procesului de omogenizare la acest malaxor de capacitate 3 mc, prin modificarea rigidității sistemului braț-paletă, poate conduce la extinderea domeniului de utilizare la betoane de înaltă consistență, în condiții de menținere a unei bune fiabilități în funcționare, precum și a unui consum energetic mai mic, ca urmare a reducerii maselor sistemelor puse în mișcare cât și a posibilei reduceri a duratei de malaxare necesare. Această creștere a randamentului de omogenizare cât și implicit a eficienței energetice se observă mai pronunțat în cazul 2 de modificare a elasticității sistemului braț-paletă, considerat varianta optimă de reproiectare a brațului de malaxor.

BIBLIOGRAFIE

1. **Polidor Bratu**, *Analiza structurilor elastice. Comportarea la acțiuni statice și dinamice*, Editura Impuls, București 2011
2. **Polidor Bratu**, *Analiza dinamică a echipamentelor cu arbori elastici*, Universitatea “Dunărea de Jos” Galați, 2001
3. **Ungureanu Ion, Ispas Bucura, Constantinescu Emil**, *Rezistența Materialelor I (curs)*, Universitatea Tehnică de Construcții București, 1995
4. **Andreescu Indira, Mocanu Ștefan**, *Compendiu de Rezistența Materialelor (curs)*, Editura Matrix Rom, București, 2005
5. **Polidor Bratu**, *Multibody System with Elastic Connections for Dynamic Modeling of Compactor Vibratory Rollers*, *Symmetry* 2020
6. **Polidor Bratu, Cornelia Dobrescu**, *Dynamic Response of Zener-Modelled Linearly Viscoelastic Systems under Harmonic Excitation*, *Symmetry* 2019
7. **Polidor Bratu, Andrei Buruga, Oleg Chilari, Adrian Ion Ciocodeiu, Ionel Oprea**, *Evaluation of the Linear Viscoelastic Force for a Dynamic System (m, c, k) Excited with a Rotating Force*, *Romanian Journal of Acoustics and Vibration*. 16, 1 (Sep. 2019), 39-46
8. **Virgil Enescu** (2021) *Parameters variation of the vibration movement of the elastic arm-pallet system at the mixers with vertical axis, by modifying the stiffness in order to improve the homogenization process*, *ACTA TECHNICA NAPOCENSIS - Universitatea Tehnică din Cluj Napoca*, vol. 64, Issue 3, September 2021
9. **Virgil Enescu** (2021) *Parameters Variation of The Elastic Arm-Blade System Vibration Movement at The Planetary Mixers to Improve the Homogenization Process* *Romanian Journal of Acoustics and Vibration*. vol. 18, issue 2/2021, pp 133-138
10. *Prospect malaxor cu ax vertical de 3,0 mc*