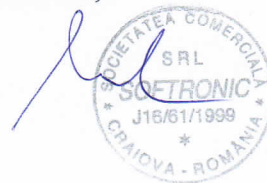


Director General Softronic Craiova

ing. Ion Gîrniță



**Program PN-III: Creșterea Competitivității Economiei Românești
prin Cercetare, Dezvoltare și Inovare**
Subprogram: Transfer la Operatorul Economic

RAPORT ȘTIINȚIFIC FINAL

**CONTRACT Nr. 1 PTE/2016: Tehnologii combinate, analitice și experimentale,
de validare la oboseală și solicitări excepționale a echipamentelor și structurilor
de rezistență ale vehiculelor feroviare**

TERMEN: 28.09.2018

Colectivul de elaborare:

Manager proiect: Dr. Fiz. Ion Manea – Softronic Craiova

Membri : Dr. Ing. Mihai Gabriel Matache – INMA București

Prof. Dr. Ing. Ioan Sebeșan – UPB – Facultatea de Transporturi

1 OBIECTIVE PROPUSE LA LANSAREA PROIECTULUI

În conformitate cu reglementările Regulamentului Uniunii Europene nr. 1302/2014 privind Specificația Tehnică de Interoperabilitate (STI) referitoare la subsistemul Material Rulant, toate vehiculele feroviare care circulă în rețeaua sistemului feroviar transeuropean convențional sau de mare viteză trebuie să fie certificate din punct de vedere al rezistenței structurale. Procedurile de certificare trebuie să demonstreze că vehiculele, sau echipamentele montate pe ele, asigură suficientă siguranță în exploatare fără a se produce defecte sau întreruperi funcționale, deformații inadmisibile sau fisuri, dar nici influențe adverse asupra subsistemelor asociate. Conform celor mai noi reglementări, începând cu iulie 2019 nu mai au acces pe căile ferate din Uniunea Europeană vehicule feroviare fără certificare STI.

Procedurile de certificare se aplică atât pe vehicul ca ansamblu, cât și pe principalele echipamente sau subansamble. O atenție deosebită se acordă ramelor de boghiu care prezintă o situație aparte atât datorită rolului jucat în asigurarea siguranței funcționale a vehiculelor feroviare, cât și a implicațiilor ce decurg din abordarea clasică a unor metode de validare la oboseală prin încercări. Încercările la oboseală necesită existența unui laborator dotat cu un număr apreciabil de echipamente capabile de a reproduce ciclurile dinamice de solicitări dar și o durată mare de efectuare de cca. șase luni până la un an.

Având în vedere implicațiile financiare și durata mare de efectuare a validării la oboseală prin încercări, normativele de profil admit că încercările la oboseală pot fi înlocuite cu alte metode care să demonstreze rezistența la oboseală, printre acestea metoda analitică jucând un rol important, cu condiția ca modelul analitic să fie corect realizat și calibrat prin încercări.

1.1 Obiectivele la lansarea proiectului:

-Validarea unor tehnologii combinate, analitice și experimentale de joasă intensitate energetică, de evaluare la oboseală și solicitări excepționale a structurilor de rezistență ale vehiculelor feroviare, cu orientare prioritară către validarea ramelor de boghiu;

-Validarea unor tehnologii de evaluare a solicitărilor vibratorii, la locul de montaj ale principalelor echipamente de bord și de comandă și de verificare a acestora la solicitări mecanice de durată, conforme cu normativele internaționale și cu solicitările reale de la locul de funcționare;

-Asimilarea tehnologiilor realizate prin proiect de către partenerul industrial și introducerea lor în procesul de proiectare și de fabricare a noilor vehicule feroviare;

1.2 Livrabile propuse la lansarea proiectului

-Tehnică de evaluare la oboseală și solicitări excepționale a structurilor mecanice de rezistență (în particular rame de boghiu) prin metode combinate, analitice și experimentale;

-Tehnică de validare prin încercări la solicitări mecanice pentru echipamente de bord și comandă.

-Articole științifice: 2.

2 GRADUL DE ATINGERE A REZULTATELOR ESTIMATE

2.1 Tehnică de evaluare la oboseală și solicitări excepționale a structurilor mecanice de rezistență (în particular rame de boghiu) prin metode combinate, analitice și experimentale.

Tehnica de evaluare la oboseală și solicitări excepționale a ramelor de boghiu prin metode combinate, analitice și experimentale, dezvoltată în cadrul proiectului, cuprinde următoarele componente:

-Tehnologie pentru determinarea solicitărilor reale, în exploatare, aplicate ramei de boghiu;

-Model analitic, validat prin analiză modală experimentală, pentru evaluarea răspunsului la solicitări statice și dinamice a ramelor de boghiu;

-Tehnologie de efectuare a încercărilor statice și de oboseală a ramelor de boghiu;

-Modele analitice pentru analiza răspunsului structural în tensiuni mecanice și a duratei de viață a ramelor de boghiu la combinații de solicitări dinamice de sinteză sau echivalente celor din exploatare.

2.1.1 Tehnologie pentru determinarea solicitărilor reale, în exploatare, aplicate ramei de boghiu

Pentru rama de boghiu, solicitările majore care conduc la fenomene de oboseală provin de la calea de rulare și sunt constituite din forțele de interacțiune roată-șină: forțe transversale, Y, și forțe verticale, Q. În cadrul proiectului a fost realizat echipamentul pentru măsurarea forțelor de interacțiune roată-șină (osie

montată de măsură) și s-au efectuat mai multe drumuri de încercare în linie curentă CFR, pentru măsurarea acestor forțe, urmărindu-se corecta măsurare a forțelor de interacțiune roată-șină și compatibilitatea datelor măsurate cu softul de evaluare la oboseala nCode DesignLife 13.1, HBM Prencia, achiziționat prin proiect.

Măsurarea forțelor de interacțiune roată-șină, Y/Q, prin utilizarea unei roați de locomotivă cu discul plin, este o problemă deosebit de grea deoarece este practic imposibilă delimitarea unor zone în care să se poată face separarea celor două tipuri de forțe, transversale, Y și verticale, Q. Pentru evitarea acestui impediment a fost realizată o osie de măsură prevăzută cu roți cu spițe, compatibilă cu locomotiva electrică LE-MA 6000kW. Spițele celor două roți ale osiei de măsură au fost echipate cu mărci tensometrice în punte completă, fiind transformate în traductoare de măsură pentru forțele Y și Q, unu pentru fiecare spiță, etalonate ca traductoare separate de măsură. Fiecare roată este prevăzută cu 24 spițe, dintre care 12 sunt realizate ca traductoare pentru măsurarea forțelor orizontale, Y, și 12 ca traductoare pentru măsurarea forțelor verticale, Q. Spițele pentru măsurarea forțelor Y, sunt spițe de formă eliptică, cu axa mare perpendicular pe calea de rulare. Spițele pentru măsurarea forțelor Q, sunt rotunde și mai subțiri.

Pentru a fi utilizată ca traductor pentru măsurarea forțelor de interacțiune Y/Q, osia de măsură a fost etalonată pe "Stand pentru Verificări Mecanice", amenajat special pentru această destinație în cadrul Laboratorului pentru Încercări Mecanice și Climatice, <https://limsoftronic.ro>, realizat și autorizat cu AFER în cadrul prezentului proiect de către partenerul SC Softronic Craiova.

Fișierele de date ce conține înregistrări ale forțelor de interacțiune Y/Q, constituie istoria în timp a solicitărilor aplicate ramei de boghiu care se aplică la intrarea programului nCode DesignLife 13.1, împreună cu fișierul de răspuns structural .rst, realizat, în Ansys pentru rama de boghiu.

2.1.2 Model analitic al ramei de boghiu, validat prin analiză modală experimentală

2.1.2.1 Modelul analitic al ramei de boghiu

Modelul analitic al ramei de boghiu LE-MA, desen BL008-58, a fost realizat în Ansys pentru a simula comportamentul ramei atât în regim de exploatare excepțională cât și în regim normal de exploatare, în conformitate cu standardul EN 13749:2011, dar și cu datele reale, din exploatare, sau cu date sintetice de laborator. Rama de boghiu BL 008-58 este parte componentă a boghiului desen BL 011-27 ce echipează locomotiva electrică LE-MA 6000kW, export Suedia, cu sarcina pe osie de 210.13 kN.

Pentru realizarea modelului analitic s-au utilizat: pachetul de programe ANSYS, Solid Works, Microsoft Office. Modelul analitic al ramei de boghiu BL008-58 este constituit din următoarele elemente:

- elementele tetraedrice: 806471 elemente și 1490919 noduri;
- elemente liniare de tip bară rigidă (Beam4) pentru structura dintre suspensiile principale și osie, pentru osie și de asemenea pentru transmiterea forțelor din punctele de aplicație la structură;
- elemente de tip arc pentru suspensiile primare și secundare cu definirea coeficienților de rigiditate ce le caracterizează, conform diagramei de încărcare (elemente tip COMBIN14).

Model geometric, în vedere izometrică, a ramei de boghiu este prezentat în figura 2.1.

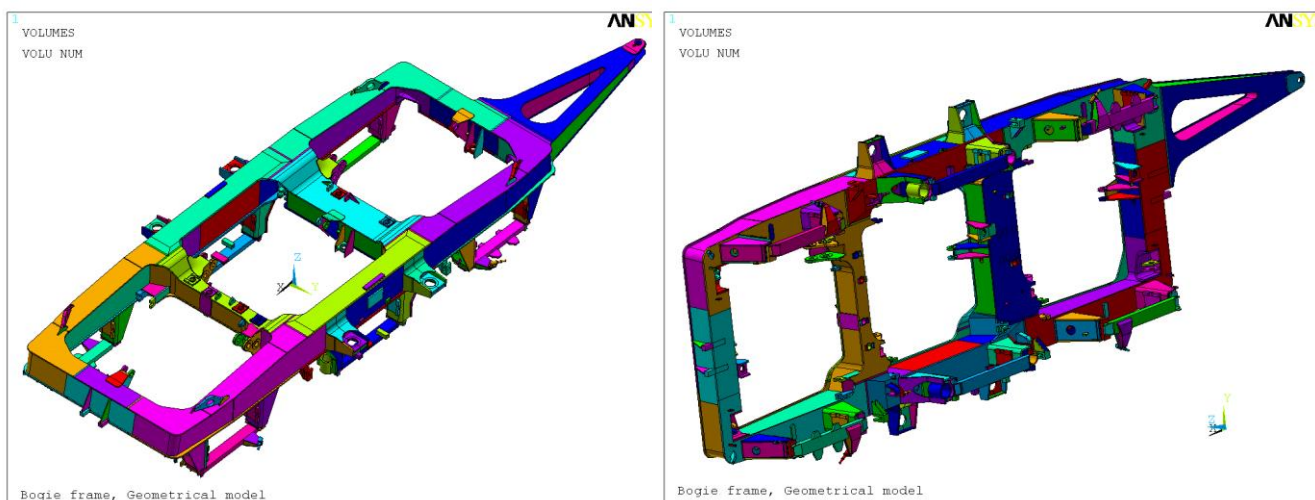


Fig. 2.1. Model geometric, în vedere izometrică, a ramei de boghiu LE-MA, desen BL008-58

2.1.2.2 Validarea modelului analitic (FEA) prin analiză modală experimentală (EMA)

Analiză modală experimentală (EMA), constituie procedura de elaborare a modelului matematic al unei structuri pe baza datelor experimentale obținute prin măsurători efectuate pe structura adusă într-o stare vibratorie controlată. Sistemul este excitat în condiții bine definite și, determinând legile de evoluție ale excitației și ale răspunsului vibratoriu, se identifică modelul modal caracterizat printr-un număr minim de parametri ce descriu modurile proprii de vibrație: pulsații proprii, factori de amortizare, forme modale.

Din punct de vedere al analizei modale experimentale, orice sistem mecanic poate fi modelat printr-un sistem discret format din ‘n’ puncte materiale de masă concentrată ‘ m_k ’ unite prin elemente elastice de rigiditate ‘ k_k ’ și elemente de amortizare de constantă ‘ c_k ’. Pentru acest sistem, supus acțiunii unui sistem de excitații exterioare, $\{Q(t)\}$, ecuațiile de mișcare sunt:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{Q(t)\} \quad (1)$$

Răspunsul sistemului la excitația externă se prezintă sub forma unei sume de ‘n’ contribuții modale datorate fiecărui grad de libertate separat:

$$\{X(\omega)\} = \sum_{k=1}^N \left[\frac{\{\psi^k\} \cdot \{\psi^k\}^T \cdot \{Q(\omega)\}}{a_k(-\mu_k + i(\omega - \nu_k))} + \frac{\{\bar{\psi}^k\} \cdot \{\bar{\psi}^k\}^T \cdot \{Q(\omega)\}}{\bar{a}_k(-\mu_k + i(\omega + \nu_k))} \right] \quad (2)$$

unde s-au folosit notațiile: $[M]$ - Matricea maselor sau matricea de inerție; $[C]$ - Matricea constantelor de amortizare; $[K]$ - Matricea de rigiditate; $\{\psi^k\}$ and $\{\bar{\psi}^k\}$ - Vectorul propriu de ordinul “k”; μ_k - Rata de amortizare de ordinul “k”; ν_k - Frecvența naturală amortizată de ordinul “k”; a_k and \bar{a}_k - Constante de normare; ω - Frecvența excitației externe.

Esența analizei modale experimentale constă în determinarea parametrilor modali $\mu_k, \nu_k, \psi^k, k = 1 \dots n$, pornind de la determinări experimentale efectuate pe echipamentul adus într-o stare controlată de vibrație, cu determinarea simultană a excitației și a răspunsului. Pentru rama de boghiu, recomandată este excitarea cu impuls de forță (cu ciocan de impact) sau cu vibrator electrodinamic utilizând semnale de forță de tip random sau baleiaj de frecvență.

Din punct de vedere al analizei cu elemente finite (FEA), structura mecanică este discretizată în elemente finite de diverse tipuri, între care se stabilesc legături matematice echivalente legăturilor fizice dintre elementele adiacente sau cu mediul înconjurător. Modelului fizic îi corespunde un model matematic, asemănător modelului matematic din analiza modală experimentală, deosebirea constând în faptul că în analiza cu elemente finite nu se consideră amortizarea sistemului. Modelul matematic asociat este:

$$[M] \cdot \{\ddot{x}\} + [K] \cdot \{x\} = \{0\} \quad (3)$$

Rezolvarea sistemului de ecuații (3) conduce la determinarea analitică a frecvențelor și a modurilor proprii de vibrații, adică a parametrilor modali, care, referindu-se la același sistem, trebuie să fie aceiași cu cei determinați experimental prin analiza modală experimentală.

Analiza cu elemente finite lucrează cu un model matematic aproximativ, realizat prin aproximări mai mult sau mai puțin grosiere atât ale caracteristicilor geometrice cât și ale caracteristicilor de material.

Chiar dacă modelul geometric este perfect, iar ecuațiile de mișcare ale modelului matematic sunt perfecte, tot va rezulta un model analitic aproximativ, deoarece se cunoaște faptul că niciodată caracteristicile de material utilizate în modelare nu coincid cu cele reale ale structurii. Din cele prezentate rezultă că un bun model analitic se obține doar prin validare cu date furnizate de sistemul real, prin EMA.

2.1.2.3 Analiza modală experimentală a ramei de boghiu LE-MA

Pentru realizarea încercărilor de analiză modală experimentală s-a utilizat metoda de excitație într-un singur punct cu vibrator electrodinamic. Rama a fost așezată pe arcurile exterioare ale suspensiei secundare, în poziția normală de funcționare. În acest montaj rama de boghiu poate fi considerată ca sistem liber, fără restricționarea gradelor de libertate. Pentru excitarea structurii ramei a fost utilizat un vibrator electrodinamic Robotron de 100N fiind utilizată metoda baleiajului de frecvență în gama 5÷200Hz.

Răspunsul în accelerații a fost măsurat într-un număr de 30 puncte, pentru fiecare punct de măsură răspunsul fiind măsurat pe trei direcții reciproc ortogonale: vertical, orizontal transversal și orizontal longitudinal. Numărul total al gradelor de libertate măsurate este 150, rezultând un număr de 150 funcții de răspuns în frecvență. Punctele de măsurare a răspunsului în accelerații au fost selectate în așa fel încât se permită animarea corectă a structurii în modurile proprii de vibrație.



Fig. 2.2. Montaj pentru analiza modală experimentală a ramei de boghiu LE-MA

S-a realizat excitarea structurii prin baleiaj logaritm de frecvență, bidirecțional, cu o viteză de baleiaj de 8mdec/s, în domeniul 5÷200 Hz. Pentru a realiza o acuratețe ridicată a funcțiilor de răspuns în frecvență (FRF) a fost selectată o rezoluție în frecvență de 62.5 mHz și a fost aleasă o mediere liniară peste un număr de 237 de secvențe FRF. Au fost determinate și salvate modurile proprii de vibrație.

În programul de corelație *PULSE Reflex Correlation Analysis*, au fost importate atât modelul analitic, realizat în Ansys, cât și modelul experimental, realizat în Modal Analysis al lui PulsReflex. În tabelul 2.1 este prezentat rezultatul analizei de corelație pentru modurile de vibrație analitice și experimentale. Din analiza datelor din tabelul 2.1 și a formelor modale (a se vedea taportul de etapă) se constată o foarte bună corelare a formelor modale analitice și experimentale, factorul MAC luând valori mai mari de 0.9. S-a calculat eroarea de evaluare a frecvențelor proprii, rezultând, de asemenea, erori de evaluare mai mici de 1.7%.

Tabel 2.1. Corelarea modelelor analitic, FEA și experimental, EMA

Mod	Model analitic (Ansys)			Model experimental			Eroare Frecvența Amortizată (%)	MAC Modal Assurance Criterion	Diferența Forme Modale (%)
	Frecvența Amortizată (Hz)	Amortizare (%)	Complexitate	Frecvența Amortizată (Hz)	Amortizare (%)	Complexitate			
1	30.73	0	0	30.19	0.28	0.0128	-1.7925	0.975	1.767
2	37.43	0	0	37.95	0.32	0.2374	0.0138	0.910	-1.406
3	48.10	0	0	49.08	0.17	0.0015	0.01992	0.968	-2.033
4	66.66	0	0	65.66	0.13	0.0031	-0.0152	0.970	1.501
5	81.68	0	0	85.30	0.10	0.0048	0.04246	0.900	-4.434
6	88.18	0	0	89.92	0.10	0.0013	0.01935	0.902	-1.973

Având în vedere validarea în domeniul dinamic prin factor de corelație MAC și frecvențe proprii se admite că modelul analitic este unul corect și poate fi utilizat pentru analiza structurală cu elemente finite a ramei de boghiu atât pentru evaluarea răspunsului la solicitări statice, cât și pentru evaluarea răspunsului la solicitări dinamice, de oboseală, conform standardului SR EN 13749/2011.

2.1.2.4 Răspunsul structural al ramei de boghiu la cazuri de încărcare excepțională și normală

Pe modelul analitic, FEA, validat prin modelul experimental, EMA, în Ansys, au fost rulete toate cazurile de încărcare specificate în Specificația Tehnică nr. 494/17.04.2018: „Rama de Boghiu LE-MA desen BL 008-58-Validarea rezistenței la solicitări statice și oboseală” și în SR EN 13749:2011, determinând răspunsul în tensiuni mecanice la solicitări excepționale și normale de exploatare. Pentru fiecare caz de încărcare a fost determinată distribuția răspunsului în tensiuni mecanice von Mises pe rama de boghiu. S-a realizat un centralizator cu cele mai defavorabile cazuri de încărcare și au fost selectate un număr de 32 puncte reprezentative pentru măsurarea răspunsului structural în tensiuni mecanice, în aceste puncte aplicându-se traductoare electrorezistive (mărci tensometrice) pentru etapa de încercări. În raport, din

motive de spațiu, se prezintă doar cel mai simplu și reprezentativ caz de solicitare excepțională.

Cazul de solicitare E1: Încărcare verticală excepțională cu forțe $F_v=122205\text{N}$ aplicate suporturilor suspensiei secundare, considerând și reacțiunile de la nivelul suspensiei principale, ca în exploatare.

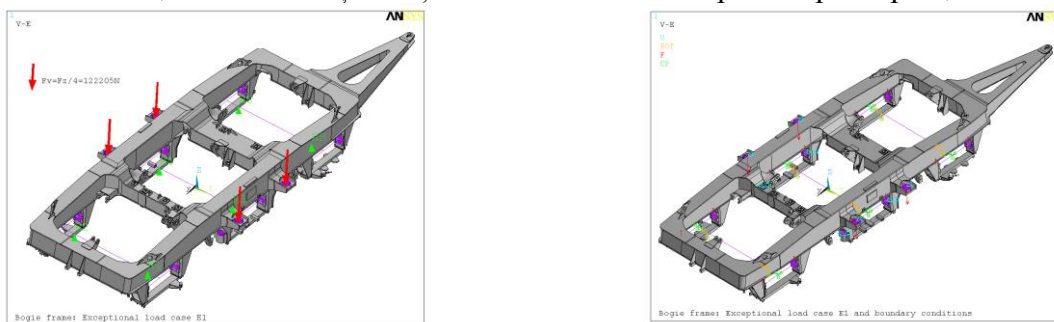


Fig. 2.3. Aplicarea solicitărilor și a reacțiunilor pentru cazul de solicitare excepțională E1

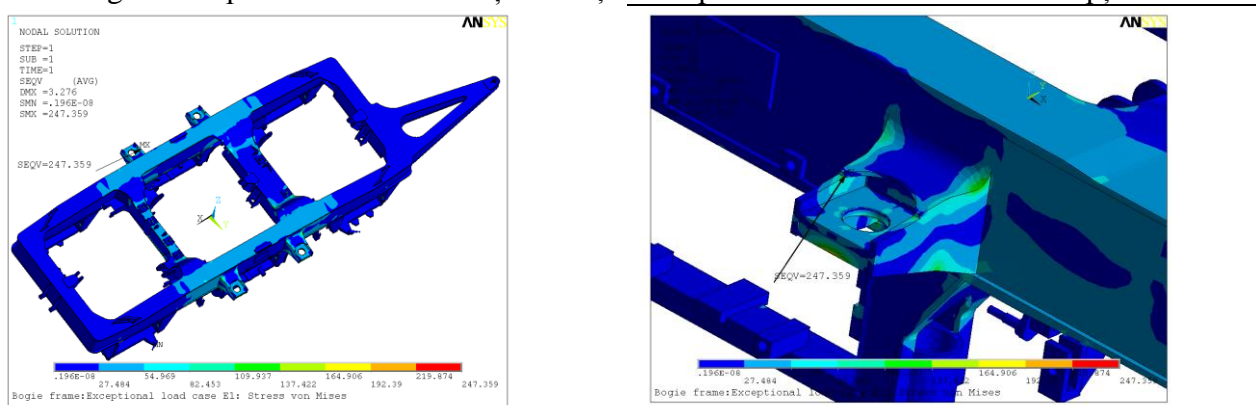


Fig. 2.4. Răspunsul în tensiuni von Mises pentru cazul de solicitare excepțională E1



Fig. 2.5. Poziția mărcilor tensometrice Ch29 și Ch10 pe suportii suspensiei secundare

2.1.3 Tehnologie de efectuare a încercărilor statice și de oboseală ale ramei de boghiu

Încercările la solicitări statice și oboseală efectuate în cadrul proiectului au dublu rol:

- pentru validarea tehnologiei combinate de evaluare la solicitări statice și oboseală;
- pentru certificarea ramei de boghiu, desen BL 008-58, pentru circulația pe căile ferate din Uniunea Europeană, conform EN 13749:2011 și Regulamentului UE nr. 1302/2014 din 18.11.2014.

În cadrul proiectului, au fost efectuate integral încercările la solicitări statice și parțial încercări la solicitări dinamice de oboseală ale ramei de boghiu LE-MA, desen BL 008-58.

La momentul elaborării raportului sunt în derulare la INMA București, în regim de acreditare RENAR, încercările la oboseală ale ramei de boghiu, în cadrul unui contract direct Sofronic - INMA.

Au fost aplicate un număr de 32 mărci tensometrice în puncte de interes selectate prin analiza cu elemente finite, în vederea monitorizării distribuției tensiunilor pe rama de boghiu pe durata încercărilor.

În figura 2.6 este prezentat boghiul LE-MA amplasat pe standul de încercări în vederea efectuării încercărilor la solicitări statice și oboseală. În figura 2.7 sunt prezentate solicitările verticale aplicate la nivelul suporturilor suspensiei secundare și distribuția răspunsului în tensiuni pentru cazul E1 de încărcare.

Cele mai mari valori ale tensiunilor mecanice von Mises se realizează în zona mărcilor tensometrice Ch29 și Ch10 unde s-au măsurat următoarele tensiuni medii în zona stabilizată:

$$\text{Ch29} = 127.1 \text{ MPa} \quad / \quad \text{Ch10} = 101.0 \text{ MPa}$$

În vederea atestării comportamentului la oboseală, au fost aplicate combinațiile de sarcini verticale, transversale și de torsiune, conform ST nr. 494/17.04 și anexa G din EN 13749:2011. În figura 2.8 este prezentată istoria în timp a combinațiilor de solicitări la oboseală (N) și răspunsul în tensiuni (MPa). Se face mențiunea că solicitările la oboseală sunt alternative, la 1 ciclu de solicitări cvasistatice corespunzând 20 cicluri de solicitare dinamică. Încercările la oboseală se fac cu o frecvență de 2 Hz pentru ciclurile de solicitare dinamică. Valorile maxime se obțin tot la aceleași puncte C10 și C29.



Fig. 2.6. Amplasarea boghiului LE-MA pentru încercările la solicitări statice și oboseală

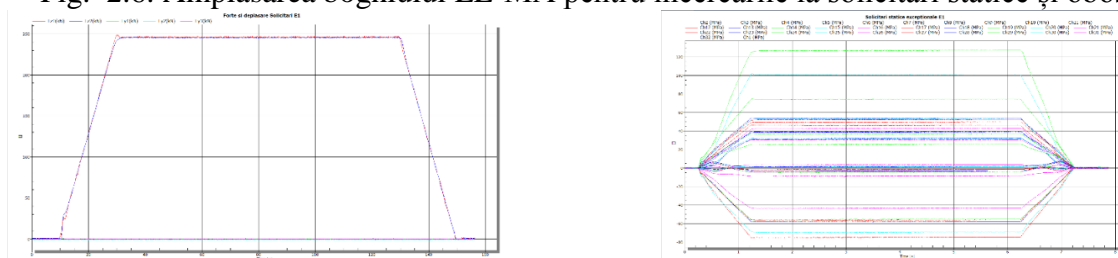


Fig. 2.7. Solicitări aplicate ramei de boghiu (N) și răspunsul în tensiuni (MPa) pentru încercarea E1

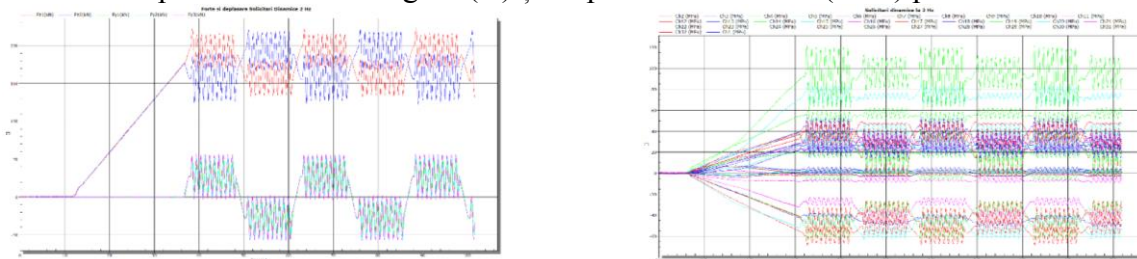


Fig. 2.8. Combinații de solicitări la oboseală (N) și răspunsul în tensiuni (MPa)

2.1.4 Modele analitice pentru analiza răspunsului structural în tensiuni mecanice și a duratei de viață

2.1.4.1 Tehnologie de evaluare la oboseală a ramelor de boghiu la combinații de solicitări sintetizate

Fenomenul de oboseală este cauzat de încărcarea unei structuri cu sarcini repetitive pentru o perioadă de timp. Cedarea prin oboseală se realizează prin inițierea unor fisuri mici, care se dezvoltă conducând în final la cedarea structurii. Metoda tradițională de calcul la oboseală folosește date empirice provenite de la multe încercări pe diverse tipuri de materiale supuse la cicluri de sarcini repetitive și stabilește că amplitudinea tensiunilor la care este supus un material este legată printr-o curbă empirică de numărul de cicluri de sarcini repetitive estimat până la cedarea prin oboseală. Aceste curbe sunt cunoscute sub numele de curbe S-N, sau curbe Wholer. Cea mai utilizată metodă de evaluare a duratei de viață se bazează pe regula de cumulare a deteriorărilor, sau regula Palmgreen-Miner, care afirmă că dauna totală acumulată în istoria încărcării este dată de suma liniară a daunelor parțiale generate de ciclurile individuale:

$$D_{total} = \sum_{i=1}^N D_i \quad \text{sau} \quad \frac{1}{N_{total}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N_i} \quad (4)$$

Unde N este durata de viață, exprimată în cicluri repetate de solicitare, iar D este dauna.

Pentru evaluarea analitică a duratei de viață, în cadrul proiectului a fost utilizat pachetul de programe nCode DesignLife, versiunea 13.1, al firmei HBM Prenscia, achiziționat prin proiect.

Datele de intrare în program sunt: fișierul .rst realizat în Ansys conținând răspunsul structurii la solicitări statice aplicate pe direcțiile de aplicare a combinațiilor de solicitări de oboseală; istoria în timp a combinațiilor de solicitări la oboseală și caracteristicile de material.

A fost elaborată schema logică din figura 2.9 pentru evaluarea duratei de viață a ramei de boghiu la sarcinile sintetice de oboseală conform EN 13749:2011. A fost sintetizat un ciclu de solicitări la oboseală, în figură fiind prezentată evoluția în timp a sarcinilor sintetice aplicate ramei de boghiu: trasa 1, sarcini verticale aplicate lonjeronului 1; trasa 2, sarcini verticale aplicate lonjeronului 2, trasa 3, sarcini transversale aplicate osiilor 1,2,3; trasa 4, twist vertical aplicat roții 2; trasa 5, twist vertical aplicat roții 3.

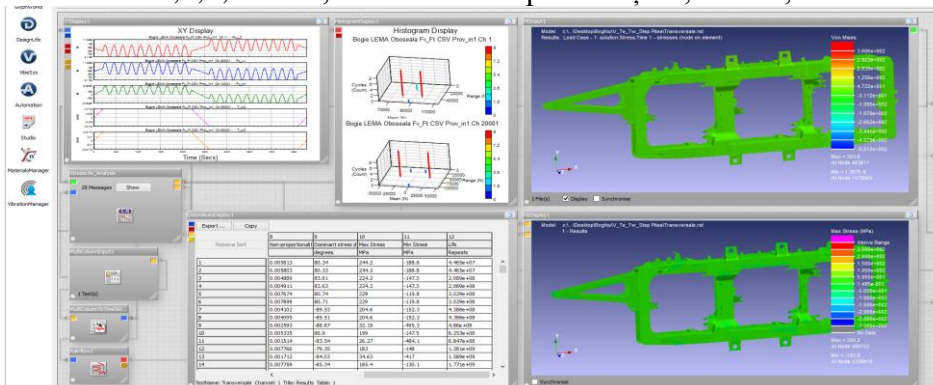


Fig. 2.9. Schema logică pentru evaluarea duratei de viață a ramei la solicitări sintetice de oboseală

În partea inferioară este reprezentată tabelar durata de viață a ramei de boghiu, exprimată în număr de repetiții ale înregistrării. Din tabel se observă că pentru cele mai sensibile puncte ale ramei, durata de încercare la oboseală, în condiții de laborator, este de 4.4×10^7 repetiții ale înregistrării. Înregistrarea conține 20 de cicluri dinamice de solicitare, deci se estimează că rama de boghiu va rezista un număr de 89.3×10^8 cicluri de solicitare dinamică de bază. Comparativ cu cele 6×10^6 cicluri de solicitare dinamică de bază, impuse prin normele de încercare, se estimează că rama de boghiu va suporta cu succes ciclurile de solicitări de bază. Din analiza distribuției tensiunilor la oboseală se observă că tensiunile în zonele cele mai solicitate sunt sub valoarea de 250 Mpa, deci sub limita de elasticitate $R_e = 345$ Mpa caracteristică tablei S355NL-EN 10025-3 din structura ramei de boghiu LE-MA.

2.1.4.2 Tehnologie de evaluare la oboseală a ramelor de boghiu la combinații de solicitări normale

În exploatare, fenomenele de oboseală ale ramei de boghiu sunt datorate prioritar forțelor verticale și transversale care se manifestă la nivelul suspensiei primare, venind dinspre calea de rulare.

În cadrul etapei, în programul nCode 13.1, a fost elaborată schema logică din figura 2.10 pentru evaluarea duratei de viață a ramei de boghiu la sarcini normale de exploatare, conform EN 13749:2011.

Fișierul .rst este cel utilizat anterior, nelând în considerare twist al cărui efect este integrat în istoria forțelor verticale și transversale. Din înregistrările forțelor de interacțiune Y/Q, a fost selectată o înregistrare în aliniament, la viteza de 80km/h, de lungime a cca. 1km. În figura 2.10 este reprezentată evoluția în timp a sarcinilor aplicate ramei de boghiu: trasa roșu, sarcini verticale aplicate lonjeronului 1; trasa albastru, sarcini verticale aplicate lonjeronului 2; trasa verde, sarcini transversale aplicate la nivelul roților. În partea dreaptă este reprezentat rezultatul rulării modulului „Rainflow” care dă distribuția statistică a numărului ciclurilor de solicitare în funcție de valoarea medie și de domeniul de solicitare.

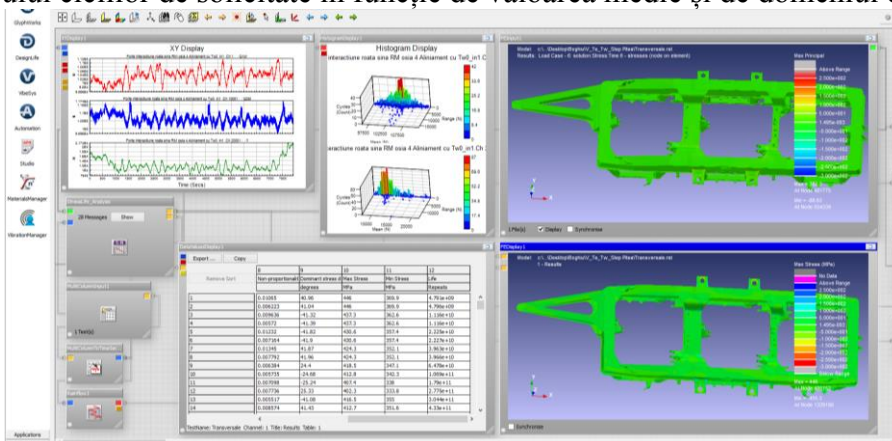


Fig. 2.10. Schema logică pentru evaluarea duratei de viață la solicitări normale de exploatare

În tabelul din figura 2.10 este transmisă dauna / durata de viață, exprimată în număr de repetiții ale înregistrării. Din tabel se observă că pentru cele mai sensibile puncte ale ramei, durata de viață este de 4.79×10^9 repetiții ale înregistrării, deci de cca. 4.79×10^9 km în aliniament la viteza de 80 km/h. Din analiza distribuției tensiunilor la oboseală, se observă că tensiunile în zonele cele mai solicitate sunt sub valoarea de 250 Mpa, deci sub limita de elasticitate $Re = 345$ Mpa caracteristică tablei S355NL-EN 10025-3 din structura ramei de boghiu.

2.1.5 Gradul de atingere a rezultatelor estimate

Obiectivele proiectului au fost realizate, tehnologia de evaluare la oboseală și solicitări excepționale a ramelor de boghiu fiind implementată în procesul curent de proiectare și fabricație al partenerului Softronic. Tehnologia a fost aplicată pentru evaluarea structurală a ramei de boghiu LE-MA, înainte de trimiterea la încercări. Demararea procesului de certificare la oboseală a constituit un punct esențial la succesul pe care Softronic l-a avut cu exportul de locomotive LE-MA la beneficiarul Green Cargo – Suedia.

2.2 Tehnică de validare prin încercări la solicitări mecanice pentru echipamente de bord, de forță și de comandă

Prin proiect a fost realizată baza materială pentru încercarea la vibrații și șocuri a echipamentelor de bord, de comandă și de forță, în conformitate cu solicitările reale de la locul de montaj dar și cu prevederile normativelor din domeniul de profil. Procedurile de încercare au fost aplicate pe echipamente de bord, de comandă și de forță realizate de Softronic, înainte de montarea pe propriile vehiculele feroviare.

În cadrul proiectului au fost încercate echipamente de bord, de comandă și de forță:

- la solicitări mecanice, conform solicitărilor din exploatare, în acord cu EN 61373:2010;
- la vibrații și șocuri, conform EN 61373:2010.

Pe durata proiectului au fost efectuate încercări în calea de rulare pentru determinarea solicitărilor vibratorii reale la nivelul ramei de boghiu și a principalelor echipamente de forță și de comandă. Încercările au fost efectuate atât în România cât și la beneficiarul Green Cargo - Suedia, cu ocazia încercărilor de compatibilitate mecanică, electrică și electromagnetică a locomotivelor LE-MA cu infrastructura feroviară din Suedia. Au fost efectuate încercări pentru determinarea caracteristicilor reale ale solicitărilor mecanice la nivelul ramei de boghiu și pentru determinarea nivelului și a compoziției spectrale a vibrațiilor la nivelul principalelor echipamente de comandă și de forță utilizate pe locomotiva LE-MA.

2.2.1 Încercări la solicitări mecanice, conforme cu solicitările din exploatare

Accelerațiile de vibrație pe direcțiile vertical și transversal, măsurată la nivelul Convertizorului Electronic de Tracțiune, Transformatorului de Putere și Instalației Convertizor Servicii Auxiliare au constituit semnale de intrare pentru instalația de încercări la vibrații și șocuri, achiziționată prin proiect. În figura 2.11 este prezentată o fotografie de montaj pentru încercarea la solicitări mecanice, conforme cu solicitările din exploatare, ale Convertizorului Servicii Auxiliare.



Fig. 2.11. Încercări la solicitări mecanice din exploatare ale Convertizorului Servicii Auxiliare

Sub modulul Core al PulseReflex se încarcă fișierul de date care conține înregistrarea vibrațiilor măsurate la nivelul echipamentului de încercat. În cazul de față se încarcă succesiv înregistrarea vibrațiilor măsurate pe direcțiile vertical și transversal, la baza Instalației Convertizor Servicii Auxiliare. Încercarea

pe direcția longitudinală este efectuată considerând aceleași caracteristici ca la înregistrarea vibrațiilor pe direcția transversală. Semnalul analogic este generat la una dintre ieșirile analogice ale sistemului de achiziție date LAN-XI 3160 A-042. Semnalul analogic este trecut prin preamplificatorul de putere LV 103 și apoi este aplicat amplificatorului de putere SDA 10 al vibratorului electrodinamic ET-10-240.

Înregistrarea este setată pentru repetare în buclă infinită. De la înregistrarea inițială se cunoaște valoarea RMS a vibrațiilor măsurate la locul de montare al echipamentului. Din preamplificatorul LV 103 și din amplificatorul SDA 10 se reglează amplitudinea vibrațiilor generate la nivelul vibratorului electrodinamic ET-10-240 în așa fel încât vibrația de încercare să aibă aceiași valoare RMS ca vibrația măsurată la încercări. Timpul de încercare, pentru fiecare direcție principală, este de 5 ore.

2.2.2 Încercări la șocuri și vibrații, conform normativelor în vigoare

Încercările se efectuează conform normativul EN 61373:2010 și au rolul de a evidenția orice slăbire sau cedare a structurii echipamentului care ar putea conduce la probleme privind siguranța funcțională a acestuia. În cadrul proiectului au fost încercate la vibrații și șocuri toate echipamentele de bord, de forță și de comandă pe care Softronic le-a fabricat, înainte de montarea pe locomotivele proprii.

2.2.3 Gradul de atingere a rezultatelor estimate

Obiectivele proiectului au fost realizate, tehnica de validare prin încercări la solicitări mecanice pentru echipamente de bord și comandă fiind implementată pe fluxul curent de fabricație al echipamentelor realizate de partenerul Softronic, contribuind la realizare de echipamente electronice robuste și fiabile.

3 ASIMILAREA TEHNOLOGIILOR REALIZATE PRIN PROIECT

Ambele tehnologii menționate la paragrafele 2.1 și 2.2 au fost implementate în procesul curent de proiectare și fabricație al partenerului Softronic, fiind integrate în Laboratorul de Încercări Mecanice și Climatice (LIMC), realizat prin proiect în cadrul Softronic și autorizat cu AFER Romania, având în componență membri din echipa de lucru a proiectului. Detalii se pot găsi la adresa: <https://limcsoftronic.ro/>

4 ARTICOLE ȘTIINȚIFICE ELABORATE ÎN CADRUL PROIECTULUI

1. Experimental modal analysis of an electric locomotive body, 21st Innovative Manufacturing Engineering and Energy International Conference, IManEE 2017; Iasi; Romania; 24-27 May 2017; MATEC Web of Conferences, Volume 112, 3 July 2017, Article number 07008;

2. System for measurement of interaction forces between wheel and rail for railway vehicles, The 13th International Conference on Modern Technologies in Manufacturing, Cluj-Napoca, 12÷13.10.2017, MATEC Web of Conferences 137, Article number 01006;

3. Considerations on studying the characteristics of the elastic axle steering system on railway vehicles, The 13th International Conference on Modern Technologies in Manufacturing, Cluj-Napoca, 12÷13.10.2017, MATEC Web of Conferences 137, Article number 01013;

4. Theoretical and experimental research on the phenomenon of stick-slip at traction railway vehicles, International Conference on Tribology, Cappadocia, Turkey;

5. Considerations on the use of elastic wheels to the urban transport vehicles, The 5th International Conference on Mechanical Engineering, Materials Science and Civil Engineering, Kuala Lumpur, Malaysia, 2017;

6. Use of the experimental modal analysis for analytical lifetime estimation of a bogie frame, The 22th edition of IManEE 2018 International Conference, 31.05÷02.06. 2018, Chisinau, Republic of Moldova; MATEC Web of Conferences 178, 06018 (2018);

7. Construction of elastic wheels on light rail vehicles, The 22th edition of IManEE 2018 International Conference, 31.05÷02.06. 2018, Chisinau, Republic of Moldova; MATEC Web of Conferences 178, 06006 (2018);

8. Research regarding the action of the aerodynamic forces on a classical passenger train, The 22th edition of IManEE 2018 International Conference, 31.05÷02.06. 2018, Chisinau, Republic of Moldova; MATEC Web of Conferences 178, 06007 (2018);

9. Analytical evaluation of the lifetime of a three-axle bogie frame using the analytical model validated through experimental modal analysis, The 14th International Conference on Vibration

5 MODUL DE ATRIBUIRE ȘI EXPLOATARE A DREPTURILOR DE PROPRIETATE

Prin proiect nu a fost prevăzută o departajare a drepturilor de proprietate intelectuală, de producție, difuzare, comercializare, etc. asupra rezultatelor proiectului.

6 REALIZĂRILE ECONOMICE ȘI/SAU TEHNOLOGICE OBTINUTE LA FINALUL PROIECTULUI COMPARATIV CU OBIECTIVELE PROPUSE ÎN PLANUL DE AFACERI

1. Servicii de evaluare la oboseală și solicitări excepționale ale structurilor mecanice de rezistență (în particular rame de boghiu) prin metode combinate, analitice și experimentale:

Propus: 2 rame de boghiu / an și 2 structuri de rezistență, feroviare sau auto.

Realizat:

-Partenerul INMA, și-a reînnoit acreditarea RENAR pentru încercări la solicitări statice și oboseală, iar pentru anul 2019 are în derulare un contract de 542.64 mii lei pentru validarea prin încercări la oboseală a ramei de boghiu LE-MA 6000kW. Pe program de investiții a obținut fonduri de investiție pentru modernizarea instalației de hidropuls, iar pentru anul 2020 se preconizează certificarea prin încercări (solicitată de organisme de certificare) unei noi rame de boghiu realizată la Softronic pentru locomotive electrice modernizate. În paralel cu încercările derulate prin prezentul proiect sunt în derulare încercări la solicitări statice pentru structura de rezistență a unui nou tip de cabină de tractor.

-Partenerul Softronic, în cadrul proiectului, și-a asimilat tehnologia de evaluare la oboseală și solicitări excepționale a structurilor mecanice de rezistență prin metode combinate, analitice și experimentale și a aplicat-o pentru evaluarea structurală a ramei de boghiu LEMA. În cadrul proiectului a realizat structura portantă pentru încercarea ramei LE-MA și a efectuat încercările la solicitări statice. Pentru anul 2020 este prevăzută realizarea unui nou tip de ramă de boghiu pentru locomotive electrice.

2. Servicii de validare prin încercări la solicitări mecanice de durată pentru echipamente:

Propus: 40 echipamente de bord și de comandă/an / 8 echipamente pentru încercări la oboseală/an.

Realizat: În anul 2018, cu dotarea realizată prin proiect, Softronic Craiova a încercat la vibrații și șocuri întreaga gamă de echipamente de bord și comandă, înainte de montare pe locomotive. În decurs de 8 luni, în cadrul proiectului au fost încercate la vibrații și șocuri un număr de 20 echipamente, iar la 3 echipamente li s-a efectuat încercări de rezistență la oboseală. La finalizarea proiectului, în cadrul LIMC vor fi abordate servicii de încercări la vibrații, șocuri și oboseală și pentru terți parteneri.

3. Servicii indirecte sau conexe

-Prin re tehnologizare și reacreditare partenerul INMA își crește potențialul de încercări și prestigiul în domeniul încercărilor la solicitări statice și oboseală pentru structuri mecanice de rezistență.

-Începerea procesului de certificare la solicitări statice și oboseală a ramei de boghiu LE-MA a permis Softronic Craiova să încheie un contract cu Green Cargo-Suedia pentru vânzare a 2 locomotive pentru anul 2018. Este în derulare un contract pentru vânzarea unui număr de 6 locomotive în anul 2019. Întreaga tehnică achiziționată prin proiect a fost utilizată la încercările de compatibilitate electromagnetică a locomotivelor LE-MA cu infrastructura feroviară din Suedia.

7 IMPACTUL REZULTATELOR OBTINUTE

-Activitățile derulate în cadrul proiectului au fost diseminate la un număr apreciabil de conferințe internaționale unde au stârnit un interes deosebit atât pentru domeniul de aplicare (sistemul de transport feroviar) cât și pentru faptul că reprezintă o îmbinare armonioasă de aplicații practice într-un domeniu de siguranță națională și cercetare științifică aprofundată. Un exemplu de interes îl reprezintă prezentarea poster de la VETOMAC, Lisbon, 10-13.09.2018, unde s-au stabilit contacte pentru colaborari în vederea abordării viitoare a unor proiecte în domeniul feroviar în cadrul European Research Area (ERA RO);

-Atestarea cu AFER Romania a Laboratorului de Încercări Mecanice și Climatice-Softronic permite începerea activității de acreditare RENAR a laboratorului în domeniile etalonări și încercări forțe și vibrații.

-Acreditarea INMA pentru certificarea prin încercări a ramelor de boghiu permite continuarea colaborării cu Softronic și UPB și abordarea de proiecte de interes în cadrul unor viitoare programe.