

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA
FACULTATEA DE MECANICĂ
Inginer: PAP P. PETRU

CONTRIBUȚII LA STUDIUL FORȚELOR
DINAMICE LONGITUDINALE APĂRUTE
ÎN TIMPUL REMORCĂRII TRENURILOR

--TEZĂ DE DOCTORAT--

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:
Prof. Dr. Ing., VASILE HOANCĂ

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA
BIBLIOTECA CENTRALĂ
Nr. volum <i>619.491</i>
Data <i>366 U.C.</i>

--1997--

CUPRINS

	pag.
INTRODUCERE	3
CAP. 1. MODELAREA ȘI SIMULAREA SISTEMELOR MECANICE	6
1.1. Noțiuni generale	6
1.2. Principiile modelării și simulării sistemelor mecanice..	7
1.3. Studiul, analiza și simularea pe calculator a comportării dinamice a trenurilor în timpul remorcării acestora pe calea ferată	9
CAP. 2. FORȚELE DINAMICE LONGITUDINALE CE ACȚIONEAZĂ ÎN TIMPUL CIRCULAȚIEI TRENURILOR ÎN REGIM DE MERS PERMANENT	12
2.1. Generalități.....	12
2.2. Mișcarea trenului pe un profil de linie cu declivitate constantă	12
2.3. Circulația trenului pe un profil de linie cu declivitate variabilă	25
CAP. 3. FORȚELE DINAMICE LONGITUDINALE CE ACȚIONEAZĂ ÎN TIMPUL CIRCULAȚIEI TRENURILOR ÎN REGIM DE MERS TRANZITORIU	39
3.1. Generalități.....	39
3.2. Forțele dinamice longitudinale ce se dezvoltă în timpul demarajului trenurilor formate din vagoane de marfă înzestrate cu aparate de tracțiune discontinue cu arcuri volute	39
3.2.1. Noțiuni generale	39
3.2.2. Modelul mecanic de calcul și forțele ce acționează asupra unui vagon oarecare din corpul trenului	40

3.2.3. Stabilirea și rezolvarea ecuațiilor diferențiale ale mișcării	41
3.3. Forțele dinamice longitudinale ce se dezvoltă în timpul demarajului trenurilor formate din vagoane înzestrate cu aparate de tracțiune discontinue cu arcuri inelare	62
3.3.1. Generalități	62
3.3.2. Determinarea forțelor din aparatele de tracțiune	63
3.4. Forțele dinamice longitudinale ce se dezvoltă în timpul frânării trenurilor	85
3.4.1. Noțiuni generale	85
3.4.2. Fazele frânării, importanța și consecințele acestora.....	85
3.4.3. Modelul mecanic de calcul și stabilirea legilor de variație a forțelor în timp	89
3.4.4. Stabilirea și rezolvarea ecuațiilor diferențiale ale mișcării.....	91
CAP. 4. REZULTATE EXPERIMENTALE	107
4.1. Generalități	107
4.2. Rezultate experimentale obținute în străinătate	108
4.3. Rezultate experimentale obținute în țară	113
4.4. Rezultate experimentale și măsurători efectuate în trenuri reale din exploatarea curentă a căilor ferate române	116
CAP. 5. SINTEZA LUCRĂRII, CONCLUZII GENERALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE.....	119
BIBLIOGRAFIE.....	124
ANEXE.....	134

INTRODUCERE

În ultimele decenii, în transportul pe calea ferată asistăm la tendința continuă de sporire a tonajelor trenurilor, a puterii locomotivelor dar și la tendința de creștere a vitezelor de circulație atât a trenurilor de călători cât și a trenurilor de marfă.

Oricare ar fi categoria trenului acesta este compus prin legarea elastică între ele a unui număr mai mic sau mai mare de vagoane, de același tip sau de tipuri diferite, goale sau având diverse încărcături.

În timpul circulației pe calea ferată, asupra trenurilor în mișcare acționează forța de tracțiune a locomotivei, forțele de inerție, forțele de rezistență ce se opun înaintării trenului, forța de frânare, precum și reacțiunile dinamice longitudinale.

Dintre acestea, forțele dinamice longitudinale acționează asupra trenurilor în faza de demaraj, în faza de circulație cu viteză variabilă, dar mai ales în fazele de frânare, fie că se aplică o frânare de menținere sau reducere a vitezei, fie că se aplică o frânare de oprire a trenului. Manipulările necorespunzătoare ale graduatorului sau controlerului locomotivei, a robinetului de comandă al frânelor automate din tren, a nisiparelor, compunerea necorespunzătoare a trenurilor lungi și grele de marfă, precum și neadaptarea tehnicii de conducere a trenului în funcție de profilul liniei pe care se circulă la un moment dat, pot conduce în anumite situații la apariția și dezvoltarea în lungul trenului a unor forțe dinamice longitudinale, în orice fază de circulație a trenului, a căror valoare maximă să depășească limitele admise și care pot produce fisurarea aparatelor de tracțiune și legare, deraierea unuia sau a mai multor vagoane sau și mai grav pot produce ruperea trenului cu pagube materiale sau cu urmări grave în siguranța circulației.

În condițiile actuale, caracterizate de sporirea continuă a tonajelor remorcate și a vitezelor de circulație ale trenurilor,

determinarea valorilor maxime ale acestor forțe dinamice longitudinale, dar și a influenței diverșilor factori ce determină producerea și dezvoltarea reacțiunilor dinamice longitudinale, precum și stabilirea și aplicarea unui complex de măsuri de reducere a intensității sau eliminare a acestora capătă o importanță deosebită.

Prezenta lucrare are ca obiect studiul, simularea precum și analiza forțelor dinamice longitudinale ce acționează în trenurile de călători sau marfă aflate în circulație pe cale, în diverse situații din activitatea curentă de exploatare a căilor ferate.

Lucrarea a fost realizată sub îndrumarea permanentă și atentă a domnului profesor doctor inginer Vasile Hoancă, conducător științific al lucrării, căruia îi exprim cele mai sincere mulțumiri pentru îndrumare și în special pentru modul cum a știut să mă încurajeze în momentele dificile. Ideea principală a lucrării a început să-l preocupe pe autor cu mult timp înainte, din perioada activității acestuia ca inginer în cadrul sectorului de exploatare al depourilor de locomotive SNCFR Caransebeș și Timișoara și mai apoi în cadrul Diviziei Tracțiune din Regionala SNCFR Timișoara când a intrat în contact cu problemele legate de manifestarea repetată a fenomenelor de ruperi de trenuri ocazie cu care și-a propus și tratarea științifică a acestora.

Lucrarea de față își propune ca obiect studiul, analiza și simularea comportării dinamice a trenurilor, oricare ar fi categoria acestora, în timpul circulației lor pe calea de rulare, pentru diferite regimuri de mers.

În acest scop autorul a elaborat câteva metodologii proprii, originale de determinare a forțelor dinamice longitudinale care se manifestă în trenuri, în timpul regimurilor tranzitorii de mișcare.

De asemenea a conceput, proiectat și elaborat metodologiile de modelare și simulare a regimurilor permanente și tranzitorii de mers ale trenurilor, scoțând în evidență atât modul de apariție, manifestare și de distribuire în lungul trenului a forțelor dinamice longitudinale cât și influența diverșilor factori asupra evoluției și valorilor maxime ale acestor forțe. Fiecare din aceste metodologii s-a materializat prin programe de simulare pe calculator realizate în limbaj Turbo Pascal V 7.0.

Rezultatele obținute și prezentate în lucrare atestă corectitudinea și veridicitatea metodologiilor propuse, existând o bună concordanță între acestea și rezultatele teoretice și mai ales experimentale prezentate în literatura de specialitate din țară și străinătate.

Consider de datoria mea, ca înainte de a încheia această prezentare, să aduc și pe această cale mulțumirile mele tuturor aceluia care m-au ajutat și sprijinit în elaborarea și prezentarea lucrării de față, și în special conducerii Regionalei SNCFR Timișoara și a Diviziei Trafic, precum și colectivului de revizori de sector din cadrul Serviciului de siguranța circulației al Regionalei SNCFR Timișoara și nu în ultimul rând domnilor Stoica Mihail și Mihăilescu Dumitru din cadrul REFER-București.

De asemenea aduc mulțumirile mele întregului colectiv al Catedrei de material rulant de cale ferată din Facultatea de mecanică a Universității "Politehnica" Timișoara.

CAPITOLUL 1

MODELAREA ȘI SIMULAREA SISTEMELOR MECANICE

1.1. NOȚIUNI GENERALE

În procesul conceperii, proiectării, realizării și mai ales al exploatării sistemelor mecanice simple sau complexe, modelarea și simularea acestora joacă un rol incontestabil, de mare importanță, fapt atestat și de sumele imense cheltuite în acest scop în țările dezvoltate.

Utilizarea cu maximă eficiență al acestui instrument de analiză extrem de puternic care este modelarea și simularea funcționării unui sistem mecanic oricât de complex presupune în mod obligatoriu înțelegerea corectă a mecanismelor sale, a avantajelor pe care le oferă, dar și a posibilelor dezavantaje precum și cunoașterea și analiza factorilor care pot conduce la succes sau la un eșec.

În ultimele decenii, odată cu dezvoltarea explozivă a tehnicii de calcul dar și a informaticii în general, simularea și modelarea funcționării și comportării sistemelor mecanice, din ce în ce mai complexe, a cunoscut o mare extindere.

Simularea comportării sistemelor mecanice asistată de calculator prezintă numeroase avantaje și anume:

- posibilități foarte largi de cuantificare exactă și de mare finețe a tuturor variabilelor utilizate pentru simularea sistemelor mecanice;
- precizie mare a calculelor asigurată de calitățile intrinseci ale calculatoarelor;
- posibilități extinse de generare internă a unor funcții cu multe variabile;
- scară lărgită de variație a valorilor variabilelor, ca urmare a posibilităților de utilizare a multor zecimale sau a calculului în virgulă mobilă;
- exploatare directă și cu efort minim a programelor din bibliotecile sistemelor de calcul automat;
- folosirea diverselor limbaje de programare de nivel înalt (Pascal, C, Fortran) sau a limbajelor de simulare (GPSS, SIMAN, ACSL, etc);
- viteză foarte mare de efectuare a calculelor și deci reducerea

- duratei simulării;
- posibilități extinse de realizare a oricât de multe variante de simulare, diferite una de alta;
- corectarea foarte ușoară a simulării propriu zise, sau a programelor, eventual a datelor de simulare;
- stocarea facilă a programelor de simulare;

Necesitatea modelării și simulării sistemelor mecanice rezidă în faptul că deseori sistemele mecanice reale nu pot fi studiate în mod direct, fie din cauza dificultăților de evaluare cantitativă sau calitativă a fenomenelor, fie din cauza complexității exagerate a acestora sau din cauza pericolului de deteriorare sau distrugere a sistemului mecanic respectiv.

1.2. PRINCIPIILE MODELĂRII ȘI SIMULĂRII SISTEMELOR MECANICE

Din punct de vedere al simulării orice sistem mecanic, simplu sau complex, reprezintă o colecție de elemente care interacționează pentru realizarea unui obiectiv (scop).

Fiecare sistem mecanic este descris prin mulțimea componentelor sale, relațiile și intercondiționările dintre acestea și mulțimea de variabile care definește starea sistemului mecanic la un anumit moment de timp.

Pentru a se obține informații despre caracteristicile și comportarea în timp a sistemului mecanic studiat se efectuează de cele mai multe ori o analiză indirectă a acestuia, iar informațiile obținute permit, după prelucrarea acestora, evaluarea performanțelor sistemului respectiv într-un anumit context, analiza sensibilității și comportării acestuia sub influența unor factori diverși, precum și optimizarea sa.

Din diferite cauze, în majoritatea cazurilor se utilizează un model simbolic al sistemului mecanic, model ce prezintă sub formă de schemă funcțională sau de model matematic (sistem de ecuații algebrice sau diferențiale, relații de recurență, etc), acele aspecte ale sistemului mecanic analizat care sunt considerate esențiale din punct de vedere a scopurilor analizei. Din punct de vedere al evoluției în timp, acest model simbolic poate fi static sau dinamic, după cum ilustrează particularitățile și comportarea sistemului mecanic modelat la un singur moment dat, sau pe parcursul unui interval de timp.

Complexitatea modelelor matematice ale sistemelor mecanice

reale impune în majoritatea cazurilor utilizarea tehnicii de calcul, care să prelucreze modelul matematic, rezultând astfel așa numita simulare numerică în care specialiștii au posibilitatea să aleagă dintr-o mare varietate de limbaje și programe specializate de simulare pe cel mai potrivit scopului și posibilităților existente.

Construcția modelelor și în general formularea problemelor de simulare a sistemelor mecanice nu sunt probleme simple, recomandându-se în literatura de specialitate următoarea succesiune a principalelor etape în orice simulare :

- definirea problemei în mod clar, precis cu precizarea tuturor limitărilor ce se cer a fi luate în considerare;
- conceperea unui model al sistemului mecanic, incluzând precizarea ipotezelor, alegerea criteriilor de optimizare și alegerea procedeeleor practice de lucru;
- construirea unei scheme logice de lucru în care să se stabilească relațiile funcționale dintre elementele componente ale sistemului mecanic ce urmează a fi simulat;
- determinarea elementelor de intrare pentru modelul sistemului mecanic și pentru programul de simulare;
- realizarea concretă a programului de simulare;
- experimentarea modelului obținut în mai multe etape, în diferite condiții;
- evaluarea comportării probabile a sistemului mecanic în baza analizei concluziilor simulărilor.

Cea mai importantă etapă în activitatea de simulare este formularea modelului, care trebuie pusă în legătură directă și nemijlocită cu ipotezele simplificatoare, deoarece simplificarea fenomenelor este de dorit, dar simplificarea exagerată poate fi fatală. În concluzie există întotdeauna riscul ca o eroare de apreciere privind importanța unui factor, respectiv element sau o eroare de apreciere privind formularea unei interdependențe funcționale să conducă la rezultate total diferite de cele care s-ar obține în realitate. De aceea orice model trebuie verificat și validat cu mare atenție înainte de a trece la folosirea sa efectivă.

1.3. STUDIUL, ANALIZA ȘI SIMULAREA PE CALCULATOR A COMPORTĂRII DINAMICE A TRENURILOR ÎN TIMPUL REMORCĂRII ACESTORA PE CALEA FERATĂ

Studiul și simularea pe calculator a comportării dinamice a unui tren în timpul circulației acestuia este un proces iterativ, care de obicei impune reluarea unor etape, până la obținerea de rezultate concludente. Principalele etape parcurse de autor pentru realizarea acestui proces au fost următoarele :

- stabilirea cadrului simulării, etapă esențială în care s-a definit clar atât tipul și categoria trenurilor analizate cât și obiectivele urmărite: determinarea valorică a forțelor dinamice longitudinale în toate regimurile și fazele de mișcare a trenului, stabilirea condițiilor în care apar valorile maxime ale acestor forțe, scoaterea în evidența a factorilor ce exercită influențe semnificative asupra apariției, evoluției și a maximumului forțelor dinamice longitudinale, variantele de simulare care trebuie analizate, criteriile utilizate pentru compararea variantelor de simulare, modul de prezentare și analiză al rezultatelor simulărilor, etc.. În această etapă s-au luat în considerare toate detaliile cunoscute de autor privind tonajele, modurile de compunere ale trenurilor, modul de efectuare al comenzii frânării, modul de manipulare al locomotivei, etc.;
- elaborarea modelului conceptual al trenului, în care s-au utilizat unitățile de măsură, notațiile matematice și grafice utilizate în mod curent în Sistemul Internațional, precum și în literatura de specialitate. Deoarece comportarea dinamică a trenurilor în timpul circulației pe calea ferată în regim de mers permanent diferă în mod esențial de comportarea dinamică din timpul regimului tranzitoriu, pentru fiecare din aceste regimuri s-a elaborat câte un model conceptual original, specific care să reflecte esența fenomenelor și a interdependențelor dintre acestea. În plus, chiar și în cadrul regimului tranzitoriu de demaraj comportarea dinamică a trenurilor depinde de asemenea în mod esențial de existența sau nu în sistemul mecanic real reprezentat de tren a dispozitivelor de amortizare ale aparatelor de tracțiune. Ca urmare în procesul de echivalare a modelului conceptual cu modelul matematic de simulare, echivalare realizată prin codificarea modelului conceptual al trenului, sub formă de program

de simulare, s-a ținut seama de acest fapt rezultând astfel cele două moduri distincte de obținere a valorilor maxime ale forțelor dinamice longitudinale din tren la demaraj și anume :

- determinarea valorilor maxime ale forțelor dinamice longitudinale în baza energiei cinetice a unui singur corp inextensibil, corp aflat în mișcare cu o viteză oarecare ce acționează asupra unui corp aflat în staționare, în cazul în care aparatele de tracțiune ale vagoanelor sunt înzestrate cu dispozitive de amortizare cu inele de fricțiune;
- determinarea valorilor maxime ale forțelor dinamice longitudinale pentru fiecare vagon în parte prin rezolvarea numerică a unui sistem de n ecuații diferențiale neliniare, pentru cazul în care în construcția aparatelor de tracțiune nu există dispozitive de amortizare ;
- definirea experiențelor de simulare, realizată de autor în scopul verificării și validării, cu sau fără modificări, a tuturor modelelor de simulare concepute și utilizate, dar și în scopul obținerii rezultatelor necesare pentru atingerea obiectivelor stabilite;
- colectarea și pregătirea datelor, activitate sistematică desfășurată de autor într-o perioadă îndelungată de documentare pentru realizarea prezentei lucrări;
- conceperea, proiectarea și realizarea integrală a modelelor specifice de simulare în baza codificării modelului conceptual al trenului, activitate materializată în obținerea sub formă de programe originale pentru calculator a trei modele principale de simulare, specifice regimurilor de mers ale trenurilor și anume: un model de simulare pentru regimul de mers permanent și două pentru regimul tranzitoriu. În această etapă s-a optat pentru utilizarea limbajului de programare Turbo Pascal, versiunea 7.0.
- verificarea și validarea tuturor modelelor de simulare prin rularea repetată de un mare număr de ori a programelor de simulare obținute. Toate rulările efectuate pentru variante diferite de simulare au confirmat analogia dintre comportarea tuturor modelelor de simulare și comportarea sistemului mecanic real simulat, sistem mecanic reprezentat de tren;
- efectuarea unui mare număr de rulări pe calculator pentru fiecare model de simulare, pentru obținerea rezultatelor conform obiectivelor urmărite. În această etapă s-au adăugat noi

experiențe de simulare, cu scopul de a scoate în evidență influența a cât mai mulți factori asupra apariției, evoluției și distribuției forțelor dinamice longitudinale din trenurile în mișcare;

-analiza și interpretarea rezultatelor furnizate de rulările repetate, etapă ce a permis obținerea concluziilor finale pentru fiecare regim de mers al trenurilor, fie tranzitoriu fie permanent;

-prezentarea și utilizarea rezultatelor analizei, etapă materializată prin trasarea graficelor ce scot în evidență dependențele forțelor dinamice longitudinale din tren în toate regimurile de mers, de diverși factori de influență. În finalul acestei etape în baza graficelor obținute s-au evidențiat concluziile finale din capitolele doi și trei.

Trebuie menționat că etapa cea mai delicată a studiului și simulării pe calculator a comportării dinamice a trenurilor în timpul circulației acestora pe calea ferată, a fost etapa realizării modelelor de simulare specifice. Astfel, modelele de simulare obținute trebuiau să aproximeze sistemul mecanic real reprezentat de trenul în mișcare, folosind o reprezentare cât mai simplă și mai compactă, care să nu includă detalii inutile, dar care în același timp, să nu omită nici unul dintre elementele importante.

În final mai trebuie arătat că, la fel ca în orice experiment de simulare și în cazul modelării și simulării comportării dinamice a trenurilor în timpul remorcării acestora în orice regim de mers, s-a pus în evidență comportarea modelului specific pe parcursul unui interval de observare, interval definit prin valoarea inițială și cea finală a timpului simulat. Deoarece simularea comportării dinamice a trenurilor în timpul circulației acestora pe calea ferată s-a realizat pe calculator, avansul timpului în intervalul de simulare a fost marcat de ceasul simulării, ceas modelat în cuprinsul programelor de simulare în cele mai multe cazuri, prin variabila numerică i . Ceasul simulării avansează cu pas constant și se oprește în momentul atingerii valorii finale a intervalului de observare.

CAPITOLUL 2

FORȚELE DINAMICE LONGITUDINALE CE ACȚIONEAZĂ ÎN TIMPUL CIRCULAȚIEI TRENURILOR ÎN REGIM DE MERS PERMANENT

2.1. GENERALITĂȚI

Prin regim de mers permanent se înțelege un regim de mers staționar, în care circulația trenului se face cu viteză constantă sau cu o viteză lent variabilă, uniform accelerată sau încetinită, sub acțiunea forțelor constante sau lent variabile (forța de tracțiune a locomotivei, rezistența la înaintare a trenului, forțele de frânare, etc.).

Acest regim de circulație a trenurilor este predominant și apare între două regimuri de mers tranzitorii, iar forțele care solicită aparatele de tracțiune și ciocnire sunt determinate de forțele exterioare date și de regimul de funcționare al locomotivei.

2.2. MIȘCAREA TRENULUI PE UN PROFIL DE LINIE CU DECLIVITATE CONSTANTĂ.

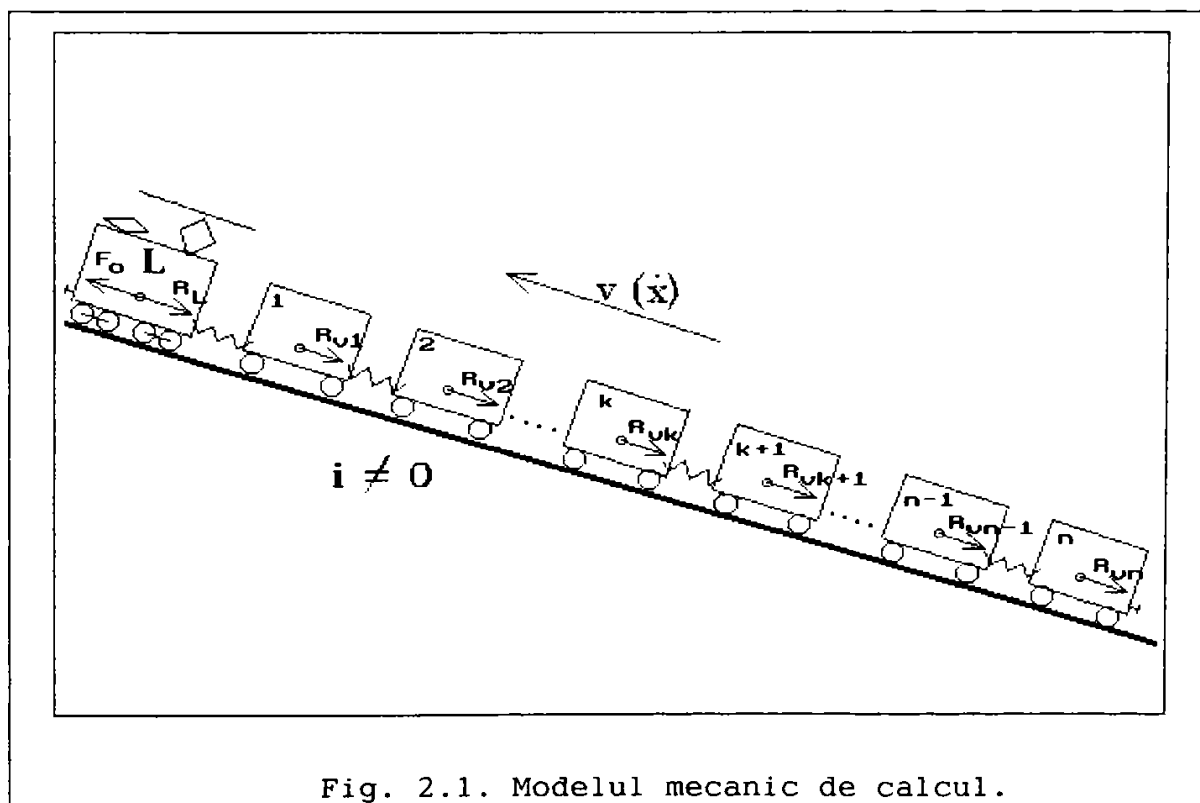


Fig. 2.1. Modelul mecanic de calcul.

Dacă se consideră trenul ca un sistem mecanic format din mase concentrate, legate elastic între ele, având masa locomotivei

plasată în capul trenului, (fig. 2.1.), atunci mișcarea trenului care circulă în regim de tracțiune pe un element de profil al liniei cu declivitate constantă sub acțiunea forțelor exterioare date, este caracterizată de următoarea ecuație:

$$F_o = R_L + R_v \quad (2.1.)$$

în care:

- F_o reprezintă forța de tracțiune dezvoltată la obada roților motoare ale locomotivei, în N;
- R_L este rezistența totală la înaintare a locomotivei, în N;
- R_v reprezintă rezistența totală la înaintare a convoiului de vagoane care include rezistențele principale, cele suplimentare, precum și cele datorate inerției, în N.

În general, când trenul circulă în regim de tracțiune pe un singur element de profil ce are declivitatea constantă și diferită de zero, se poate considera că:

$$F_o = (1 + \gamma_L) * 1000 * \frac{G_L}{g} * \frac{dv}{dt} + (r_{oL} + i) * G_L + \sum_{j=1}^n (1 + \gamma_{vj}) * 1000 * \frac{G_{vj}}{g} * \frac{dv}{dt} + \sum_{j=1}^n (r_{ovj} + i) * G_{vj}, \quad (2.2.)$$

în care:

- $(1 + \gamma_L)$ și $(1 + \gamma_{vj})$ reprezintă factorul de masă al locomotivei și respectiv al vagoanelor, factor care ia în considerare influența acelor mase ale trenului ce execută și o mișcare de rotație pe lângă mișcarea de tranzlație;
- g este accelerația gravitațională, egală cu 9.81 m/s^2 ;
- G_L și G_{vj} reprezintă greutatea locomotivei și respectiv a vagoanelor, în kN;
- v , respectiv \dot{x} este viteza de circulație a trenului, în m/s;
- $x(t)$ reprezintă coordonata centrului de greutate a trenului, în m;
- $\frac{dv}{dt}$, respectiv \ddot{x} reprezintă accelerația trenului, în m/s^2 ;
- r_{oL} și r_{ovj} sunt rezistențele specifice la înaintare a locomotivei și respectiv a vagoanelor, în N/kN;

- i reprezintă rezistența specifică la circulația pe declivități, luându-se în considerare profilul simplificat, în N/kN;
- n reprezintă numărul de vagoane din tren.

În oricare moment al mișcării accelerația trenului se poate determina din relația:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_o - [(r_{oL} + i) * G_L + \sum_{j=1}^n (r_{ovj} + i) * G_{vj}]}{1000 * [(1 + \gamma_L) * \frac{G_L}{g} + \sum_{j=1}^n (1 + \gamma_{vj}) * \frac{G_{vj}}{g}]} \quad (2.3.)$$

Deoarece forța de tracțiune dezvoltată de locomotivă are valori maxime pentru viteze mici de circulație, rezultă că și forțele longitudinale apărute în corpul trenului care circulă în regim permanent vor atinge valori maxime pentru aceleași viteze de circulație. Ca urmare, pentru viteze mici de circulație, atât forța de tracțiune cât și rezistențele principale la înaintare, care depind de viteza de circulație se pot aproxima ca fiind funcții de viteză la puterea unu [113], prin relații de forma:

$$\begin{cases} F_o = A + B * v, \\ r_{oL} = a_L + b_L * v, \\ r_{ovj} = a_{vj} + b_{vj} * v, \end{cases} \quad (2.4.)$$

unde coeficienții A, B, a_L , b_L , a_{vj} , și b_{vj} sunt coeficienți stabiliți în baza unor determinări experimentale [122].

În acest caz mișcarea trenului pe cale este descrisă de ecuația diferențială:

$$1000 * [(1 + \gamma_L) * \frac{G_L}{g} + \sum_{j=1}^n (1 + \gamma_{vj}) * \frac{G_{vj}}{g}] * \frac{d^2x}{dt^2} + [b_L * G_L + \sum_{j=1}^n b_{vj} * G_{vj} - B] * \frac{dx}{dt} + a_L * G_L + i * G_L + \sum_{j=1}^n a_{vj} * G_{vj} + i * \sum_{j=1}^n G_{vj} - A = 0, \quad (2.5.)$$

sau:

$$\ddot{x} + K * \dot{x} = M, \quad (2.6.)$$

unde: - x reprezintă drumul parcurs de tren, în metri;

- $\dot{x} = \frac{dx}{dt} = v$ este viteza de circulație a trenului, în m/s;

- $\ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{dv}{dt}$ reprezintă accelerația trenului, în m/s^2 ,

iar

$$K = \frac{b_L * G_L + \sum_{j=1}^n b_{vj} * G_{vj} - B}{1000 * [(1 + \gamma_L) * \frac{G_L}{g} + \sum_{j=1}^n (1 + \gamma_{vj}) * \frac{G_{vj}}{g}]}, \quad (2.7.)$$

și respectiv

$$M = \frac{A - a_L * G_L - i * G_L - \sum_{j=1}^n a_{vj} * G_{vj} - i * \sum_{j=1}^n G_{vj}}{1000 * [(1 + \gamma_L) * \frac{G_L}{g} + \sum_{j=1}^n (1 + \gamma_{vj}) * \frac{G_{vj}}{g}]}. \quad (2.8.)$$

Soluția ecuației diferențiale (1.6.) este de forma:

$$x = C1 * e^{-K*t} + \frac{M}{K} * t + C2, \quad (2.9.)$$

iar pentru viteza și accelerația trenului obținem:

$$v = \dot{x} = -C1 * K * e^{-K*t} + \frac{M}{K}, \quad (2.10.)$$

și

$$a = \frac{dv}{dt} = \ddot{x} = C1 * K^2 * e^{-K*t}. \quad (2.11.)$$

Considerând condițiile inițiale ale mișcării, la $t=0$, ca fiind:

$$x = x_0 \quad (2.12.)$$

și

$$\dot{x} = v_0, \quad (2.13.)$$

se obține:

$$x = \frac{1}{K} * (\frac{M}{K} - v_0) * (e^{-K*t} - 1) + \frac{M}{K} * t + x_0, \quad (2.14.)$$

$$v = \dot{x} = -(\frac{M}{K} - v_0) * e^{-K*t} + \frac{M}{K}, \quad (2.15.)$$

$$\frac{dv}{dt} = \ddot{x} = K * (\frac{M}{K} - v_0) * e^{-K*t}. \quad (2.16.)$$

Rezultă că în fiecare moment, trenul aflat sub acțiunea forțelor exterioare aplicate asupra lui, se mișcă cu accelerația

$$\ddot{x} = \frac{dv}{dt}.$$

Forțele longitudinale $N_{k,k+1}$ din aparatul de legare, dintre vagonul cu numărul de ordine k și vagonul cu numărul de ordine $k+1$, se pot determina din ecuația de mișcare a trenului scrisă pentru grupul de vagoane având numerele de ordine de la $j=k+1$ la $j=n$, (fig. 2.2.), astfel:

$$1000 * \frac{dv}{dt} * \sum_{j=k+1}^n (1 + \gamma_{vj}) * \frac{G_{vj}}{g} = N_{k,k+1} - \sum_{j=k+1}^n (r_{ovj} + i) * G_{vj}, \quad (2.17.)$$

de unde rezultă:

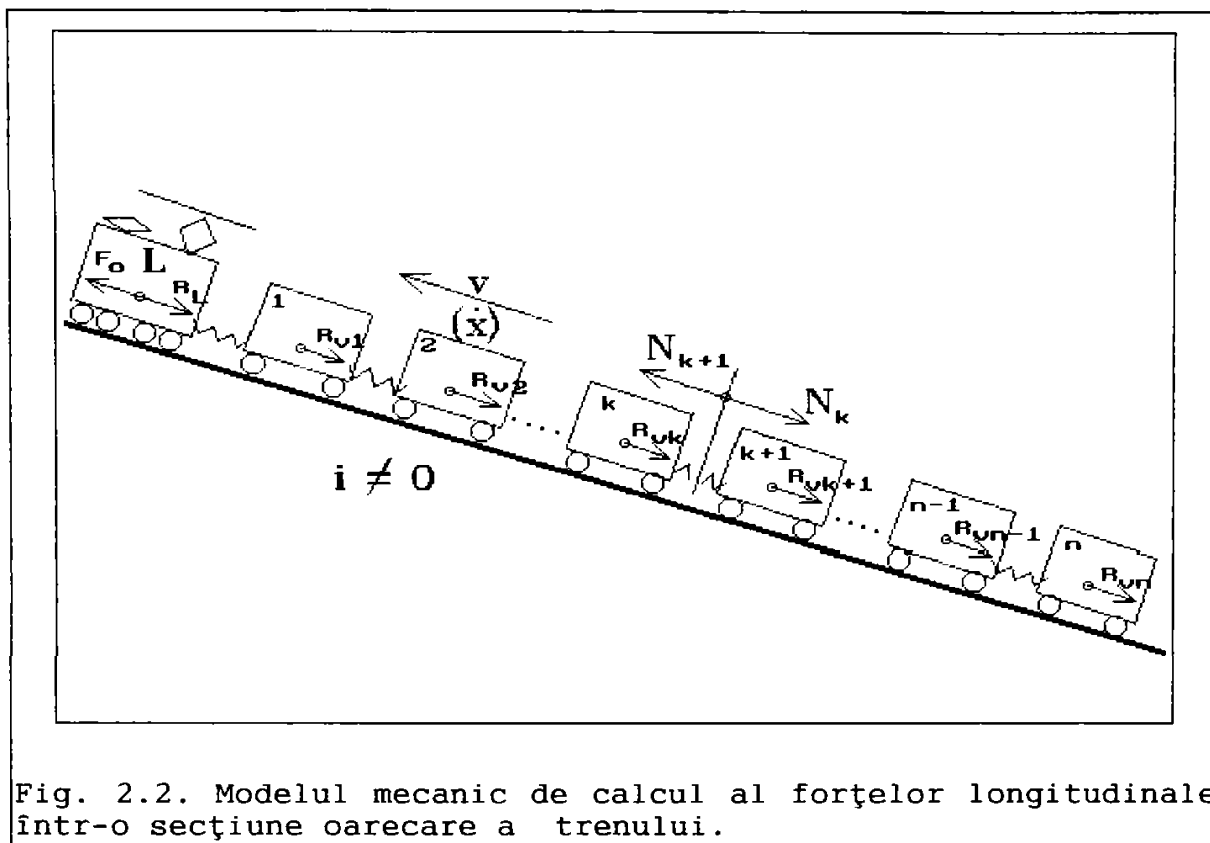
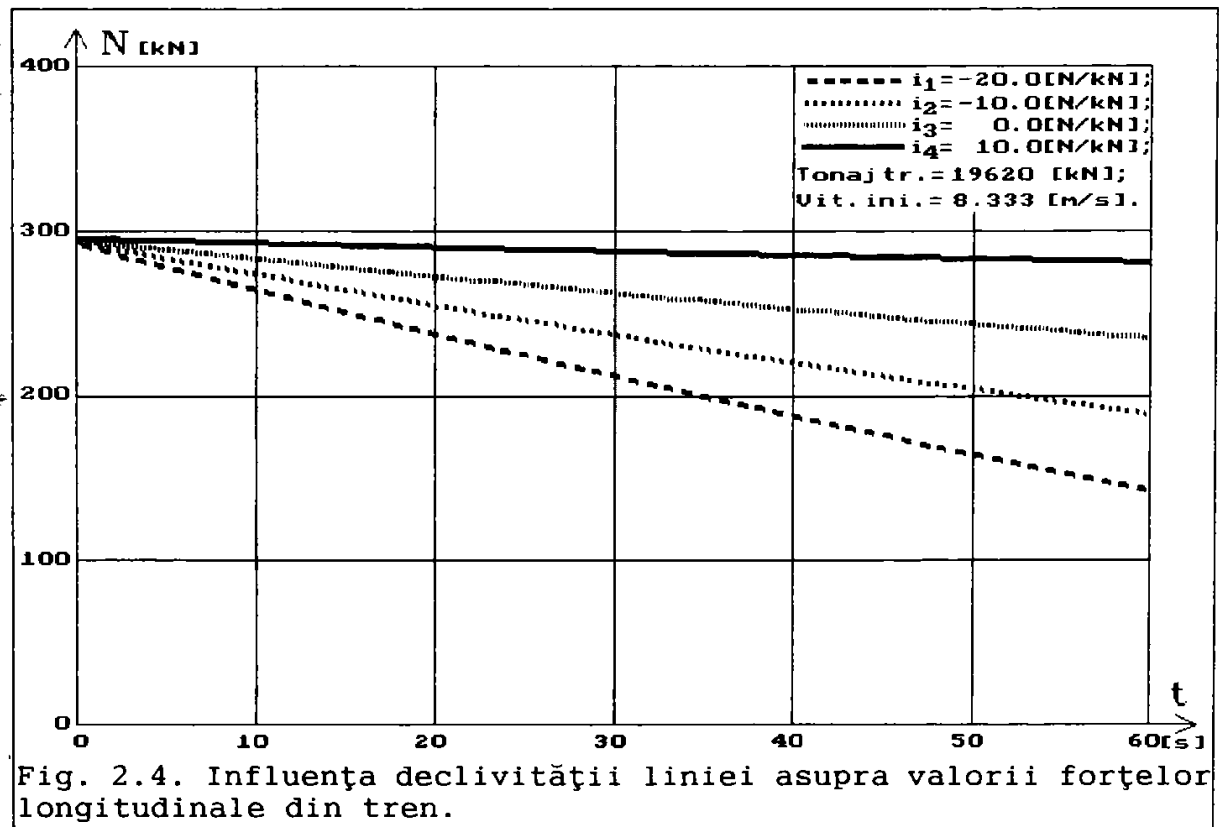
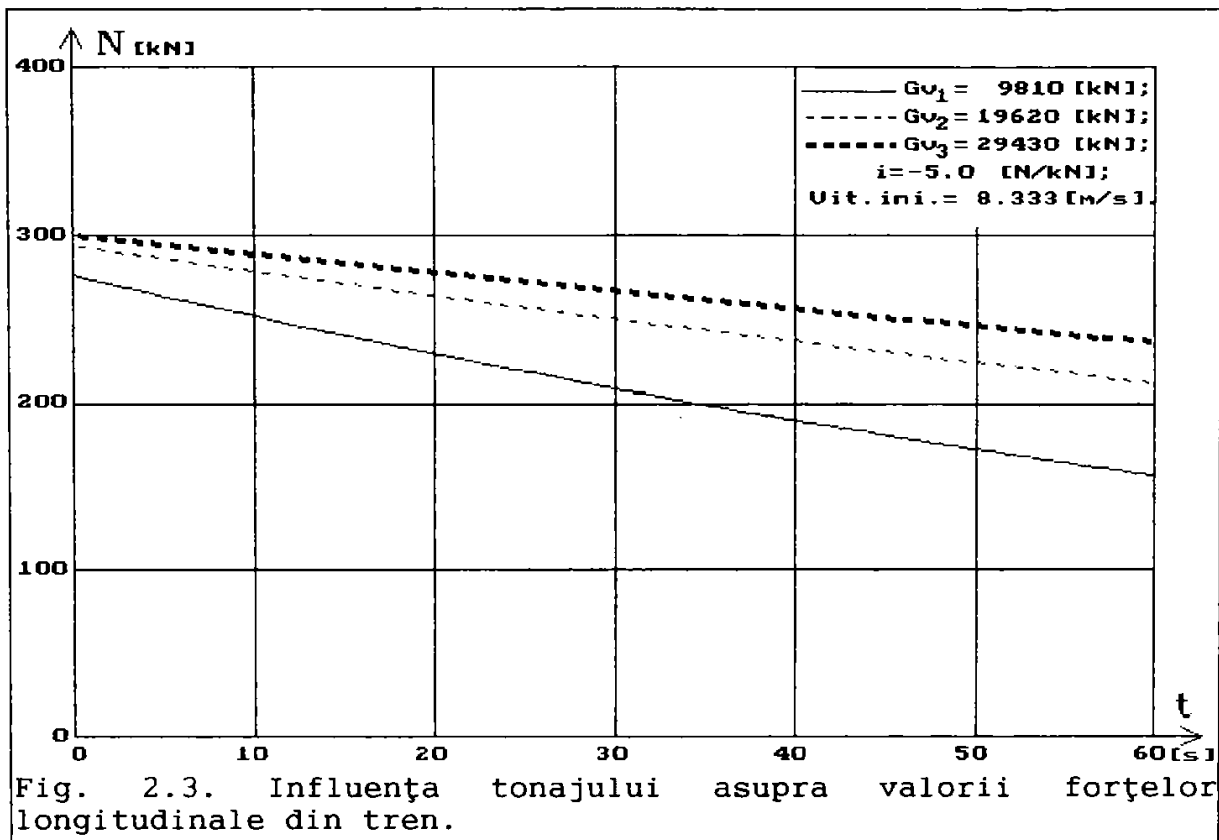


Fig. 2.2. Modelul mecanic de calcul al forțelor longitudinale într-o secțiune oarecare a trenului.

$$N_{k,k+1} = 1000 * \frac{dv}{dt} * \sum_{j=k+1}^n (1 + \gamma_{vj}) * \frac{G_{vj}}{g} + \sum_{j=k+1}^n (r_{ovj} + i) * G_{vj}. \quad (2.18.)$$

Primul termen al sumei din relația (2.18.) este forța de inerție a părții din spate a trenului, luată în considerare, accelerația $\frac{dv}{dt}$ fiind calculată cu ajutorul relației (2.16.), iar al doilea termen reprezintă rezistența la înaintare a aceleiași părți.

Pentru efectuarea calculelor de determinare a valorii forțelor longitudinale $N_{k,k+1}$, în baza relației (2.18.), pentru $k=1$, se consideră trenuri de marfă în compunere omogenă având tonaje cuprinse între 10 000 kN și 40 000 kN, care circulă pe linii de cale ferată, cu declivități între 20 N/kN și -20 N/kN, având vitezele de circulație între 2,777 m/s și 8,333 m/s, iar rezultatele simulărilor se prezintă pe figurile 2.3...2.8..



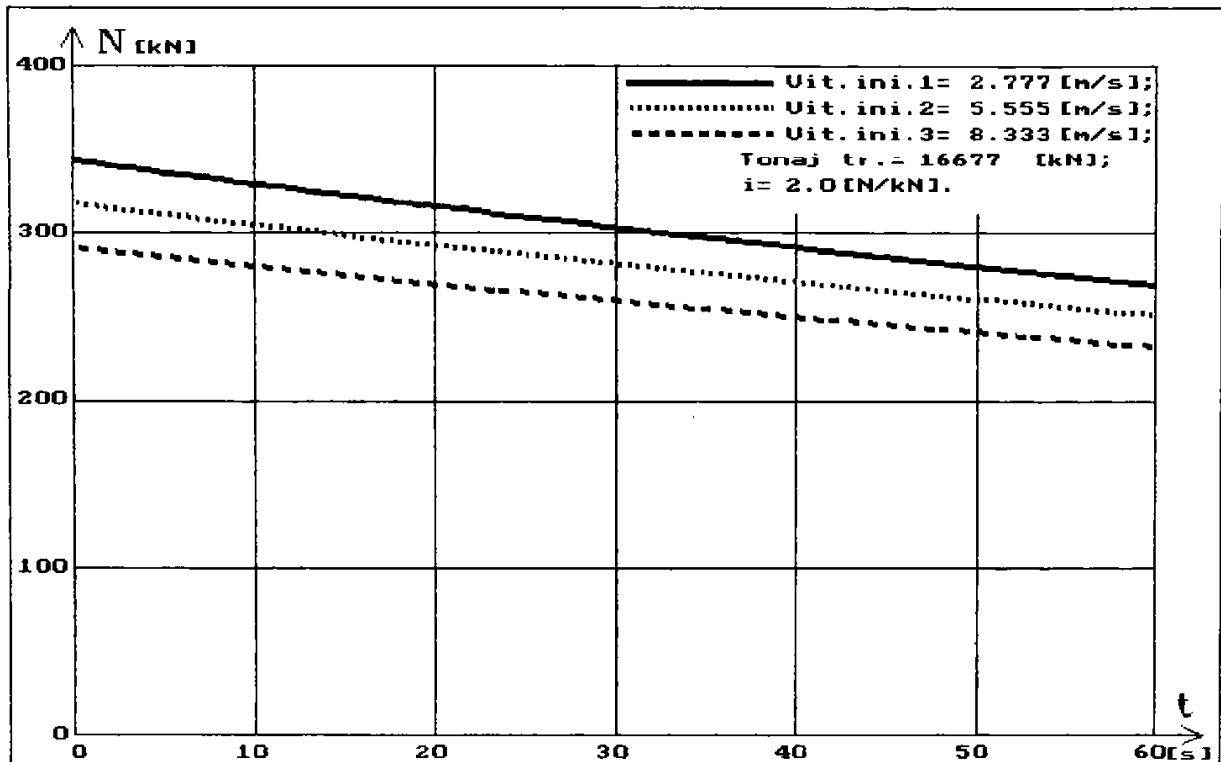


Fig. 2.5. Influența vitezei de circulație asupra valorii forțelor longitudinale din tren.

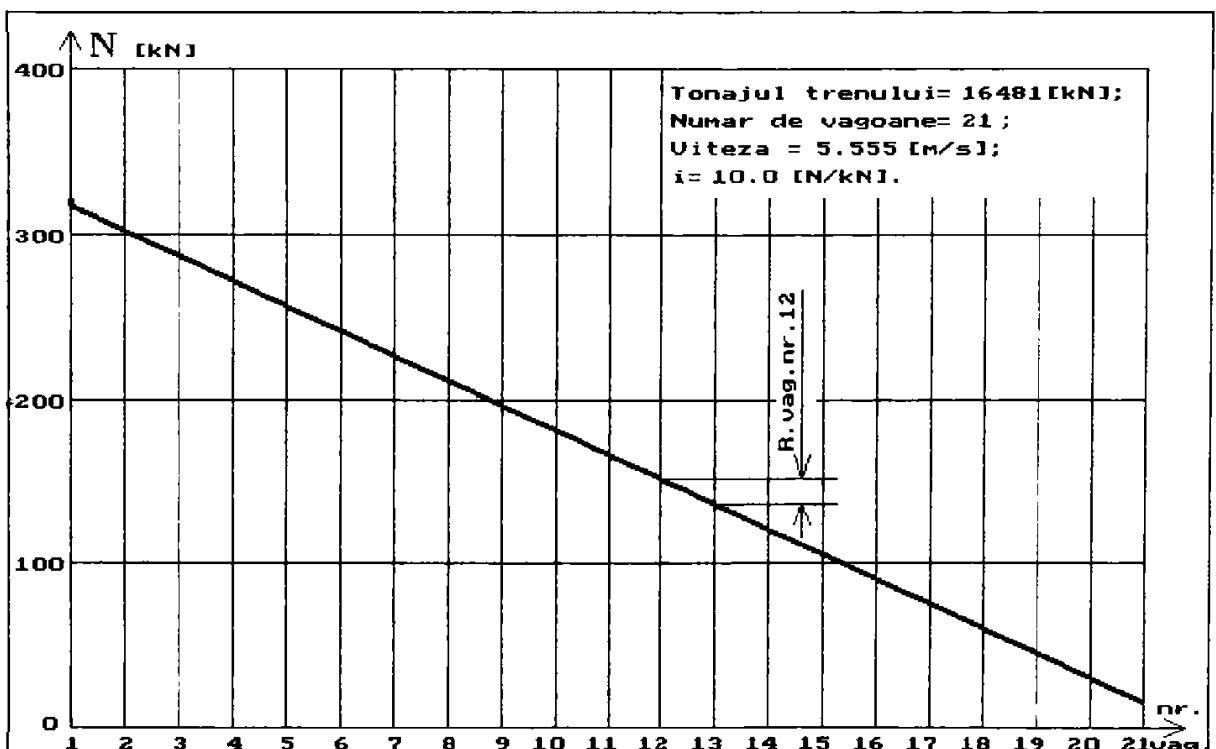
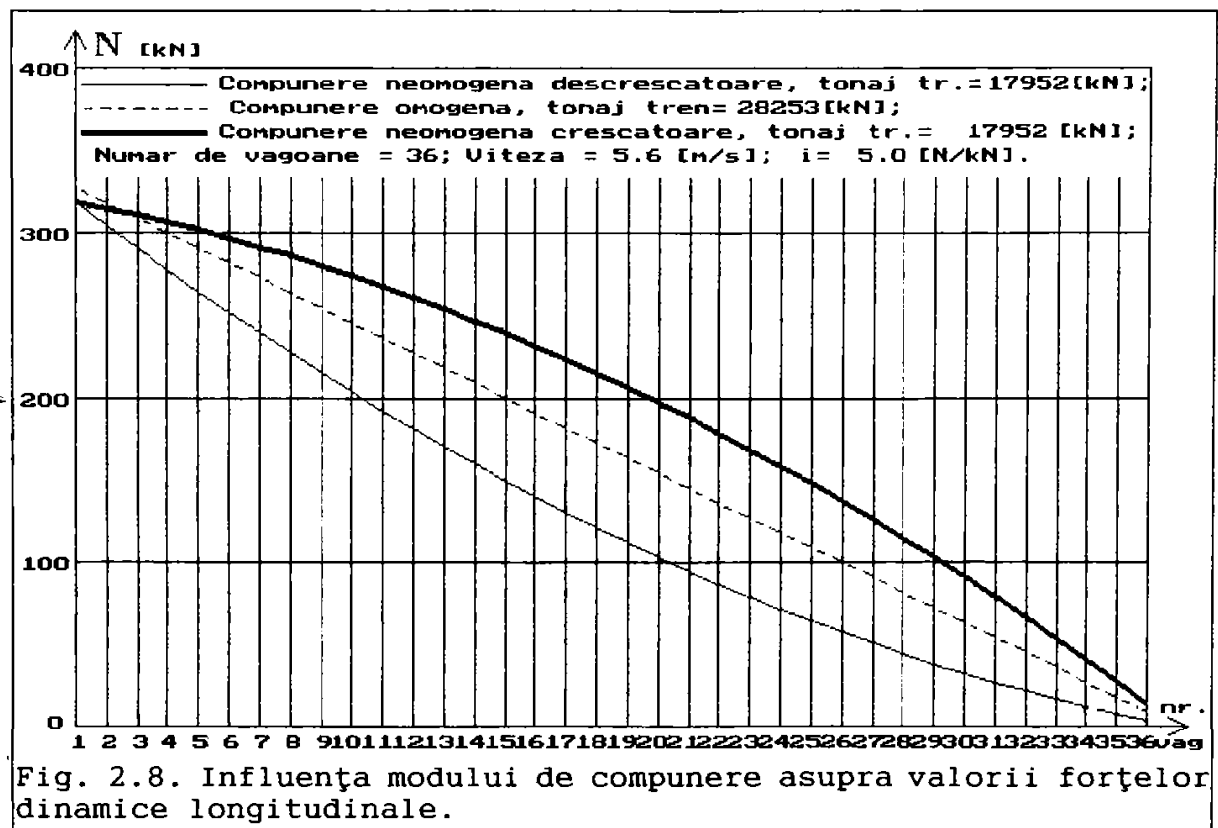
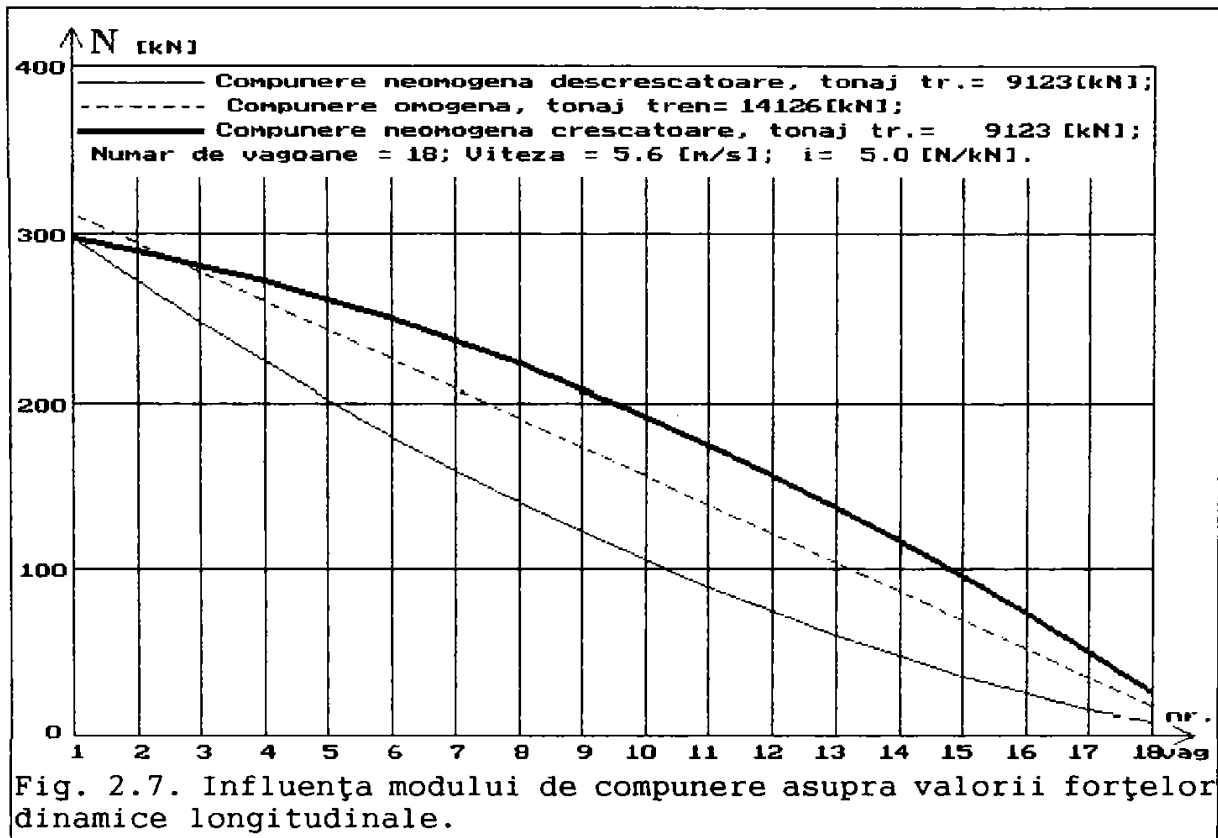


Fig. 2.6. Repartizarea forțelor longitudinale în lungul trenului.



Analizând rezultatele obținute în urma simulării circulației trenurilor în regim de mers permanent, efectuate pe calculator se pot trage următoarele concluzii:

-oricare ar fi categoria trenului, în timpul circulației acestuia cu locomotiva funcționând în regim de tracțiune, în aparatele de tracțiune ale vehiculelor apar forțe longitudinale de întindere;

- valorile acestor forțe longitudinale din aparatele de tracțiune cresc odată cu creșterea tonajelor trenurilor remorcate, fig. 2.3.;

-de asemenea, valorile acestor forțe cresc odată cu creșterea valorii rezistențelor datorate declivităților, fig. 2.4.;

-odată cu scăderea vitezei de circulație, valorile forțelor longitudinale de întindere se modifică, fig. 2.5.;

-pentru un caz dat, cea mai mare valoare a forțelor longitudinale de întindere se observă în aparatul de legare dintre locomotivă și primul vagon din tren, fig. 2.6.;

-tot pentru un caz dat, valorile forțelor longitudinale de întindere scad în lungul trenului începând dinspre capul trenului, de la un vagon la următorul, cu o valoare egală cu rezistența totală la înaintare a vagonului respectiv, fig. 2.6.;

-forțele dinamice longitudinale ce acționează în zona de mijloc a trenului depind și de modul de compunere al trenului, fig. 2.7. și fig.2.8.. În cazul în care trenul este compus neomogen, astfel încât greutatea vagoanelor să scadă continuu de la capul spre urma trenului (caz ideal), forțele longitudinale din zona de mijloc, sunt mai mici cu circa 25% față de cazul în care trenul este compus astfel încât greutatea vagoanelor să varieze continuu, în sens crescător de la locomotivă spre partea de la urma trenului. Această diferență între valorile forțelor longitudinale din partea de mijloc a trenului, pentru cele două moduri de compunere diferite, crește odată cu creșterea tonajului trenului, fig. 2.7. și fig. 2.8.;

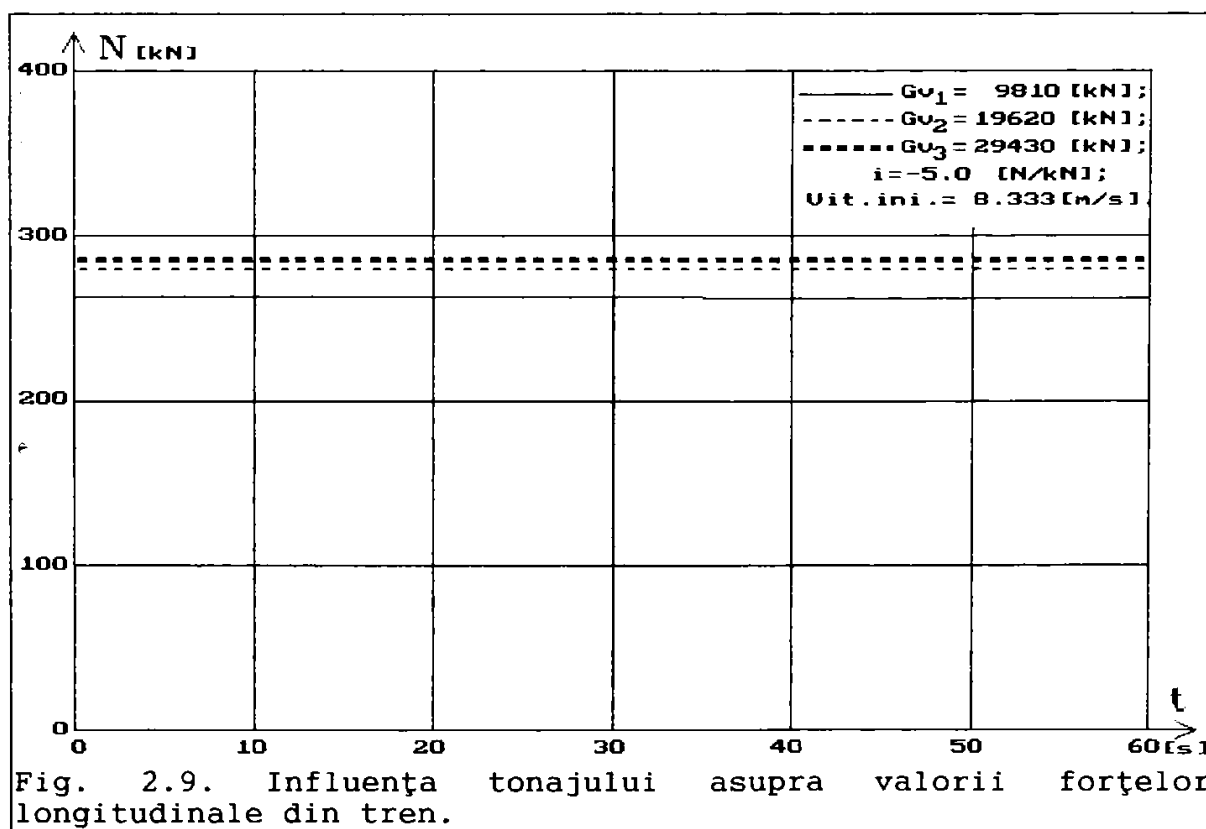
-totuși, chiar și în cea mai nefavorabilă situație dintre cele analizate, forța longitudinală de întindere maximă ce solicită aparatul de tracțiune dintre locomotivă și primul vagon din tren nu depășește sensibil forța maximă admisă în calculul de verificare (300 kN) al aparatelor de tracțiune ce echipează vagoanele de marfă din dotarea SNCFR, și nici forțele de probă

din timpul verificării pe stand a acestor aparate, fie ele noi sau reparate;

Pentru viteze de circulație în regim de mers permanent, mai mici de 11 m/s, în cazul în care se consideră forța de tracțiune dezvoltată de locomotivă, în perioada intervalului de observare a simulării (60 de secunde) ca fiind constantă și egală cu valoarea de 300.000 N, se obțin rezultatele prezentate pe figurile 2.9....2.14., iar din analiza și interpretarea acestora, rezultă în plus față de cele de mai sus, următoarele concluzii:

- mărimea forței longitudinale de întindere este maximă în aparatul de tracțiune dintre locomotivă și primul vagon, scăzând apoi spre urma trenului, de la un vagon la următorul cu o valoare egală cu rezistența la înaintare a vagonului respectiv, fig. 2.12.;

- forțele longitudinale de întindere ce acționează în aparatul de tracțiune dintre locomotivă și primul vagon rămân constante în timp, pe durata intervalului de observare, fig. 2.9., fig. 2.10. și fig. 2.11.;



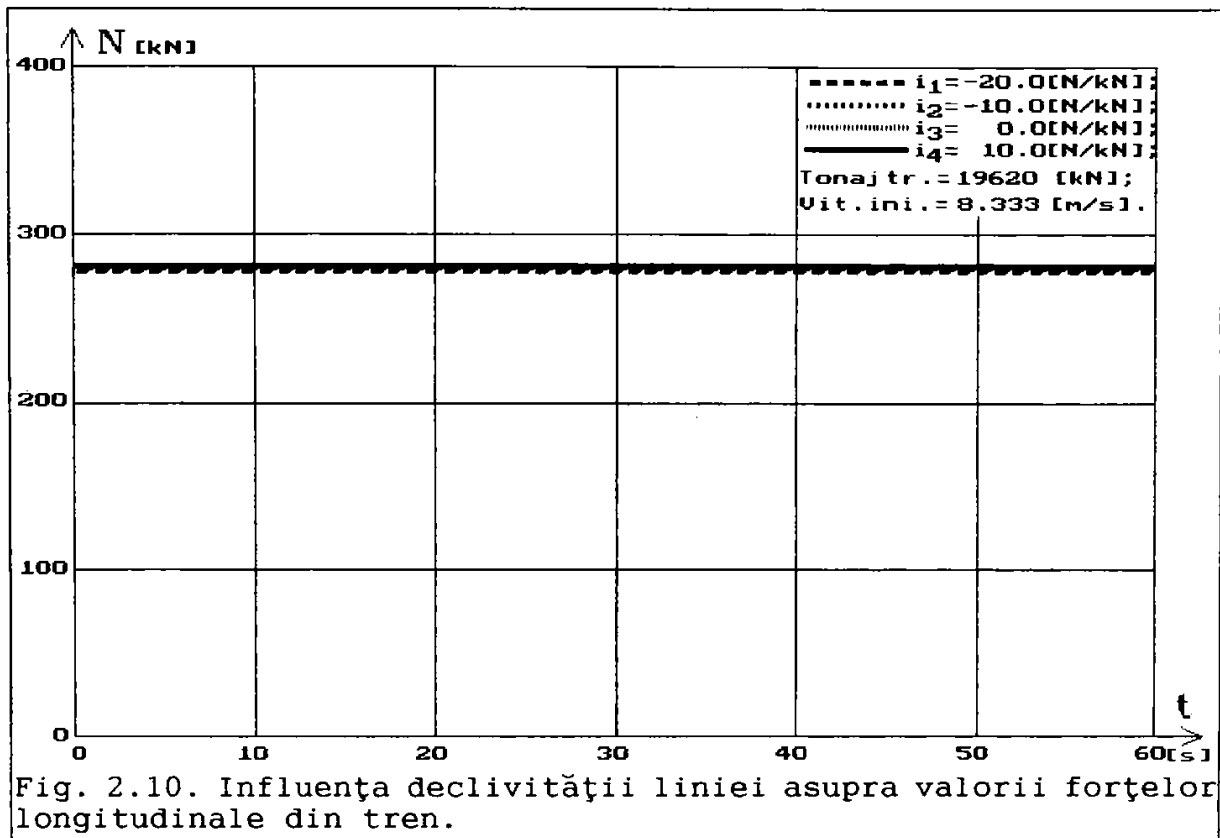


Fig. 2.10. Influența declivității liniei asupra valorii forțelor longitudinale din tren.

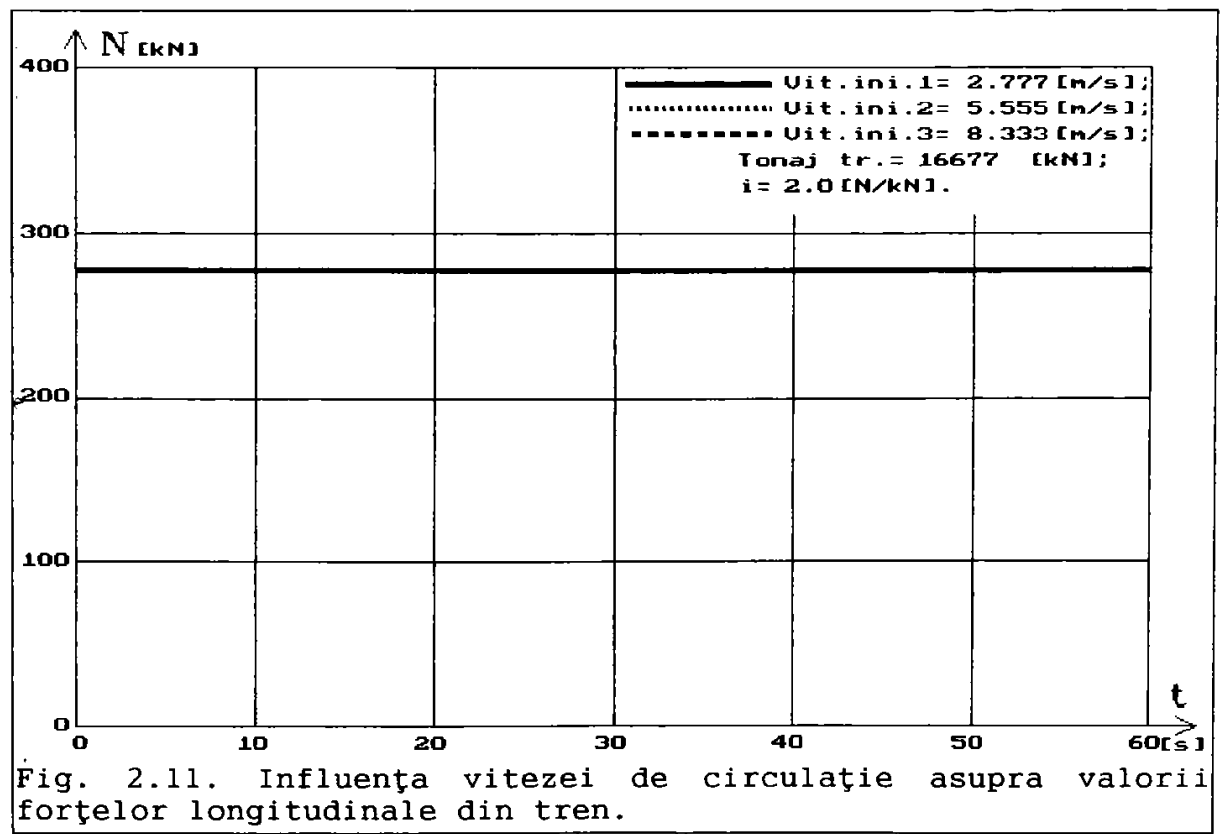
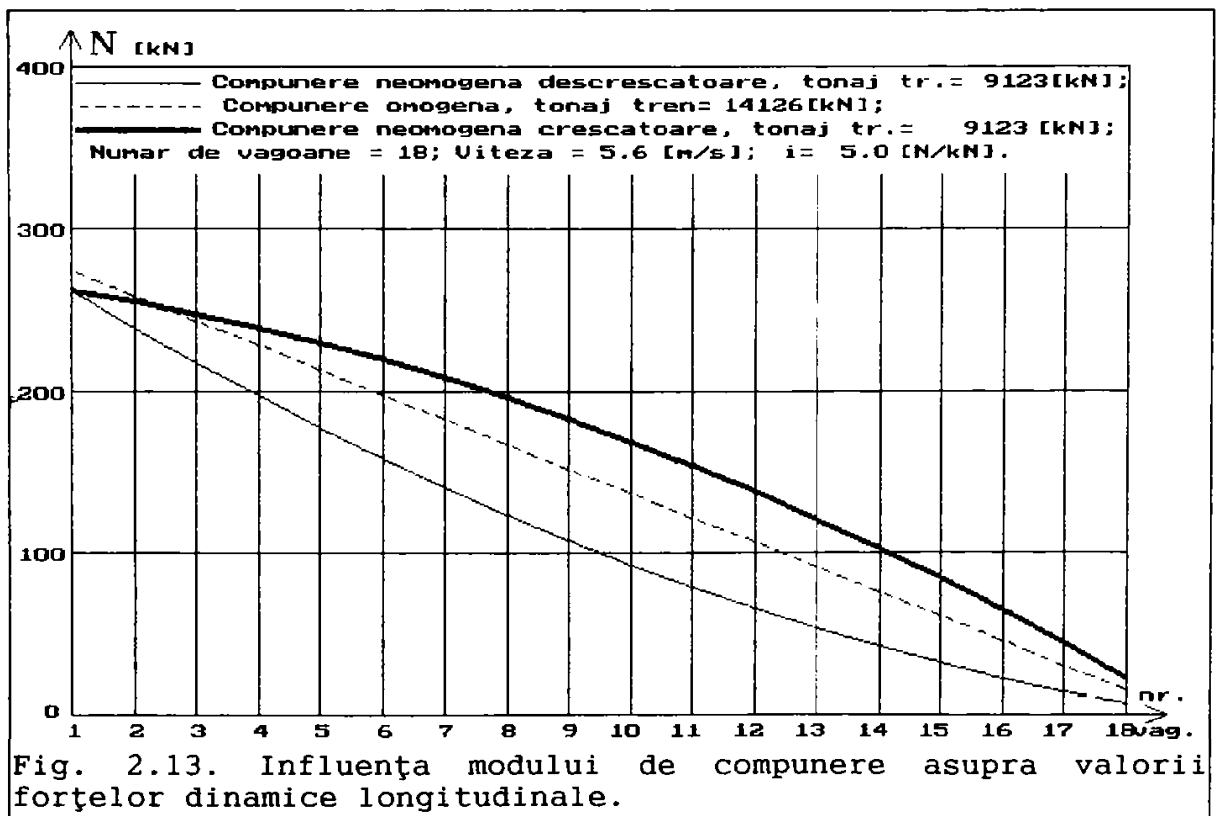
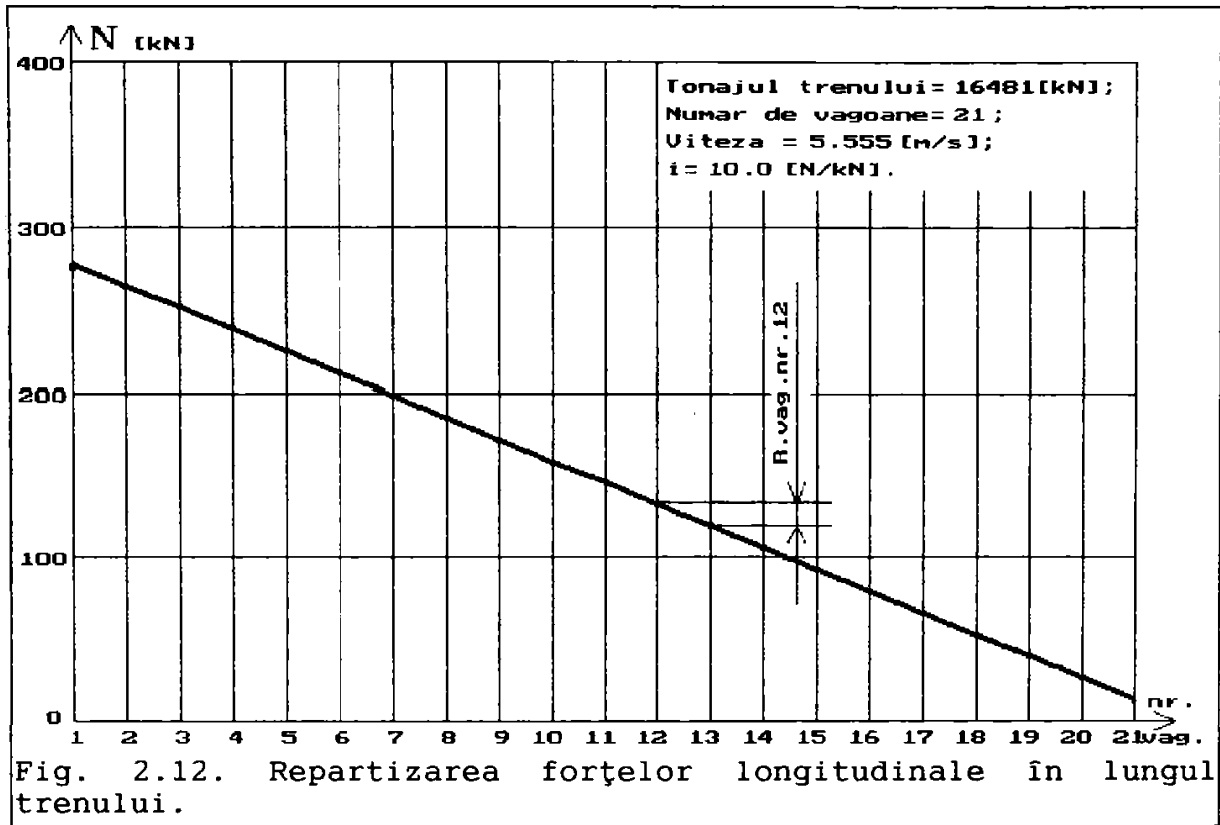
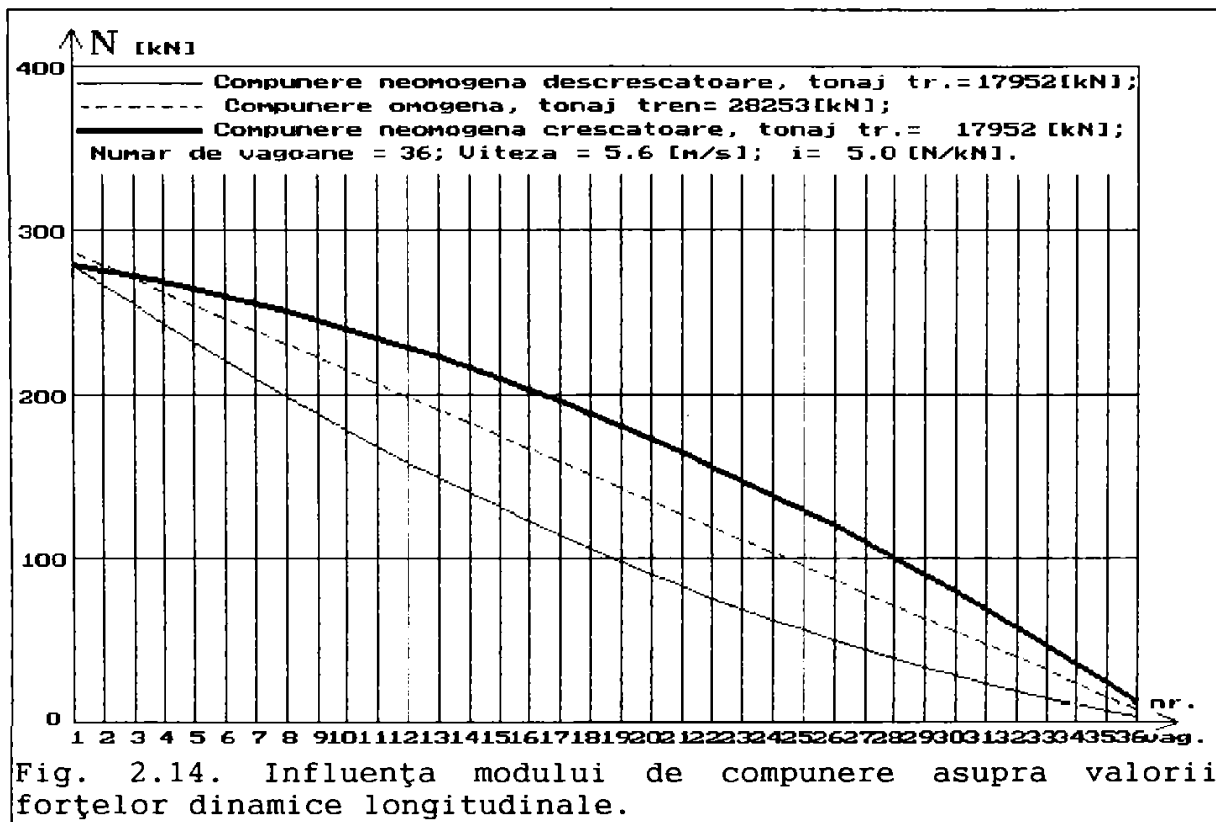


Fig. 2.11. Influența vitezei de circulație asupra valorii forțelor longitudinale din tren.





-mărimea acestor forțe longitudinale este direct proporțională cu tonajul trenului remorcat, fig. 2.9., dar nu depinde decât în mică măsură de mărimea declivității, fig. 2.10., respectiv nu depinde în mod semnificativ de viteza de circulație, fig. 2.11.;

-în mod asemănător cu situația în care s-a considerat că forța de tracțiune este o funcție de viteză la puterea unu, și în cazul în care se consideră că forța de tracțiune este constantă, modul de compunere al trenului, omogen sau neomogen descrescător, respectiv neomogen crescător influențează valoarea forțelor longitudinale de întindere din zona de mijloc a trenului. Astfel se mențin în general aceleași diferențe de circa 25% între valorile forțelor longitudinale din zona de mijloc, în funcție de modul de compunere, și de tonaj, fig. 2.13. și fig. 2.14..

-ca o concluzie generală, având în vedere cele arătate mai sus, ruperea aparatelor de legare și tracțiune în stare bună de funcționare nu se poate produce în timpul circulației trenului în regim de mers permanent. În cazul unor aparate de tracțiune având fisuri nedepistate în exploatare, se poate produce totuși adâncirea fisurii sau chiar ruperea acestora mai ales în cazul

circulației în regim de tracțiune la limita de aderență, a trenurilor de marfă grele.

2.3. CIRCULAȚIA TRENULUI PE UN PROFIL DE LINIE CU DECLIVITATE VARIABILĂ

În acest caz caracterul mișcării trenului, viteza și accelerația sa depind în mod esențial de profilul căii.

În condițiile reale ale exploatarei materialului rulant de cale ferată cele mai des întâlnite cazuri sunt acelea când în lungul trenului se află o singură frântură a profilului, adică trenul în mișcare, remorcat cu locomotiva funcționând în regim de tracțiune se dispune simultan pe două elemente de profil având declivități diferite, caz în care partea din față a trenului (de lungime x) se află pe un element de profil având declivitatea i_1 , iar partea de la urma trenului, având lungimea $l-x$ se află pe celălalt element de profil având declivitatea i_2 .

Situația luată în considerare se prezintă pe figura 2.15., în care s-a notat cu l (în metri) lungimea garniturii de vagoane, iar cu z_1 și z_2 s-au notat distanțele până la secțiunile curente de calcul a forțelor dinamice longitudinale.

Pentru cazul prezentat mai sus, atunci când locomotiva funcționează în regim de tracțiune se poate scrie:

$$F_o = R_L + R_{v1} + R_{v2}, \quad (2.19.)$$

sau

$$F_o = 1000 * (1 + \gamma_L) * \frac{G_L}{g} * \frac{dv}{dt} + (r_{oL} + i_1) * G_L + 1000 * (1 + \gamma_v) * \frac{G_v}{g} * \frac{x}{l} * \frac{dv}{dt} + (r_{ov} + i_1) * G_v * \frac{x}{l} + 1000 * (1 + \gamma_v) * \frac{G_v}{g} * \frac{l-x}{l} * \frac{dv}{dt} + (r_{ov} + i_2) * G_v * \frac{l-x}{l}, \quad (2.20.)$$

în care:

- R_{v1} și R_{v2} reprezintă rezistența totală la înaintare a primului grup de vagoane aflat pe declivitatea i_1 și respectiv rezistența totală la înaintare a celui de-al doilea grup de

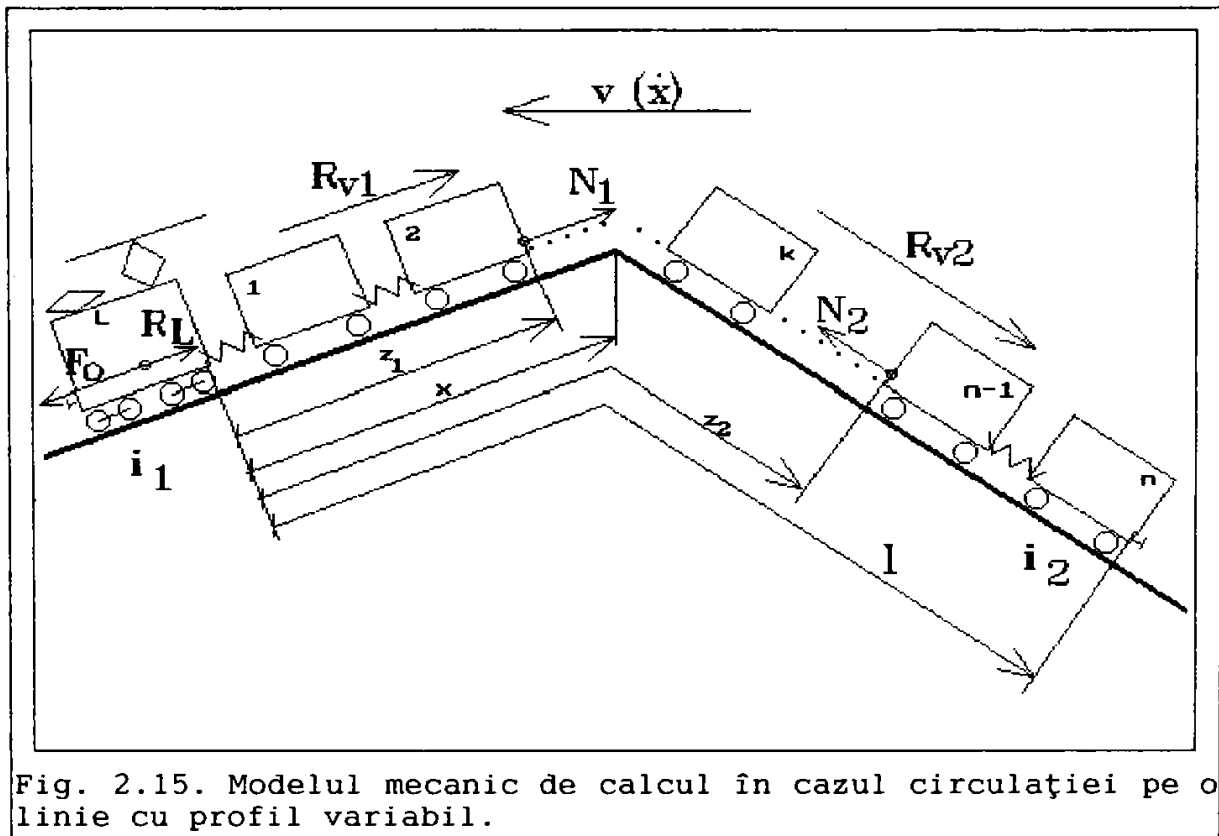


Fig. 2.15. Modelul mecanic de calcul în cazul circulației pe o linie cu profil variabil.

vagoane, aflat pe declivitatea i_2 , în N;

- $G_v \cdot \frac{x}{l}$ și $G_v \cdot \frac{l-x}{l}$ sunt greutatea primului grup de vagoane și respectiv al celui de-al doilea grup de vagoane, aflate pe declivitatea i_1 și respectiv i_2 , în kN.

Exprimând forța de tracțiune a locomotivei precum și rezistențele la înaintare prin relații de forma (2.4.) mișcarea trenului pe cale va fi descrisă de următoarea ecuație diferențială:

$$1000 \cdot \left[(1 + \gamma_L) \cdot \frac{G_L}{g} + (1 + \gamma_v) \cdot \frac{G_v}{g} \right] \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + (b_L \cdot G_L - B + b_v \cdot G_v) \cdot \frac{dx}{dt} + (i_1 - i_2) \cdot \frac{G_v}{l} \cdot x = A - a_L \cdot G_L - i_1 \cdot G_L - a_v \cdot G_v - i_2 \cdot G_v, \quad (2.21.)$$

sau:

$$\ddot{x} + K \cdot \dot{x} + L \cdot x = M, \quad (2.22.)$$

unde:

$$K = \frac{b_L \cdot G_L - B + b_v \cdot G_v}{1000 \cdot \left[(1 + \gamma_L) \cdot \frac{G_L}{g} + (1 + \gamma_v) \cdot \frac{G_v}{g} \right]}, \quad (2.23.)$$

$$L = \frac{(i_1 - i_2) * G_v}{1000 * I * [(1 + \gamma_r) * \frac{G_L}{g} + (1 + \gamma_v) * \frac{G_v}{g}]}, \quad (2.24.)$$

și

$$M = \frac{A - a_L * G_L - i_1 * G_L - a_v * G_v - i_2 * G_v}{1000 * [(1 + \gamma_r) * \frac{G_L}{g} + (1 + \gamma_v) * \frac{G_v}{g}]}. \quad (2.25.)$$

Pentru ecuația diferențială omogenă, corespunzătoare ecuației diferențiale (2.22.), ecuația caracteristică va fi:

$$I^2 + K * I + L = 0, \quad (2.26.)$$

având rădăcinile:

$$I_{1,2} = -\frac{K}{2} \pm \sqrt{\frac{K^2}{4} - L}. \quad (2.27.)$$

În cazul în care $\frac{K^2}{4} - L < 0$, rădăcinile ecuației (2.26.) sunt complex conjugate având forma:

$$I_{1,2} = \alpha \pm i * \beta, \quad (2.28.)$$

soluția ecuației diferențiale (2.22.) se determină cu relația:

$$x = e^{\alpha * t} * (C1 * \cos \beta * t + C2 * \sin \beta * t) + \frac{M}{L}. \quad (2.29.)$$

Viteza și accelerația corespunzătoare sunt:

$$\begin{aligned} \dot{x} = & \alpha * e^{\alpha * t} * (C1 * \cos \beta * t + C2 * \sin \beta * t) + \\ & + \beta * e^{\alpha * t} * (C2 * \cos \beta * t - C1 * \sin \beta * t), \end{aligned} \quad (2.30.)$$

$$\begin{aligned} \ddot{x} = & e^{\alpha * t} * (\alpha^2 - \beta^2) * (C1 * \cos \beta * t + C2 * \sin \beta * t) - \\ & - 2 * \alpha * \beta * e^{\alpha * t} * (C1 * \sin \beta * t - C2 * \cos \beta * t), \end{aligned} \quad (2.31)$$

unde C1 și C2 sunt constante de integrare ce se determină din condițiile inițiale, iar:

$$\alpha = -\frac{K}{2}, \quad (2.32.)$$

și

$$\beta = \sqrt{\frac{K^2}{4} - L}. \quad (2.33.)$$

Pentru următoarele condiții inițiale:

$$t=0, \quad x=x_0 \quad \text{și} \quad \dot{x}=\dot{x}_0=v_0, \quad (2.34.)$$

se obține:

$$C1=x_0-\frac{M}{L}, \quad (2.35.)$$

$$C2=\frac{\dot{x}_0}{\beta}-\frac{\alpha}{\beta}*(x_0-\frac{M}{L}), \quad (2.36.)$$

și

$$x=e^{\alpha*t}*\left\{(x_0-\frac{M}{L})*\cos\beta*t+[\frac{\dot{x}_0}{\beta}-\frac{\alpha}{\beta}*(x_0-\frac{M}{L})]*\sin\beta*t\right\}+\frac{M}{L}, \quad (2.37.)$$

În mod corespunzător viteza și accelerația trenului vor fi :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \alpha * e^{\alpha*t} * \left\{ (x_0 - \frac{M}{L}) * \cos\beta*t + [\frac{\dot{x}_0}{\beta} - \frac{\alpha}{\beta} * (x_0 - \frac{M}{L})] * \sin\beta*t \right\} + \\ &+ \beta * e^{\alpha*t} * \left\{ -(x_0 - \frac{M}{L}) * \sin\beta*t + [\frac{\dot{x}_0}{\beta} - \frac{\alpha}{\beta} * (x_0 - \frac{M}{L})] * \cos\beta*t \right\}, \end{aligned} \quad (2.38.)$$

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= (\alpha^2 - \beta^2) * e^{\alpha*t} * \left\{ (x_0 - \frac{M}{L}) * \cos\beta*t + [\frac{\dot{x}_0}{\beta} - \frac{\alpha}{\beta} * (x_0 - \frac{M}{L})] * \sin\beta*t \right\} - \\ &- 2 * \alpha * \beta * e^{\alpha*t} * \left\{ (x_0 - \frac{M}{L}) * \sin\beta*t - [\frac{\dot{x}_0}{\beta} - \frac{\alpha}{\beta} * (x_0 - \frac{M}{L})] * \cos\beta*t \right\}. \end{aligned} \quad (2.39.)$$

În cazul în care $\frac{K^2}{4} - L > 0$, rădăcinile ecuației caracteristice (2.26.) sunt reale având forma:

$$r_{1,2} = \alpha \pm \beta, \quad (2.40.)$$

unde:

$$\alpha = -\frac{K}{2},$$

și

$$\beta = \sqrt{\frac{K^2}{4} - L},$$

soluția ecuației diferențiale (2.22.) se va determina cu relația:

$$x = C1 * e^{r_1*t} + C2 * e^{r_2*t} + \frac{M}{L}. \quad (2.41.)$$

Valorile constantelor de integrare C1 și C2, pentru aceleași condiții inițiale (2.34.) vor fi:

$$C1 = \frac{\dot{x}_0}{r_1 - r_2} * \left[1 - \frac{r_2}{\dot{x}_0} * (x_0 - \frac{M}{L}) \right], \quad (2.42.)$$

și

$$C2 = -\frac{\dot{x}_o}{r_1 - r_2} * [1 - \frac{r_1}{\dot{x}_o} * (x_o - \frac{M}{L})] . \quad (2.43.)$$

Deci, în acest caz soluția ecuației diferențiale (2.22.) va fi:

$$x = \frac{\dot{x}_o}{r_1 - r_2} * [1 - \frac{r_2}{\dot{x}_o} * (x_o - \frac{M}{L})] * e^{r_1 * t} - \frac{\dot{x}_o}{r_1 - r_2} * [1 - \frac{r_1}{\dot{x}_o} * (x_o - \frac{M}{L})] * e^{r_2 * t} + \frac{M}{L}, \quad (2.44.)$$

iar viteza și accelerația trenului, în mod corespunzător vor fi:

$$\dot{x} = \frac{r_1 * \dot{x}_o}{r_1 - r_2} * [1 - \frac{r_2}{\dot{x}_o} * (x_o - \frac{M}{L})] * e^{r_1 * t} - \frac{r_2 * \dot{x}_o}{r_1 - r_2} * [1 - \frac{r_1}{\dot{x}_o} * (x_o - \frac{M}{L})] * e^{r_2 * t}, \quad (2.45.)$$

și

$$\ddot{x} = \frac{r_1^2 * \dot{x}_o}{r_1 - r_2} * [1 - \frac{r_2}{\dot{x}_o} * (x_o - \frac{M}{L})] * e^{r_1 * t} - \frac{r_2^2 * \dot{x}_o}{r_1 - r_2} * [1 - \frac{r_1}{\dot{x}_o} * (x_o - \frac{M}{L})] * e^{r_2 * t}. \quad (2.46.)$$

Pentru stabilirea relației de determinare a valorii forțelor longitudinale dintre vagoane se consideră cele două cazuri posibile și anume: cazul în care secțiunea unde se determină valoarea forțelor longitudinale se află în partea din față a trenului situată pe elementul de profil având declivitatea i_1 , adică cazul în care $z_1 < x$ și cazul în care aceeași secțiune se află în a doua parte a trenului situată pe elementul de profil având declivitatea i_2 , adică cazul în care $z_2 > x$.

Pentru cazul în care $z_1 < x$, ecuația de echilibru a părții studiate din tren având lungimea z_1 va fi:

$$1000 * [(1 + \gamma_L) * \frac{G_L}{g} + (1 + \gamma_v) * \frac{G_v}{g} * \frac{z_1}{l}] * \ddot{x} = F_o - N_1 - R_L - R_{v1}, \quad (2.47.)$$

de unde rezultă:

$$N_1 = F_o - R_L - R_{v1} - 1000 * [(1 + \gamma_L) * \frac{G_L}{g} + (1 + \gamma_v) * \frac{G_v}{g} * \frac{z_1}{l}] * \ddot{x}, \quad (2.48.)$$

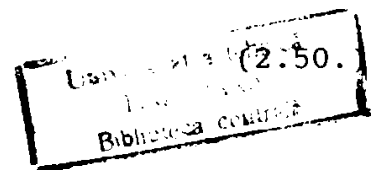
sau introducând notațiile:

$$C1 = -1000 * [(1 + \gamma_L) * \frac{G_L}{g} + (1 + \gamma_v) * \frac{G_v}{g} * \frac{z_1}{l}], \quad (2.49.)$$

$$D1 = B - b_L * G_L - b_v * G_v * \frac{z_1}{l},$$

și

$$E1 = A - (a_L + i_1) * G_L - (a_v + i_1) * G_v * \frac{z_1}{l}, \quad (2.51.)$$



se obține:

$$N_1 = C1 * \dot{x} + D1 * \ddot{x} + E1, \quad (2.52.)$$

în care \dot{x} și \ddot{x} sunt viteza și accelerația trenului la un anumit moment, determinate cu ajutorul relațiilor (2.38.) și (2.39.), respectiv (2.45.) și (2.46.).

Pentru cazul în care $z_2 > x$, ecuația de echilibru a părții de la urma trenului, având lungimea $l - z_2$ este:

$$1000 * (1 + \gamma_v) * \frac{G_v}{g} * \frac{l - z_2}{l} * \ddot{x} = N_2 - R_{v2}, \quad (2.53.)$$

și rezultă că:

$$N_2 = 1000 * (1 + \gamma_v) * \frac{G_v}{g} * \frac{l - z_2}{l} * \ddot{x} + R_{v2}. \quad (2.54.)$$

Introducând notațiile:

$$C2 = 1000 * (1 + \gamma_v) * \frac{G_v}{g} * \frac{l - z_2}{l}, \quad (2.55.)$$

$$D2 = b_v * G_v * \frac{l - z_2}{l}, \quad (2.56.)$$

și

$$E2 = (a_v + i_2) * G_v * \frac{l - z_2}{l}, \quad (2.57.)$$

se obține:

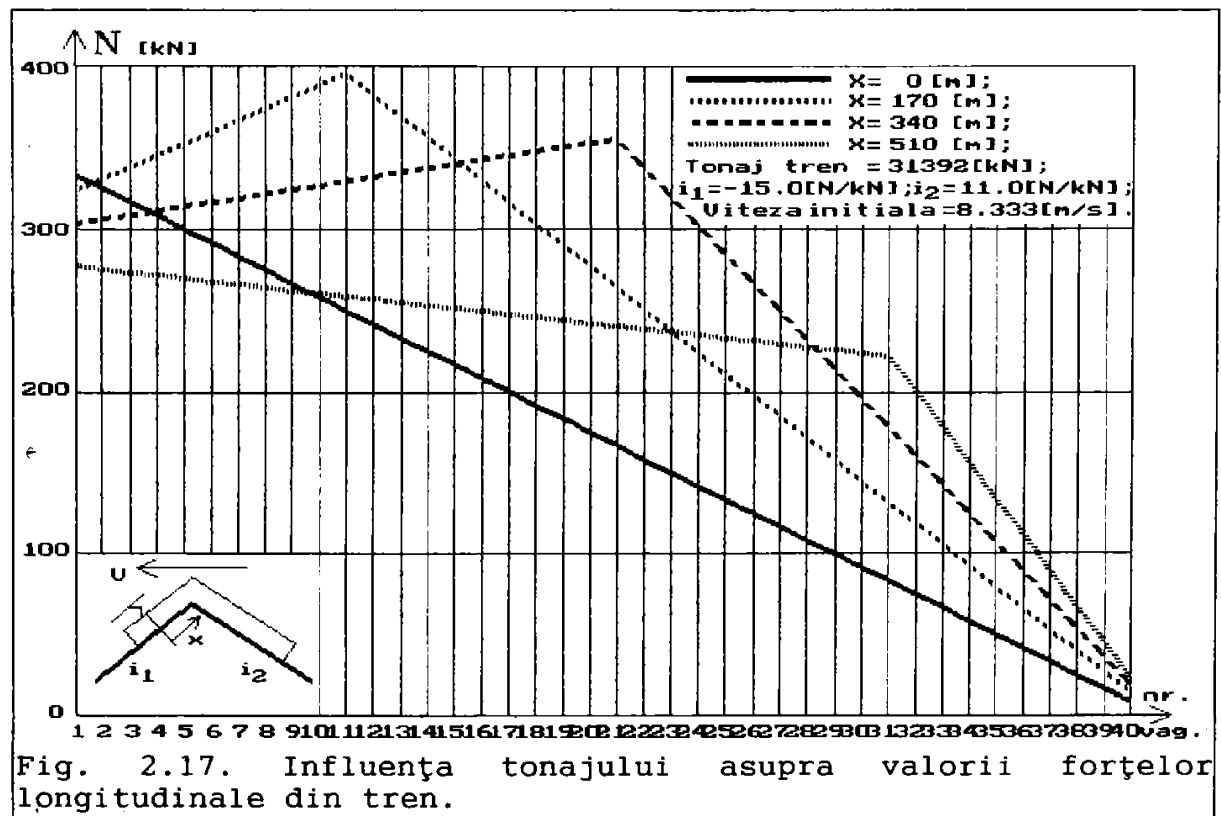
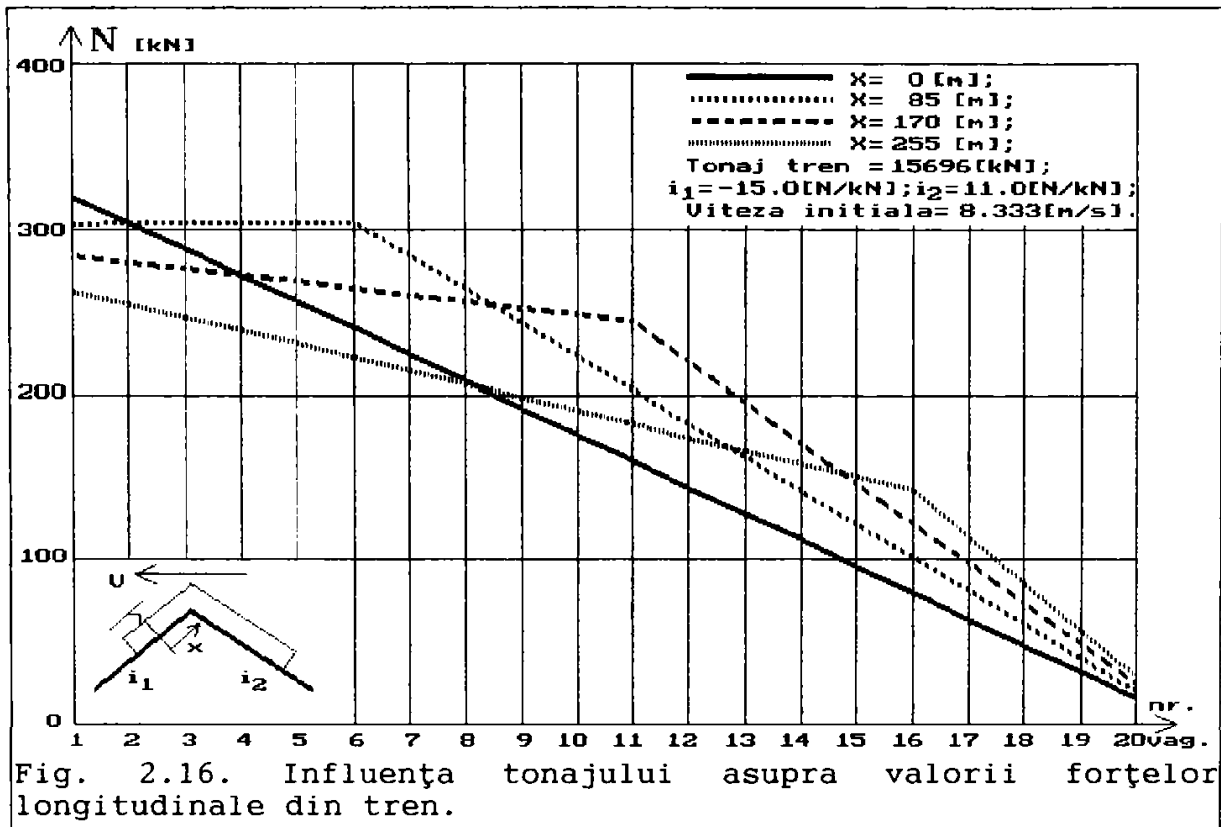
$$N_2 = C2 * \ddot{x} + D2 * \ddot{x} + E2, \quad (2.58.)$$

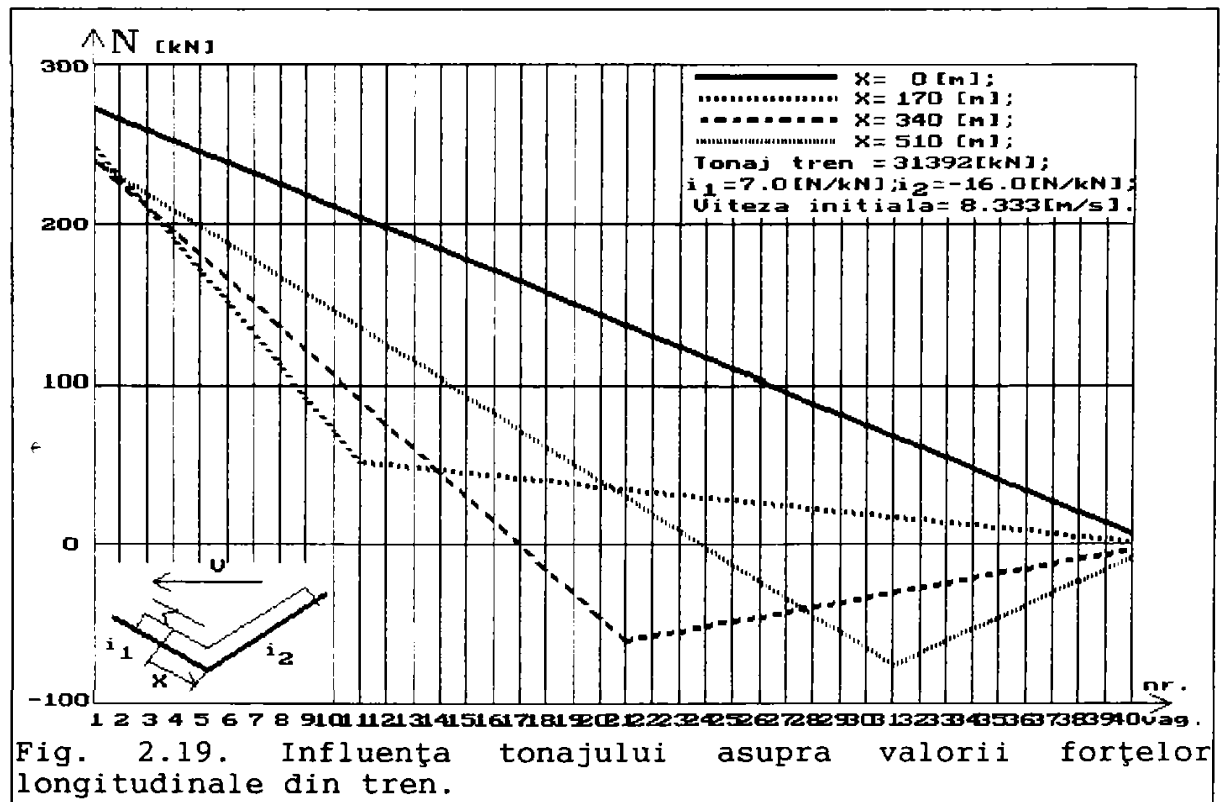
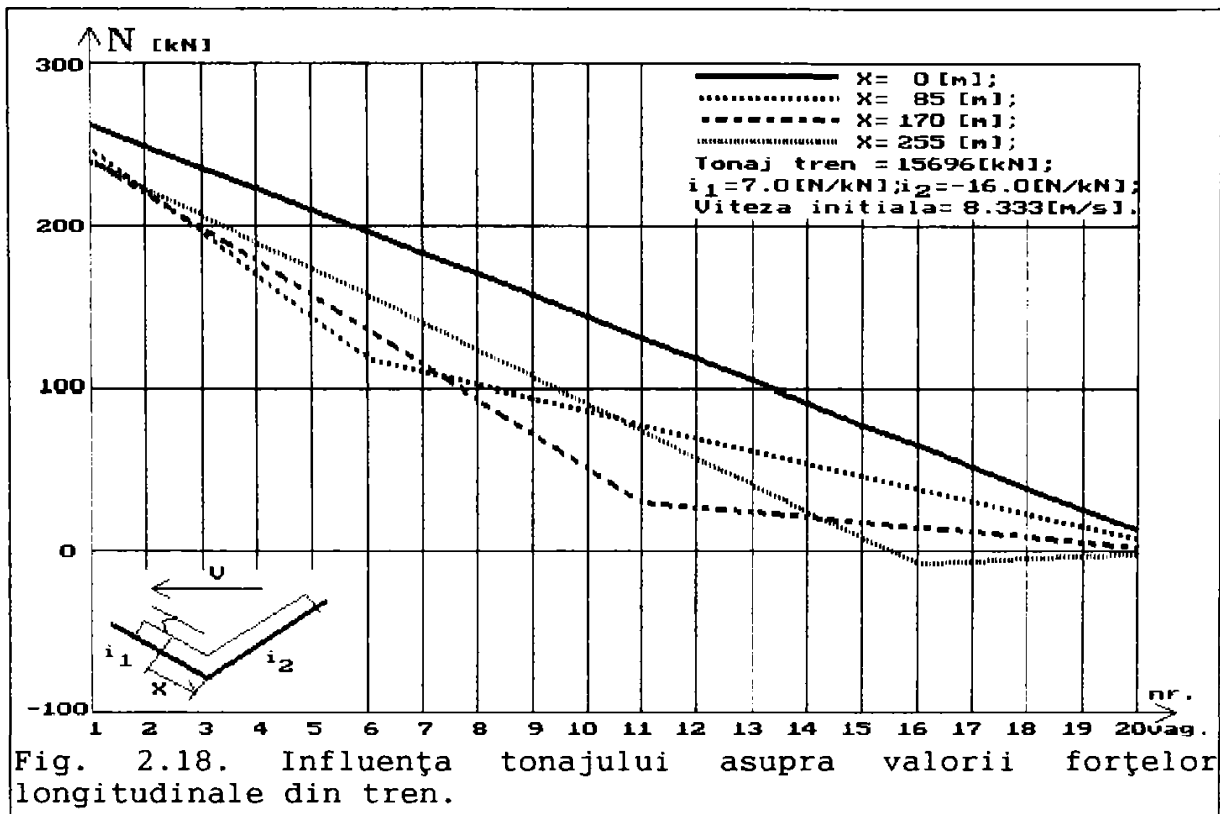
unde \dot{x} și \ddot{x} sunt viteza și accelerația trenului, determinate tot cu ajutorul relațiilor (2.38.) și (2.39.), respectiv (2.45.) și (2.46.).

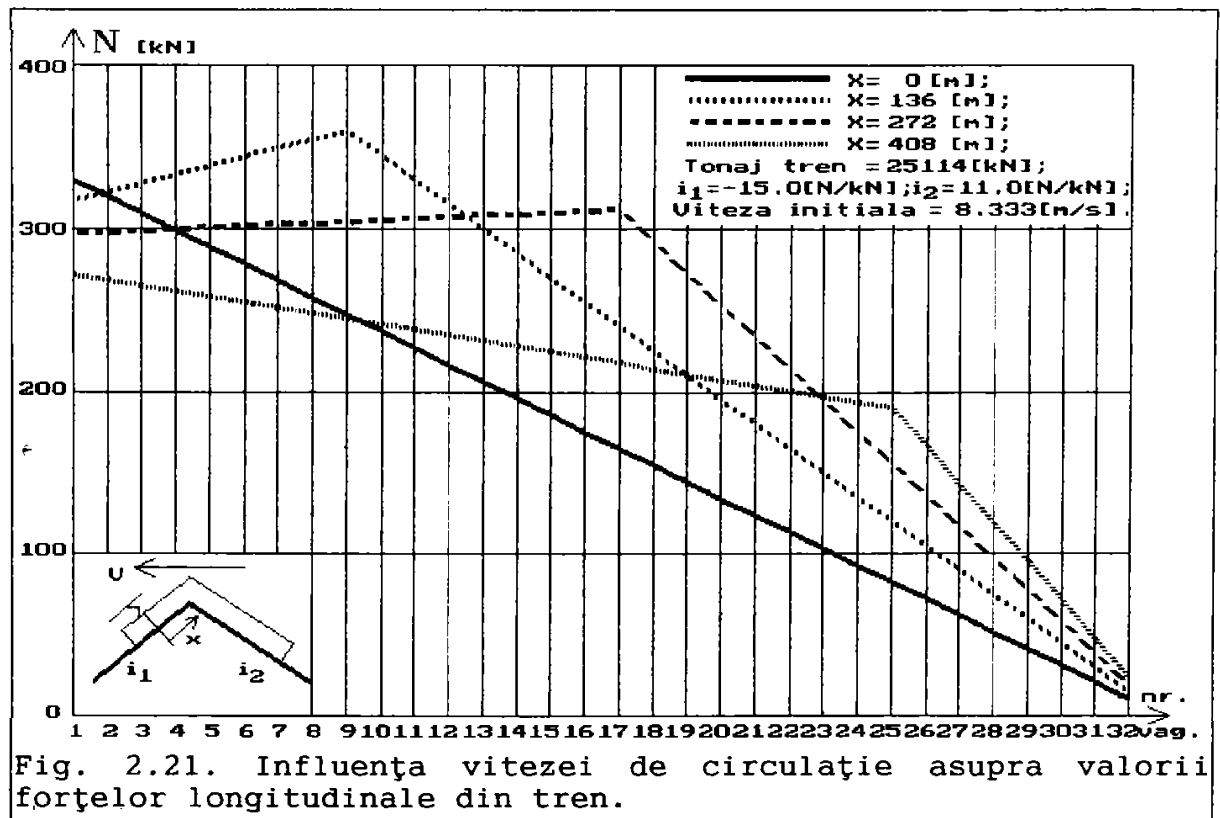
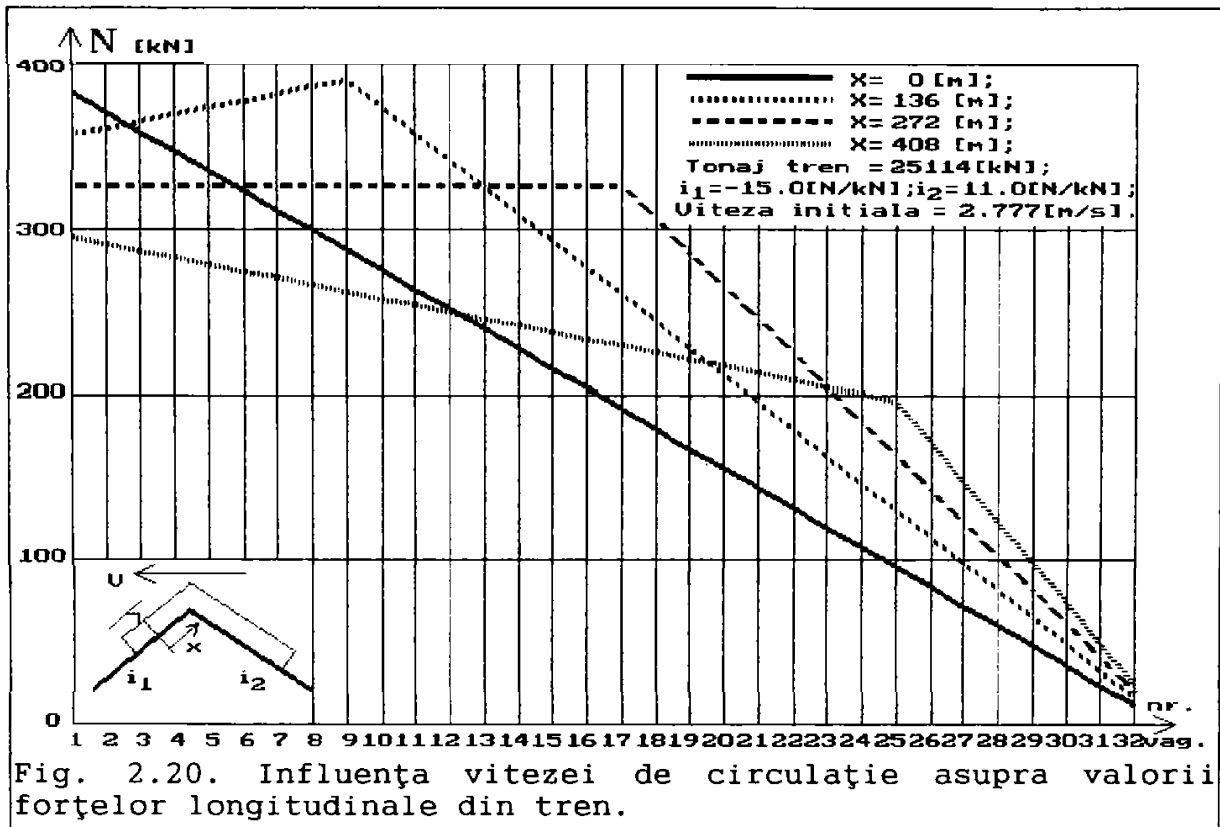
În scopul determinării sensului și valorilor forțelor longitudinale N_1 din prima parte și N_2 din partea a doua a trenului, precum și a distribuției acestora în lungul trenului se consideră în variantele combinate de calcul, simulare și studiu admise, trenuri omogene de marfă cu tonaje cuprinse între 10000 kN și 30000 kN, care circulă în regim de mers permanent cu viteze între 2,777 m/s și 8,333 m/s pe linii de cale ferată având profil variabil cu declivități cuprinse între 20 N/kN și -20 N/kN.

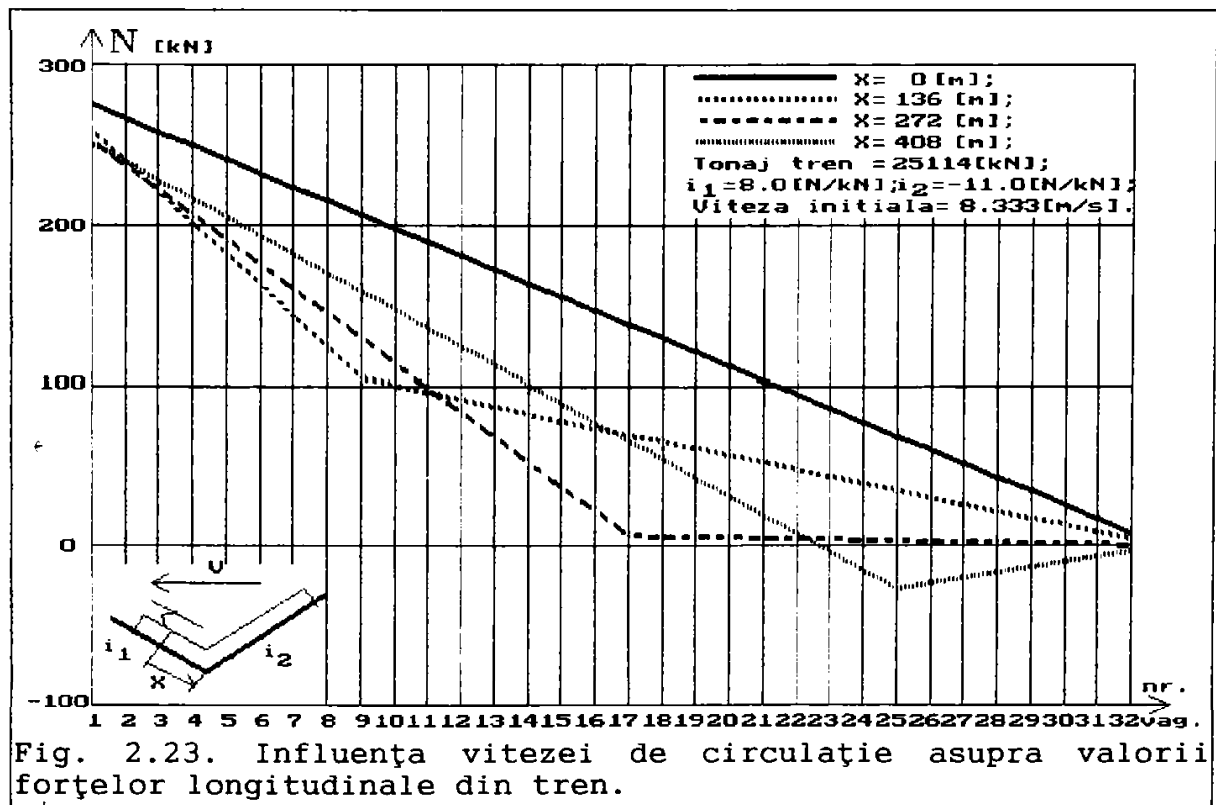
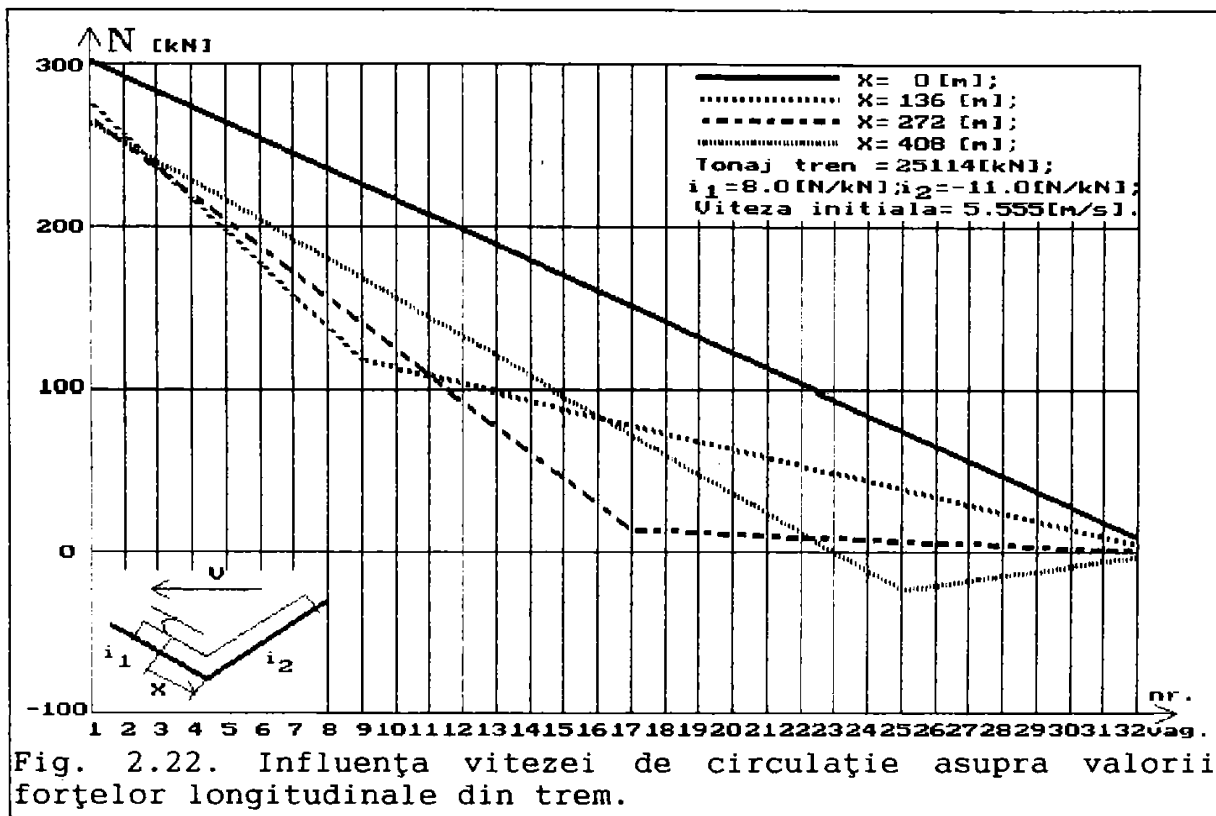
Rezultatele diferitelor variante de studiu simulate pe calculator [Anexa 1] se prezintă pe figurile 2.16...2.27., iar din analiza acestora se pot trage următoarele concluzii:

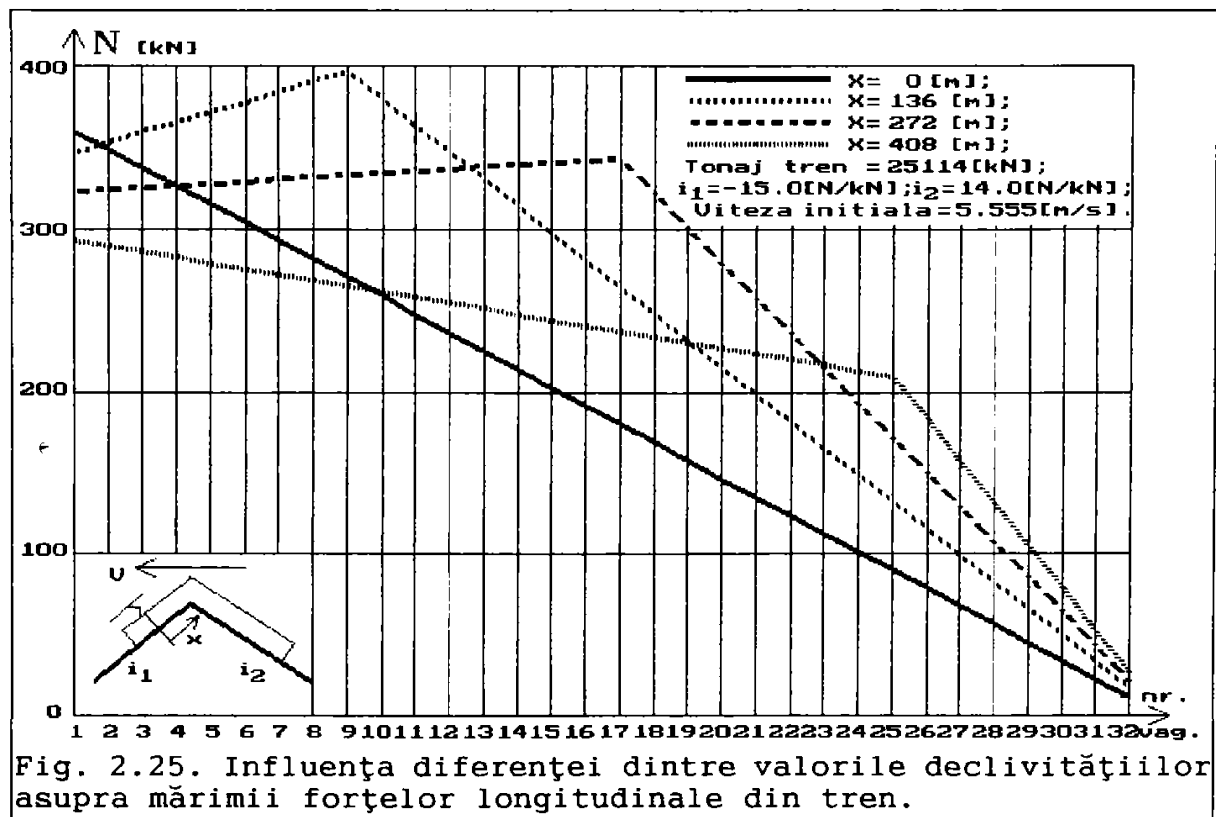
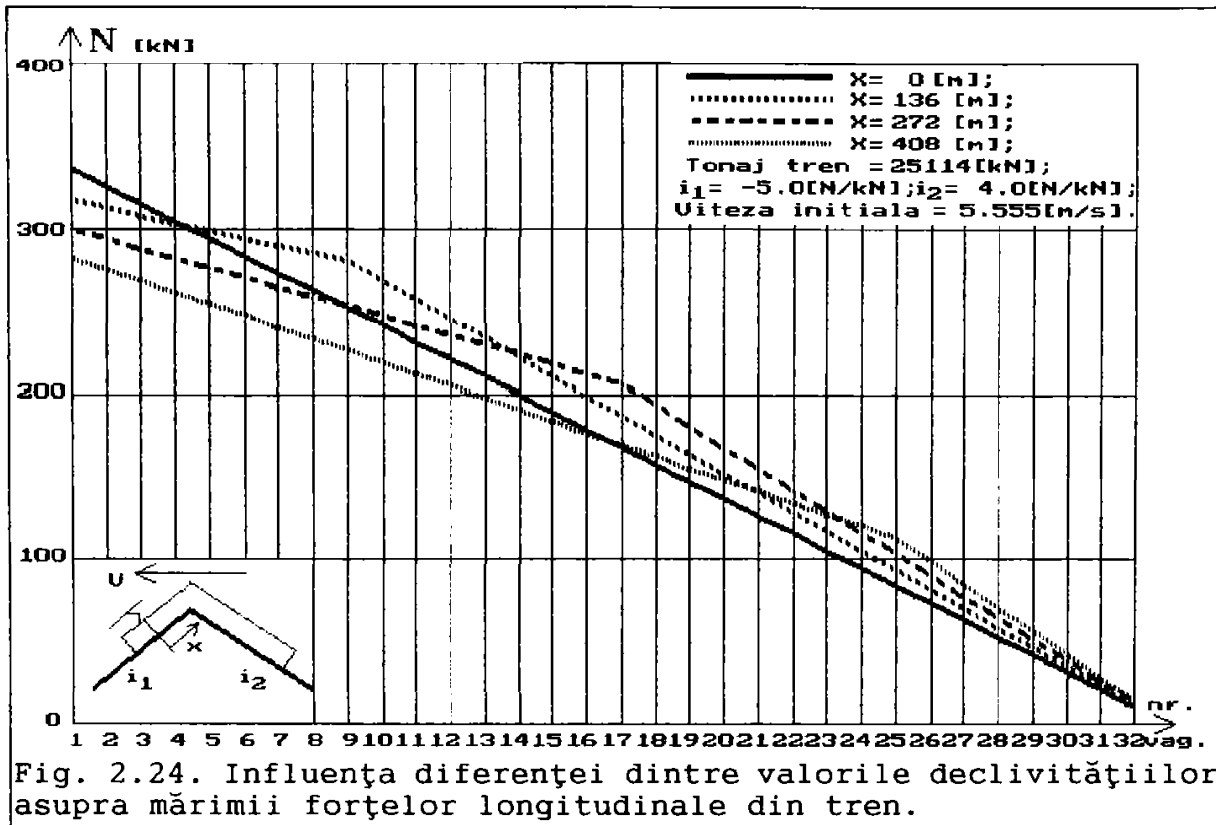
- și în cazul circulației trenului cu locomotiva funcționând în

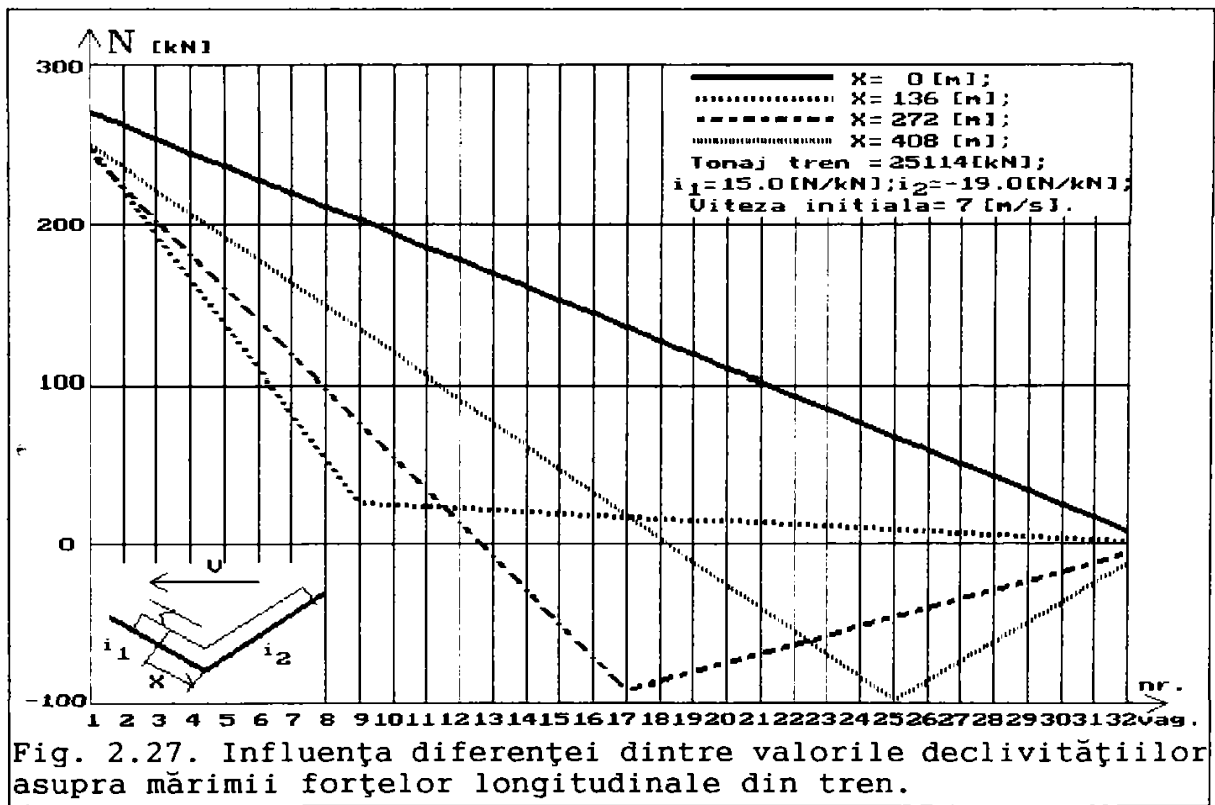
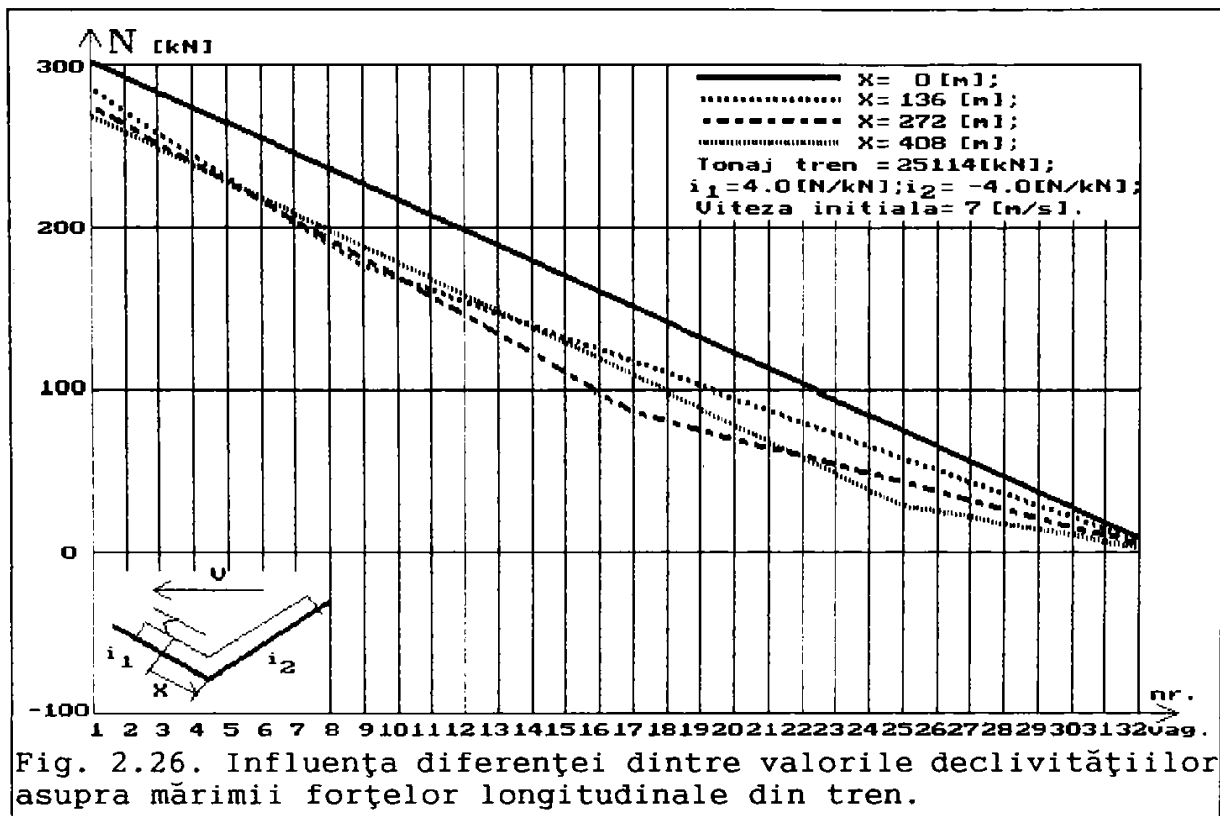












regim de tracțiune pe profile de linie cu declivitate variabilă, valorile forțelor longitudinale de întindere ce acționează în aparatele de tracțiune sunt direct proporționale cu tonajul trenului remorcat, fig. 2.16. și fig. 2.17., și respectiv fig.2.18. și fig. 2.19.;

- de asemenea, aceste forțe sunt invers proporționale cu viteza de circulație a trenului, fig. 2.20. și fig. 2.21., și respectiv fig. 2.22. și fig. 2.23.;

-Componenta greutatei celor două grupe de vehicule paralelă cu planul inclinat al declivităților, modifică modul de distribuție a forțelor dinamice longitudinale în lungul trenului, în sensul creșterii sau micșorării acestora. Ca urmare între vagoanele care trec peste locul de frântură al profilului apar forțe longitudinale suplimentare de întindere sau de compresiune care se adună sau se scad din forța principală de tracțiune, putând rezulta în anumite cazuri, atunci când frântura profilului este orientată cu vârful în jos, forțe longitudinale reale de comprimare în tren, cu toate că trenul circulă în regim de tracțiune. La rândul lor și aceste forțe de comprimare sunt direct proporționale cu tonajul trenului, fig. 2.18. și fig. 2.19., cu diferența dintre valorile celor două declivități și invers proporționale cu viteza de circulație, fig. 2.26. și fig. 2.27., și respectiv fig. 2.12. și fig. 2.13.. În cazul în care frântura dintre cele două elemente de profil cu declivități diferite, este orientată cu vârful în sus, iar diferența dintre valorile celor două declivități este suficient de mare, valoarea maximă a forței longitudinale de întindere nu mai acționează în aparatul de legare dintre locomotivă și primul vagon, ci în aparatul de legare dintre două vagoane alaturate, aflate în prima jumătate a trenului, în sensul de mers, fig. 2.17., fig. 2.21. și fig. 2.25.. În acest caz, valoarea maximă a forței longitudinale ce acționează în legătura dintre două vagoane, poate fi mai mare decât forța de tracțiune dezvoltată de locomotivă, cu până la 20%..30%, fig. 2.17., în funcție de viteza de circulație, tonajul trenului și nu în ultimul rând, în funcție de diferența dintre valorile celor două declivități ale frânturii, fig. 2.24. și fig. 2.25.;

-având în vedere cele de mai înainte, se poate concluziona că în cazul circulației trenurilor de marfă lungi și grele în regim

de mers permanent, remorcate cu locomotive electrice seria 060, ce funcționează în regim de tracțiune la limita de aderență, în situația în care trenul se afla pe un profil de linie cu declivitate variabilă, având frântura profilului orientată cu vârful în sus, atunci există teoretic posibilitatea apariției unor forțe longitudinale de întindere în aparatele de tracțiune ale vagoanelor din prima jumătate a trenului, a căror valoare să producă deformarea sau ruperea cârligului de tracțiune. În mod practic însă, trecerea de la o rampă la o pantă se face cu o anumită rază de racordare în plan vertical, a celor două elemente de profil, motiv pentru care forțele longitudinale reale din aparatele de tracțiune a două vagoane vecine, care trec peste locul de frântură a profilului, sunt mai mici decât cele rezultate din simulările pe calculator. Ca urmare, nici în cazul circulației trenurilor în regim de mers permanent pe un profil de linie cu declivitate variabilă, remorcate cu locomotiva funcționând în regim de tracțiune, nu se poate produce fisurarea sau ruperea aparatelor de tracțiune. Totuși dacă aceste aparate au fisuri inițiale, atunci există pericolul fie de adâncire a acestor fisuri, fie de rupere a elementului fisurat.

+

CAPITOLUL 3

FORȚELE DINAMICE LONGITUDINALE CE ACȚIONEAZĂ ÎN TIMPUL CIRCULAȚIEI TRENULUI ÎN REGIM DE MERS TRANZITORIU

3.1. GENERALITĂȚI

Oricare ar fi categoria trenului sau tonajul real, acesta poate circula pe calea ferată fie în regim de mers tranzitoriu, fie în regim de mers permanent, preponderent fiind acesta din urmă.

Regimul de mers tranzitoriu apare între două regimuri de mers permanente, fiind determinat de compunerea trenului, de condițiile inițiale, precum și de modul de variație în timp al forței de tracțiune, respectiv al forțelor de frânare.

În mod practic se poate considera că prima fază a demarajului (care durează până la punerea în mișcare a ultimului vagon din tren), precum și primele trei faze ale frânării trenului, aparțin regimului de mers tranzitoriu. În timpul circulației trenurilor în acest regim de mers, în tren se nasc perturbații complicate din cauza mișcărilor reciproce relative, suplimentare ale vagoanelor și ca urmare valorile momentane ale forțelor dinamice longitudinale ce solicită aparatele de tracțiune și/sau ciocnire variază în jurul valorilor corespunzătoare regimului de mers permanent și se sting treptat sub influența diferitelor rezistențe la mișcărilor relative ale vagoanelor.

În general în timpul circulației trenurilor pe calea ferată, asupra acestora acționează forța de tracțiune a locomotivei, forțele de rezistență ce se opun înaintării, forțele de frânare ale vehiculelor precum și reacțiunile dinamice longitudinale, acestea din urmă putând atinge valori mari, în fazele tranzitorii ale mișcării trenurilor lungi și grele.

3.2. FORȚELE DINAMICE LONGITUDINALE CE SE DEZVOLTĂ ÎN TIMPUL DEMARAJULUI TRENURILOR FORMATE DIN VAGOANE DE MARFĂ ÎNZESTRATE CU APARATE DE TRACȚIUNE DISCONTINUE CU ARCURI VOLUTE

3.2.1. NOȚIUNI GENERALE

În mod esențial problema demarajului unui tren oarecare, de călători sau marfă, se reduce la problema punerii în mișcare a unui

anumit număr de mase concentrate legate elastic între ele. În cele mai multe cazuri punerea în mișcare a elementelor componente ale trenului se face în mod succesiv, unul după altul, începând de la capul trenului (locomotiva) spre urma acestuia. Deoarece legăturile dintre masele concentrate nu sunt rigide ci elastice, iar între vehiculele trenului există jocuri libere de valori diferite provenite din faza de compunere a trenului, în timpul punerii în mișcare a tuturor elementelor componente ale trenului, lungimea acestuia variază. De asemenea, în același timp variază și distanțele între centrele de greutate ale maselor concentrate. Ca urmare, în timpul demarajului unui tren compus din vagoane dotate cu aparate de tracțiune discontinue cu arcuri volute apar mișcări relative ale elementelor componente cu accelerații având sensuri și valori diferite astfel încât interacțiunea dinamică dintre aceste elemente poate conduce la apariția în aparatele de tracțiune a unor forțe dinamice longitudinale, care în anumite condiții pot atinge valori foarte mari.

Deoarece arcurile volute ce echipează acest tip de aparate de tracțiune au un coeficient de amortizare neglijabil, iar mișcările relative ale vehiculelor pot fi privite din punct de vedere mecanic ca fiind mișcări vibratorii, pentru studiul, analiza și simularea regimului tranzitoriu al trenului se va aplica metodologia utilizată în studiul vibrațiilor.

3.2.2. MODELUL MECANIC DE CALCUL ȘI FORȚELE CE ACȚIONEAZĂ ASUPRA UNUI VAGON OARECARE DIN CORPUL TRENULUI

Considerând trenul, fie că este format din vagoane de călători, fie că este format din vagoane de marfă, ca un sistem mecanic alcătuit dintr-un număr de n mase concentrate, legate elastic între ele, rezultă modelul mecanic corespunzător prezentat pe figura 3.1.

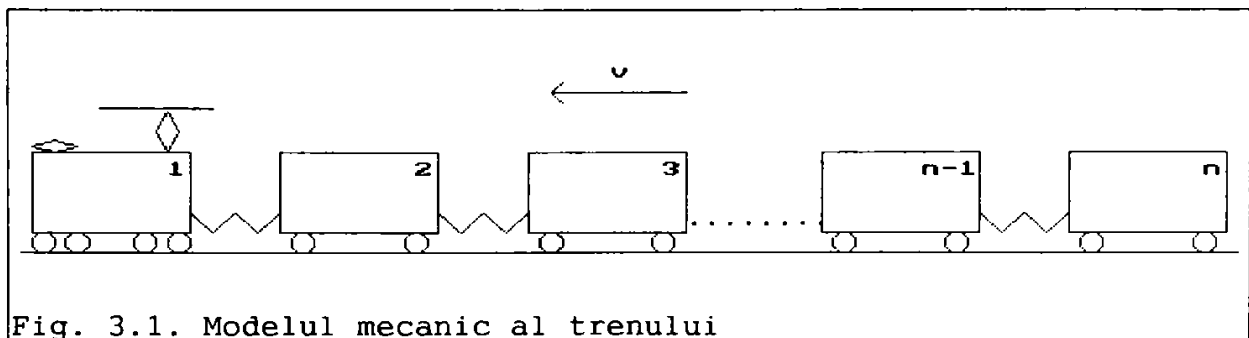
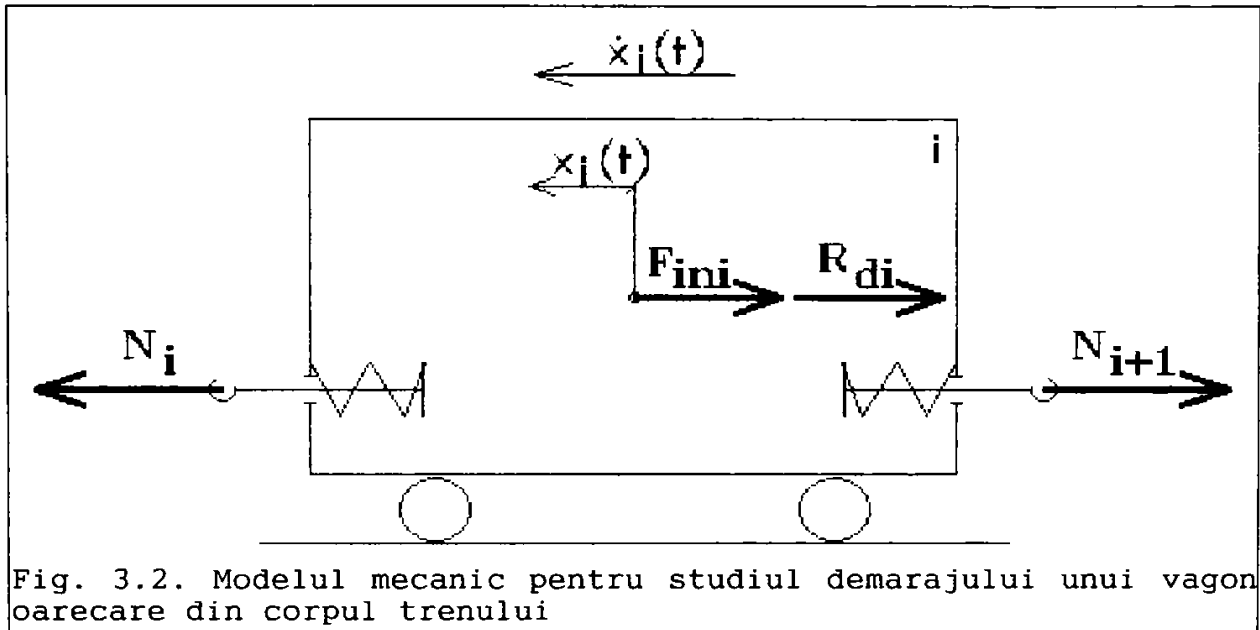


Fig. 3.1. Modelul mecanic al trenului

Asupra unui vagon oarecare din corpul trenului, vagon ce are numărul de ordine i , vor acționa în timpul demarajului acestuia forțele prezentate pe figura 3.2., iar starea aparatelor de tracțiune și ciocnire ale aceluiași vagon, înainte și după demaraj se prezintă pe figura 3.3.



3.2.3. STABILIREA ECUAȚIILOR DIFERENȚIALE ALE MIȘCĂRII

Aplicând legea a doua a dinamicii modelului mecanic de mai sus, comportarea dinamică a acestuia sub influența forțelor ce acționează asupra lui este descrisă de următorul sistem de n ecuații diferențiale de gradul doi:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1 * (1 + \gamma_1) * \frac{d^2 x_1}{dt^2} = F_o - R_{d1} - N_1, \\ m_2 * (1 + \gamma_2) * \frac{d^2 x_2}{dt^2} = N_2 - R_{d2} - N_3, \\ \dots \dots \dots \\ m_i * (1 + \gamma_i) * \frac{d^2 x_i}{dt^2} = N_i - R_{di} - N_{i+1}, \\ \dots \dots \dots \\ m_n * (1 + \gamma_n) * \frac{d^2 x_n}{dt^2} = N_n - R_{dn}, \end{array} \right. \quad (3.1.)$$

unde:

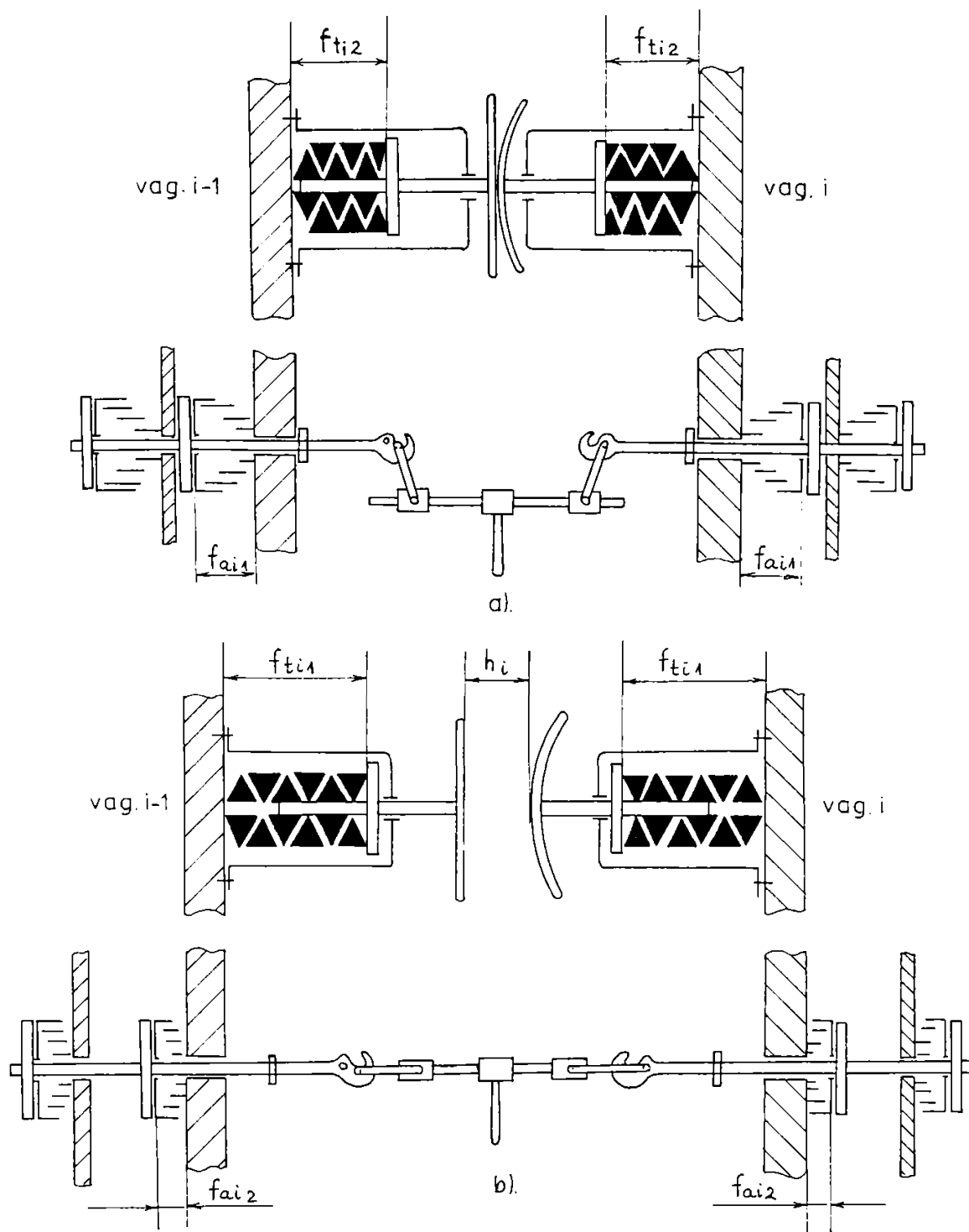


Fig.3.3. Starea aparatelor de tracțiune și ciocnire ale unui vagon oarecare i , înainte (a) și în timpul demarajului acestuia (b).

- $m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_n$, reprezintă masele locomotivei și respectiv ale vagoanelor, în kg;
- $x_1(t), x_2(t), \dots, x_i(t), \dots, x_n(t)$, sunt coordonatele centrelor de greutate ale locomotivei și vagoanelor, în metri;
- F_0 reprezintă forța de tracțiune a locomotivei, presupusă constantă sau variabilă (în trepte, sau continuu), din timpul demarajului, în N;
- $R_{d1}, R_{d2}, \dots, R_{di}, \dots, R_{dn}$, sunt rezistențele totale la demaraj ale vehiculelor, care includ și rezistențele datorate declivităților, rezistențe totale presupuse constante în perioada demarajului, în N/kN;
- $N_1, N_2, \dots, N_i, \dots, N_n$, reprezintă forțele dinamice longitudinale ce apar și se dezvoltă în aparatele de tracțiune ale vehiculelor în timpul demarajului acestora, în N;
- $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_i, \dots, \gamma_n$, sunt coeficienții de masă care reflectă influența maselor aflate și în mișcare de rotație.

Forța dinamică longitudinală ce acționează în legătura dintre vagonul $i-1$ și vagonul i , pe durata demarajului vagonului având numărul de ordine i , se poate exprima prin relații de forma:

$$N_i = k * (a * f_i + b * f_i^3), \quad (3.2.)$$

respectiv:

$$N_i = k * [a * (x_{i-1} - x_i) + b * (x_{i-1} - x_i)^3], \quad (3.3.)$$

unde:

- k reprezintă rigiditatea arcului volut echivalent de la perechea de aparate de tracțiune ce leagă vagonul i de vagonul $i-1$, presupusă identică la toate vehiculele, în N/m;
- f_i este săgeata arcului volut echivalent de la aceeași pereche de aparate de tracțiune, în metri;
- $x_{i-1}(t)$ și $x_i(t)$ reprezintă coordonatele centrelor de greutate ale vagonului având numărul de ordine $i-1$, și respectiv al vagonului cu numărul de ordine i , în metri.

Introducând relațiile de mai sus în sistemul de ecuații diferențiale (3.1.), acesta devine:

$$\left\{ \begin{aligned}
& \frac{d^2x_1}{dt^2} + \frac{k}{m_1*(1+\gamma_1)} * [a*(x_1-x_2) + b*(x_1-x_2)^3] + \frac{R_{d1}-F_o}{m_1*(1+\gamma_1)} = 0, \\
& \frac{d^2x_2}{dt^2} + \frac{k}{m_2*(1+\gamma_2)} * \{a*[(x_2-x_3) - (x_1-x_2)] + b*[(x_2-x_3)^3 - (x_1-x_2)^3]\} + \\
& \quad + \frac{R_{d2}}{(m_2*(1+\gamma_2))} = 0 \\
& \dots\dots\dots \\
& \frac{d^2x_i}{dt^2} + \frac{k}{m_i*(1+\gamma_i)} * \{a*[(x_i-x_{i+1}) - (x_{i-1}-x_i)] + b*[(x_i-x_{i+1})^3 - \\
& \quad - (x_{i-1}-x_i)^3]\} + \frac{R_{di}}{m_i*(1+\gamma_i)} = 0, \\
& \dots\dots\dots \\
& \frac{d^2x_n}{dt^2} + \frac{k}{m_n*(1+\gamma_n)} * [-a*(x_{n-1}-x_n) - b*(x_{n-1}-x_n)^3] + \frac{R_{dn}}{m_n*(1+\gamma_n)} = 0.
\end{aligned} \right. \quad (3.4.)$$

Sistemul de ecuații (3.4.) este un sistem de n ecuații diferențiale neliniare de gradul doi, a cărei rezolvare exactă este extrem de dificilă.

Ca urmare, pentru determinarea funcțiilor $x_1(t), x_2(t), \dots, x_i(t), \dots, x_n(t)$ se va utiliza metoda Runge-Kutta de ordinul patru, metodă ce oferă o precizie de calcul suficientă pentru necesitățile practice, și care permite realizarea unui algoritm de calcul ușor de implementat într-un limbaj de programare de nivel înalt [13], [19], [25], [43] și [Anexa 2].

În acest scop se fac următoarele substituții:

$$\frac{dx_1}{dt} = y_1, \quad \frac{dx_2}{dt} = y_2, \quad \dots \quad \frac{dx_i}{dt} = y_i, \quad \dots \quad \frac{dx_n}{dt} = y_n, \quad (3.5.)$$

În baza cărora sistemul de n ecuații diferențiale (3.4.) devine:

Considerând că la momentul $t=0$, locomotiva în mișcare, având viteza V_{Lo} , acționează asupra primului vagon din tren, setul de condiții inițiale atașate sistemului de ecuații diferențiale (3.6.) respectiv (3.7.), sunt:

$$\begin{cases} x_1=x_2=\dots=x_i=\dots=x_n=0, \\ \frac{dx_1}{dt}=\dot{x}_1=y_1=V_{Lo}, \\ \dot{x}_2=y_2=\dot{x}_3=y_3=\dots=\dot{x}_i=y_i=\dots=\dot{x}_n=y_n=0. \end{cases} \quad (3.8.)$$

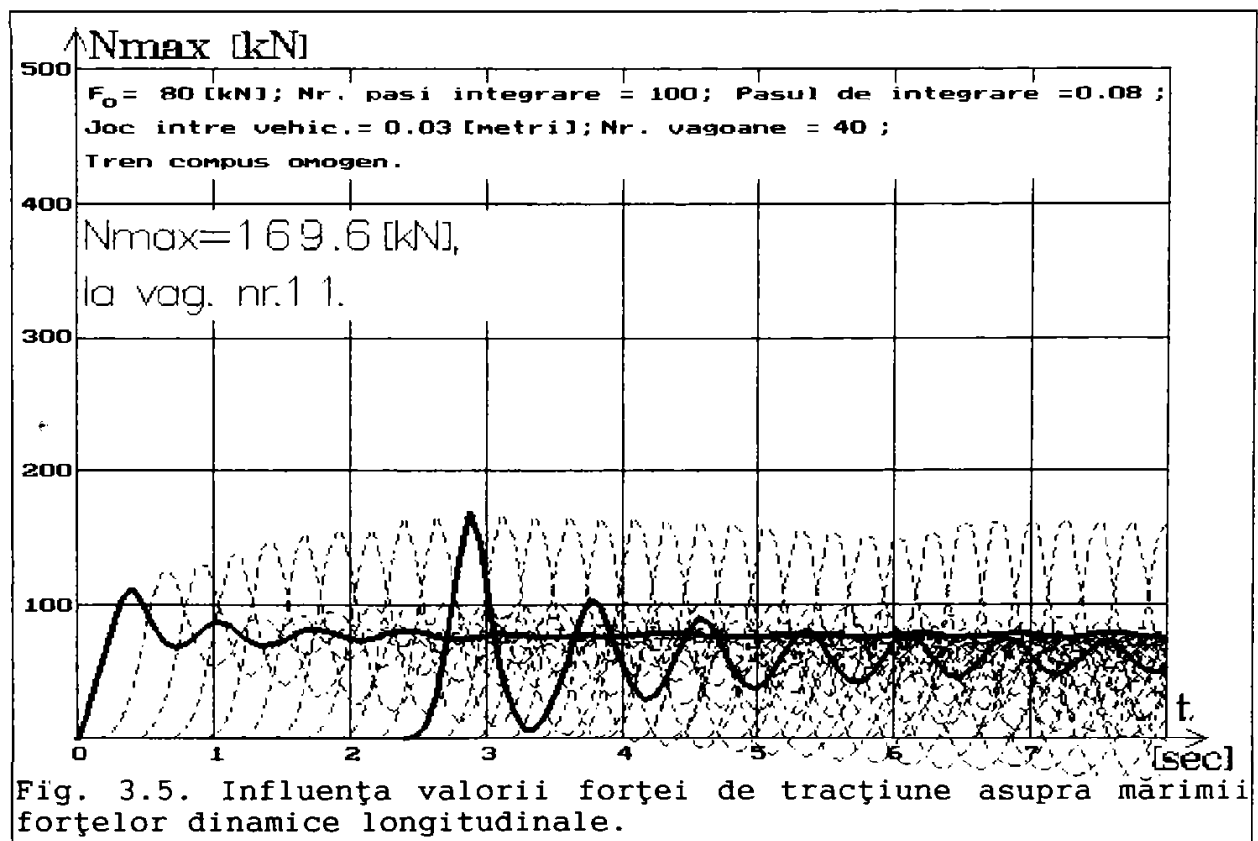
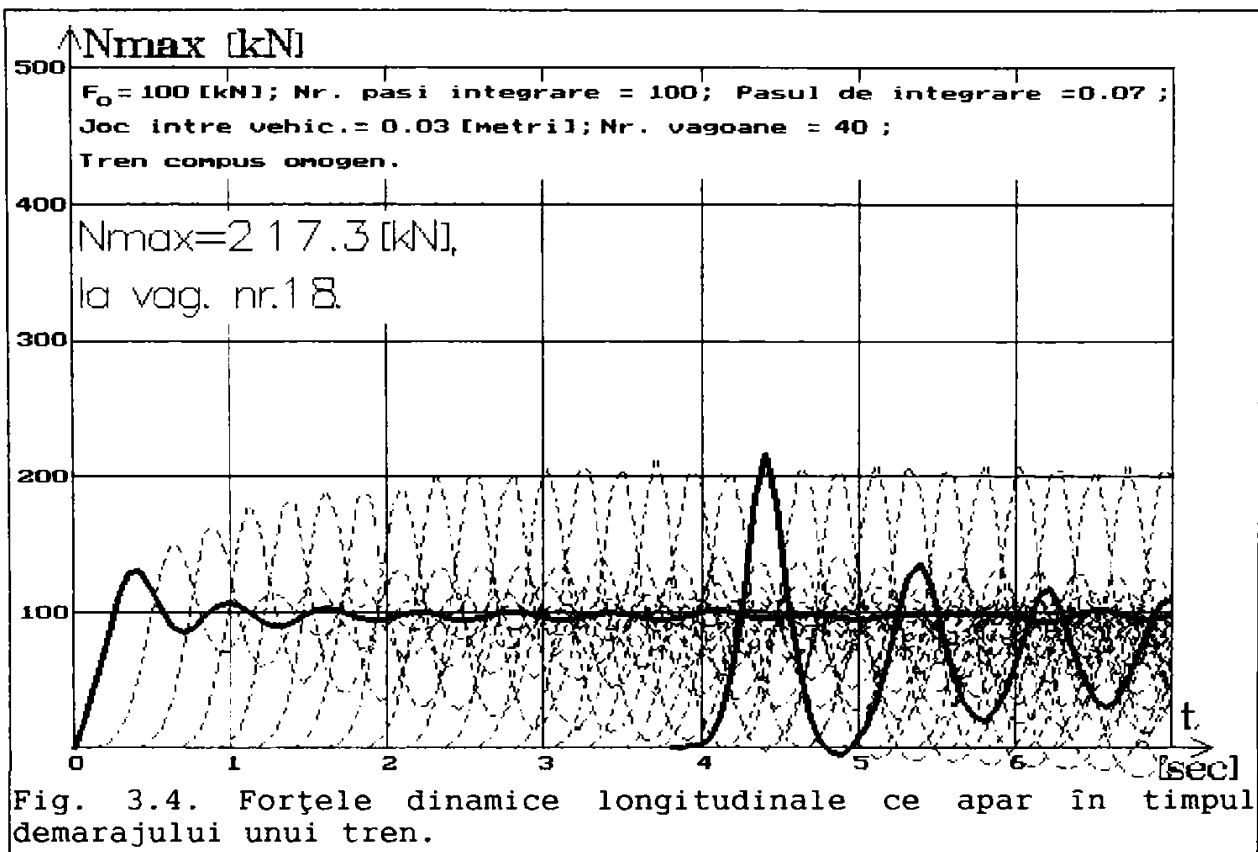
Pentru rezolvarea sistemului de ecuații (3.6.) respectiv (3.7.) s-a conceput, proiectat, realizat și implementat un program de calcul în limbaj Turbo Pascal V7.0 [Anexa 2], program ce permite simularea comportării unui tren de marfă, de mare tonaj, compus din câteva zeci de vagoane în timpul demarajului acestuia. Acest program de calcul original permite scoaterea în evidență a influenței unei multitudini de factori cum ar fi: jocul liber dintre vehicule, precomprimarea inițială a trenului, declivitatea pe care are loc demarajul, valoarea și modul de aplicare al forței de tracțiune, a tonajului trenului, precum și a modului de compunere al trenului, asupra valorilor și evoluției în timpul demarajului a forțelor dinamice longitudinale din tren.

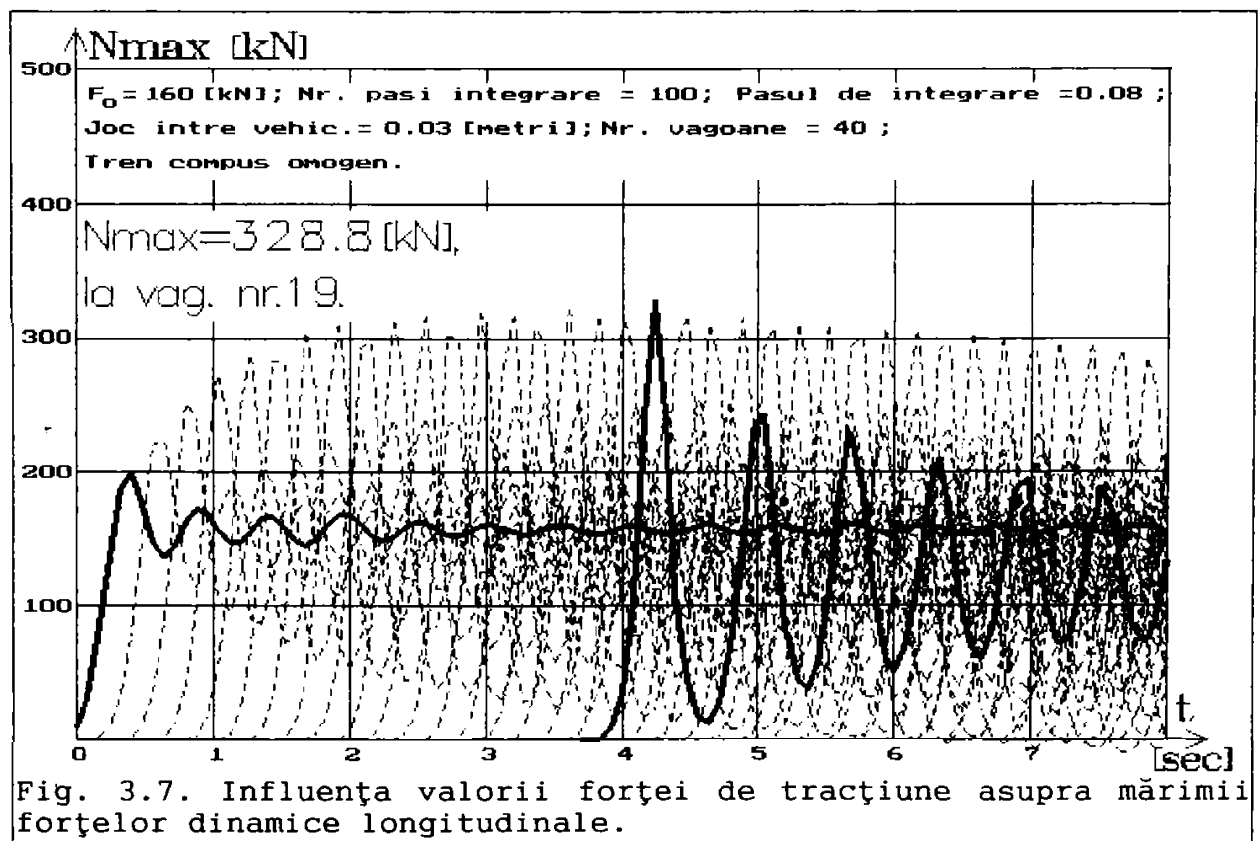
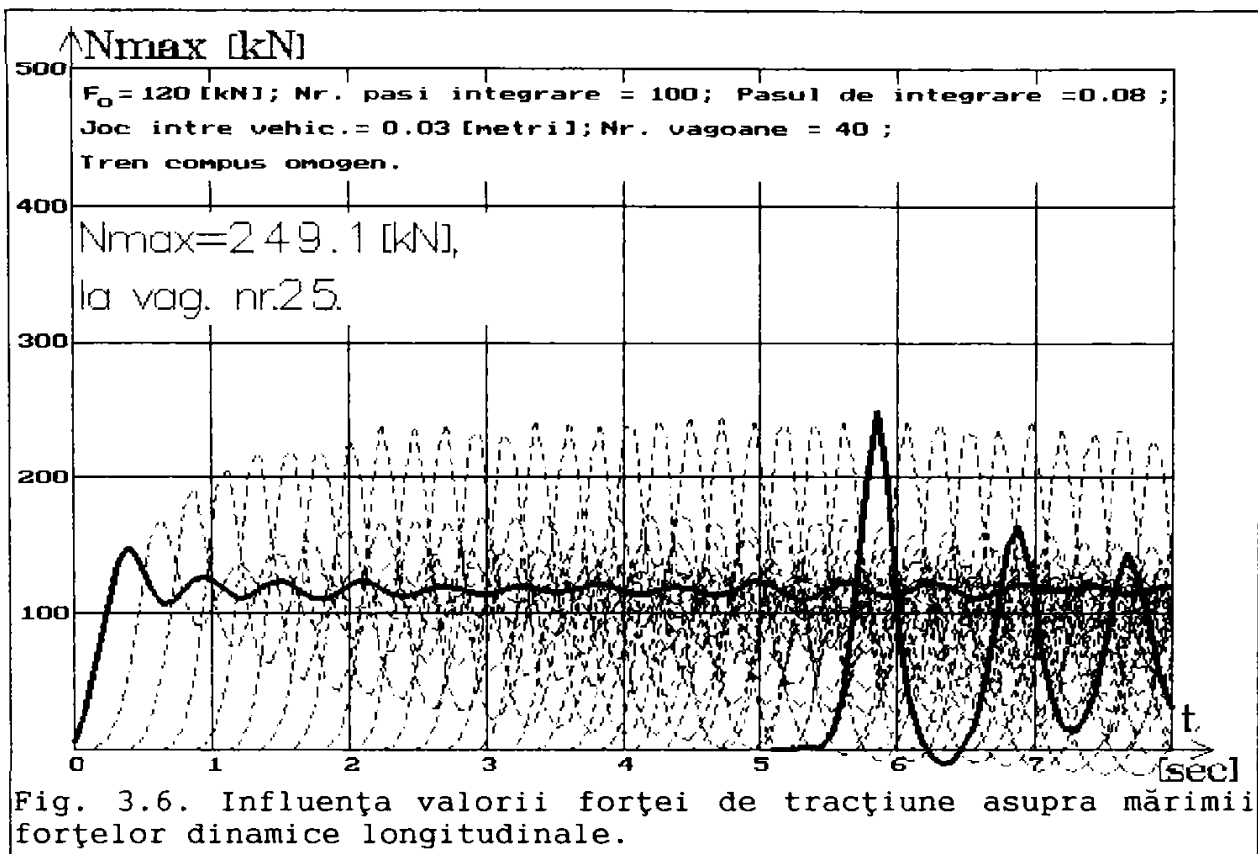
Analizând rezultatele simulărilor realizate pe calculator, rezultate ce sunt prezentate grafic pe figurile (3.4.)...(3.29.), se pot trage următoarele concluzii importante:

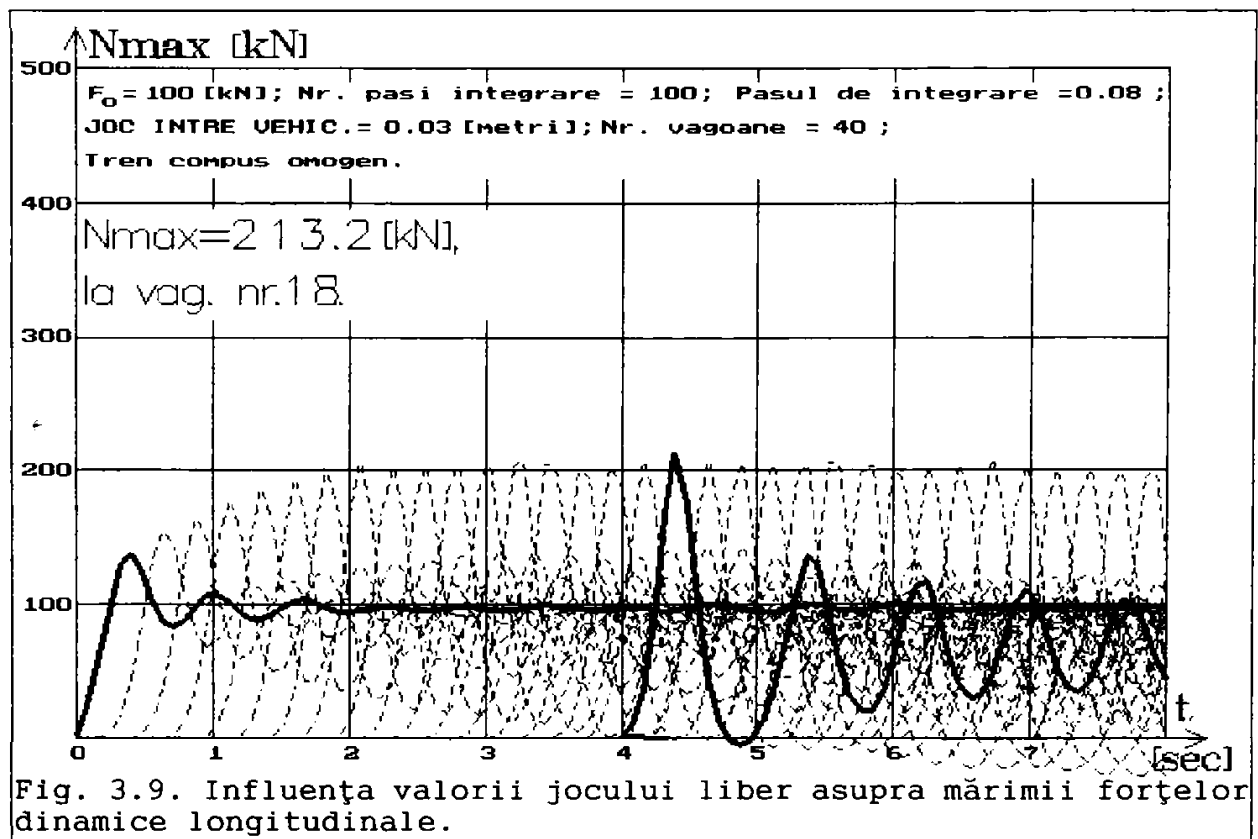
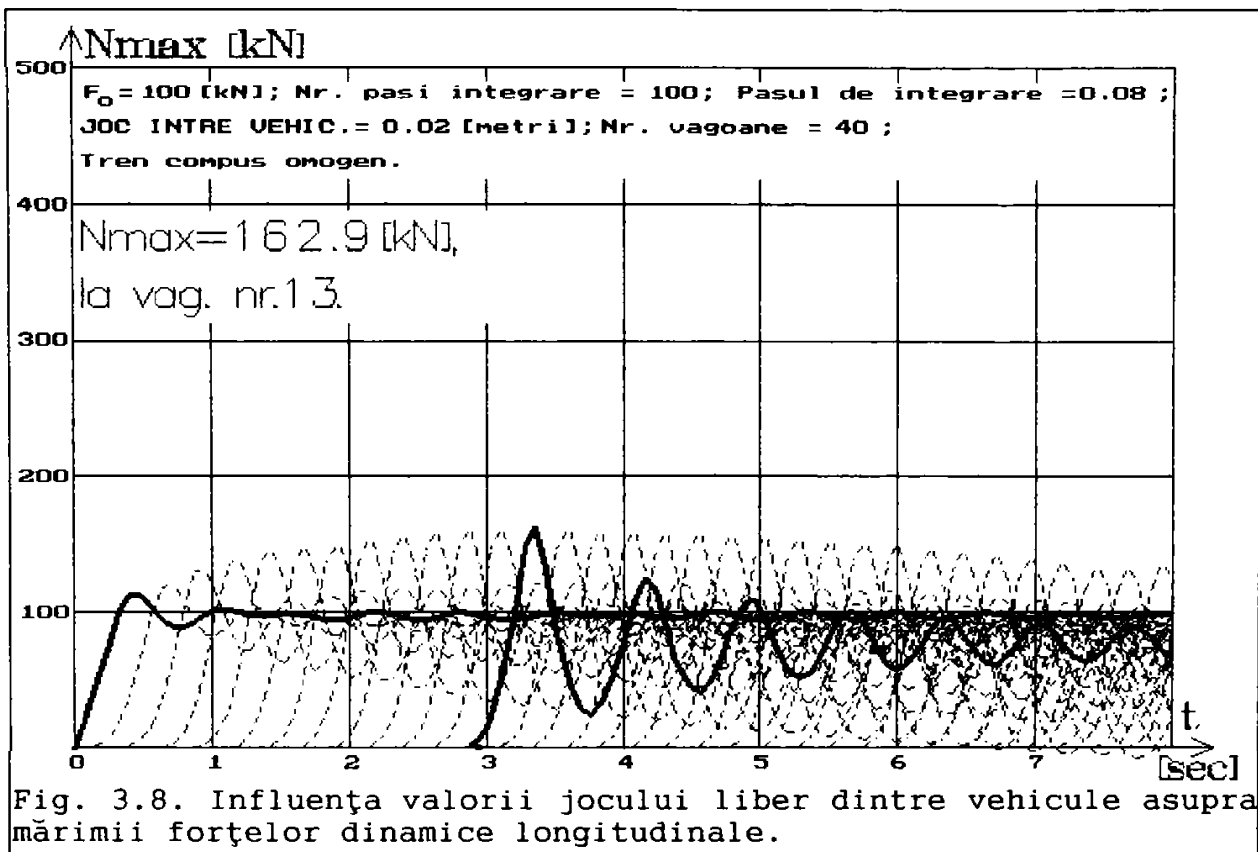
- în timpul demarajului trenurilor omogene din aliniament și palier, în legăturile dintre vehicule apar forțe dinamice longitudinale de întindere, variabile în timp. Valorile maxime ale acestora în primele momente sunt întodeauna mai mari decât forța de tracțiune dezvoltată de locomotivă, fig. 3.4. și fig. 3.5.;

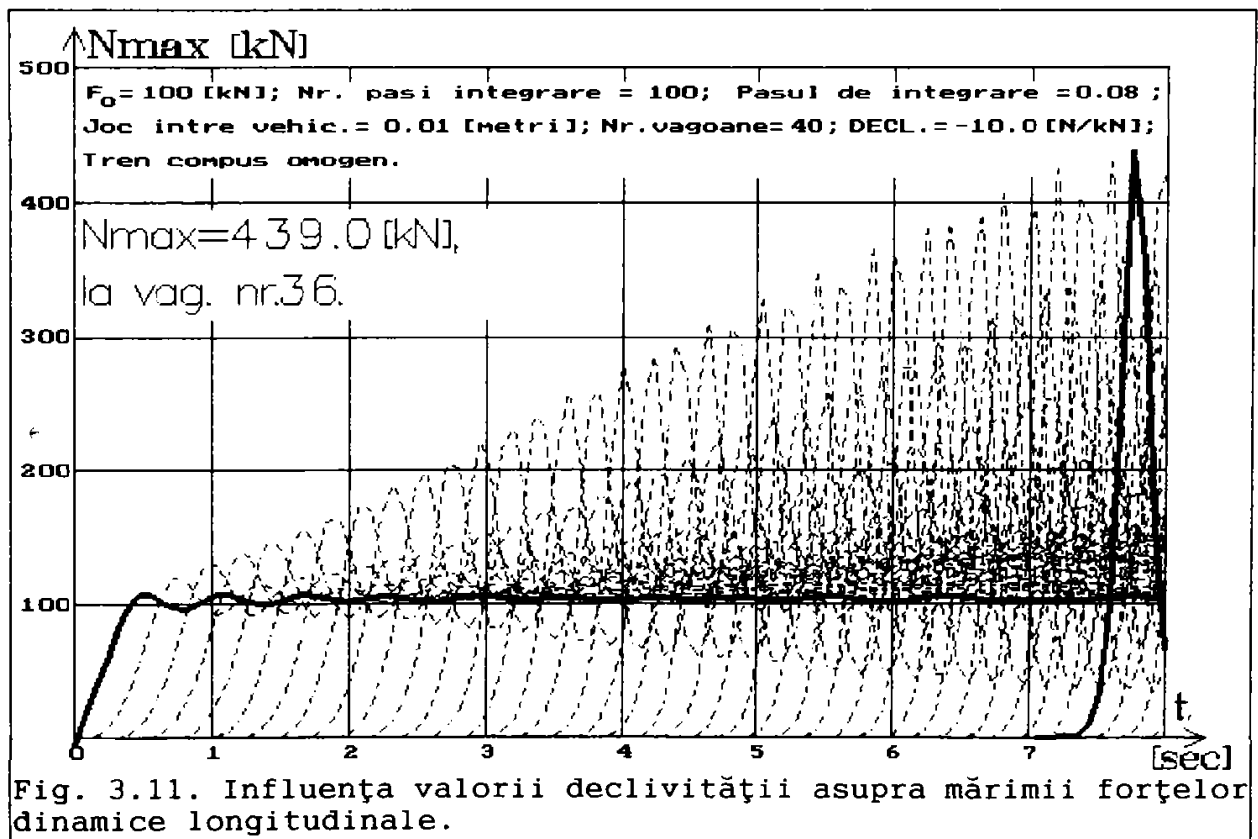
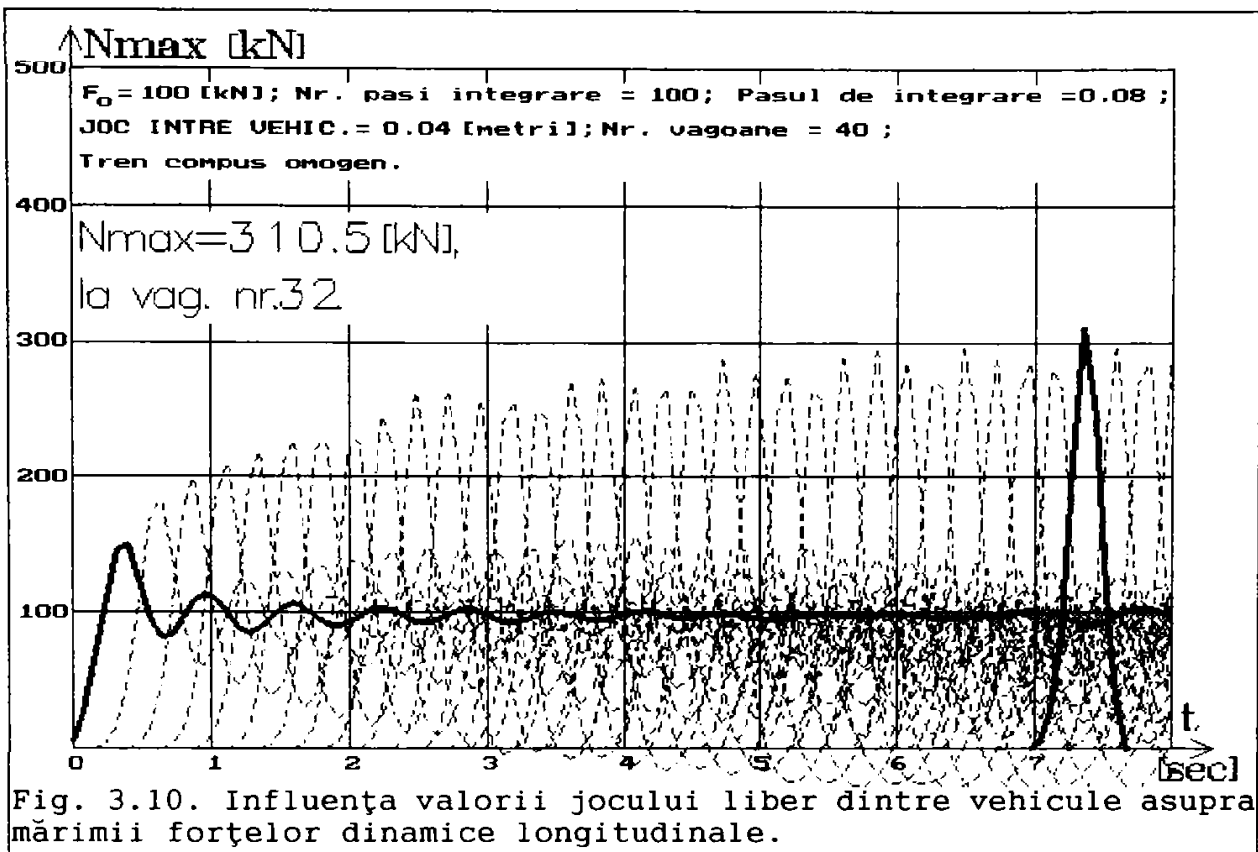
- valorile maxime ale forțelor dinamice longitudinale care se manifestă în timpul demarajului trenurilor de marfă omogene, depind în mod semnificativ de mărimea forței de tracțiune dezvoltată de locomotivă. Odată cu creșterea mărimii forței de tracțiune cresc și valorile maxime ale forțelor dinamice longitudinale, acestea apărând în general în partea de mijloc a trenului, fiind de circa două ori mai mari decât forța de tracțiune dezvoltată de locomotivă, fig. 3.4.,....fig. 3.7.;

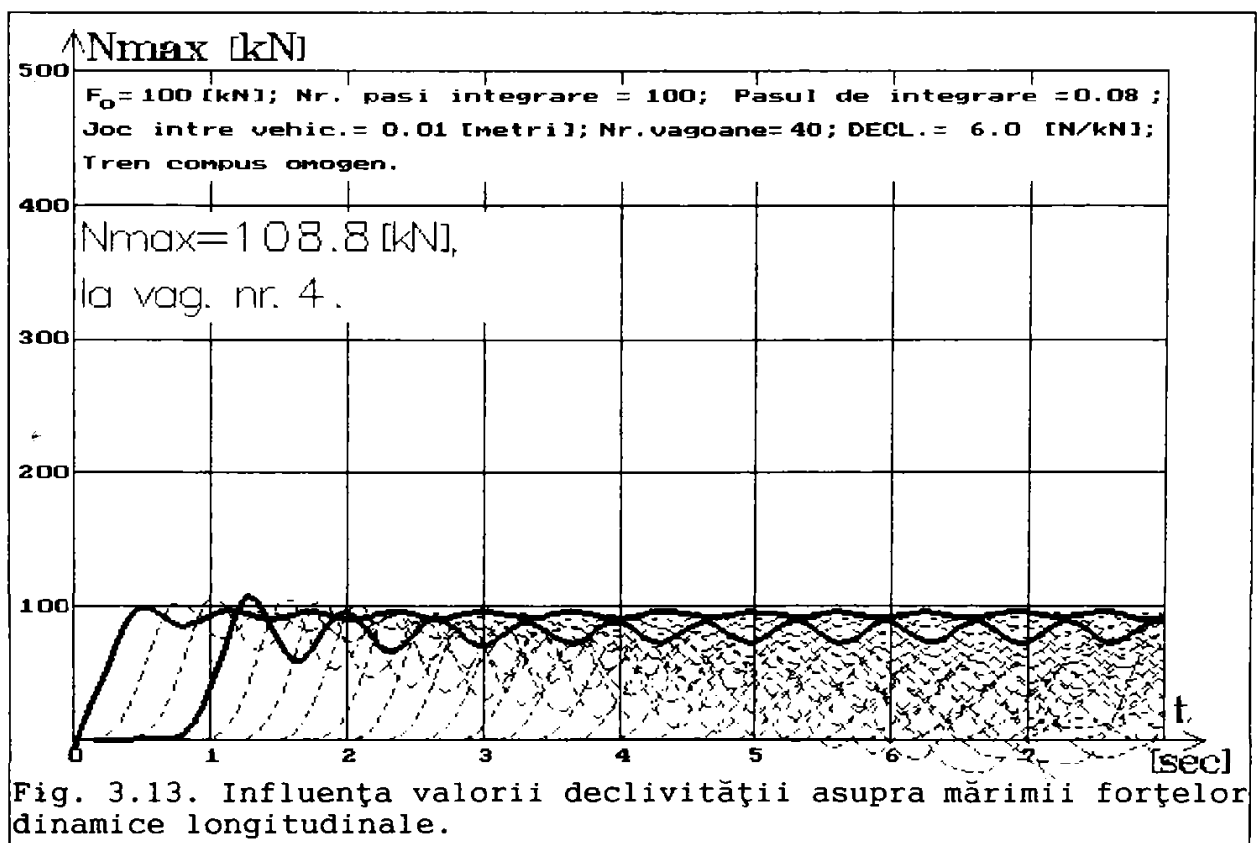
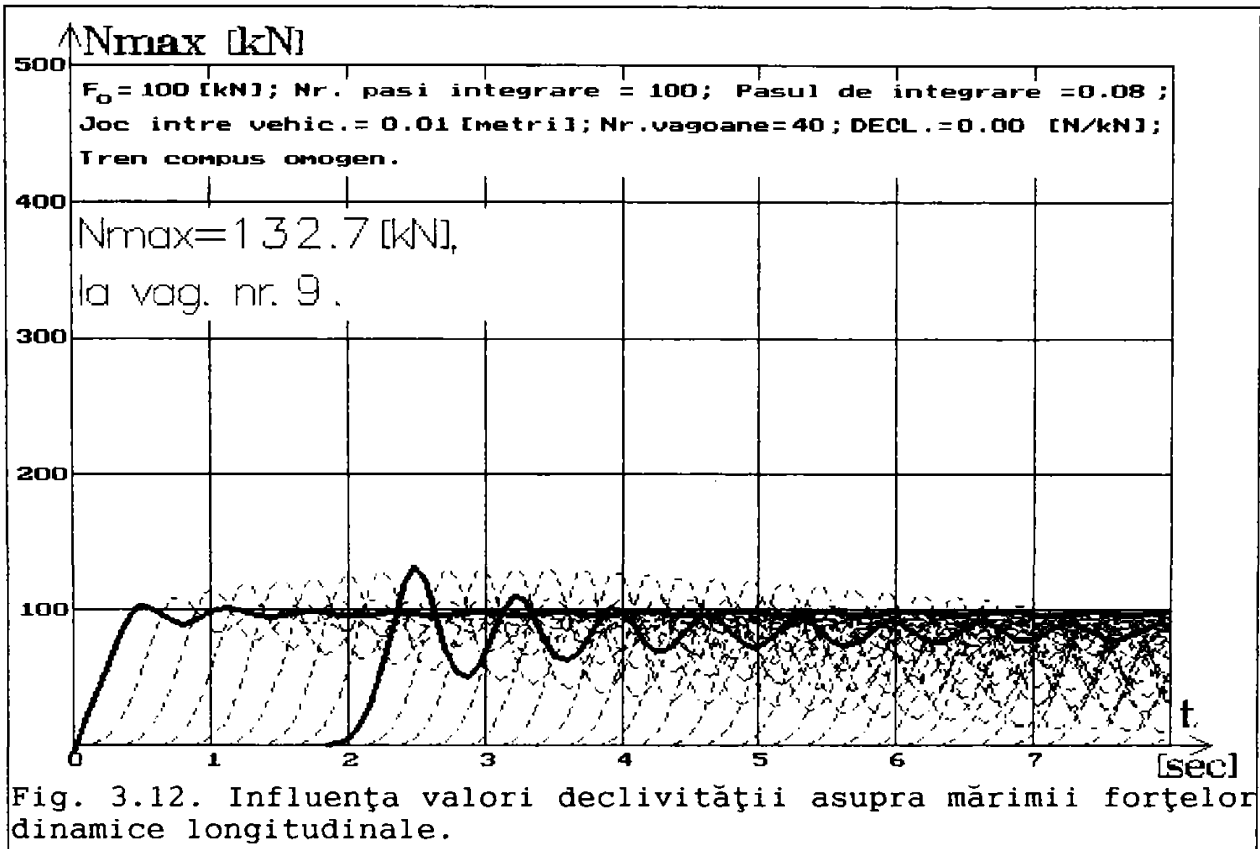
- jocul liber dintre vehiculele trenurilor de marfă, lăsat în faza de compunere a acestora influențează de asemenea în mod semnificativ valorile maxime ale forțelor dinamice longitudinale, a

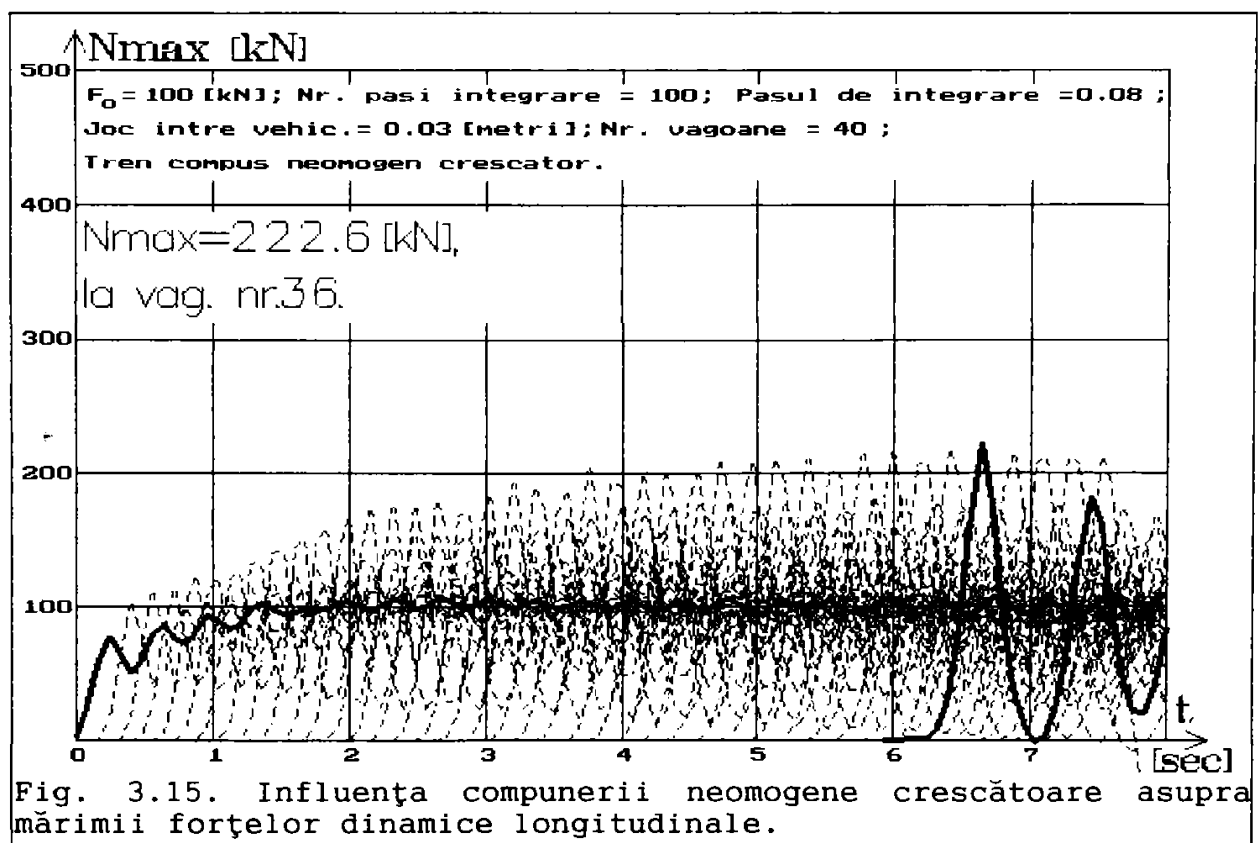
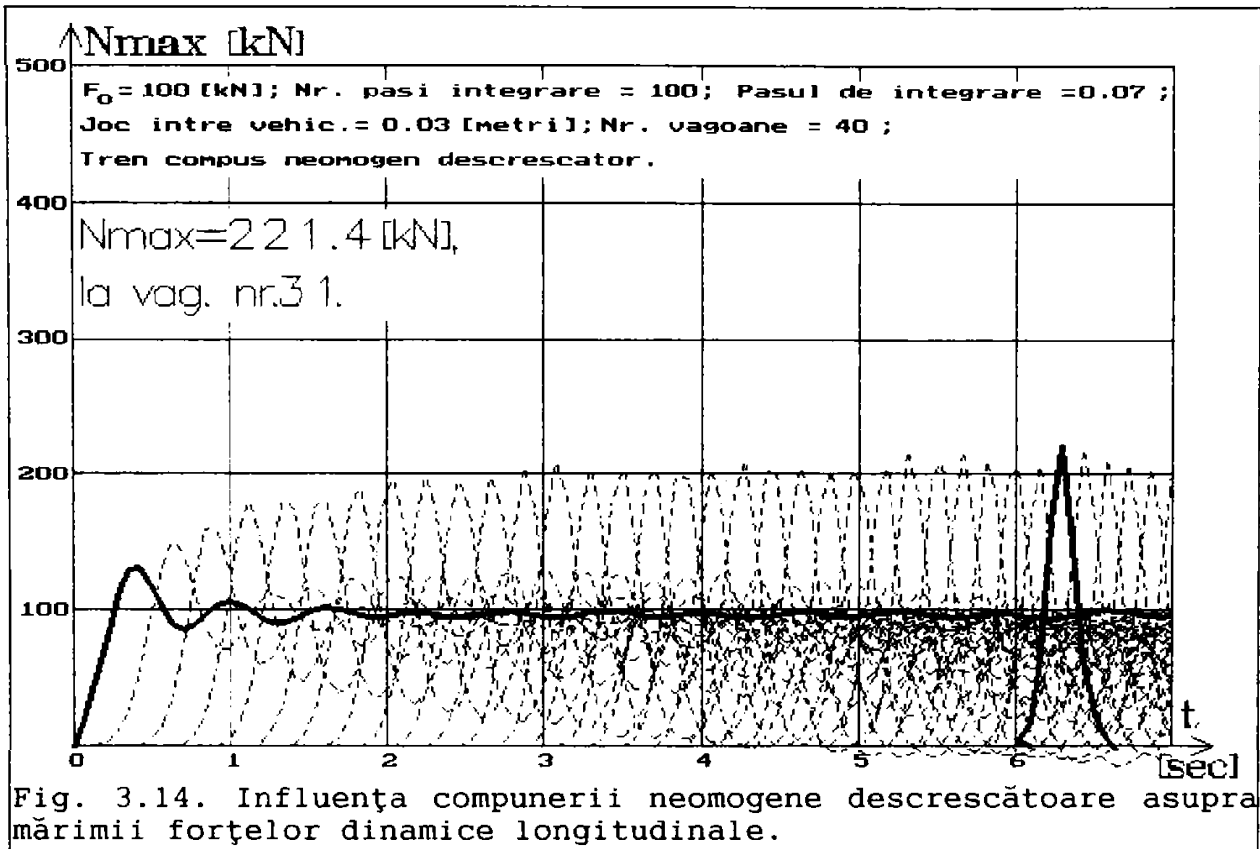


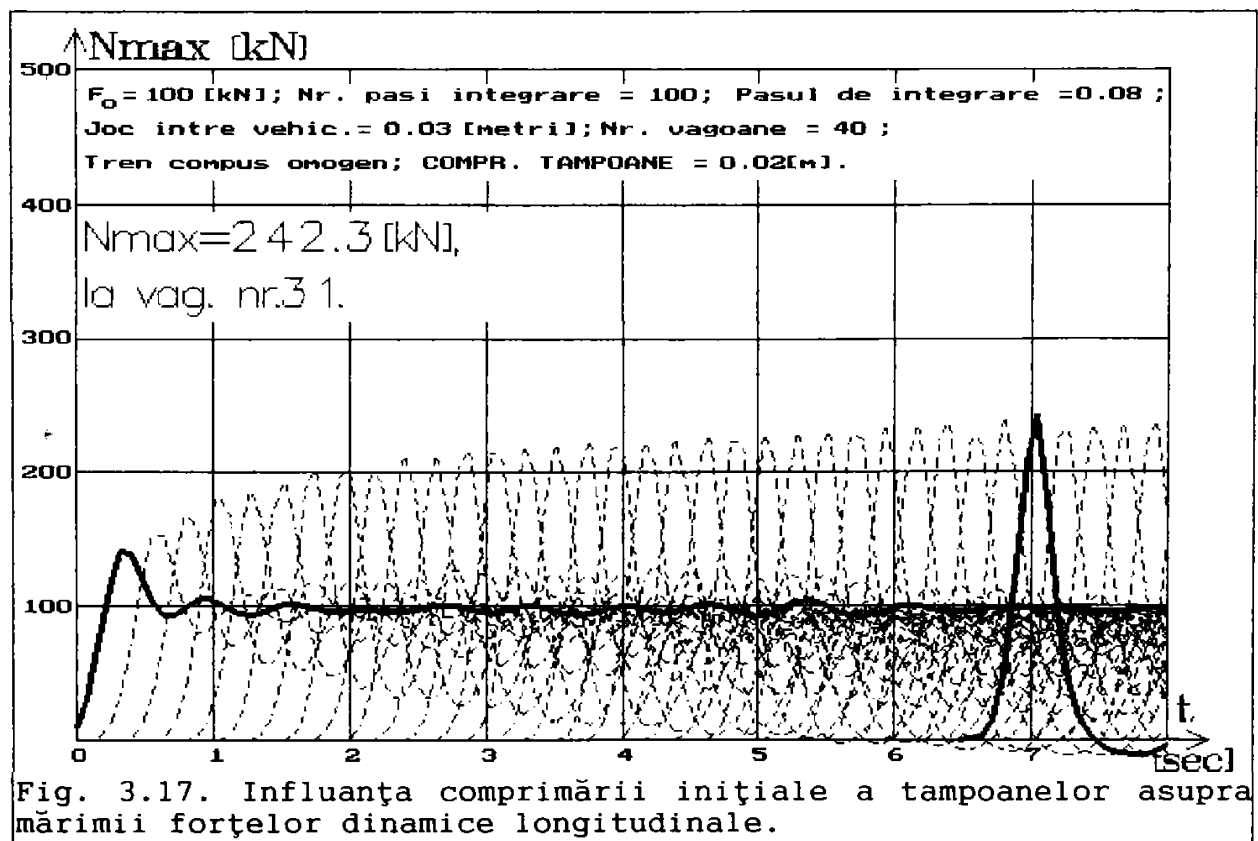
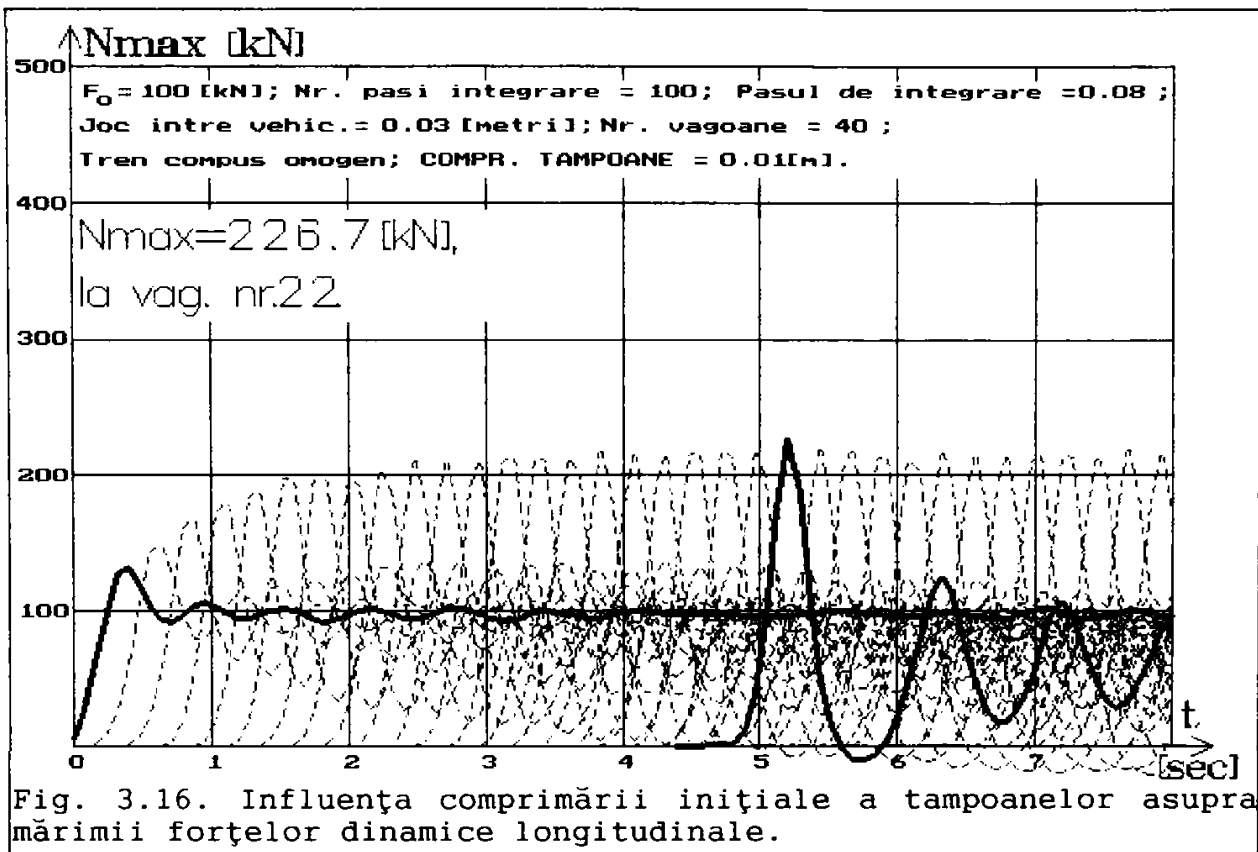


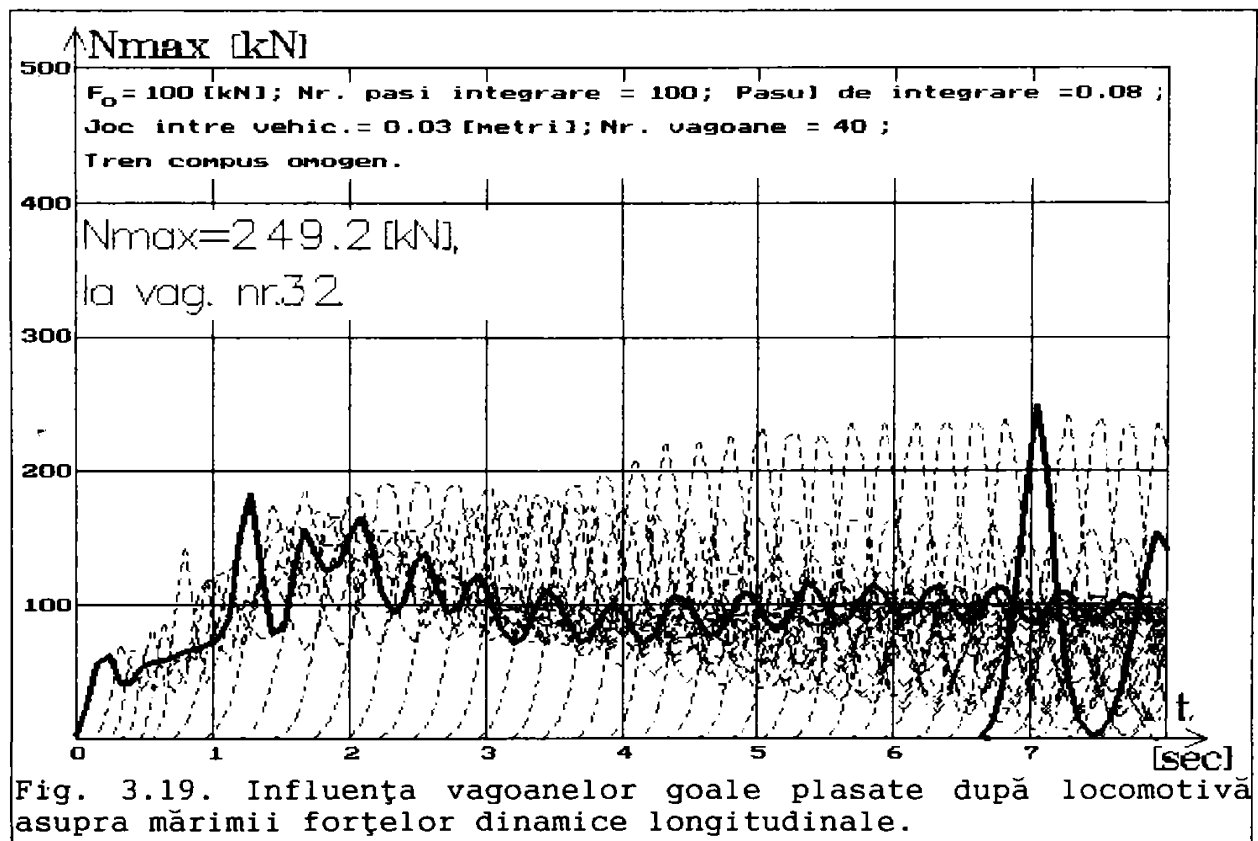
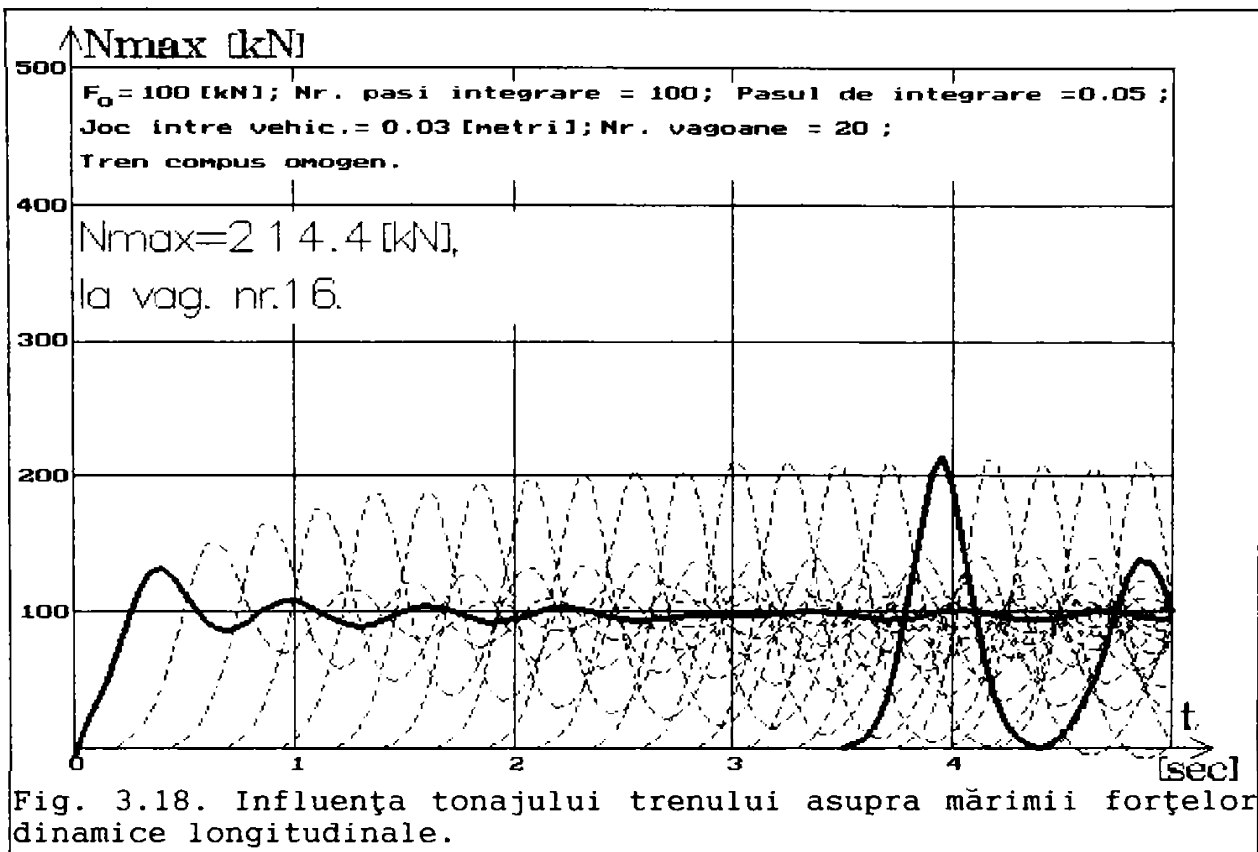


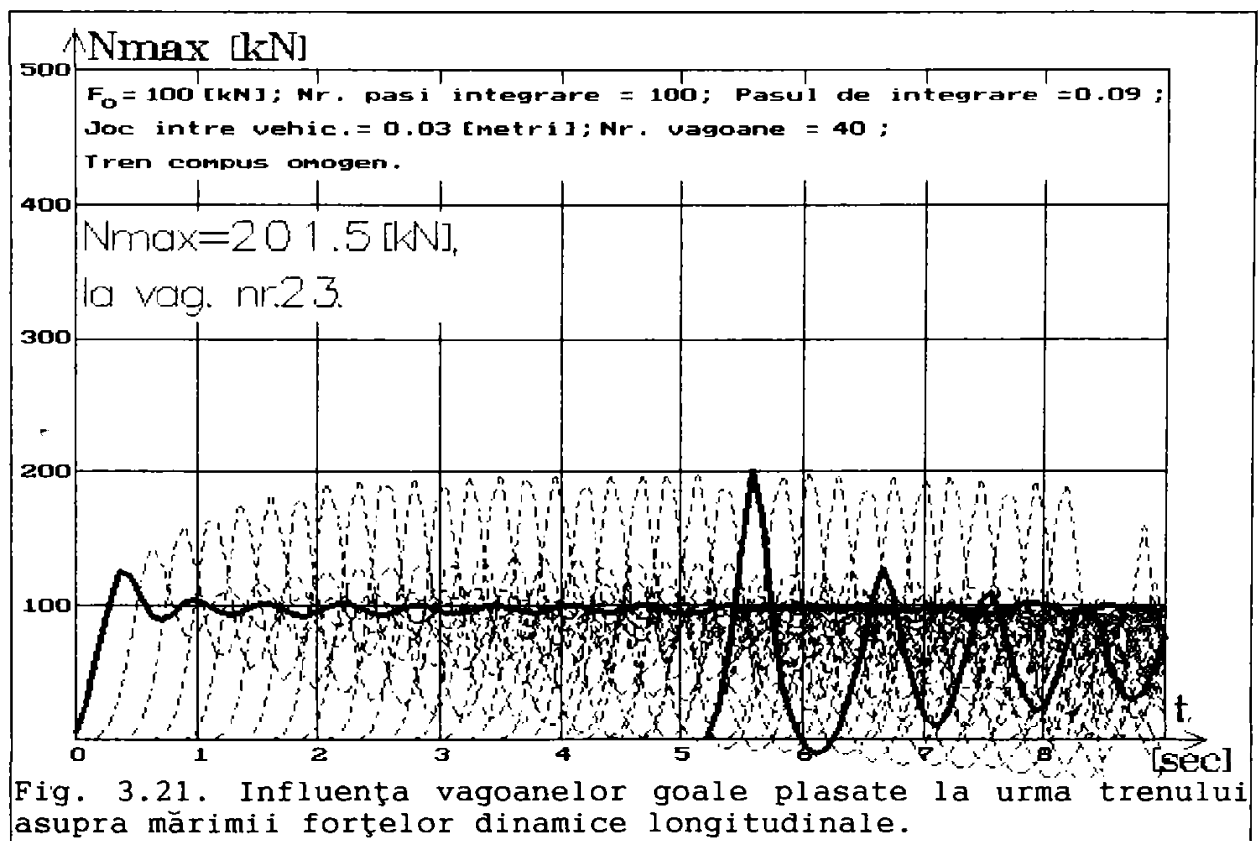
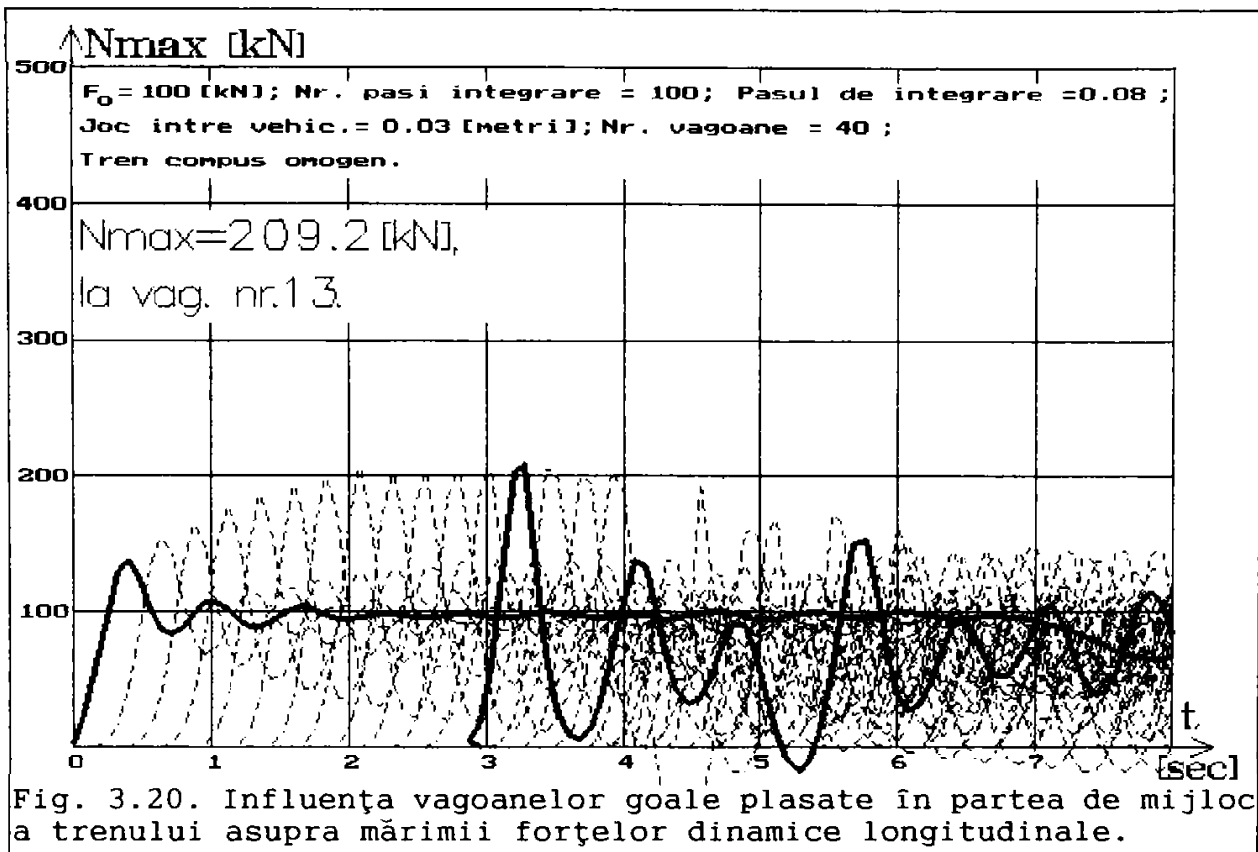


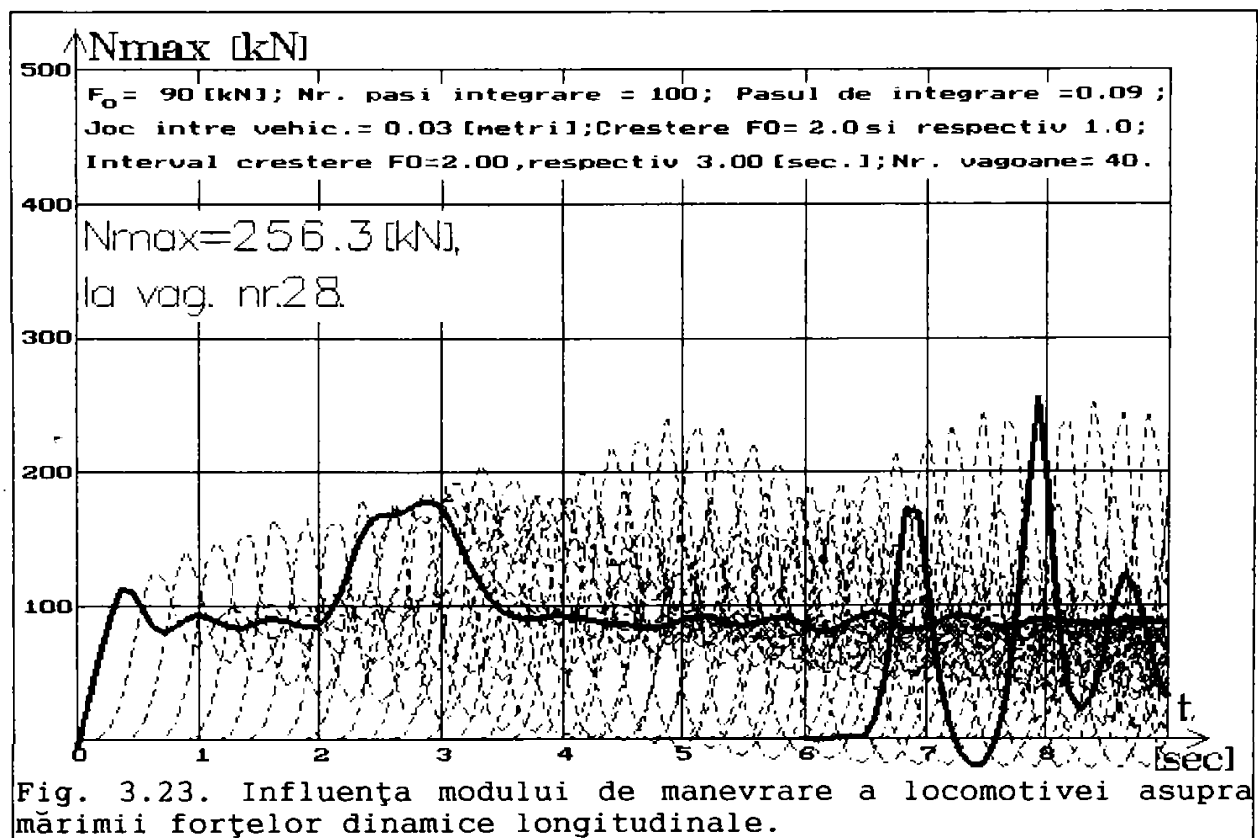
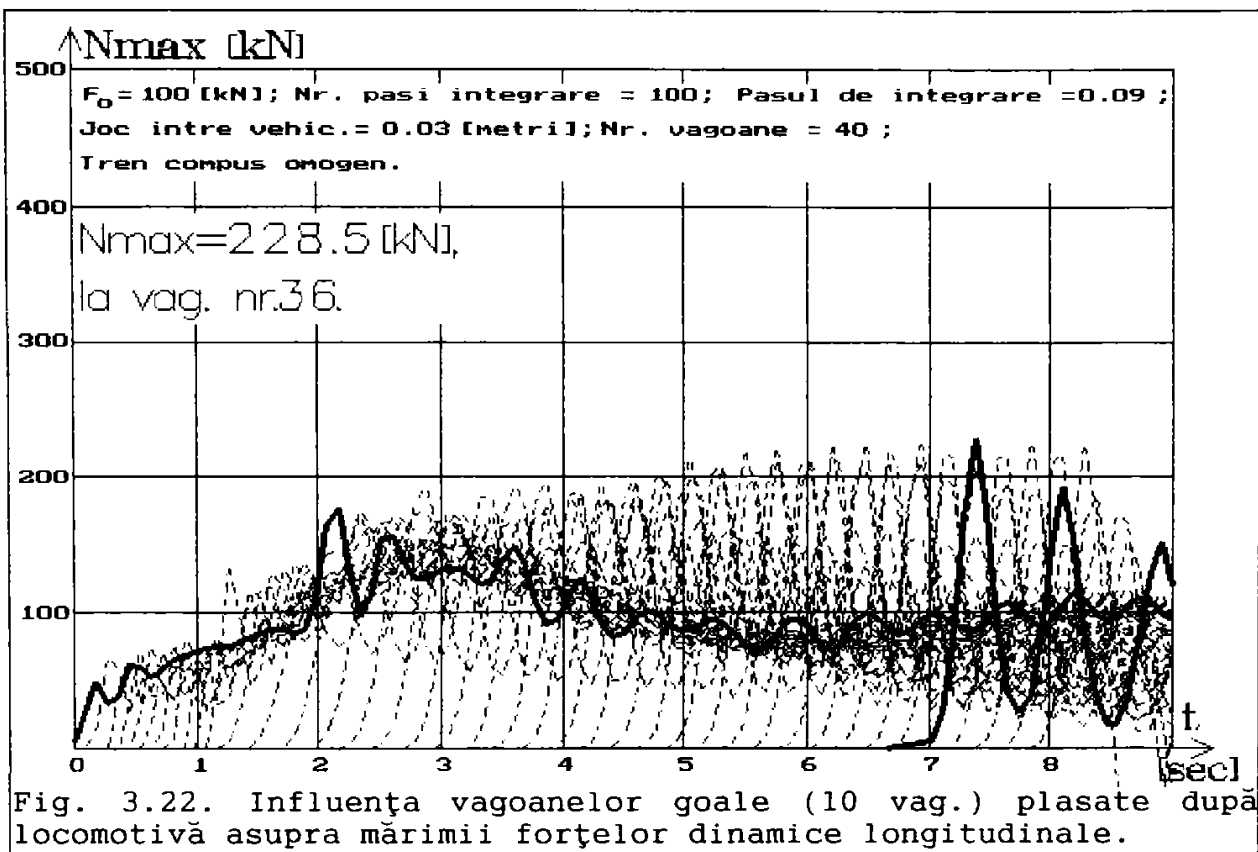


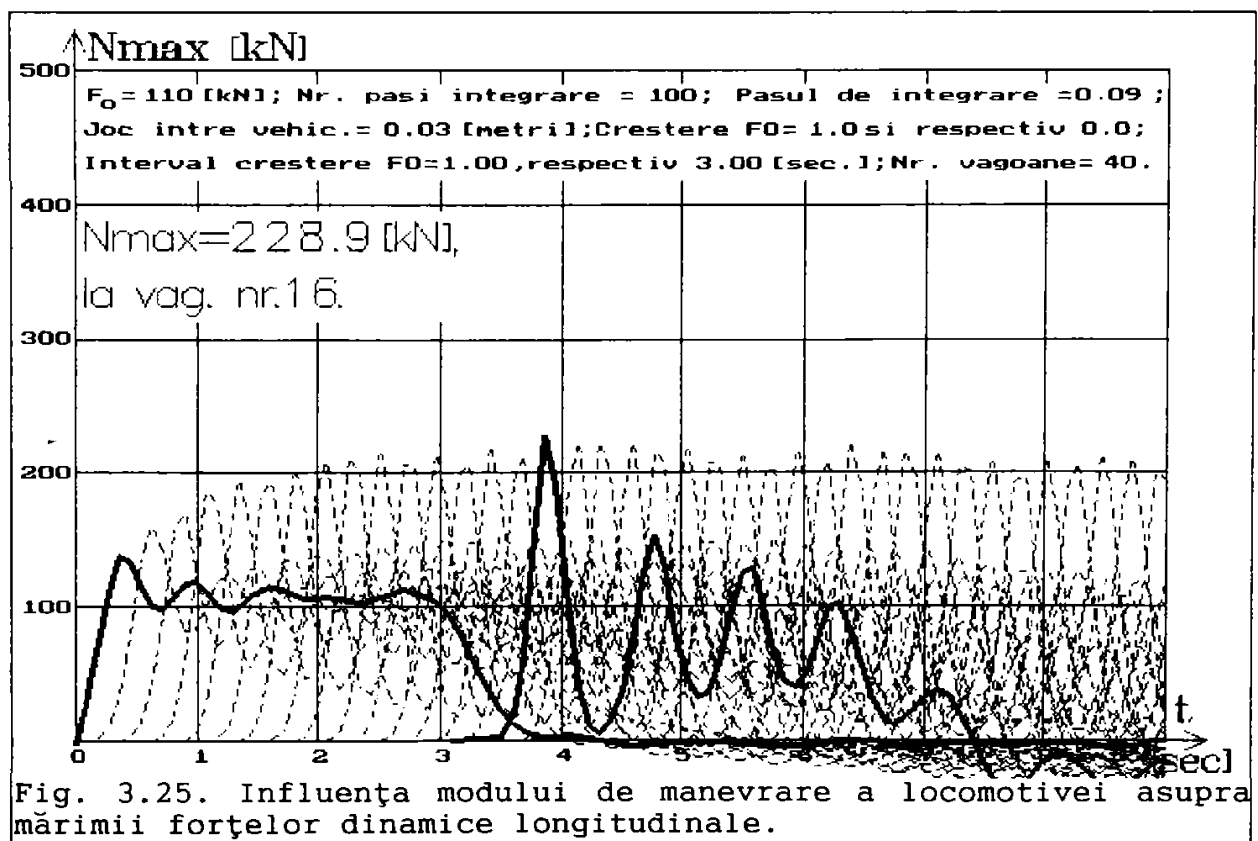
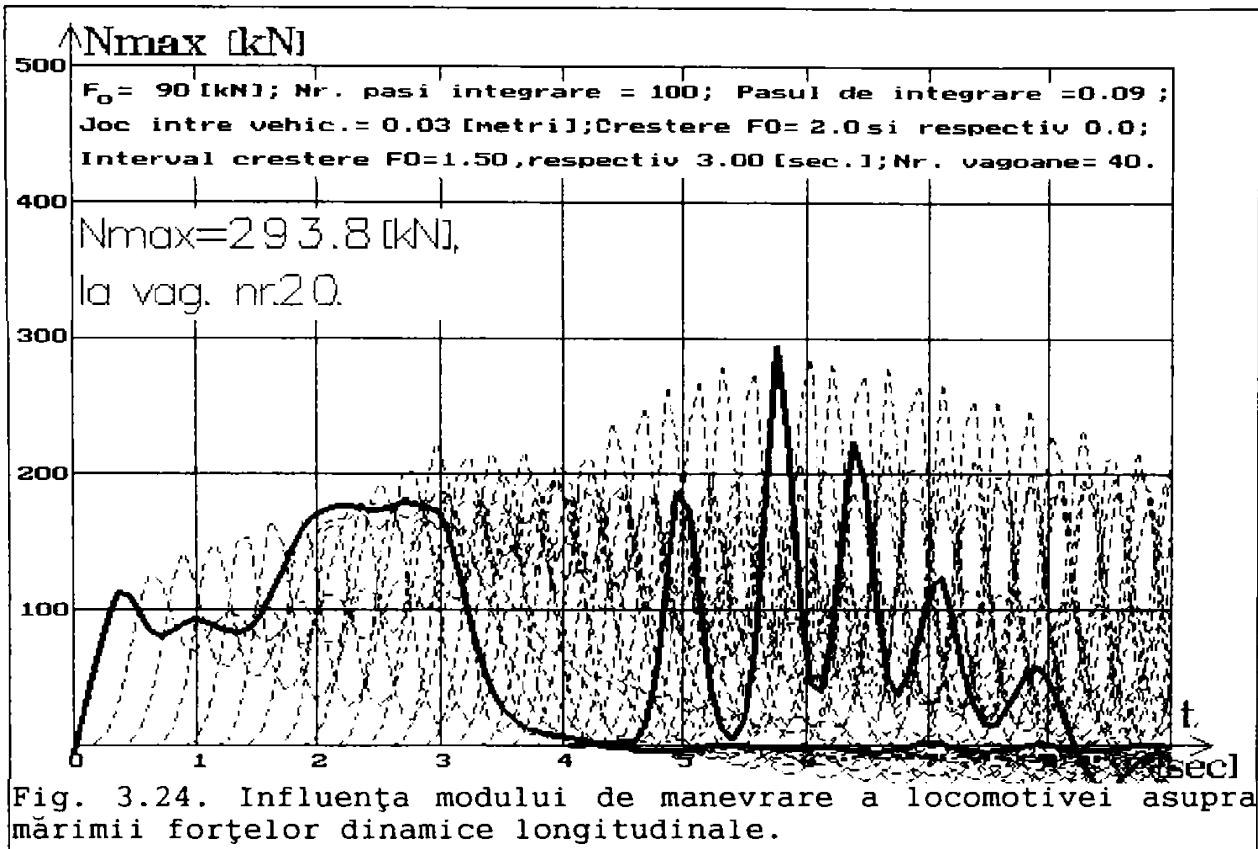


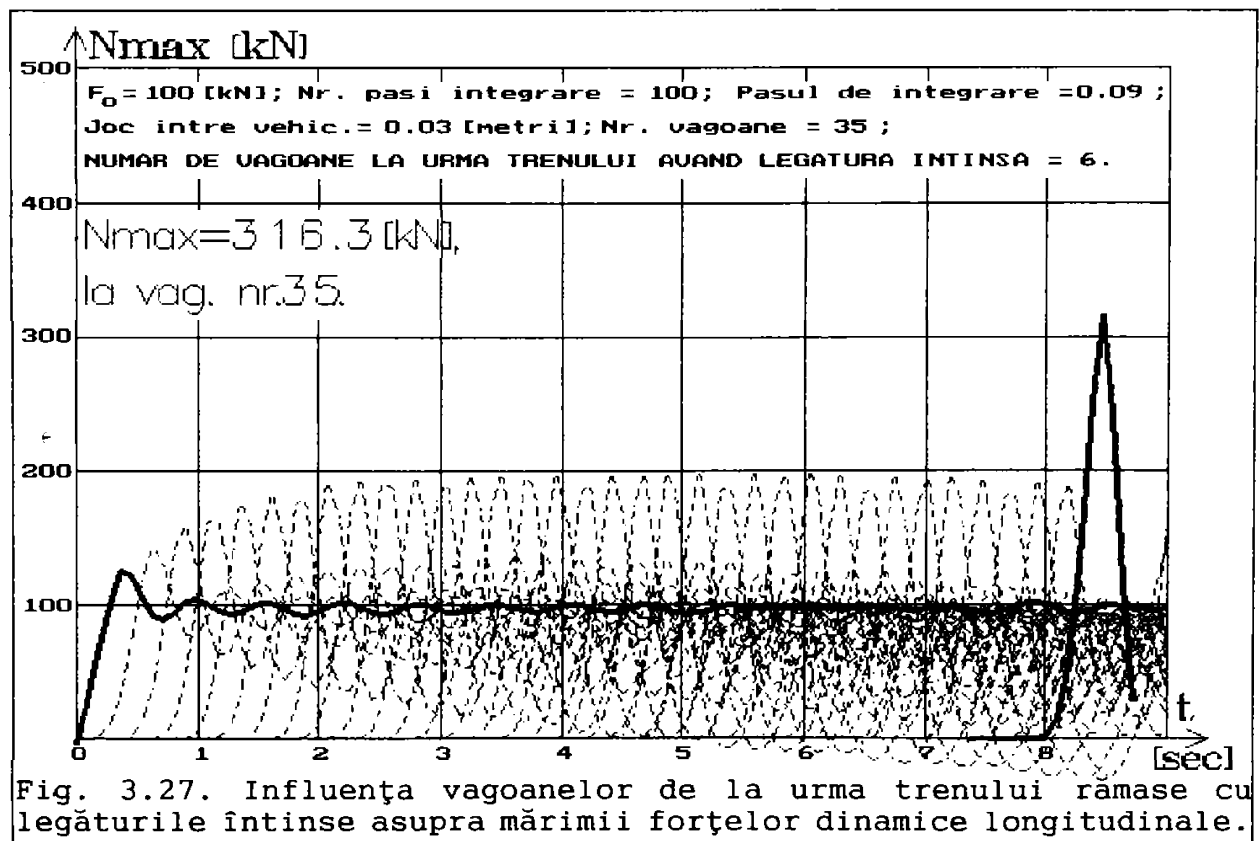
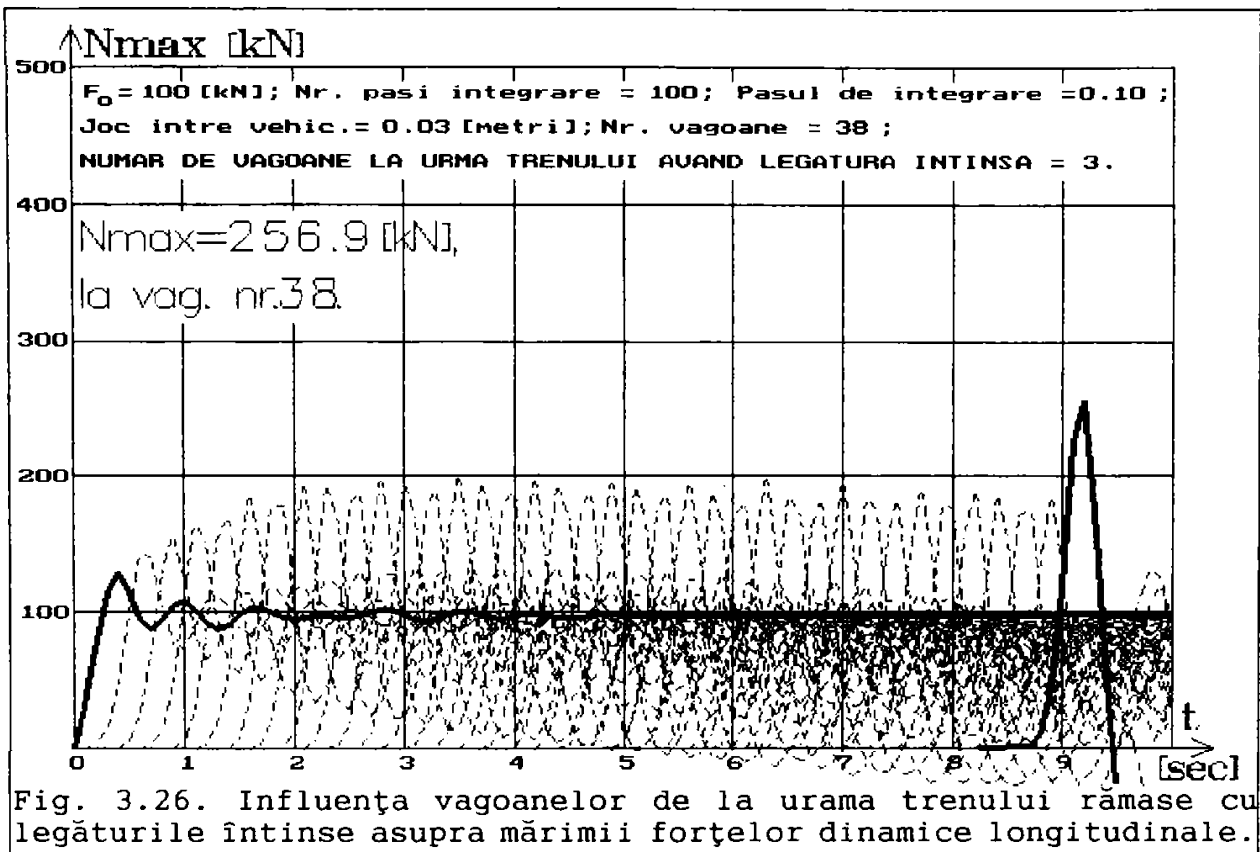


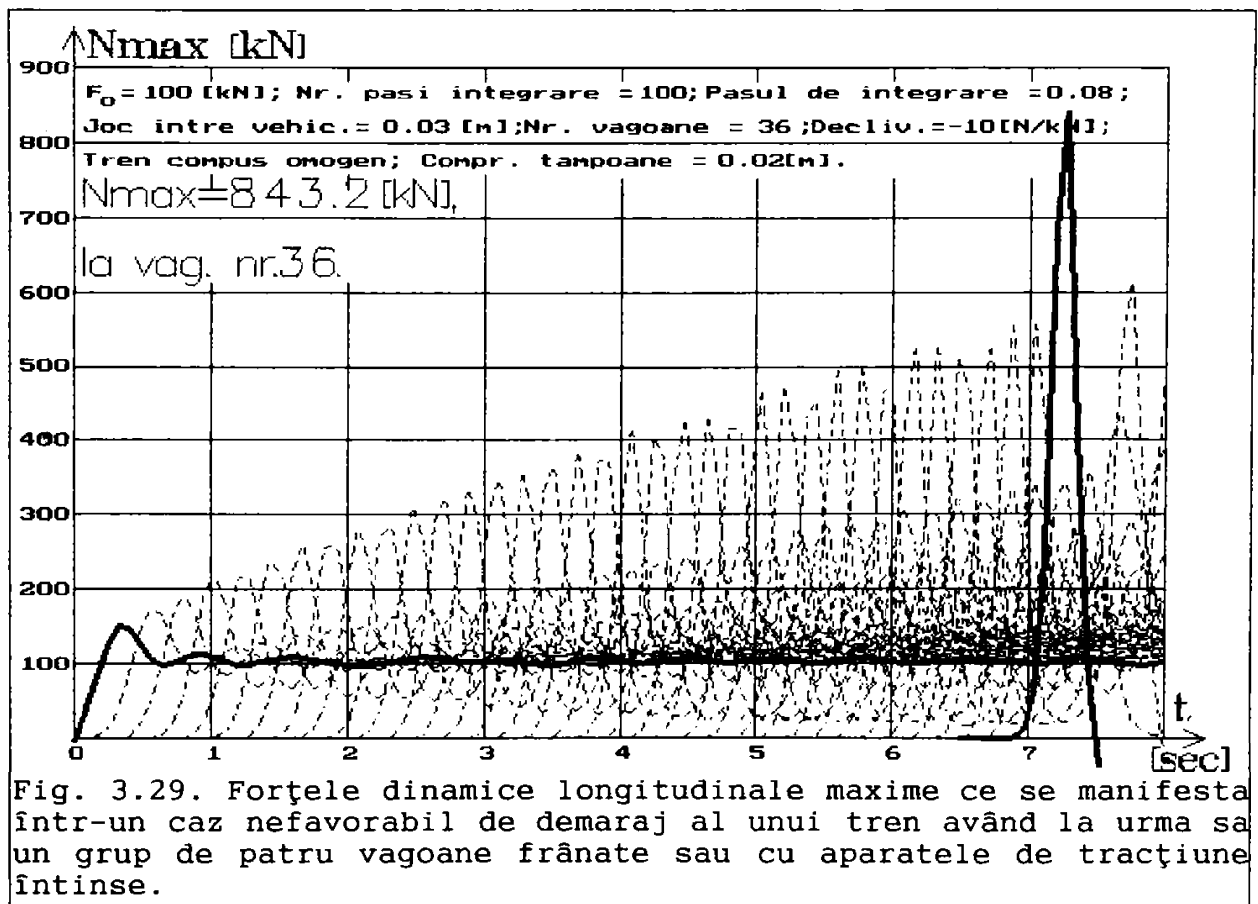
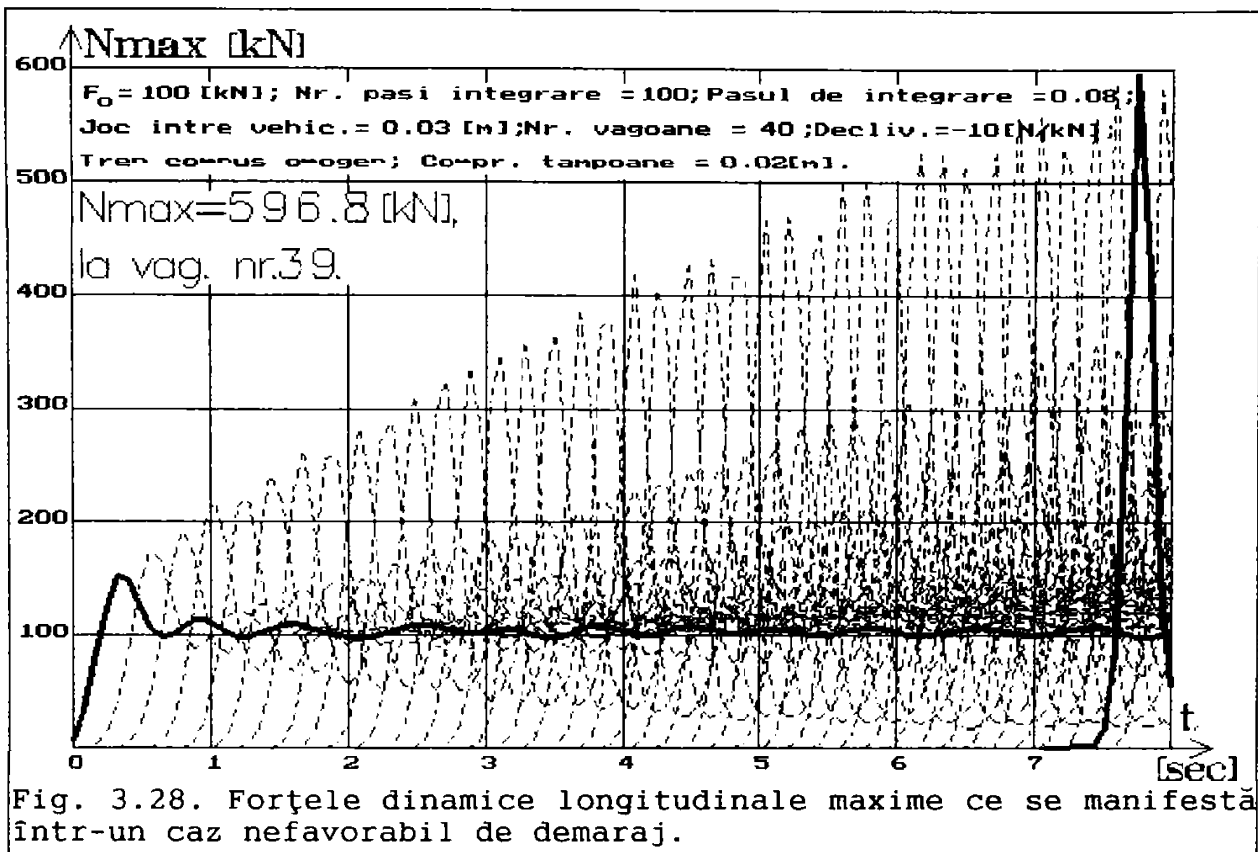












căror mărime crește odată cu creșterea valorilor jocului liber dintre vagoane. În plus, odată cu creșterea mărimii jocului liber, sporește și diferența dintre valoarea forței de tracțiune dezvoltată de locomotivă și valoarea forței dinamice longitudinale maxime, fig. 3.8.,....fig. 3.10.;

-în cazul în care demarajul trenurilor se execută din pantă valorile forțelor dinamice longitudinale sunt mult mai mari decât în cazul demarajului aceluiasi tren din rampă sau din palier, fig. 3.11.,....fig. 3.13.;

-modul de compunere al trenurilor de marfă pentru același număr de vagoane (tren compus omogen, tren compus neomogen descrescător sau tren compus neomogen crescător) nu influențează în mod semnificativ valorile maxime ale forțelor dinamice longitudinale ce apar în timpul demarajului, fig. 3.4., fig. 3.14. și fig. 3.15.;

-în cazul în care la legarea locomotivei la tren se comprimă tamponurile dintre vehicule pentru ușurarea demarajului trenurilor de marfă lungi și grele, atunci valorile maxime ale forțelor dinamice longitudinale cresc odată cu creșterea mărimii comprimării tamponurilor, fig. 3.16. și fig. 3.17.;

-odată cu creșterea numărului de vagoane din compunerea trenurilor omogene, și deci odată cu creșterea tonajelor acestora, cresc și valorile maxime ale forțelor dinamice longitudinale, fig. 3.18. și fig. 3.4.;

-existența în corpul trenurilor de marfă omogene care demarează a unui grup de vagoane goale, influențează valorile maxime ale forțelor dinamice longitudinale, în funcție de locul din tren unde sunt plasate aceste vagoane, precum și de numărul lor. Influența cea mai pronunțată se manifestă în cazul în care, de exemplu un grup de cinci vagoane goale este plasat imediat după locomotivă, caz în care valoarea maximă a forțelor dinamice longitudinale (249,2 kN) este mai mare cu circa 25 % decât în cazul în care același număr de vagoane goale este plasat la urma trenului, fig. 3.19., fig. 3.20., și fig. 3.21.. În cazul în care numărul de vagoane goale plasate imediat după locomotivă este mai mare (de exemplu zece vagoane goale), fig. 3.22., valorile maxime ale forțelor dinamice longitudinale sunt mai mici decât în cazul în care imediat după locomotivă sunt plasate doar cinci vagoane goale, fig. 3.19.;

-modul de manevrare al locomotivei în timpul primei faze a

demarajului exercită o influență semnificativă asupra mărimii și distribuției forțelor dinamice longitudinale. Dacă are loc modificarea valorii forței de tracțiune înainte de punerea în mișcare a ultimului vehicul din tren, în sensul creșterii sau scăderii acesteia, în corpul trenului apar reacțiuni dinamice longitudinale pronunțate, fig. 3.23.,.....fig.3.25., cel mai nefavorabil caz fiind acela în care forța de tracțiune crește în timpul primei faze a demarajului, fig. 3.24.;

-dacă din diferite cauze la urma trenului rămân un anumit număr de vagoane frânate sau cu legăturile dintre ele întinse, în aparatul de tracțiune al primului vehicul din acest grup apar forțe dinamice longitudinale mari. Odată cu creșterea numărului de vagoane de la urma trenului frânate sau cu legăturile dintre ele întinse, valorile maxime ale forțelor dinamice longitudinale din aparatul de tracțiune al primului vagon din grup cresc, fig. 3.26. și fig. 3.27.;

Având în vedere cele arătate mai sus se poate presupune cel puțin teoretic că există posibilitatea ca în activitatea curentă de zi cu zi din exploatarea căilor ferate românești, să apară și unele cazuri extrem de nefavorabile de demaraj a unor trenuri de marfă lungi și grele, cazuri în care toți factorii de influență prezentați mai înainte să se însumeze în sens negativ (de exemplu demarajul unui tren de marfă dintr-o pantă, tren ce are tamponanele comprimate înaintea demarajului precum și jocuri libere mari între vehicule, cu locomotiva dezvoltând forță de tracțiune mare). În acest caz valorile maxime ale forțelor dinamice longitudinale ce apar în timpul demarajului sunt de circa cinci-șase ori mai mari decât forța de tracțiune dezvoltată de locomotivă, fig. 3.28., iar dacă la urma trenului există și un grup de vagoane frânate sau având aparatele de tracțiune întinse (format de exemplu dintr-un număr de patru vagoane), forța dinamică longitudinală maximă din aparatul de tracțiune al primului vehicul din acest grup atinge valoarea de 850 kN, valoare mai mare de circa opt-nouă ori decât valoarea forței de tracțiune dezvoltată de locomotivă, fig. 3.29.

Deoarece pentru o forță de circa 200 de kN, are loc comprimarea completă a arcului volut echivalent al unei legături dintre două vehicule, în toate cazurile în care apar forțe dinamice longitudinale mai mari decât această valoare, se va produce comprimarea completă a dispozitivelor elastice ale aparatelor de

tracțiune, comprimare urmată de transmiterea neelastică în continuare a forțelor dinamice longitudinale. Ca urmare tensiunile reale de întindere din aparatul de tracțiune în timpul transmiterii neelastice a forței dinamice longitudinale maxime, forță ce are caracter de șoc, sunt mult mai mari decât tensiunile ce rezultă în cazul calculelor de verificare ale aparatelor de tracțiune la o sarcină de calcul de circa 300 de kN, sarcină aplicată static.

În concluzie, în toate cazurile în care valoarea maximă a forțelor dinamice longitudinale depășește valoarea de 200 kN, există posibilitatea de producere, în urma șocurilor repetate, a unor fisuri în aparatele de tracțiune sau de adâncire a unor eventuale microfisuri existente, apărând astfel condițiile pentru a se produce ruperea acestora.

3.3. FORȚELE DINAMICE LONGITUDINALE CE SE DEZVOLTĂ ÎN TIMPUL DEMARAJULUI TRENURILOR FORMATE DIN VAGOANE ÎNZESTRATE CU APARATE DE TRACȚIUNE DISCONTINUE CU ARCURI INELARE

3.3.1. GENERALITĂȚI

Atât trenurile de călători cât și trenurile de marfă sunt compuse prin legare elastică între ele a unui anumit număr de vagoane, identice sau nu.

În cazul trenurilor de marfă predomină compunerea neomogenă a acestora, vagoanele fiind de diverse tipuri și având diverse încărcături. Datorită tonajelor mari, pentru a ușura demararea, trenurile de marfă se compun prin plasarea vagoanelor grele în partea din față, iar a celor ușoare în partea din spate a trenului, lăsându-se și un anumit joc între aparatele de ciocnire, caz în care luarea din loc a trenului se face vagon după vagon. Tot în scopul ușurării demarajului, trenurile de marfă lungi și grele se comprimă parțial înaintea demarajului.

Ca urmare în primele momente ale demarajului, locomotiva pusă în mișcare parcurge un spațiu liber egal cu jocul dintre locomotivă și primul vagon, joc dat de distanța dintre tamponane și de săgeata aparatelor de ciocnire, figura 3.31..

La finele cursei libere locomotiva atinge o viteză oarecare și acționează asupra primului vagon cu o forță aplicată în aparatul de tracțiune al acestuia, forță ce are caracter de șoc, punându-l

în mișcare. După ce primul vagon a parcurs cursa liberă dintre acesta și vagonul următor, el va avea o viteză oarecare și va acționa asupra celui de-al doilea vagon, tot cu o forță având caracter de șoc. Fenomenul descris mai sus se va repeta până la urma trenului, moment în care întregul tren este pus în mișcare, iar prima fază a demarajului se încheie.

Deoarece masa și viteza părții din tren aflată deja în mișcare cresc pe măsură ce locomotiva pune în mișcare tot mai multe vagoane, energia cinetică a sistemului în mișcare crește, și în consecință crește în mod corespunzător și forța de șoc cu care partea aflată în mișcare acționează asupra părții care staționează.

În funcție de valoarea jocului dintre vehicule, masa acestora și de forța de tracțiune dezvoltată de locomotivă, interacțiunea dinamică dintre vehicule în prima fază a demarajului conduce la apariția unor forțe dinamice longitudinale a căror valori maxime pot depăși în anumite condiții rezistențele admisibile ale aparatelor de tracțiune.

3.3.2.DETERMINAREA FORȚELOR DIN APARATELE DE TRACȚIUNE

Pentru stabilirea variației forțelor longitudinale în tren, la demaraj, se consideră inițial un tren omogen compus din vagoane înzestrate cu aparate de tracțiune discontinue cu arcuri inelare, situat în aliniament și palier și comprimat complet și uniform de către locomotivă [28],[39]. Pe figura 3.30. se prezintă schema trenului, numerotarea vagoanelor precum și a legăturilor dintre vagoane.

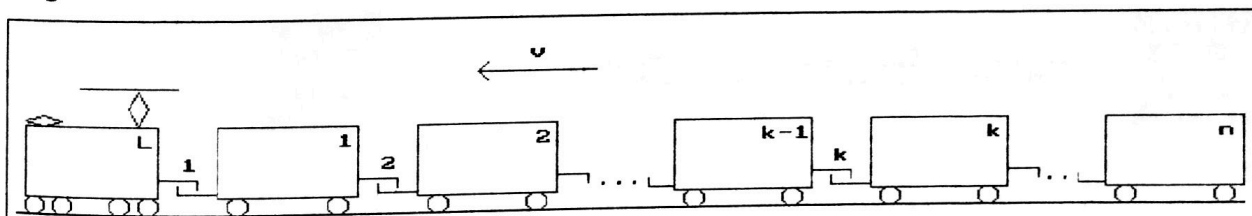


Fig. 3.30. Schema de numerotare a vagoanelor și a legăturilor dintre ele.

În acest caz arcurile tamponelor au săgeată maximă, iar locomotiva la pornire, înainte de a acționa asupra primului vagon, va parcurge o cursă liberă, figura 3.31.:

$$s_1 = j_1 + f_{t1} \quad (3.9.)$$

în care:

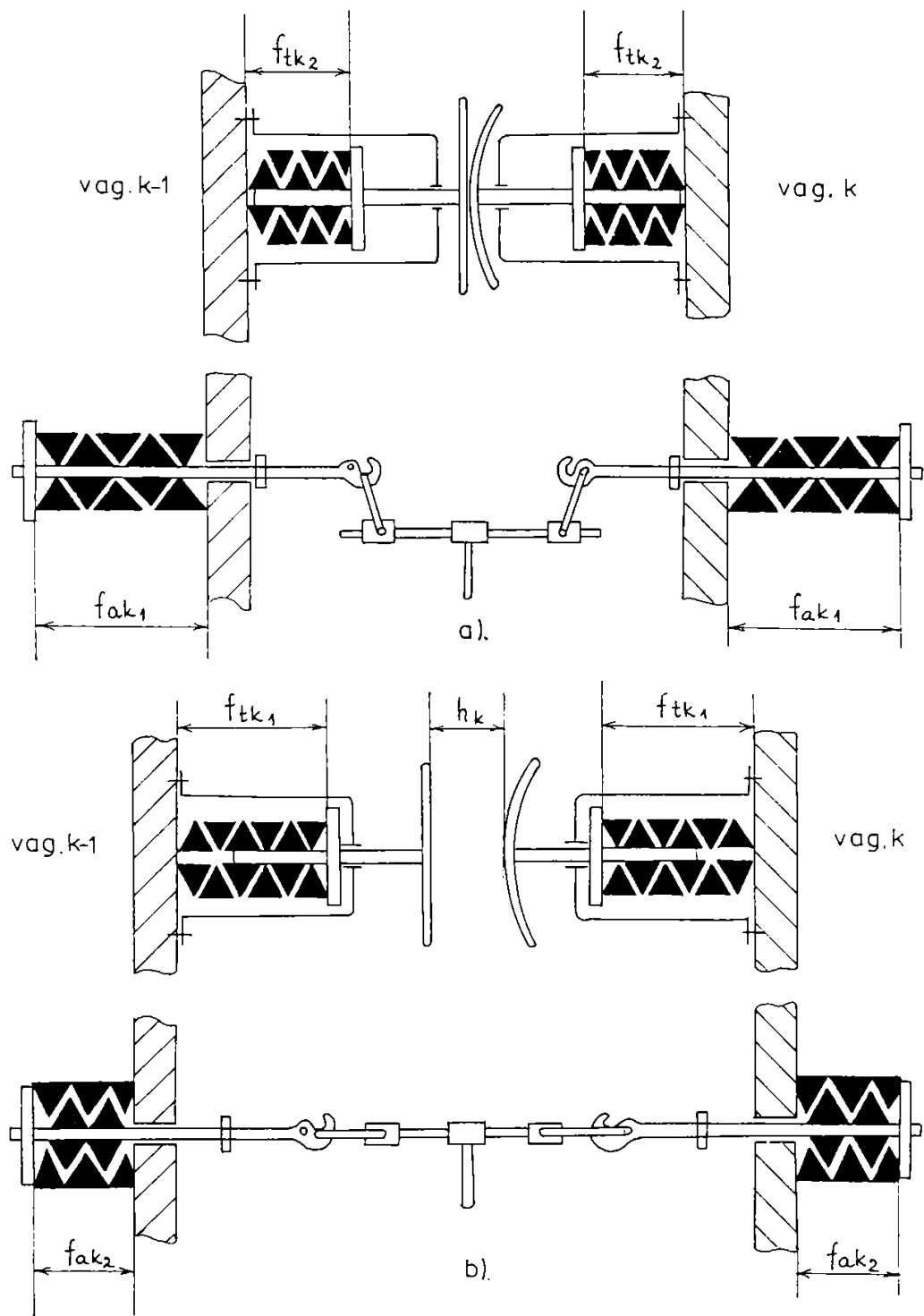


Fig.331. Starea aparatelor de tracțiune și ciocnire ale unui vagon oarecare k , înainte (a) și în timpul demarajului acestuia (b).

- j_1 reprezintă distanța (jocul liber) dintre tampoane atunci când aparatul de legare este întins, dar arcurile aparatului de tracțiune sunt necomprimate, în metri;
- f_{t1} este săgeata maximă a arcurilor de la opereche de tampoane, în contact, în metri, iar:

$$f_{t1} = 2 * (f_{t11} - f_{t12}) . \quad (3.10.)$$

În relația (3.10.) f_{t11} și f_{t12} reprezintă săgeata arcurilor tamponelor dintre locomotivă și primul vagon înainte, respectiv după comprimarea trenului.

După parcurgerea cursei libere s_1 , locomotiva va acționa asupra primului vagon, iar aparatele de tracțiune dintre locomotivă și primul vagon se vor alungi cu valoarea săgeții arcurilor lor, f_{a1} , figura 3.31., iar:

$$f_{a1} = 2 * (f_{a11} - f_{a12}) , \quad (3.11.)$$

unde:

- f_{a11} și f_{a12} reprezintă săgeata arcului inelar al unui aparat de tracțiune dintre locomotivă și primul vagon, înainte și după comprimare, în metri.

Deci primul vagon se va pune în mișcare numai după ce locomotiva a parcurs spațiul h_1 , dat de relația:

$$h_1 = j_1 + f_{t1} + f_{a1} . \quad (3.12.)$$

În intervalul de timp necesar parcurgerii spațiului s_1 , locomotiva va atinge o viteză oarecare, iar în momentul când acționează asupra primului vagon, va avea o anumită energie cinetică, proporțională cu masa ei și cu pătratul vitezei în momentul respectiv. Ca urmare acțiunea locomotivei asupra primului vagon va avea un caracter de șoc.

Aplicând teorema energiei cinetice rezultă că, în momentul începerii acțiunii locomotivei asupra primului vagon, energia cinetică a locomotivei (după parcurgerea spațiului s_1 de către aceasta) este dată de relația [28] :

$$(1+\gamma_L) * \frac{M_L * v_o^2}{2} = (F_o - r_{dL} * G_L) * s_1 + k_{t1} * \int_{f_{t0}}^{f_{t0} + 2 * f_{t1}} f_t * df_t, \quad (3.13.)$$

unde:

- F_o este forța de tracțiune dezvoltată de locomotivă, considerată constantă în perioada demarajului, în N;
- v_o reprezintă viteza locomotivei în momentul începerii acțiunii acesteia asupra primului vagon, în m/s;
- M_L este masa locomotivei, în kg;
- r_{dL} reprezintă rezistența specifică la demaraj a locomotivei, presupusă constantă în timpul parcurgerii spațiului s_1 , în N/kN;
- k_{t1} este rigiditatea la destindere a unui tampon, de la primul vagon, în N/m;
- f_{t0} reprezintă săgeata inițială (din fabricație) a arcului inelar de la un tampon, în metri;

Având energia cinetică dată de relația (3.13.) locomotiva în mișcare, va acționa asupra primului vagon (în staționare) și ca urmare arcurile inelare ale celor două aparate de tracțiune care leagă locomotiva și primul vagon vor începe să se comprime, iar distanța dintre centrul de greutate al locomotivei și centrul de greutate al primului vagon va crește. În momentul comprimării maxime a celor două arcuri inelare (presupuse identice), viteza primului vagon va fi egală cu cea a locomotivei [28].

În intervalul de timp necesar pentru punerea în mișcare a primului vagon, ecuațiile diferențiale ale mișcării locomotivei și primului vagon sunt:

$$(1+\gamma_L) * M_L * \frac{d^2 x_L}{dt^2} = F_o - r_{oL} * G_L - N_1, \quad (3.14.)$$

$$(1+\gamma_v) * M_{v1} * \frac{d^2 x_1}{dt^2} = N_1 - r_{dv} * G_{v1}. \quad (3.15.)$$

unde:

- $x_L(t)$ și $x_1(t)$ reprezintă coordonatele centrului de greutate ale locomotivei și primului vagon, în metri;
- r_{oL} este rezistența specifică la înaintare a locomotivei în cazul circulației în aliniament și palier, presupusă constantă în perioada demarajului, în N/kN;

- N_1 reprezintă forța longitudinală din legătura dintre locomotivă și primul vagon, în N;
- M_{v1} este masa primului vagon, în kg;
- r_{dv} reprezintă rezistența specifică la demaraj a primului vagon, presupusă constantă în intervalul de timp necesar pentru punerea în mișcare a primului vagon, în N/kN.

Notând cu f_{a1} alungirea legăturii dintre locomotivă și primul vagon, figura 3.31., alungire egală cu suma comprimării arcurilor inelare dintre locomotivă și primul vagon, forța longitudinală N_1 se poate exprima cu relația:

$$N_1 = k_{a1} * (f_{a0} + f_{a1}), \quad (3.16.)$$

unde:

- k_{a1} este rigiditatea echivalentă la comprimare a celor două arcuri inelare ale legăturii, în N/m;
- f_{a0} reprezintă suma săgeților inițiale (din fabricație) ale celor două arcuri inelare ale legăturii, în metri.

Deoarece:

$$\frac{d^2 x_L}{dt^2} - \frac{d^2 x_1}{dt^2} = \frac{d^2 f_{a1}}{dt^2}, \quad (3.17.)$$

se obține:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 f_{a1}}{dt^2} + \left(\frac{1}{(1+\gamma_L) * M_L} + \frac{1}{(1+\gamma_v) * M_{v1}} \right) * k_{a1} * (f_{a0} + f_{a1}) = \\ = \frac{F_o - I_{oL} * G_L}{(1+\gamma_L) * M_L} + \frac{I_{dv} * G_{v1}}{(1+\gamma_v) * M_{v1}} \end{aligned} \quad (3.18.)$$

Soluția generală a ecuației (3.18.) este:

$$\begin{aligned} f_{a1} = C * \sin \left[\sqrt{\left(\frac{1}{(1+\gamma_L) * M_L} + \frac{1}{(1+\gamma_v) * M_{v1}} \right) * k_{a1}} * t + \varphi \right] + \\ + \frac{M_{v1} * \{ F_o * (1+\gamma_v) + G_L * [I_{dv} * (1+\gamma_L) - I_{oL} * (1+\gamma_v)] \}}{[(1+\gamma_v) * M_{v1} + (1+\gamma_L) * M_L] * k_{a1}} - f_{a0}, \end{aligned} \quad (3.19.)$$

unde C și φ sunt constante de integrare ce se determină din condițiile inițiale.

Analizând relația (3.19.) rezultă că valoarea maximă a funcției f_{a1} (adică valoarea maximă a alungirii legăturii dintre locomotivă și primul vagon) în momentul egalității dintre viteza primului vagon și cea a locomotivei, nu depinde de valoarea constantei ϕ , și este dată de relația [28] :

$$f_{a1max} = C + \frac{M_{v1} * \{F_o * (1 + \gamma_v) + G_L * [r_{dv} * (1 + \gamma_L) - r_{oL} * (1 + \gamma_v)]\}}{[(1 + \gamma_v) * M_{v1} + (1 + \gamma_L) * M_L] * k_{a1}} - f_{a0}. \quad (3.20.)$$

Pentru următoarele condiții inițiale:

$$t=0, f_{a0}=0 \text{ și } \frac{df_{a1}}{dt} = v_o, \quad (3.21.)$$

unde se consideră ca moment inițial ($t=0$) momentul în care locomotiva, având energia cinetică dată de relația (3.13.), începe să acționeze asupra primului vagon aflat în staționare, se obține:

$$C = \sqrt{D_1 + F_1 + f_{a0}^2}, \quad (3.22.)$$

unde s-a notat:

$$D_1 = \frac{M_{v1}^2 * \{F_o * (1 + \gamma_v) + G_L * (r_{dv} * (1 + \gamma_L) - r_{oL} * (1 + \gamma_v))\}^2}{[(1 + \gamma_v) * M_{v1} + (1 + \gamma_L) * M_L]^2 * k_{a1}^2}, \quad (3.23.)$$

$$F_1 = \frac{2 * M_{v1} * \{E_{c1} * (1 + \gamma_v) - f_{a0} * [F_o * (1 + \gamma_v) + G_L * (r_{dv} * (1 + \gamma_L) - r_{oL} * (1 + \gamma_v))]\}}{[(1 + \gamma_v) * M_{v1} + (1 + \gamma_L) * M_L] * k_{a1}} \quad (3.24.)$$

În relația (3.24.) energia cinetică a locomotivei, în momentul acțiunii acesteia asupra primului vagon, s-a notat cu E_{c1} , iar aceasta se determină cu relația (3.13.)

În baza relației (3.22.), relația (3.20.) devine:

$$f_{a1max} = \frac{M_{v1} * \{F_o * (1 + \gamma_v) + G_L * [r_{dv} * (1 + \gamma_L) - r_{oL} * (1 + \gamma_v)]\}}{[(1 + \gamma_v) * M_{v1} + (1 + \gamma_L) * M_L] * k_{a1}} - f_{a0} + \sqrt{D_1 + F_1 + f_{a0}^2}. \quad (3.25.)$$

Notând cu :

$$X_1 = \beta * F_o + G_L * (\alpha * r_{dv} - \beta * r_{oL}), \quad (3.26.)$$

și

$$Y_1 = \alpha * M_L + \beta * M_{v1}, \quad (3.27.)$$

unde:

$$\alpha = 1 + \gamma_L, \quad (3.28.)$$

$$\beta = 1 + \gamma_v, \quad (3.29.)$$

relația (3.25.) devine:

$$f_{a1max} = \frac{M_{v1} * X_1}{Y_1 * k_{a1}} - f_{a0} + \sqrt{D_1 + F_1 + f_{a0}^2}. \quad (3.30.)$$

În momentul în care viteza primului vagon devine egală cu viteza locomotivei, alungirea legăturii dintre cele două vehicule este dată de relația (3.25.) respectiv (3.30.), iar valoarea acestei alungiri rămâne constantă până la demarajul ultimului vagon din tren. Atunci când locomotiva și primul vagon au parcurs o anumită distanță egală cu jocul dintre primul și al doilea vagon s_2 , începe procesul demarajului celui de-al doilea vagon. Ca urmare a celor de mai sus, în momentul începerii acțiunii primului vagon asupra celui de-al doilea vagon, partea de la capul trenului, formată din locomotivă și primul vagon, parte aflată în mișcare cu o viteză oarecare, poate fi privită ca un singur corp, inextensibil, având masa egală cu suma maselor vehiculelor componente, [28].

În momentul începerii acțiunii primului vagon asupra celui de-al doilea vagon, energia cinetică a locomotivei însumată cu cea a primului vagon este dată de relația [28] :

$$E_{c2} = (F_o - I_{dL} * G_L) * s_1 + (F_o - I_{oL} * G_L) * (s_2 + f_{a1max}) - I_{dv} * G_{v1} * s_2 - k_{a1} * \int_{f_{a0}}^{f_{a0} + f_{a1max}} f_{a1} * df_{a1} + k_{t1} * \int_{f_{t0}}^{f_{t0} + 2 * f_{t1}} f_t * df_t + k_{t2} * \int_{f_{t0}}^{f_{t0} + 2 * f_{t2}} f_t * df_t. \quad (3.31.)$$

Din punct de vedere fizic, membrii din dreapta ai relației (3.31.) au următoarele semnificații:

- $(F_o - I_{dL} * G_L) * s_1$ reprezintă suma lucrului mecanic efectuat de forța de tracțiune și de forța de rezistență la înaintare, ale

locomotivei, în timpul mișcării acesteia cu rezistența specifică r_{dL} , pe distanța s_1 ;

- $(F_o - r_{oL} * G_L) * (s_2 + f_{a1max})$ este suma lucrului mecanic efectuat de forța de tracțiune și de forța de rezistență la înaintare, ale locomotivei, în timpul mișcării acesteia cu rezistența specifică r_{oL} , pe distanța $s_2 + f_{a1max}$;

- $r_{dv} * G_{v1} * s_2$ reprezintă lucrul mecanic al forței de rezistență la înaintare a primului vagon în timpul mișcării acesteia, având rezistența specifică la demaraj r_{dv} pe distanța s_2 ;

- $k_{a1} * \int_{f_{a0}}^{f_{a0} + f_{a1max}} f_{a1} * df_{a1}$ este lucrul mecanic consumat pentru alungirea

legăturii dintre locomotivă și primul vagon;

- $k_{t1} * \int_{f_{t0}}^{f_{t0} + 2 * f_{t1}} f_t * df_t + k_{t2} * \int_{f_{t0}}^{f_{t0} + 2 * f_{t2}} f_t * df_t$ reprezintă lucrul mecanic produs

la destinderea tampoanelor primei și a celei de-a doua legături.

În intervalul de timp necesar pentru punerea în mișcare a celui de-al doilea vagon, ecuațiile diferențiale ale mișcării locomotivei împreună cu primul vagon și ale celui de-al doilea vagon sunt:

$$(\alpha * M_L + \beta * M_{v1}) * \frac{d^2 x_1}{dt^2} = F_o - (r_{oL} * G_L + r_{ov} * G_{v1}) - N_2, \quad (3.32.)$$

$$\beta * M_{v2} * \frac{d^2 x_2}{dt^2} = N_2 - r_{dv} * G_{v2}, \quad (3.33.)$$

unde:

- $x_1(t)$ și $x_2(t)$ reprezintă coordonatele centrelor de greutate ale părții din tren aflată în mișcare (locomotiva împreună cu primul vagon) și respectiv ale celui de-al doilea vagon, în metri;

- N_2 este forța longitudinală din legătura dintre primul și al doilea vagon, în N;

- M_{v2} și G_{v2} reprezintă masa (în kg) și respectiv greutatea (în kN) ale celui de-al doilea vagon.

Notând cu f_{a2} alungirea legăturii dintre primul și al doilea vagon, forța longitudinală N_2 se poate exprima cu relația:

$$N_2 = k_{a2} * (f_{a0} + f_{a2}), \quad (3.34.)$$

unde k_{a2} și f_{a0} au semnificații similare cu cele din relația (3.16).

Deoarece:

$$\frac{d^2x_1}{dt^2} - \frac{d^2x_2}{dt^2} = \frac{d^2f_{a2}}{dt^2}, \quad (3.35.)$$

se obține:

$$\begin{aligned} \frac{d^2f_{a2}}{dt^2} + \left(\frac{1}{\alpha * M_L + \beta * M_{v1}} + \frac{1}{\beta * M_{v2}} \right) * k_{a2} * (f_{a0} + f_{a2}) = \\ = \frac{F_o - (I_{oL} * G_L + I_{ov} * G_{v1})}{\alpha * M_L + \beta * M_{v1}} + \frac{I_{dv} * G_{v2}}{\beta * M_{v2}}. \end{aligned} \quad (3.36.)$$

Aplicând în mod similar, aceeași metodologie de calcul ce a condus la obținerea relației pentru determinarea alungirii maxime a legăturii dintre locomotivă și primul vagon, rezultă:

$$f_{a2max} = \frac{M_{v2} * X_2}{Y_2 * k_{a2}} - f_{a0} + \sqrt{D_2 + F_2 + f_{a0}^2}, \quad (3.37.)$$

în care s-a notat:

$$X_2 = \beta * F_o + G_L * (\alpha * I_{dv} - \beta * I_{oL}) + \beta * \delta * G_{v1}, \quad (3.38.)$$

$$\delta = I_{dv} - I_{ov}, \quad (3.39.)$$

$$Y_2 = \alpha * M_L + \beta * (M_{v1} + M_{v2}), \quad (3.40.)$$

$$D_2 = \frac{M_{v2}^2 * X_2^2}{Y_2^2 * k_{a2}^2}, \quad (3.41.)$$

$$F_2 = \frac{2 * M_{v2} * (\beta * E_{c2} - f_{a0} * X_2)}{Y_2 * k_{a2}}. \quad (3.42.)$$

În relația (3.42.) s-a notat cu E_{c2} , energia cinetică a locomotivei împreună cu primul vagon, în momentul acțiunii primului vagon asupra celui de-al doilea vagon, dată de relația (3.31.).

În momentul începerii acțiunii celui de-al doilea vagon asupra celui de-al treilea vagon, energia cinetică a părții din față a trenului (compusă din locomotivă și primele două vagoane) aflată în mișcare, este dată de relația:

$$\begin{aligned} E_{c3} = E_{c2} + (F_o - I_{oL} * G_L) * (S_3 + f_{a2max}) - I_{ov} * G_{v1} * (S_3 + f_{a2max}) - \\ - I_{dv} * G_{v2} * S_3 - k_{a2} * \int_{f_{a0}}^{f_{a0} + f_{a2max}} f_{a2} * df_{a2} + k_{t3} * \int_{f_{t0}}^{f_{t0} + 2 * f_{t3}} f_t * df_t \end{aligned} \quad (3.43.)$$

În mod similar, energia cinetică a grupului de vehicule format din locomotivă și primele trei vagoane, în momentul începerii acțiunii acestora asupra vagonului numărul patru este dată de relația:

$$E_{c4} = E_{c3} + (F_o - I_{0L} * G_L - I_{0v} * G_{v1}) * (S_4 + f_{a3max}) - I_{0v} * G_{v2} * (S_4 + f_{a3max}) - \\ - I_{dv} * G_{v3} * S_4 - k_{a3} * \int_{f_{a0}}^{f_{a0} + f_{a3max}} f_{a3} * df_{a3} + k_{t4} * \int_{f_{t0}}^{f_{t0} + 2 * f_{t4}} f_t * df_t, \quad (3.44.)$$

iar energia cinetică a locomotivei împreună cu primele patru vagoane, în momentul începerii acțiunii acestora asupra vagonului cu numărul de ordine cinci este dată de relația:

$$E_{c5} = E_{c4} + (F_o - I_{0L} * G_L - I_{0v} * G_{v1} - I_{0v} * G_{v2}) * (S_5 + f_{a4max}) - I_{0v} * G_{v3} * (S_5 + f_{a4max}) - \\ - I_{dv} * G_{v4} * S_5 - k_{a4} * \int_{f_{a0}}^{f_{a0} + f_{a4max}} f_{a4} * df_{a4} + k_{t5} * \int_{f_{t0}}^{f_{t0} + 2 * f_{t5}} f_t * df_t \quad (3.45)$$

Analizând relațiile (3.13.), (3.31.), (3.43.), (3.44.) și (3.45.) rezultă relația de recurență care permite determinarea energiei cinetice a părții din față a trenului (compusă din locomotivă și primele k-1 vagoane aflate în mișcare), în momentul începerii acțiunii acestora asupra unui vagon oarecare având numărul de ordine k, în staționare, și anume :

$$E_{ck} = E_{ck-1} + (F_o - I_{0L} * G_L - I_{0v} * \sum_{j=1}^{k-3} G_{vj}) * (S_k + f_{ak-1max}) - \\ - I_{0v} * G_{vk-2} * (S_k + f_{ak-1max}) - I_{dv} * G_{vk-1} * S_k - \\ - k_{ak-1} * \int_{f_{a0}}^{f_{a0} + f_{ak-1max}} f_{ak-1} * df_{ak-1} + k_{tk} * \int_{f_{t0}}^{f_{t0} + 2 * f_{tk}} f_t * df_t. \quad (3.46.)$$

Relația (3.46.) are sens pentru $k \geq 4$, iar pentru $k=3$, $k=2$ și $k=1$ sunt valabile relațiile (3.43.) și respectiv (3.31.) și (3.13.).

Având energia cinetică dată de relația (3.43.), grupul de vehicule în mișcare, format din locomotivă și primele două vagoane, va acționa asupra celui de-al treilea vagon, pe care îl va pune în mișcare. În momentul egalității vitezei vagonului numărul trei cu

viteza locomotivei și a primelor două vagoane, alungirea maximă a legăturii dintre cel de-al treilea vagon și vagonul numărul doi va fi dată de relația:

$$f_{a3max} = \frac{M_{v3} * X_3}{Y_3 * k_{a3}} - f_{a0} + \sqrt{D_3 + F_3 + f_{a0}^2}, \quad (3.47.)$$

în care s-a notat:

$$X_3 = \beta * F_o + G_L * (\alpha * I_{dv} - \beta * I_{oL}) + \beta * \delta * (G_{v1} + G_{v2}), \quad (3.48.)$$

$$Y_3 = \alpha * M_L + \beta * (M_{v1} + M_{v2} + M_{v3}), \quad (3.49.)$$

$$D_3 = \frac{M_{v3}^2 * X_3^2}{Y_3^2 * k_{a3}^2}, \quad (3.50.)$$

$$F_3 = \frac{2 * M_{v3} * (\beta * E_{c3} - f_{a0} * X_3)}{Y_3 * k_{a3}}. \quad (3.51.)$$

În mod analog, prin parcurgerea aceluiași etape se obține relația pentru determinarea alungirii maxime a legăturii dintre vagonul cu numărul patru și vagonul cu numărul trei, în momentul egalității vitezelor acestora, și anume:

$$f_{a4max} = \frac{M_{v4} * X_4}{Y_4 * k_{a4}} - f_{a0} + \sqrt{D_4 + F_4 + f_{a0}^2}, \quad (3.52.)$$

unde:

$$X_4 = \beta * F_o + G_L * (\alpha * I_{dv} - \beta * I_{oL}) + \beta * \delta * (G_{v1} + G_{v2} + G_{v3}), \quad (3.53.)$$

$$Y_4 = \alpha * M_L + \beta * (M_{v1} + M_{v2} + M_{v3} + M_{v4}), \quad (3.54.)$$

$$D_4 = \frac{M_{v4}^2 * X_4^2}{Y_4^2 * k_{a4}^2}, \quad (3.55.)$$

$$F_4 = \frac{2 * M_{v4} * (\beta * E_{c4} - f_{a0} * X_4)}{Y_4 * k_{a4}}. \quad (3.56.)$$

Analizând relațiile (3.30.), (3.37.), (3.47.) și (3.52.), rezultă relația de recurență care permite determinarea alungirii maxime a legăturii dintre vagonul k și vagonul k-1, dacă se cunoaște energia cinetică a grupului de vehicule în mișcare, grup format din locomotivă și primele k-1 vagoane, în momentul începerii acțiunii vagonului cu numărul k-1 asupra vagonului cu numărul k, și anume:

$$f_{akmax} = \frac{M_{vk} * X_k}{Y_k * k_{ak}} - f_{a0} + \sqrt{D_k + F_k + f_{a0}^2}, \quad (3.57.)$$

în care:

$$X_k = \beta * F_o + G_L * (\alpha * I_{dv} - \beta * I_{oL}) + \beta * \delta * \sum_{j=1}^{k-1} G_{vj}, \quad (3.58.)$$

$$Y_k = \alpha * M_L + \beta * \sum_{j=1}^k M_{vj}, \quad (3.59.)$$

$$D_k = \frac{M_{vk}^2 * X_k^2}{Y_k^2 * k_{ak}^2}, \quad (3.60.)$$

$$F_k = \frac{2 * M_{vk} * (\beta * E_{ck} - f_{a0} * X_k)}{Y_k * k_{ak}}. \quad (3.61.)$$

Relația (3.57.) este valabilă pentru $k \geq 3$, iar pentru $k=2$ și $k=1$ sunt valabile relațiile (3.37.) și (3.30.).

În conformitate cu cele de mai sus forța longitudinală maximă N_k (corespunzătoare alungirii maxime f_{akmax}) din aparatele de tracțiune ce leagă vagonul cu numărul de ordine k de vagonul cu numărul de ordine $k-1$, în timpul demarajului vagonului k , este dată de relația:

$$N_{kmax} = k_{ak} * (f_{a0} + f_{akmax}), \quad (3.62.)$$

respectiv:

$$N_{kmax} = \frac{M_{vk} * X_k}{Y_k} + \sqrt{D'_k + k_{ak} * F'_k + k_{ak}^2 * f_{a0}^2}, \quad (3.63.)$$

unde:

$$D'_k = \frac{M_{vk}^2 * X_k^2}{Y_k^2}, \quad (3.64.)$$

și

$$F'_k = \frac{2 * M_{vk} * (\beta * E_{ck} - f_{a0} * X_k)}{Y_k}. \quad (3.65.)$$

Relația (3.63.), obținută în baza metodologiei prezentate mai sus se poate utiliza cu succes și pentru determinarea forțelor longitudinale ce apar la demarajul unui tren de marfă neomogen, format din vagoane de diverse tipuri și având diferite încărcături, vagoane înzestrate cu același tip de aparate de amortizare a șocurilor sau nu, și cu diferite jocuri între vehicule.

De asemenea relația (3.63.) este aplicabilă și în cazul demarajului de pe declivități (rampe sau pante) a trenurilor

comprimate parțial sau necomprimate înaintea demarajului.

De exemplu, în cazul unui tren de marfă presupus omogen și comprimat inițial, care demarează de pe o rampă, rampă ce are valoarea i , relația (3.63.) devine:

$$N_{kmax} = \frac{M_{vk} * X'_k}{Y_k} + k_{ak} * \sqrt{\frac{M_{vk}^2 * X'_k{}^2}{Y_k^2 * k_{ak}^2} + \frac{2 * M_{vk} * (\beta * E'_{ck} - f_{a0} * X'_k)}{Y_k * k_{ak}} + f_{a0}^2}, \quad (3.66)$$

unde:

$$X'_k = \beta * F_o + G_L * [(I_{dv} + i) * \alpha - (I_{0L} + i) * \beta] + \beta * \delta * \sum_{j=1}^{k-1} G_{vj}, \quad (3.67.)$$

iar

$$\begin{aligned} E'_{ck} = & E'_{ck-1} + [F_o - (I_{0L} + i) * G_L - (I_{0v} + i) * \sum_{j=1}^{k-3} G_{vj}] * (S_k + f'_{ak-1max}) - \\ & - (I_{0v} + i) * G_{vk-2} * (S_k + f'_{ak-1max}) - (I_{dv} + i) * G_{vk-1} * S_k - \\ & - k_{ak-1} * \int_{f_{a0}}^{f_{a0} + f'_{ak-1max}} f_{ak-1} * df_{ak-1} + k_{tk} * \int_{f_{t0}}^{f_{t0} + 2 * f_{tk}} f_t * df_t. \end{aligned} \quad (3.68.)$$

În relația (3.68.) valoarea alungirii maxime $f'_{ak-1max}$ este dată de relația:

$$f'_{ak-1} = \frac{M_{vk-1} * X'_{k-1}}{Y_{k-1} * k_{ak-1}} - f_{a0} + \sqrt{D'_{k-1} + F'_{k-1} + f_{a0}^2}, \quad (3.69.)$$

în care:

$$X'_{k-1} = \beta * F_o + G_L * [(I_{dv} + i) * \alpha - (I_{0L} + i) * \beta] + \beta * \delta * \sum_{j=1}^{k-2} G_{vj}, \quad (3.70.)$$

$$Y_{k-1} = \alpha * M_L + \beta * \sum_{j=1}^{k-1} M_{vj}, \quad (3.71.)$$

$$D'_{k-1} = \frac{M_{vk-1}^2 * X'_{k-1}{}^2}{Y_{k-1}^2 * k_{ak-1}^2}, \quad (3.72.)$$

$$F'_{k-1} = \frac{2 * M_{vk-1} * [(\beta * E'_{ck-1} - f_{a0} * X'_{k-1})]}{Y_{k-1} * k_{ak-1}}. \quad (3.73.)$$

În mod asemănător, în cazul unui tren de marfă omogen considerat înaintea demarajului ca fiind parțial comprimat (partea din față)

și parțial întins (partea de la urmă), care demarează din aliniament și palier, relația pentru determinarea forței dinamice longitudinale maxime din aparatul de tracțiune al primului vagon din partea rămasă întinsă de la urma trenului este :

$$N_{zmax} = \frac{M_{vz} * X_z}{Y_z} + k_{az} * \sqrt{\frac{M_{vz}^2 * X_z^2}{Y_z^2 * k_{az}^2} + \frac{2 * M_{vz} * (\beta * E_{cz} - f_{a0} * X_z)}{Y_z * k_{az}} + f_{a0}^2}, \quad (3.74.)$$

în care:

$$X_z = \beta * F_o + G_L * (\alpha * r_{dv} - \beta * r_{oL}) + \beta * \delta * \sum_{j=1}^{z-1} G_{vj}, \quad (3.75.)$$

$$Y_z = \alpha * M_L + \beta * \left(\sum_{j=1}^{z-1} M_{vj} + M_{vz} \right), \quad (3.76.)$$

iar:

- z reprezintă numărul de ordine al primului vagon din partea rămasă întinsă de la urma trenului;
- M_{vz} este suma maselor vagoanelor din partea de la urma trenului care a rămas întinsă, și care trebuie demarate simultan, în kg;
- E_{cz} reprezintă energia cinetică a părții din față a trenului, parte compusă din locomotivă și primele z-1 vagoane, aflată în mișcare, în momentul începerii acțiunii acestei părți asupra vagonului cu numărul de ordine z aflat în staționare, energie ce se determină în baza relației (3.46.) în care k se înlocuiește cu valoarea cunoscută pentru z.

Pentru determinarea, studiul și analiza forțelor dinamice longitudinale ce apar în trenurile de marfă, în procesul demarajului acestora, s-a utilizat tehnica de calcul, realizându-se mai multe programe de simulare originale, în limbaj Turbo Pascal V 7.0, [Anexa 3] și s-au simulat un mare număr de cazuri concrete de demaraj a trenurilor de marfă, cazuri cât mai apropiate sau identice cu cele întâlnite în exploatarea curentă a căilor ferate.

Rezultatele acestor simulări precum și analiza factorilor ce influențează, apariția, evoluția și mai ales valoarea maximă a forțelor dinamice longitudinale în timpul demarajului se prezintă pe figurile 3.32, ..., 3.42..

Analizând un număr mare de variante de simulare a demarajului trenurilor de marfă, se pot trage următoarele concluzii importante:

- în timpul demarajului apar forțe dinamice longitudinale în prima treime a trenului, a căror valoare maximă este mai mare cu circa

50%-100% decât valoarea forței de tracțiune aplicată primului vagon, fig. 3.32.;

-valoarea maximă a forțelor dinamice longitudinale este direct proporțională cu mărimea forței de tracțiune dezvoltată de locomotivă în timpul demarajului, fig. 3.32.;

-forțele longitudinale din timpul demarajului cresc ca valoare odată cu creșterea mărimii jocului liber dintre vehicule, fig. 3.33.;

-în cazul demarajului trenului de pe declivități cu locomotiva dezvoltând forță de tracțiune constantă, mărimea și distribuția forțelor dinamice longitudinale depinde în mod esențial de tipul declivității. Astfel în cazul demarajului de pe pante, valoarea maximă a forțelor dinamice longitudinale apare în partea de la urma trenului și este de circa două ori mai mare decât în cazul demarajului din palier și de circa patru ori mai mare decât în cazul demarajului din rampă, fig. 3.34.;

-valoarea maximă a forțelor dinamice longitudinale din timpul demarajului este influențată și de mărimea precomprimării inițiale a trenului realizată cu ocazia legării locomotivei la tren. Cu cât trenul este comprimat mai puternic înaintea demarajului cu atât crește valoarea forțelor dinamice longitudinale maxime ce acționează în timpul demarajului, fig. 3.35.;

-la fel ca și în cazul declivităților, modul de compunere omogen sau neomogen al trenului influențează în mod esențial valorile maxime precum și distribuția în lungul trenului a forțelor dinamice longitudinale. Astfel, în cazul trenurilor de marfă compuse neomogen crescător la care greutatea vagoanelor crește de la locomotivă spre urma trenului, valorile maxime ale forțelor dinamice longitudinale din timpul demarajului acționează în ultima treime a trenului, și sunt mai mari cu circa 20% decât în cazul trenurilor omogene și respectiv mai mari cu circa 40% decât în cazul trenurilor neomogene compuse descrescător la care greutatea vagoanelor scade de la locomotivă spre urma trenului, pentru același număr de vagoane, fig. 3.36.;

-în cazul trenurilor de marfă compuse omogen, valorile maxime ale forțelor dinamice longitudinale din timpul demarajului nu sunt influențate în mod semnificativ de mărimea tonajului trenului, fig. 3.37.;

-în cazul trenurilor de marfă compuse neomogen descrescător și

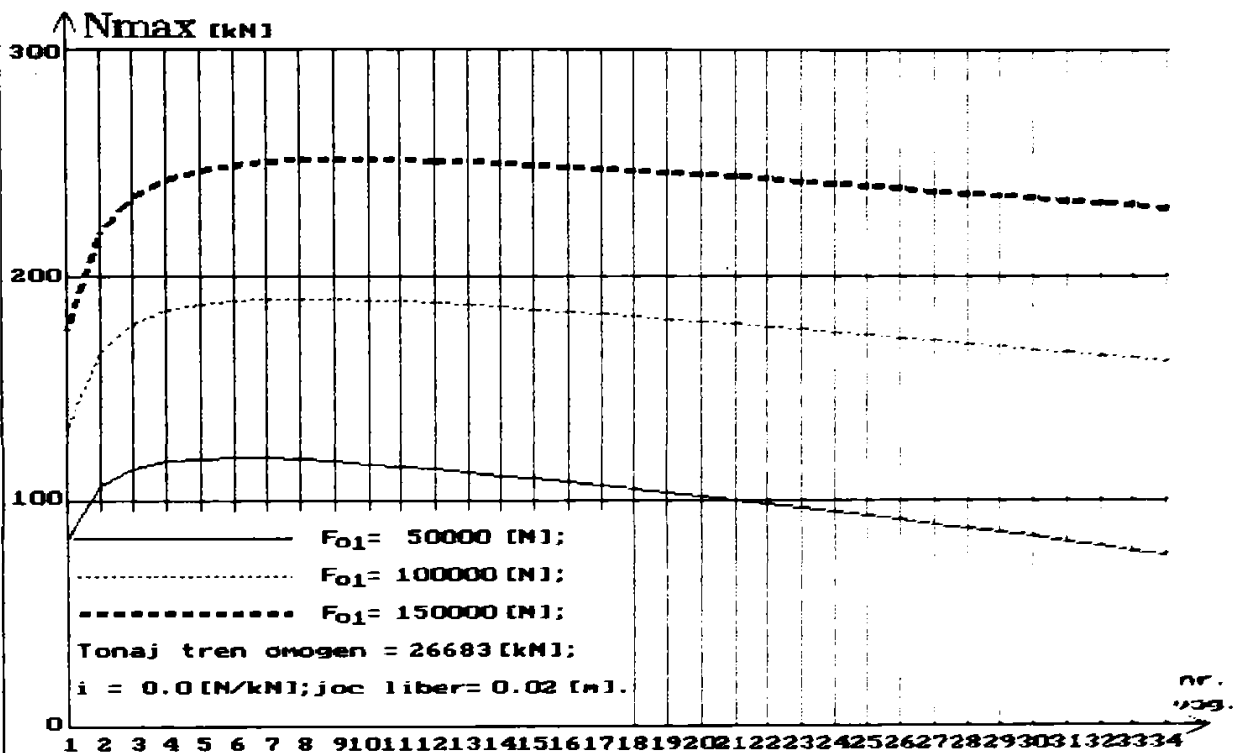


Fig. 3.32. Influența mărimii forței de tracțiune asupra valorii forțelor dinamice longitudinale.

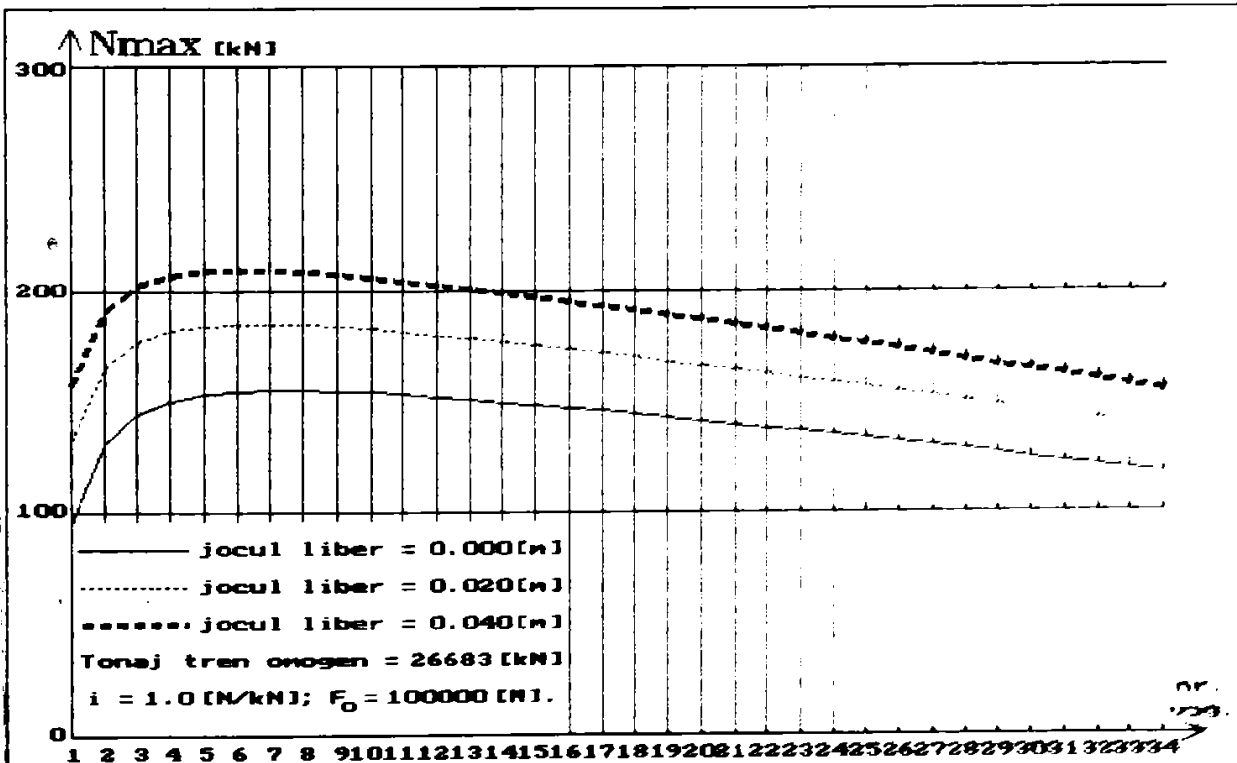


Fig. 3.33. Influența mărimii jocului liber dintre vehicule asupra valorii forțelor dinamice longitudinale.

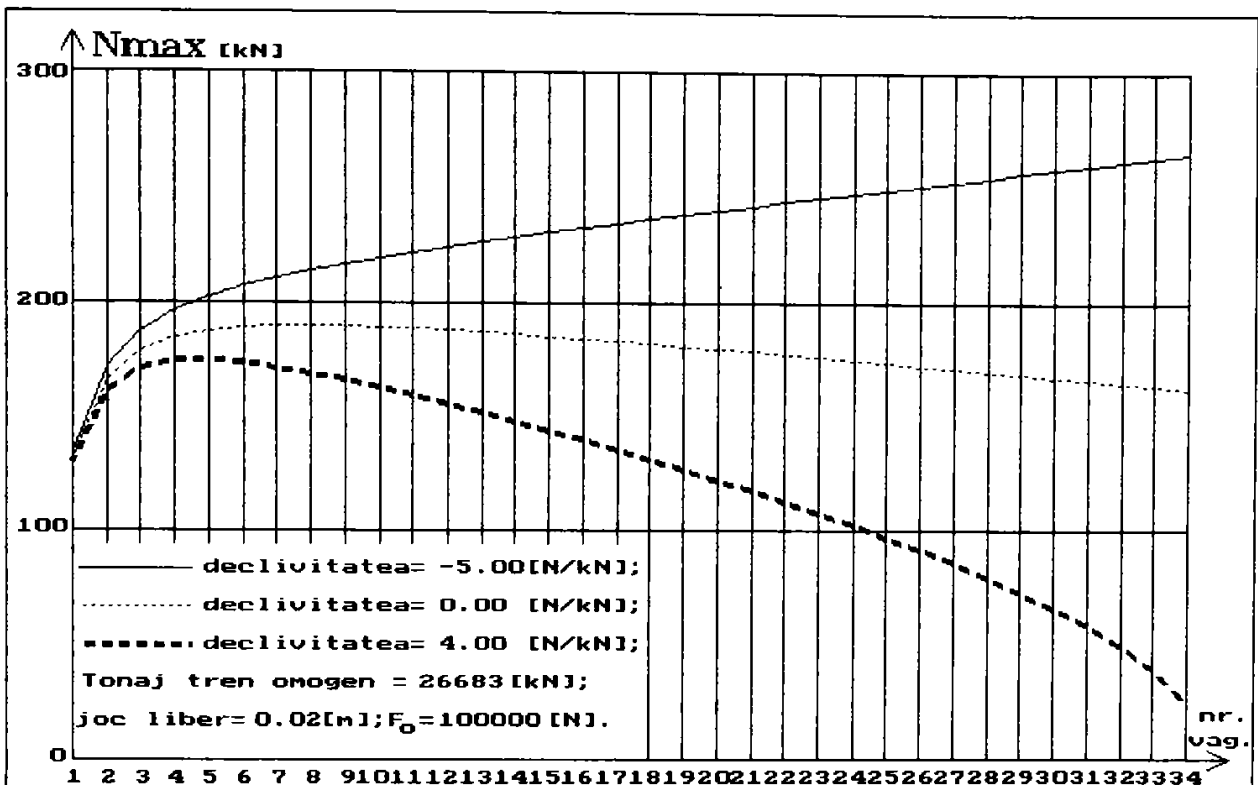


Fig. 3.34. Influența mărimii declivității de pe care se demarează asupra valorii forțelor dinamice longitudinale.

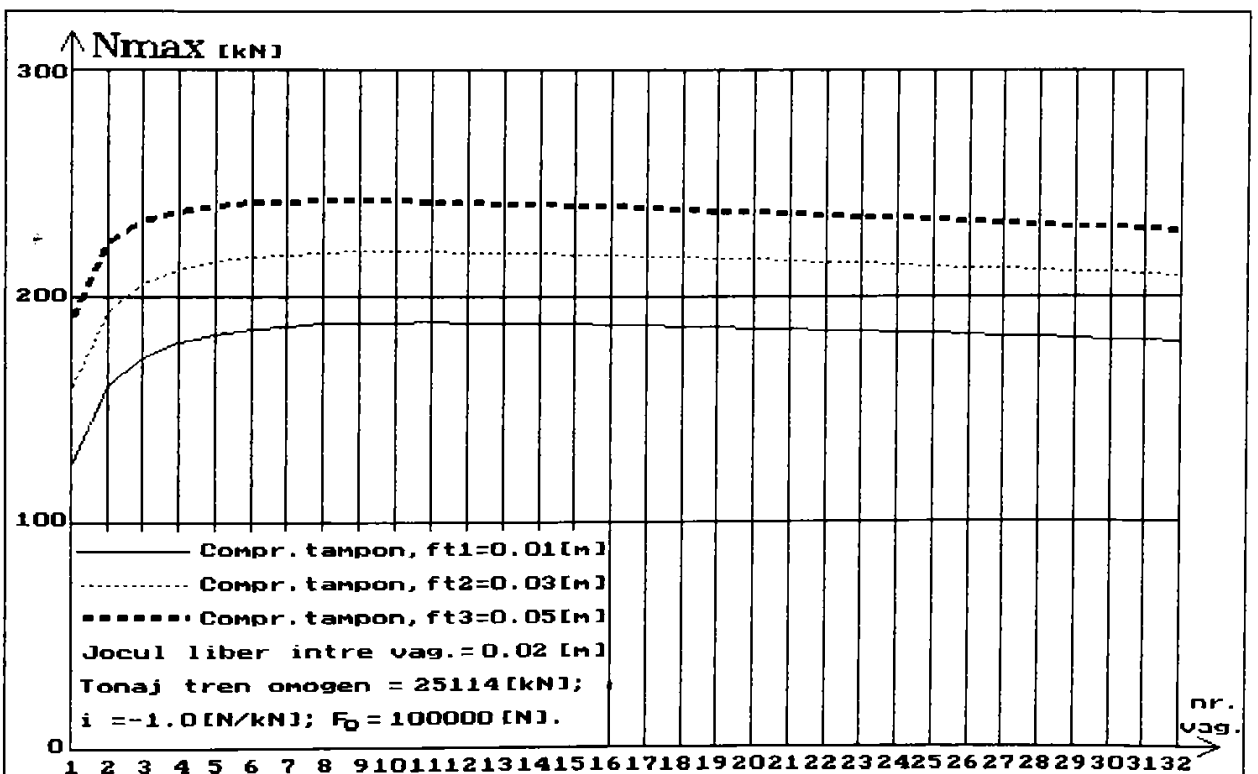
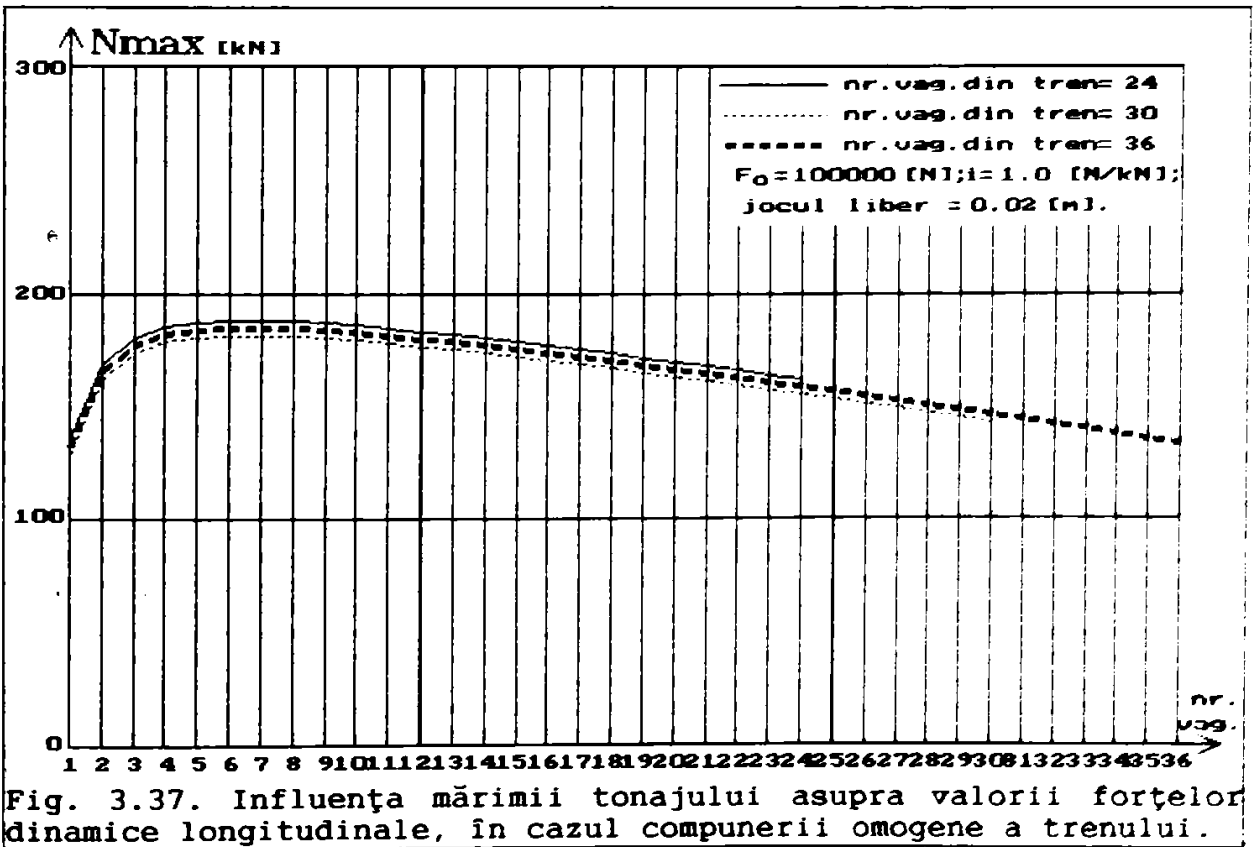
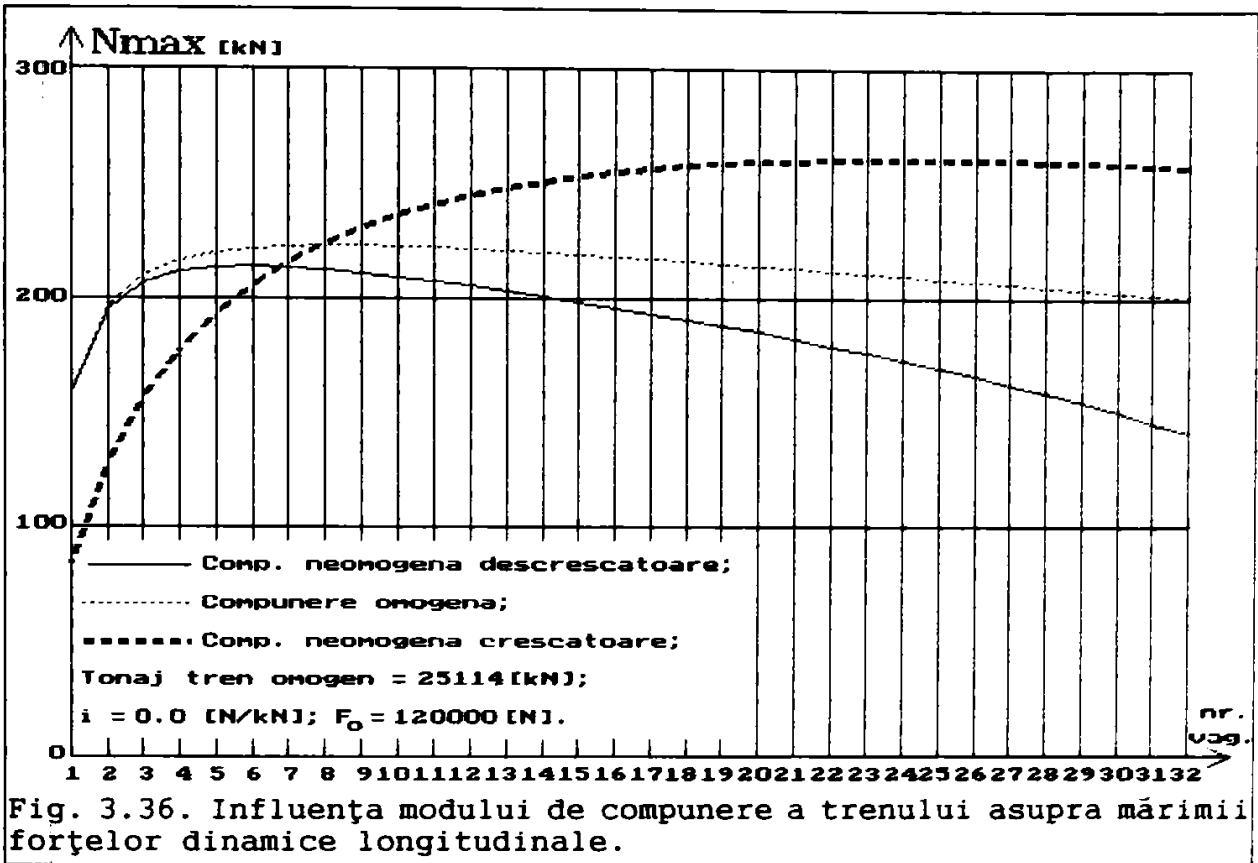


Fig. 3.35. Influența mărimii precomprimării inițiale a trenului asupra valorii forțelor dinamice longitudinale.



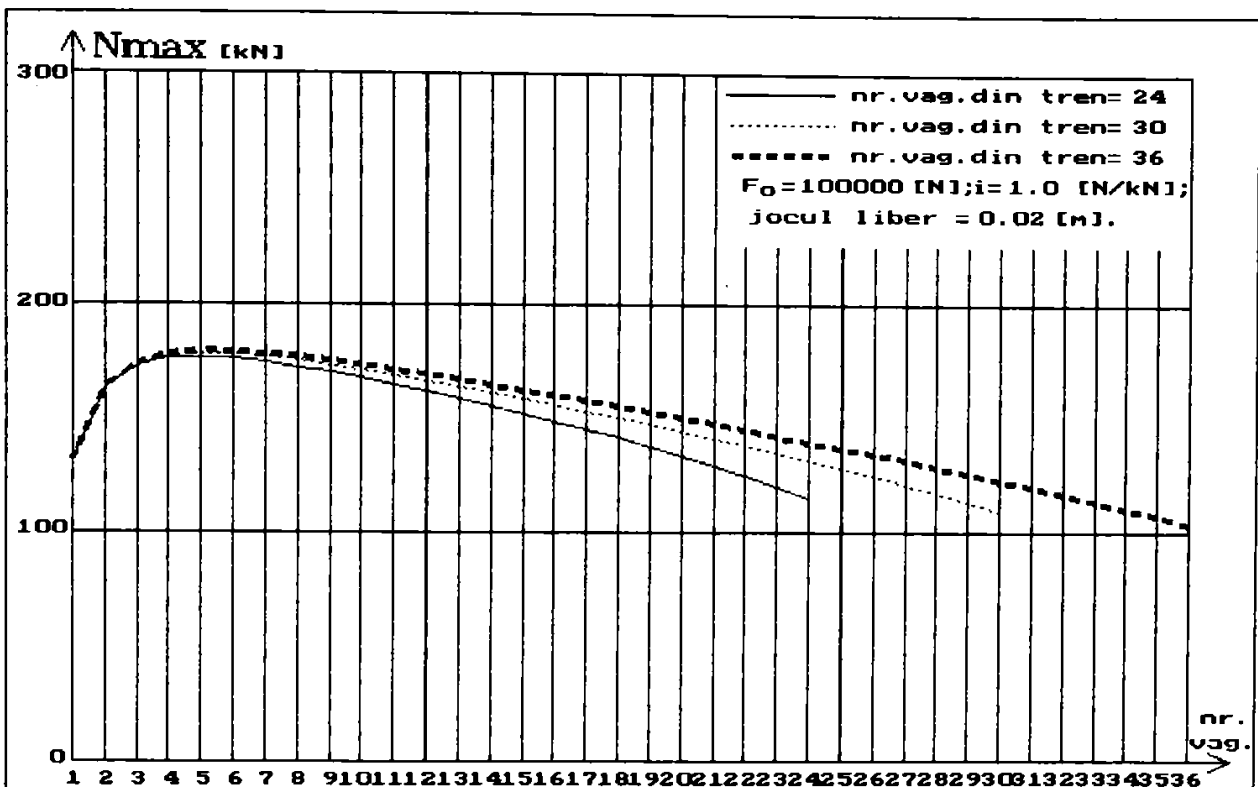


Fig. 3.38. Influența mărimii tonajului asupra valorii forțelor dinamice longitudinale, în cazul compunerii neomogene descrescătoare a trenului.

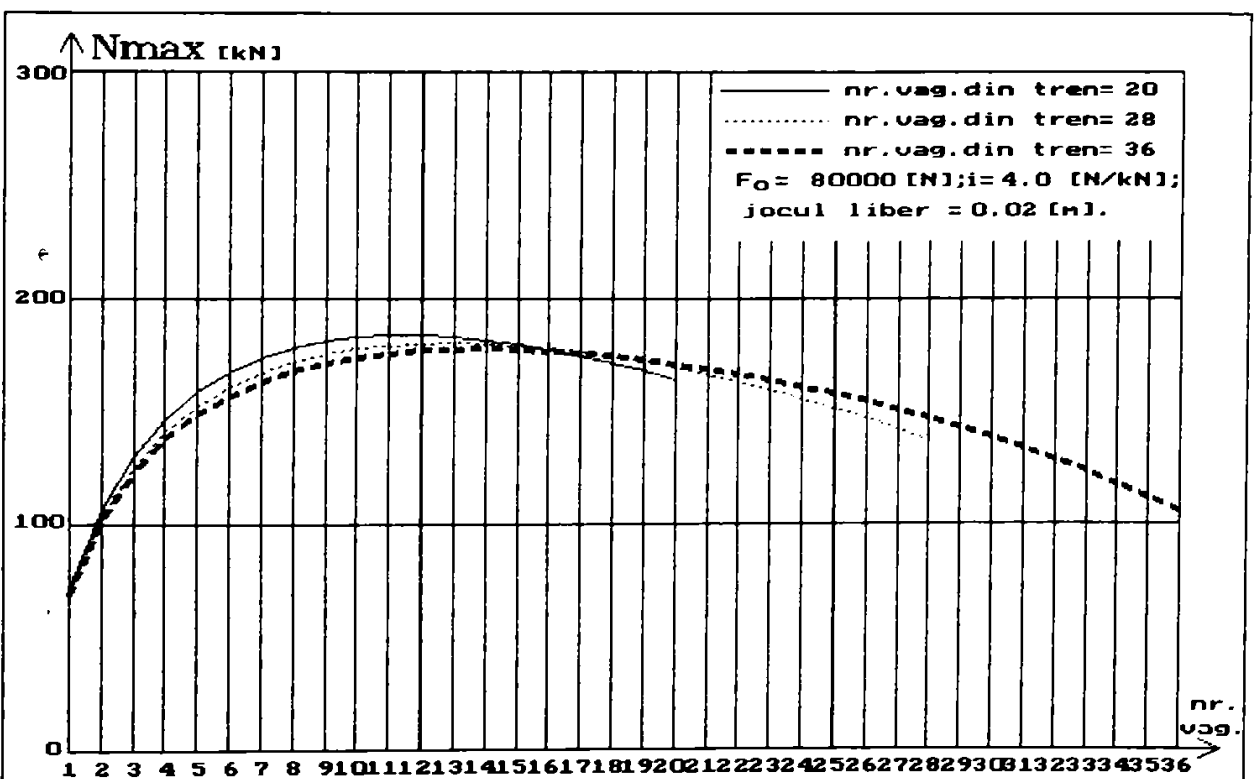


Fig. 3.39. Influența mărimii tonajului asupra valorii forțelor dinamice longitudinale, în cazul compunerii neomogene crescătoare a trenului.

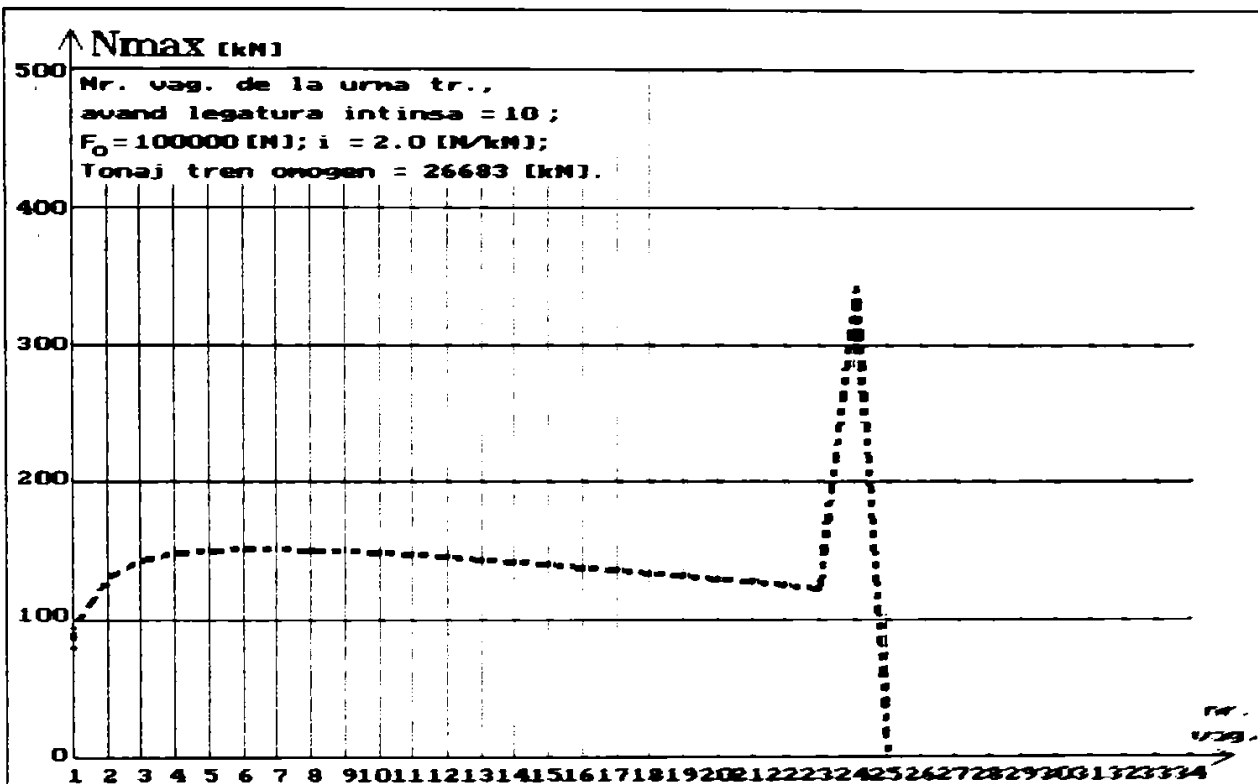


Fig. 3.40. Influența vehiculelor rămase cu legăturile întinse la urma trenului asupra mărimii forțelor dinamice longitudinale.

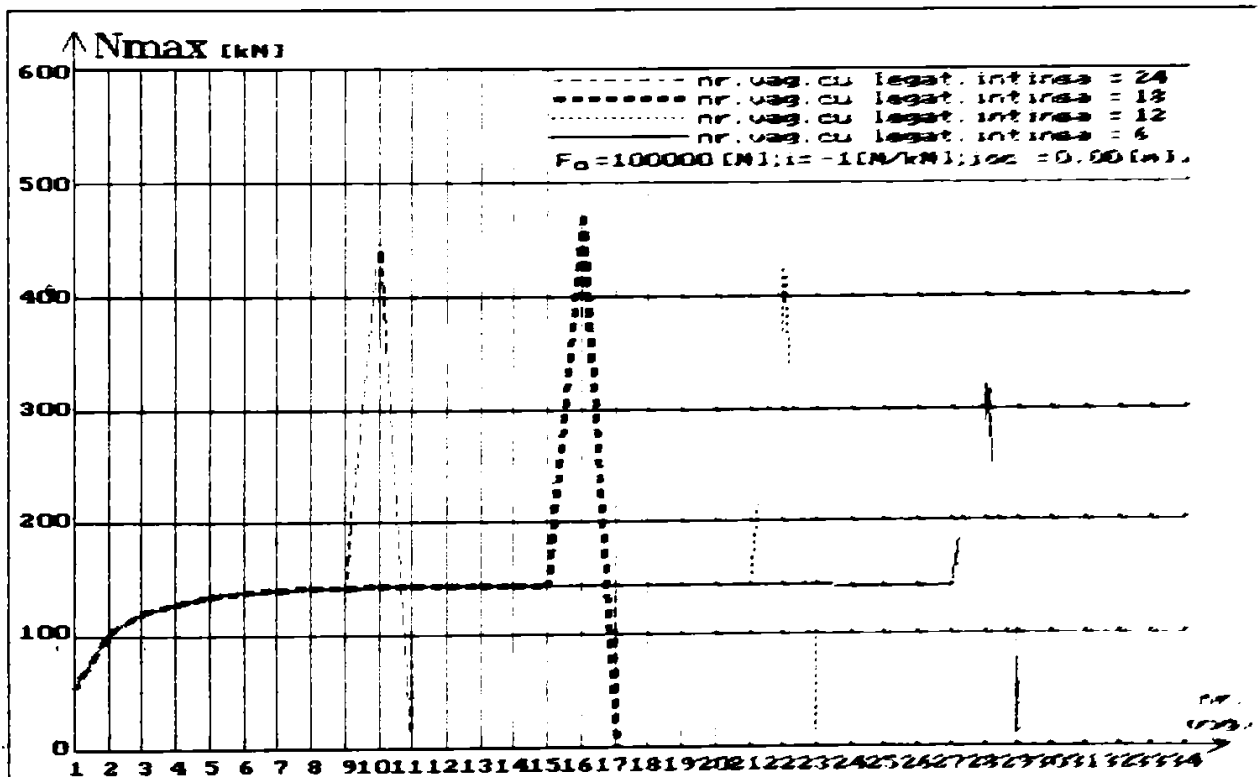


Fig. 3.41. Influența numărului de vagoane rămase cu legăturile întinse la urma trenului asupra mărimii forțelor dinamice longitudinale.

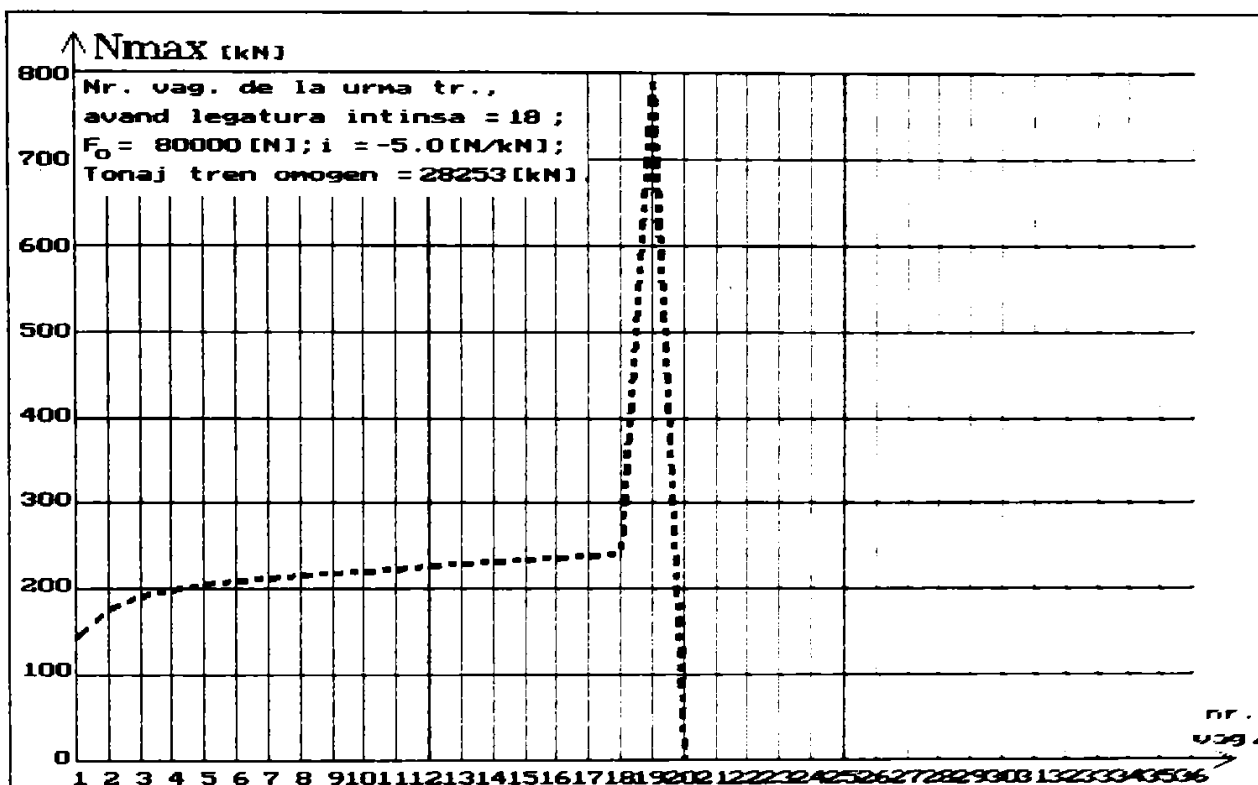


Fig. 3.42. Forța dinamică longitudinală maximă teoretică ce se dezvoltă în tren pentru un caz total defavorabil de demaraj.

respectiv neomogen crescător, mărimea tonajului trenului influențează în mică măsură doar valoarea maximă a forțelor dinamice longitudinale ce apar în timpul demarajului, din ultima treime a trenului și respectiv din prima treime a sa, fig. 3.38. și fig. 3.39.:

-valorile maxime ale forțelor dinamice longitudinale ce apar în timpul demarajului, cresc în mod semnificativ în cazul în care din diferite motive, două sau mai multe vehicule de la urma trenului rămân cu aparatele de tracțiune în stare întinsă. În acest caz forța dinamică longitudinală maximă apare în aparatul de tracțiune al primului vehicul din grupul de vagoane ce au rămas cu legăturile întinse, iar valoarea acesteia este mai mare de circa două-trei ori decât valoarea maximă a aceleiași forțe ce acționează în prima treime a trenului, fig. 3.40.. În plus cu cât numărul de vagoane rămase cu aparatele de tracțiune întinse la urma trenului este mai mare cu atât crește valoarea forței dinamice longitudinale maxime din aparatul de tracțiune al primului vagon al părții de tren având legăturile întinse, cazul cel mai defavorabil apărând atunci când prima jumătate a trenului este comprimată iar a doua întinsă. În acest din urmă caz valoarea forței dinamice longitudinale maxime

ce acționează în aparatul de tracțiune al primului vagon din partea de tren rămasă întinsă este mai mare de circa patru ori decât valoarea forței dinamice longitudinale maxime din treimea din față a trenului, fig. 3.41..

Ca o concluzie generală se poate afirma că situația cea mai nefavorabilă din punct de vedere al valorilor maxime ale forțelor dinamice longitudinale apare în cazul unui tren având jocuri libere mari între vehicule, compus omogen, presupus cu prima jumătate comprimată iar a doua întinsă și care demarează de pe o pantă. În acest caz total nefavorabil valoarea forței dinamice longitudinale maxime din aparatul de tracțiune al primului vagon al părții de tren întinsă este mai mare decât forța dinamică longitudinală maximă din treimea din față a trenului de circa opt-zece ori, fig 3.42.. Ca urmare într-un astfel de caz, chiar pentru valori relativ mici ale forței de tracțiune dezvoltate de locomotivă există posibilitatea apariției unei forțe dinamice longitudinale maxime la granița dintre partea comprimată a trenului și cea întinsă, a cărei valoare să pună în pericol integritatea aparatelor de tracțiune, producând fie fisurarea unui element al acestora, fie chiar ruperea lor. În plus mai trebuie menționat faptul că această forță dinamică maximă are un caracter de șoc și este aplicată parțial neelastic. Tot aici trebuie avut în vedere și faptul că modul de comportare la șoc al corpurilor solide diferă în mod substanțial de modul de comportare la sollicitare statică. Astfel, mișcări locale ale ariei secțiunii transversale pot provoca în bare creșteri foarte mari ale tensiunilor, buloanele filetate (cazul barei de tracțiune) și barele cu crestături (cazul cârligului de tracțiune și al barei de tracțiune) comportându-se extrem de nefavorabil la acțiunea repetată a șocurilor [67].

3.4. FORȚELE DINAMICE LONGITUDINALE CE SE DEZVOLTĂ ÎN TIMPUL FRÂNĂRII TRENURILOR

3.4.1. NOȚIUNI GENERALE

În general trenurile care circulă pe calea ferată contemporană se caracterizează în primul rând prin tonaje mărite, având în compunere un număr mare de vagoane de diverse tipuri, iar în al doilea rând prin rezistențe scăzute la înaintare ale vehiculelor.

Procesele ce au loc după comanda unei frânări în instalația de frână a trenului sunt complexe și sunt însoțite de o serie de fenomene de natură diferită, care însumate au ca efect frânarea trenului.

În timpul regimului tranzitoriu al frânării, care cuprinde primele trei faze ale frânării, figura 3.43., valorile și intensitatea forțelor de frânare variază rapid în timp, iar distribuția acestora în lungul trenului este extrem de neuniformă (în general mai mari în partea din față a trenului și mai mici în partea de la urma trenului). În plus, forțele de frânare specifice ale vehiculelor din tren nu sunt egale, iar unele vehicule din corpul trenului pot avea instalația de frână inactivă (izolată), caz în care forța specifică de frânare a acestora este nulă.

Ca urmare în timpul frânării, unele vehicule izolate sau grupe de vehicule au regimuri de mișcare proprii, adică tind să se miște cu viteze diferite față de vecini, lucru ce creează în aparatele de tracțiune și ciocnire în cauză, forțe dinamice longitudinale de întindere respectiv de comprimare.

În funcție de condițiile existente înainte de declanșarea comenzii frânării, de tipul frânării, de lungimea trenului, dar și de o multitudine de alți factori, forțele dinamice longitudinale, fie că sunt forțe de întindere fie că sunt forțe de comprimare, ating în anumite cazuri valori maxime, valori ce pot pune în pericol integritatea aparatelor de tracțiune sau pot afecta în mod grav siguranța circulației.

3.4.2. FAZELE FRÂNĂRII, IMPORTANȚA ȘI COSECINȚELE ACESTORA

Datorită particularităților constructive ale frânelor pneumatice automate ce echipează materialul rulant de cale ferată de construcție

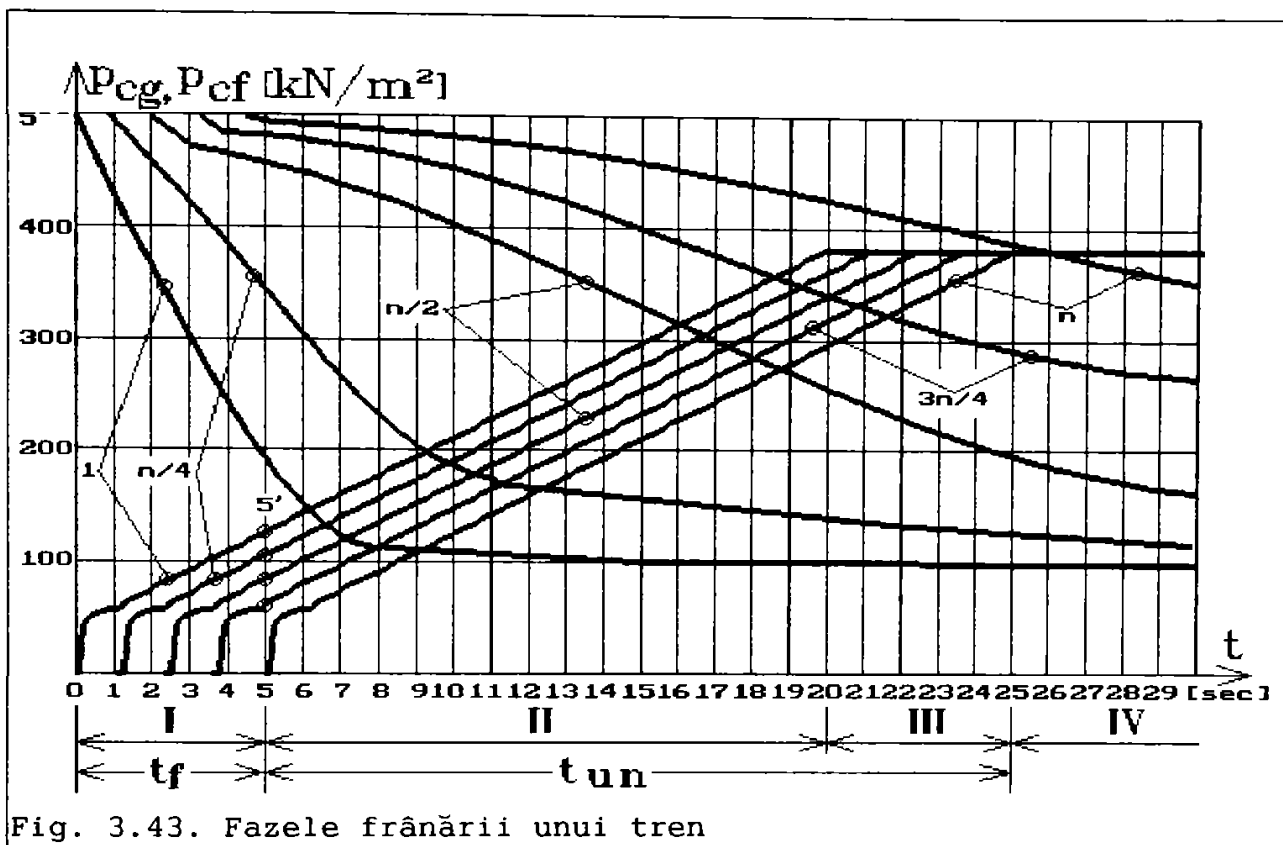


Fig. 3.43. Fazele frânării unui tren

modernă la comanda unei frânări, ce este executată în mod normal dintr-un singur loc aflat în capul trenului, începe scăderea presiunii aerului din conducta generală a trenului. Ca urmare a inerției masei de aer din conducta generală, dar și datorită rezistențelor pe care le opune conducta generală la trecerea aerului prin ea, scăderea presiunii aerului din conductă, începută la capul trenului, nu se propagă instantaneu până la urma trenului, ci într-un anumit timp. Fenomenul de propagare al scăderii presiunii aerului în lungul trenului, după ce a avut loc comanda frânării, este denumit în literatura de specialitate undă de aer.

După trecerea undei de aer printr-un punct oarecare al conductei generale, începe scăderea locală a presiunii aerului, figura 3.43., iar dacă aceasta are loc cu o anumită valoare și într-un anumit timp, se produce intrarea în acțiune a distribuitorului de aer aflat în acel punct și astfel se declanșează frânarea vagonului respectiv.

Datorită modului de propagare al undei de aer, rezultă că și intrarea în acțiune a distribuitorilor de aer se va face succesiv, de la capul spre urma trenului, acest fenomen fiind denumit în literatura de specialitate unda de frânare.

Atât unda de aer cât și unda de frânare se propagă, de la

locomotivă spre ultimul vagon cu o anumită viteză de propagare a undei de aer, respectiv a undei de frânare.

Presupunând cazul unui tren de marfă omogen, având toate distribuitoarele de aer active, de același tip, cu aceeași sensibilitate, cu ocazia frânării de la viteza maximă de circulație, forțele dinamice longitudinale ce se dezvoltă în tren trec prin patru faze, corespunzător modului de propagare a undei de aer, a undei de frânare și diagramei de umplere cu aer a cilindrilor de frână din tren, figura 3.43..

Pentru studiul sistematic al dinamicii frânării trenurilor, procesul frânării acestuia a fost împărțit în următoarele patru faze, figura 3.43., numite fazele frânării:

-faza I, care durează din momentul intrării în acțiune a distribuitorului de aer al primului vagon și până în momentul intrării în acțiune a distribuitorului de aer al ultimului vagon din tren. Această fază este caracterizată pe toată durata ei prin diferența de presiune a aerului în cilindrii de frână ale vagoanelor din tren (linia 5-5' de pe figura 3.43.), și ca urmare prin diferența forțelor de frânare ale vehiculelor, în sensul că forța de frânare momentană a unui vehicul având numărul de ordine i este mai mică decât forța de frânare momentană a vehiculului cu numărul de ordine $i-1$, dar mai mare decât aceeași forță a vehiculului cu numărul de ordine $i+1$. În concluzie, prima fază a frânării se caracterizează printr-o anumită comprimare a trenului, comprimare ce apare datorită faptului că forțele de frânare sunt mai mari la primele vagoane și scad spre urma trenului, unde forța de frânare a ultimului vehicul este nulă. Ca urmare a acestei comprimări, aparatele de ciocnire ale tuturor vehiculelor din tren înmagazinează energie potențială de deformație;

-faza II, ce durează din momentul intrării în acțiune a distribuitorului de aer al ultimului vagon din tren și până în momentul realizării presiunii maxime a aerului în cilindrul de frână al primului vehicul. Deoarece în mod teoretic presiunea aerului în cilindrii de frână ai tuturor vagoanelor din tren crește uniform, menținându-se diferența de la sfârșitul primei faze, rezultă că pe toată durata acestei faze se menține comprimarea trenului existentă la sfârșitul fazei anterioare;

-faza III, care durează din momentul stabilirii presiunii maxime a aerului în cilindrul de frână de la primul vehicul și până în

momentul realizării aceleiași presiuni a aerului în cilindrul de frână de la ultimul vehicul din tren. Ca urmare a faptului că în această fază are loc egalizarea presiunilor aerului în cilindrii de frână ai tuturor vehiculelor din tren, începând de la locomotivă spre urma trenului, rezultă că dispare cauza ce a produs comprimarea trenului în timpul fazei întâi. Ca urmare, aparatele de ciocnire comprimate în timpul primei faze a frânării încep să se destindă succesiv, începând de la locomotivă spre urma trenului, individual sau în grup, producându-se astfel fenomenul de recul succesiv, total sau parțial în funcție de tipul și calitatea aparatelor de amortizare ale tamponelor. Fenomenul de recul în tren, produs de destinderea succesivă a aparatelor de ciocnire, individual sau în grup, poate fi privit ca o succesiune de percuții aplicate longitudinal unei bare elastice, dar nu la unul din capetele barei, ci în puncte oarecare ale barei. În urma aplicării percuțiilor succesive apar unde elastice ce se propagă din locul de aplicare spre capetele barei, deci spre locomotivă și respectiv spre ultimul vagon;

-faza IV, ce durează din momentul realizării presiunii maxime în cilindrul de frână de la ultimul vagon și până la oprirea trenului. Dacă forțele de frânare sunt repartizate uniform în lungul trenului, atunci în această fază nu se mai produc în aparatele de tracțiune și ciocnire niciun fel de reacțiuni. În caz contrar, destinderea aparatelor de ciocnire poate continua și în această fază, după care se stabilește o acțiune statică reciprocă între aparatele de ciocnire, acțiune provocată de eventuala distribuție neuniformă a frânelor în tren.

În urma unor studii teoretice aprofundate privind dinamica frânării trenurilor și a unor cercetări experimentale amănunțite, prezentate în [3], [31], [33] și [45] s-a ajuns la concluzia generală că cele mai puternice și periculoase reacțiuni dinamice longitudinale se produc în trenuri datorită acțiunii nesimultane și neuniforme a instalațiilor de frână ale vehiculelor din tren, reacțiuni ce se compun cu alte reacțiuni suplimentare apărute ca urmare a mișcării vibratorii a unor părți din tren ce se propagă în lungul trenului.

3.4.3. MODELUL MECANIC DE CALCUL ȘI STABILIREA LEGILOR DE VARIATIE A FORTELOR IN TIMP

In timpul frânării de la viteza maximă de circulație, în aliniament și palier a unui tren de marfă omogen care este format din n vagoane, asupra unui vehicul oarecare având numărul de ordine i din corpul trenului, acționează forțele prezentate pe figura 3.44.:

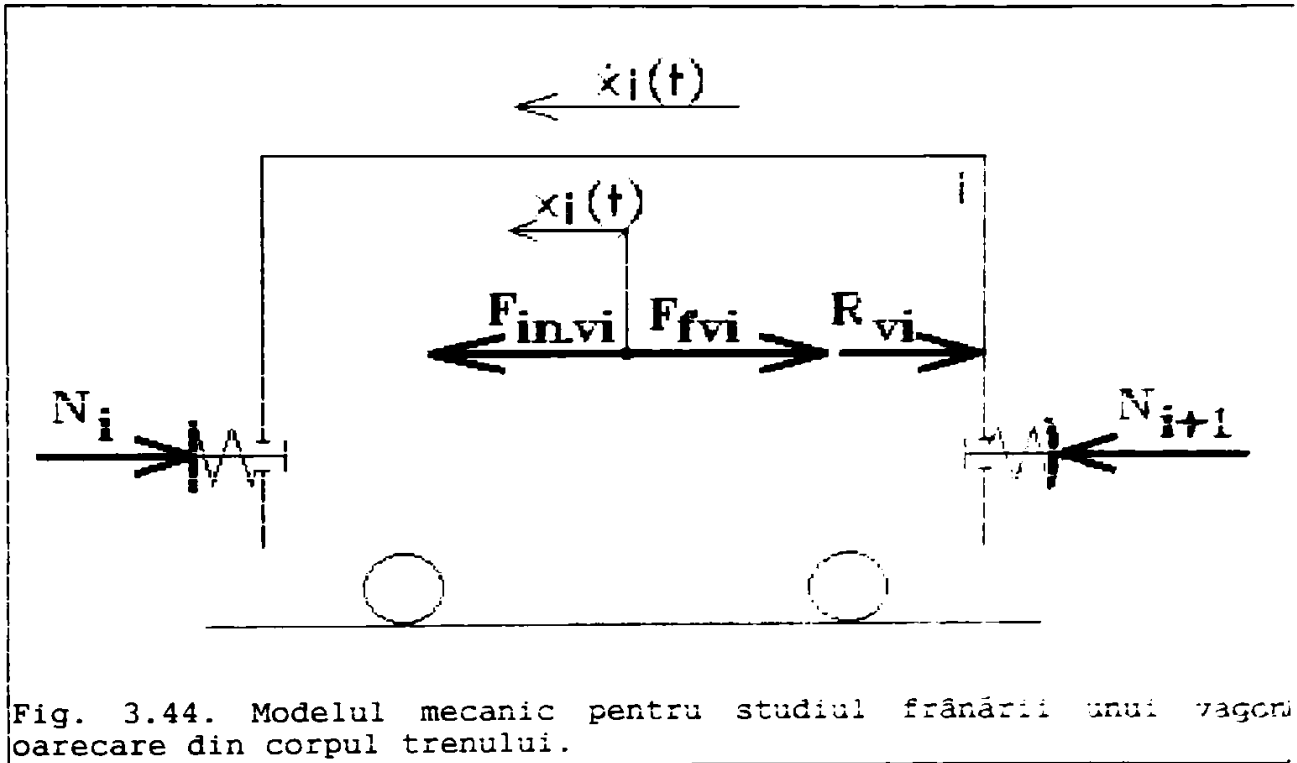


Fig. 3.44. Modelul mecanic pentru studiul frânării unui vagon oarecare din corpul trenului.

Analizând forțele ce acționează asupra unui vagon oarecare din corpul trenului, în timpul frânării acestuia, rezultă că expresia cea mai complexă din punct de vedere matematic o are forța de frânare a vagonului respectiv, F_{fvi} . Această forță are valoare nulă în intervalul de timp necesar propagării undei de aer și al undei de frânare până la vagonul respectiv, după care valoarea ei este o funcție de presiunea aerului în cilindrul de frână al vagonului (în creștere de la zero la valoarea maximă) și de coeficientul de frecare sabot-bandaj μ , figura 3.43.. În momentul în care în cilindrul de frână al vagonului s-a realizat presiunea maximă corespunzătoare treptei de frânare comandate, forța de frânare a acestui vagon este o funcție doar de coeficientul de frecare sabot bandaj μ .

Având în vedere cele de mai sus expresia forței de frânare dezvoltată în timpul frânării de un vagon oarecare din corpul

trenului este o funcție de numărul de ordine al vagonului, de timp, de presiunea aerului în cilindrul de frână, de valoarea coeficientului de frecare sabot-bandaj, de viteza de mers, etc. și se poate exprima matematic prin următoarele relații:

$$F_{fvi}(i, t, P_{cf}, \mu) = \begin{cases} 0, & \text{daca } 0 < t \leq t_{fi}; \\ C * \sum K_{vi}(t) * \mu(v), & \text{daca } t_{fi} < t < t_{ui}; \\ B * \mu(v), & \text{daca } t_{ui} \leq t. \end{cases} \quad (3.77.)$$

unde:

- C, respectiv B sunt coeficienți ce exprimă influența parametrilor constructivi și funcționali ai vagonului și respectiv ai instalației de frână a vagonului asupra valorii forței de frânare;

- $\sum K_{vi}(t)$ reprezintă suma forțelor de apăsare a sabotilor pe bandajele roților vagonului, în N;

- $\mu(v)$ este coeficientul de frecare sabot-bandaj;

- t reprezintă timpul, ca variabilă independentă, în secunde;

- t_{fi}, t_{ui} sunt timpul de propagare al undei de frânare până la vagonul cu numărul de ordine i, respectiv timpul de umplere cu aer al cilindrilor de frână al aceluiași vagon, în secunde.

Forțele dinamice longitudinale reale ce acționează în aparatele de ciocnire ale vehiculelor din trenul comprimat, în primele trei faze ale frânării, se pot exprima în orice moment de timp t prin relații de forma:

$$N_i(t) = k_{ti} * (x_{i-1}(t) - x_i(t)), \quad (3.78.)$$

Si respectiv:

$$N_{i+1}(t) = k_{ti} * (x_i(t) - x_{i+1}(t)), \quad (3.79.)$$

unde:

- k_{ti} reprezintă rigiditatea la comprimare a arcurilor inelare cu caracteristică neliniară ce echipează tamponurile vagonului cu numărul de ordine i, în N/m;

- $x_{i-1}(t), x_i(t)$ și $x_{i+1}(t)$ sunt coordonatele centrelor de greutate ale vagoanelor, având numărul de ordine i-1, i și respectiv i+1,

în metri.

3.4.4. STABILIREA ȘI REZOLVAREA ECUAȚIILOR DIFERENȚIALE ALE MIȘCĂRII

Aplicând legea a doua a dinamicii modelului mecanic prezentat pe figura 3.44., comportarea dinamică a vagonului cu numărul de ordine i , sub influența forțelor ce acționează asupra acestuia în timpul frânării este descrisă de următoarea ecuație diferențială neliniară de gradul doi:

$$m_i * (1 + \gamma_i) * \frac{d^2 x_i}{dt^2} + N_{i+1} - R_{vi} - F_{fvi} - N_i = 0. \quad (3.80)$$

Procedând în mod asemănător pentru toate vehiculele, rezultă sistemul de n ecuații diferențiale neliniare de gradul doi, sistem de ecuații ce descrie comportarea dinamică a întregului tren, pe durata primelor trei faze ale frânării:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1 * (1 + \gamma_1) * \frac{d^2 x_1}{dt^2} = F_{fv1} + R_{v1} - N_2, \\ m_2 * (1 + \gamma_2) * \frac{d^2 x_2}{dt^2} = F_{fv2} + R_{v2} + N_2 - N_3, \\ \dots \\ m_i * (1 + \gamma_i) * \frac{d^2 x_i}{dt^2} = F_{fvi} + R_{vi} + N_i - N_{i+1}, \\ \dots \\ m_n * (1 + \gamma_n) * \frac{d^2 x_n}{dt^2} = F_{fvn} + R_{vn} + N_n. \end{array} \right. \quad (3.81.)$$

unde:

- $m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_n$, reprezintă masele locomotivei și respectiv ale vagoanelor, în kg;
- $x_1(t), x_2(t), \dots, x_i(t), \dots, x_n(t)$ sunt coordonatele centrelor de greutate ale locomotivei și respectiv ale vagoanelor, în metri;
- $F_{fv1}, F_{fv2}, \dots, F_{fvi}, \dots, F_{fvn}$ reprezintă forțele de frânare ale locomotivei respectiv ale vagoanelor, în N;
- $R_{v1}, R_{v2}, \dots, R_{vi}, \dots, R_{vn}$ sunt rezistențele totale la înaintare ale locomotivei și respectiv ale vagoanelor, în N;
- $N_1, N_2, \dots, N_i, \dots, N_n$ reprezintă forțele dinamice longitudinale din

$$\left. \begin{aligned}
 & \frac{dy_1}{dt} + \frac{k_1}{m_1 \cdot (1+\gamma_1)} \cdot (x_1 - x_2) - \frac{F_{fv1} + R_{v1}}{m_1 \cdot (1+\gamma_1)} = 0, \\
 & y_1 = \frac{dx_1}{dt}, \\
 & \frac{dy_2}{dt} + \frac{k_2}{m_2 \cdot (1+\gamma_2)} \cdot [(x_2 - x_3) - (x_1 - x_2)] - \frac{F_{fv2} + R_{v2}}{m_2 \cdot (1+\gamma_2)} = 0, \\
 & y_2 = \frac{dx_2}{dt}, \\
 & \dots \dots \dots \\
 & \frac{dy_i}{dt} + \frac{k_i}{m_i \cdot (1+\gamma_i)} \cdot [(x_i - x_{i+1}) - (x_{i-1} - x_i)] - \frac{F_{fvi} + R_{vi}}{m_i \cdot (1+\gamma_i)} = 0, \\
 & y_i = \frac{dx_i}{dt}, \\
 & \dots \dots \dots \\
 & \frac{dy_n}{dt} + \frac{k_n}{m_n \cdot (1+\gamma_n)} \cdot [-(x_{n-1} - x_n)] - \frac{F_{fvn} + R_{vn}}{m_n \cdot (1+\gamma_n)} = 0, \\
 & y_n = \frac{dx_n}{dt}.
 \end{aligned} \right\} \quad (3.84.)$$

Sistemul de ecuații (3.84.) este un sistem de $2 \cdot n$ ecuații diferențiale neliniare de gradul întâi, care mai poate fi scris și în forma:

$$\left. \begin{aligned}
 & \dot{y}_1 = \frac{F_{fv1} - R_{v1}}{m_1 \cdot (1+\gamma_1)} - \frac{k_1}{m_1 \cdot (1+\gamma_1)} \cdot (x_1 - x_2), \\
 & y_1 = \dot{x}_1, \\
 & \dot{y}_2 = \frac{F_{fv2} - R_{v2}}{m_2 \cdot (1+\gamma_2)} - \frac{k_2}{m_2 \cdot (1+\gamma_2)} \cdot [(x_2 - x_3) - (x_1 - x_2)], \\
 & y_2 = \dot{x}_2, \\
 & \dots \dots \dots \\
 & \dot{y}_i = \frac{F_{fvi} - R_{vi}}{m_i \cdot (1+\gamma_i)} - \frac{k_i}{m_i \cdot (1+\gamma_i)} \cdot [(x_i - x_{i+1}) - (x_{i-1} - x_i)], \\
 & y_i = \dot{x}_i, \\
 & \dots \dots \dots \\
 & \dot{y}_n = \frac{F_{fvn} - R_{vn}}{m_n \cdot (1+\gamma_n)} - \frac{k_n}{m_n \cdot (1+\gamma_n)} \cdot [-(x_{n-1} - x_n)], \\
 & y_n = \dot{x}_n.
 \end{aligned} \right\} \quad (3.85.)$$

Dacă se consideră că la momentul $t=0$, se execută comanda frânării prin ducerea mânerului robinetului de comandă al frânelor automate din tren, KD2, într-o poziție de frânare, iar în acest moment viteza de circulație este v_{\max} , condițiile inițiale atașate sistemului de ecuații diferențiale (3.85.), respectiv (3.84.) sunt următoarele:

$$\begin{cases} x_1 = x_2 = \dots = x_i = \dots = x_n = 0, \\ \dot{x}_1 = y_1 = \dot{x}_2 = y_2 = \dots = \dot{x}_i = y_i = \dots = \dot{x}_n = y_n = v_{\max}. \end{cases} \quad (3.86.)$$

Pentru rezolvarea sistemului de $2 \cdot n$ ecuații diferențiale (3.85.) de asemenea s-a conceput, realizat și implementat un program de calcul și simulare în limbaj Turbo Pascal V 7.0 [Anexa 4], program ce permite modelarea comportării dinamice a unui tren de călători sau de marfă omogen, în timpul primelor trei faze ale frânării acestuia din viteză constantă. Acest program de simulare original permite atât stabilirea valorilor forțelor dinamice longitudinale maxime, determinarea evoluției în timpul frânării a acestora și a modului de distribuție în lungul trenului cât și evidențierea influenței unor factori asupra valorii, evoluției și distribuției acestor forțe cum ar fi: tonajul și lungimea trenului, viteza de propagare a undei de frânare și tipul distribuitorului de aer, tipul frânării și timpii de umplere cu aer a cilindrilor de frână ai vehiculelor, modul de compunere al trenului și distribuția în tren a frânelor active, viteza de circulație de la care se comandă frânarea și delivitatea pe care se circulă, caracteristica arcului inelar ce echipează aparatele de ciocnire sau caracteristica altui tip constructiv de amortizor de șoc, etc. În plus programul mai permite și simularea frânării din plină accelerare, simularea tragerii semnalului de alarmă în capul, la mijlocul sau la urma trenului, precum și modelarea comportării dinamice a trenului în cazul ruperii acestuia.

Analizând rezultatele simulărilor obținute pe calculator, care sunt prezentate grafic pe figurile 3.45.,3.61, se pot trage următoarele concluzii importante:

- în timpul regimului tranzitoriu ce se manifestă în primele faze ale frânării trenurilor omogene, oricare ar fi tipul frânării apar forțe dinamice longitudinale de comprimare;
- valoarea maximă a forțelor dinamice longitudinale de comprimare se manifestă în treimea de la mijlocul trenului și apare la începutul

fazei a doua a frânării;

-valoarea maximă a forțelor dinamice longitudinale de comprimare depinde în mod semnificativ de viteza de propagare a undei de frânare în lungul trenului. Astfel odată cu scăderea vitezei de propagare a undei de frânare, valorile maxime ale forțelor dinamice longitudinale cresc, figurile 3.45., 3.46. și 3.47., deoarece la viteze mici de propagare a undei de frânare, de exemplu pentru o frânare de serviciu, sporește diferența dintre presiunile aerului în cilindrii de frână la sfârșitul primei faze a frânării și ca urmare sporește diferența dintre forțele de frânare ale vehiculelor, figura 3.43.;

-valorile maxime ale forțelor dinamice longitudinale cresc odată cu scăderea vitezei de mișcare a trenului la care are loc comanda frânării, cea mai periculoasă situație apărând atunci când se execută o frânare de serviciu totală la viteze relativ mici de circulație de ordinul a 4-5 m/sec., numite și viteze critice, figurile 3.48., 3.49., 3.47. și 3.50.;

-cea mai semnificativă influență asupra mărimii forțelor dinamice longitudinale o exercită valoarea timpilor de umplere cu aer a cilindrilor de frână de la vagoanele trenului. Astfel pentru o frânare rapidă de exemplu, apar forțe dinamice longitudinale maxime de circa 150 kN, dacă timpii de umplere sunt cei corespunzători poziției M a schimbătorului de regim, adică 20 de secunde, și de circa 610 kN dacă timpii de umplere cu aer a cilindrilor de frână de la vagoane sunt cei corespunzători poziției P a schimbătorului de regim, adică 5 secunde, figura 3.45. și respectiv figura 3.51.. Dacă și timpii de umplere cu aer a cilindrilor de frână de la locomotivă sunt de asemenea cei corespunzători regimului P, atunci forțele dinamice longitudinale cresc, figura 3.52.;

-în cazul în care în corpul trenului există un anumit număr de vagoane a căror instalație de frână nu este în funcție (de exemplu 12 osii), în timpul fazelor tranzitorii de mișcare a trenului frânat se modifică modul de distribuție a forțelor dinamice longitudinale maxime în lungul trenului, în funcție de poziția din tren și numărul acestor vagoane. Astfel dacă cele 12 osii nefrânate sunt plasate în prima sau în a doua treime a trenului, forțele dinamice longitudinale maxime apar în treimea unde sunt plasate vagoanele ce au instalație de frână scoasă din funcție, figura 3.53. și figura 3.54.. Dacă numărul de vehicule din grupul de vagoane nefrânate aflate în corpul trenului crește (de exemplu 24 osii), atunci și valoarea maximă a

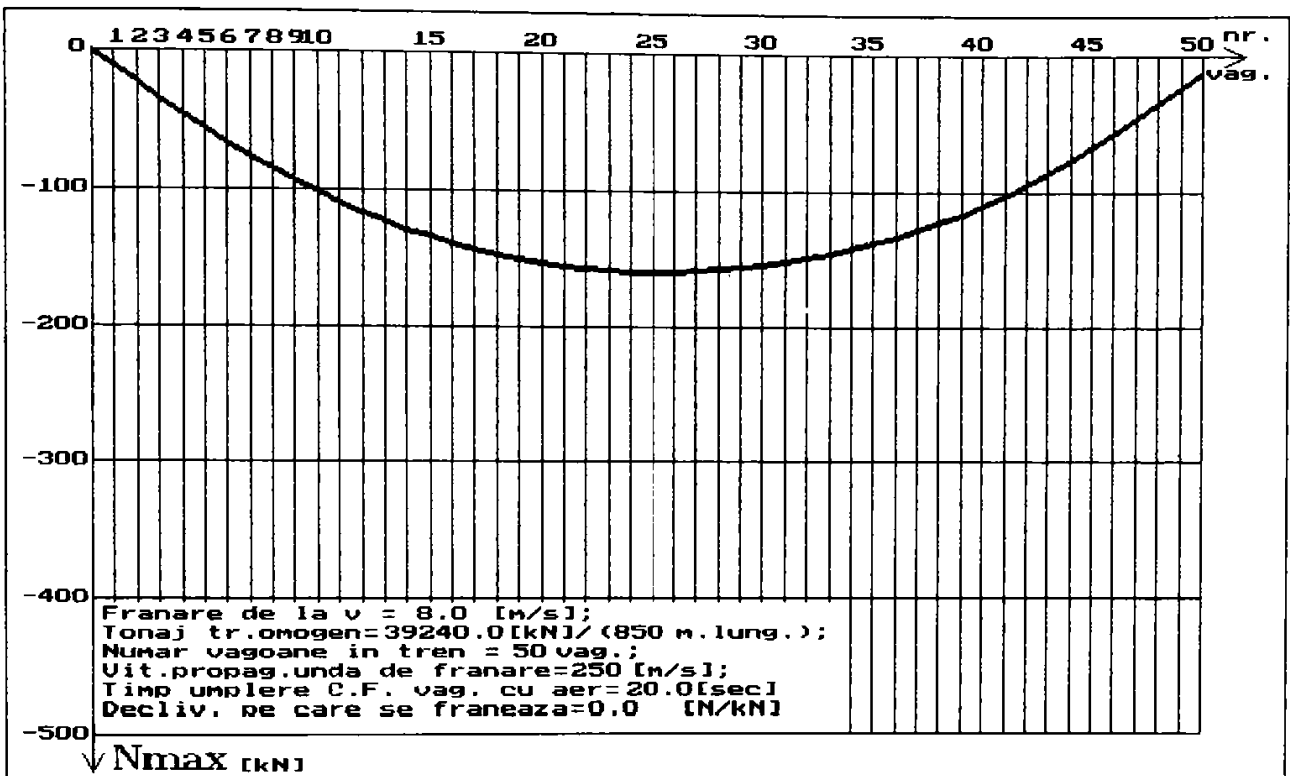


Fig. 3.45. Influența vitezei de propagare a undei de frânare asupra valorii forțelor dinamice longitudinale.

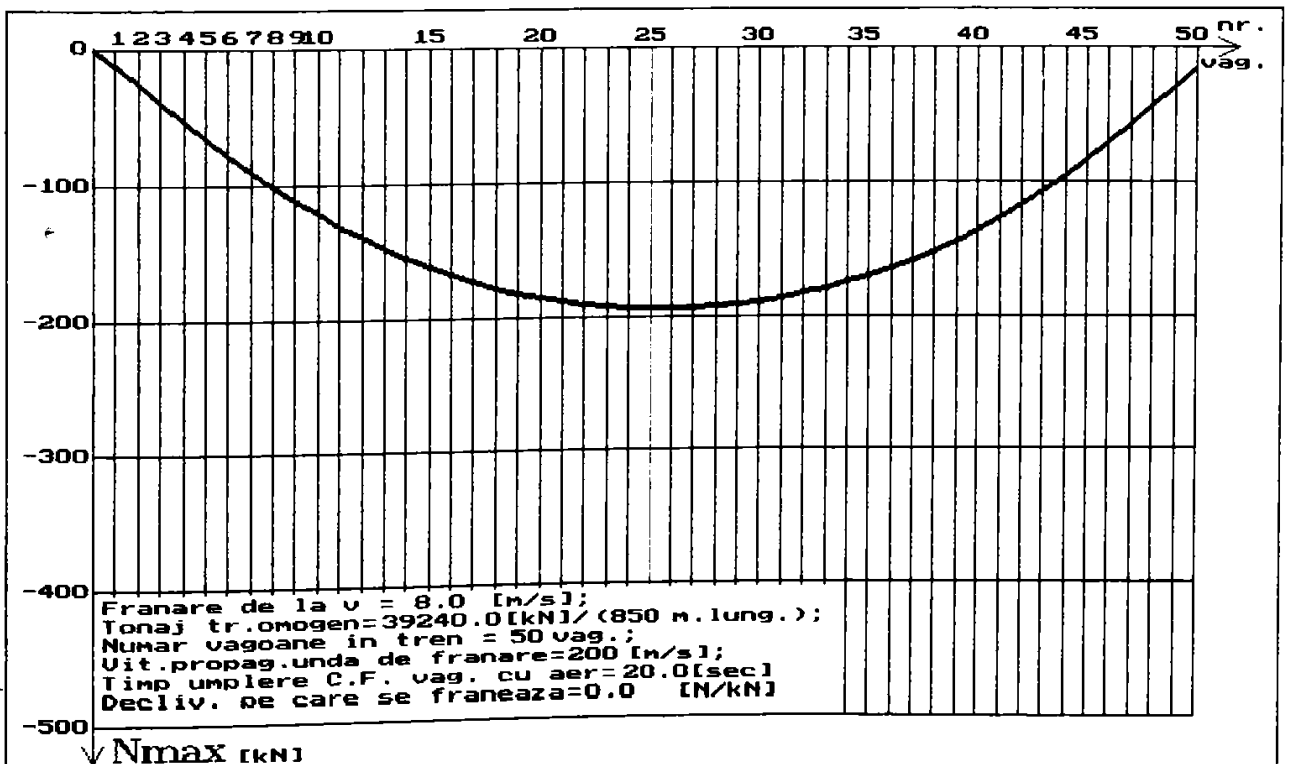


Fig. 3.46. Influența vitezei de propagare a undei de frânare asupra valorii forțelor dinamice longitudinale.

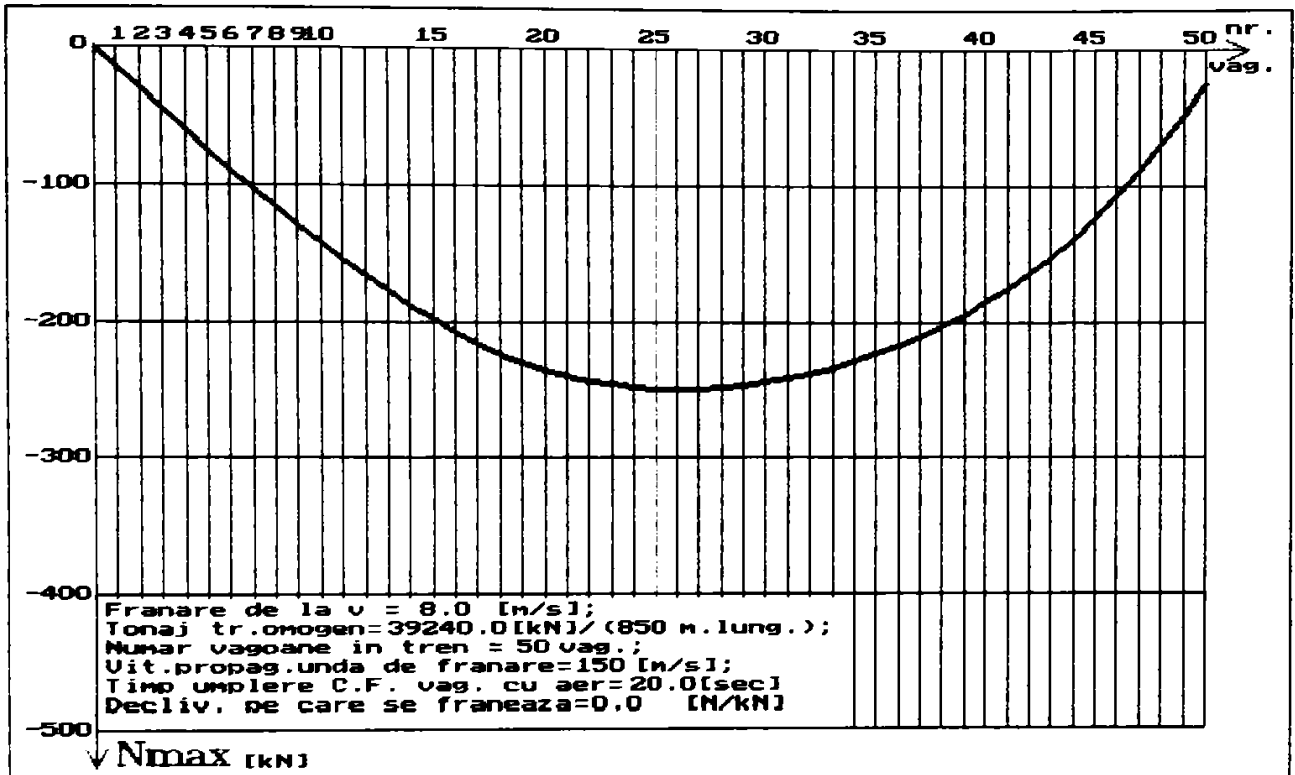


Fig. 3.47. Influența vitezei de propagare a undei de frânare asupra valorii forțelor dinamice longitudinale.

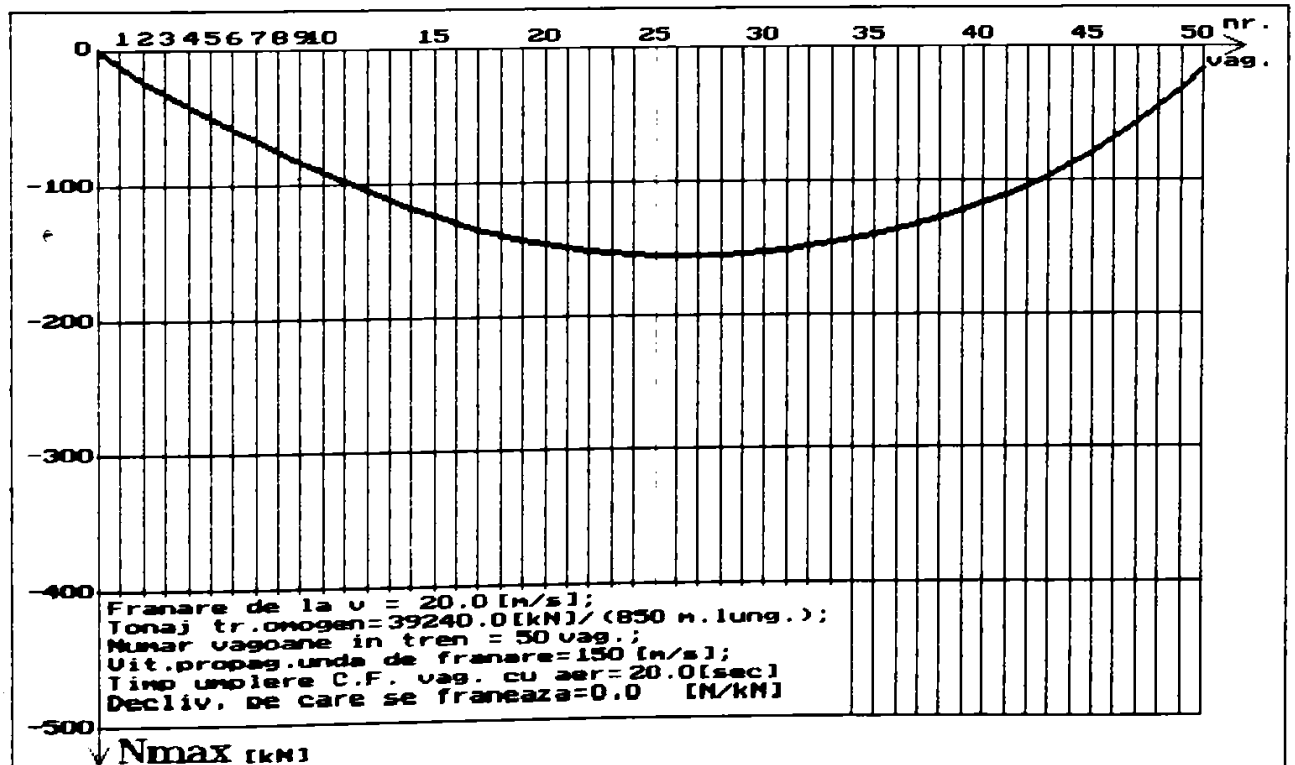


Fig. 3.48. Influența vitezei de circulație la care are loc comanda frânării asupra valorii forțelor dinamice longitudinale.

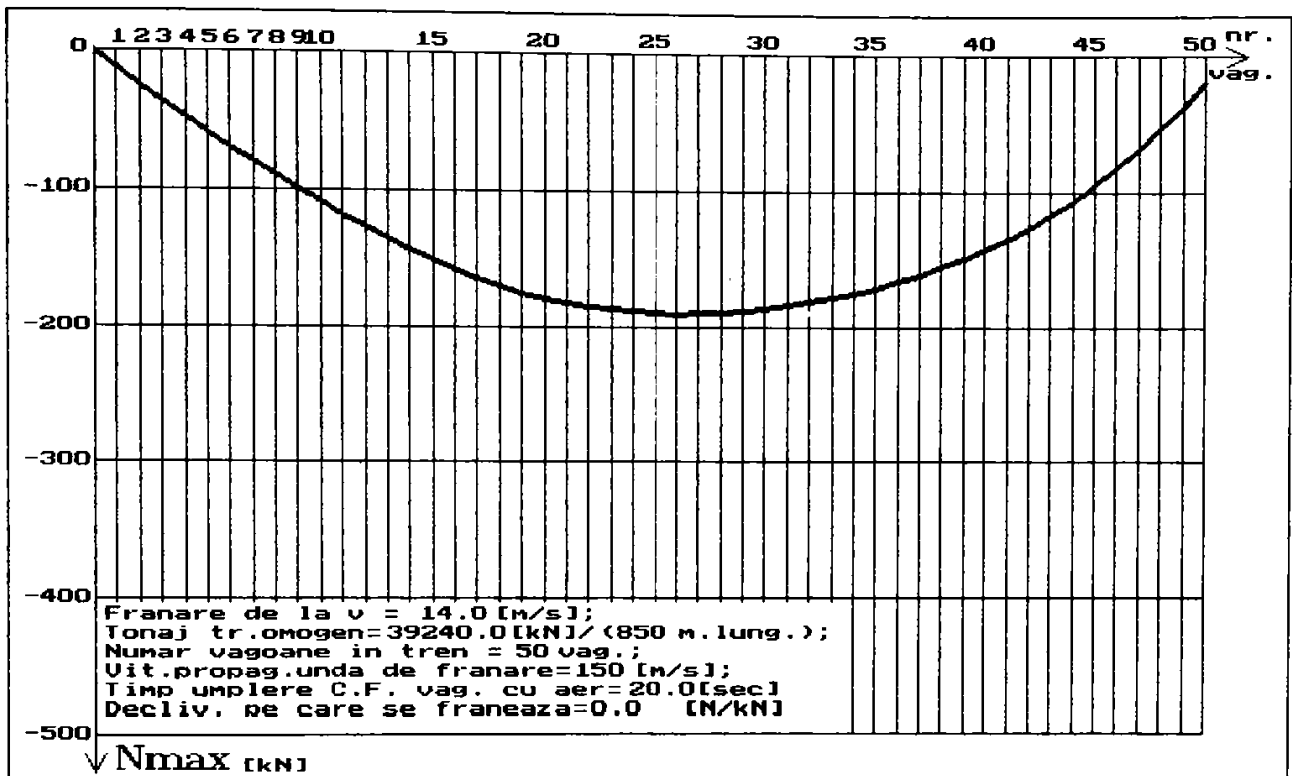


Fig. 3.49. Influența vitezei de circulație la care are loc comanda frânării asupra valorii forțelor dinamice longitudinale.

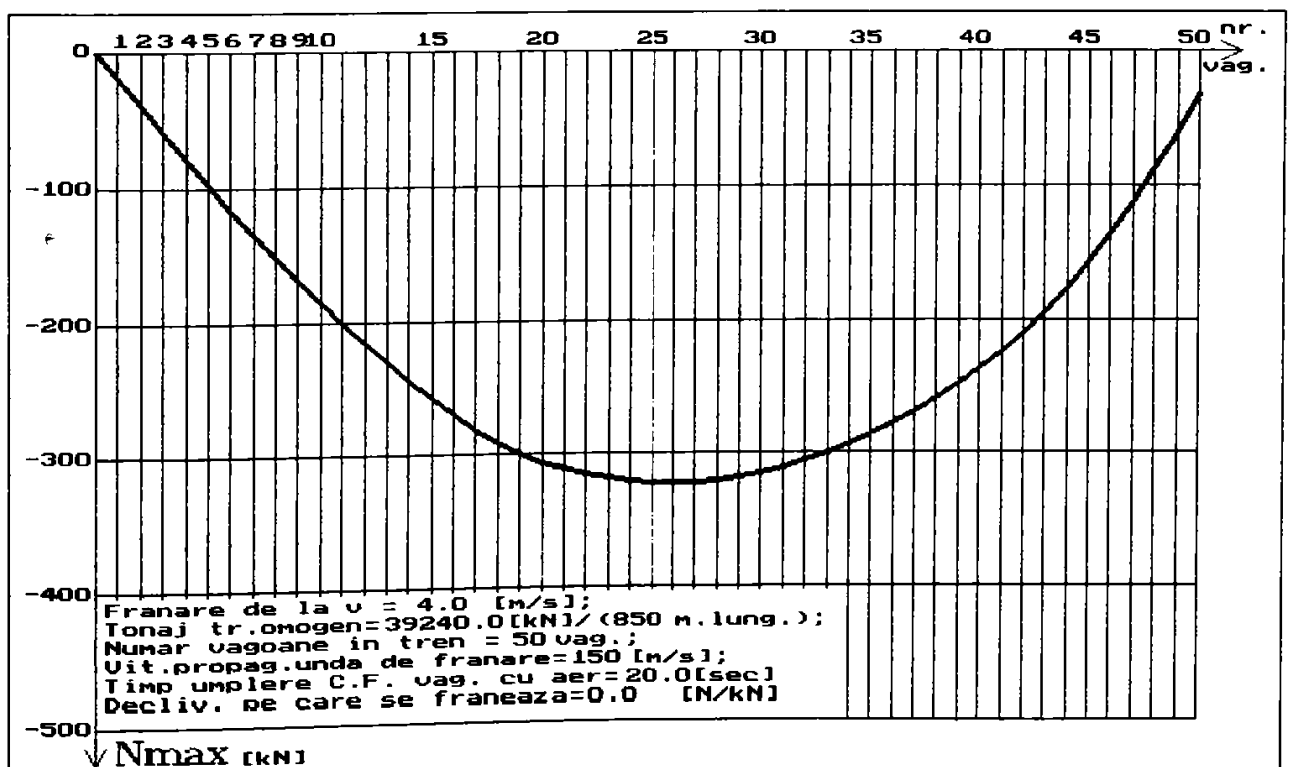


Fig. 3.50. Influența vitezei de circulație la care are loc comanda frânării asupra valorii forțelor dinamice longitudinale.

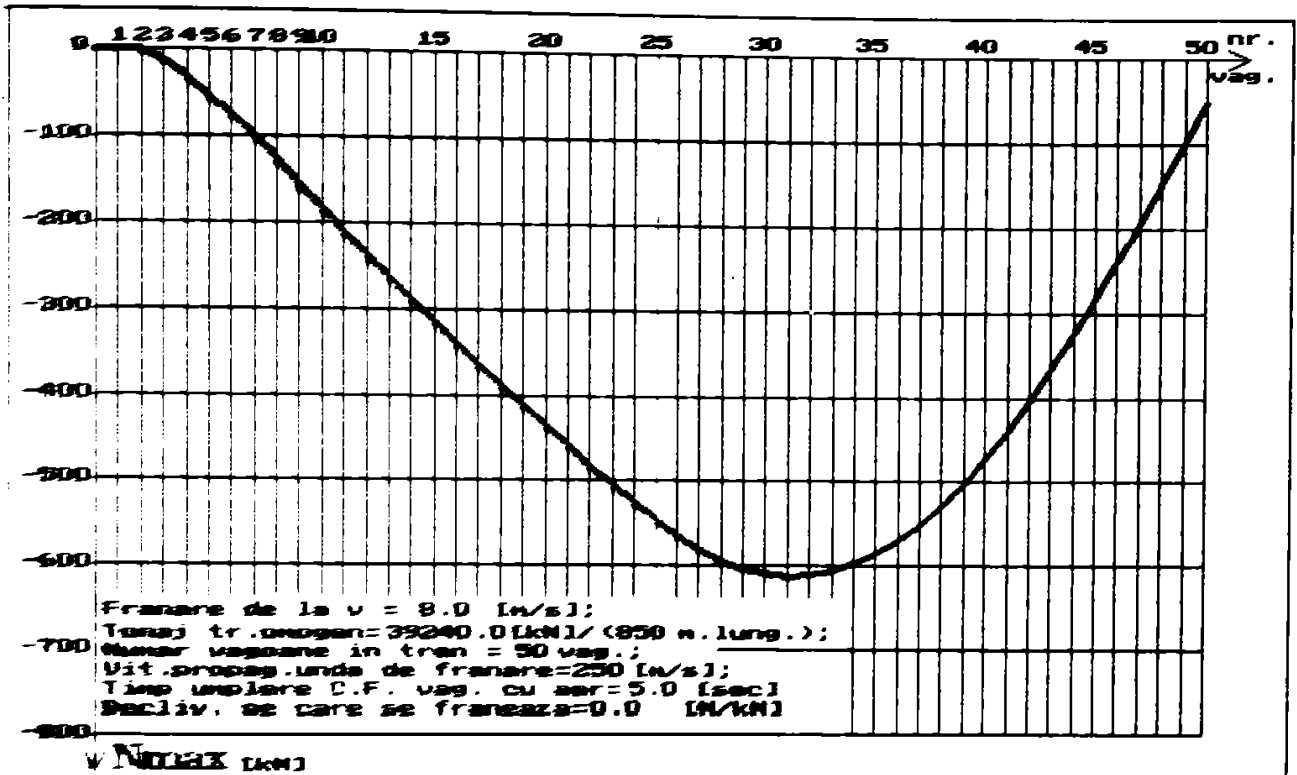


Fig. 3.51. Influența mărimii timpilor de umplere cu aer a cilindrilor de frână de la vagoane asupra valorii forțelor dinamice longitudinale.

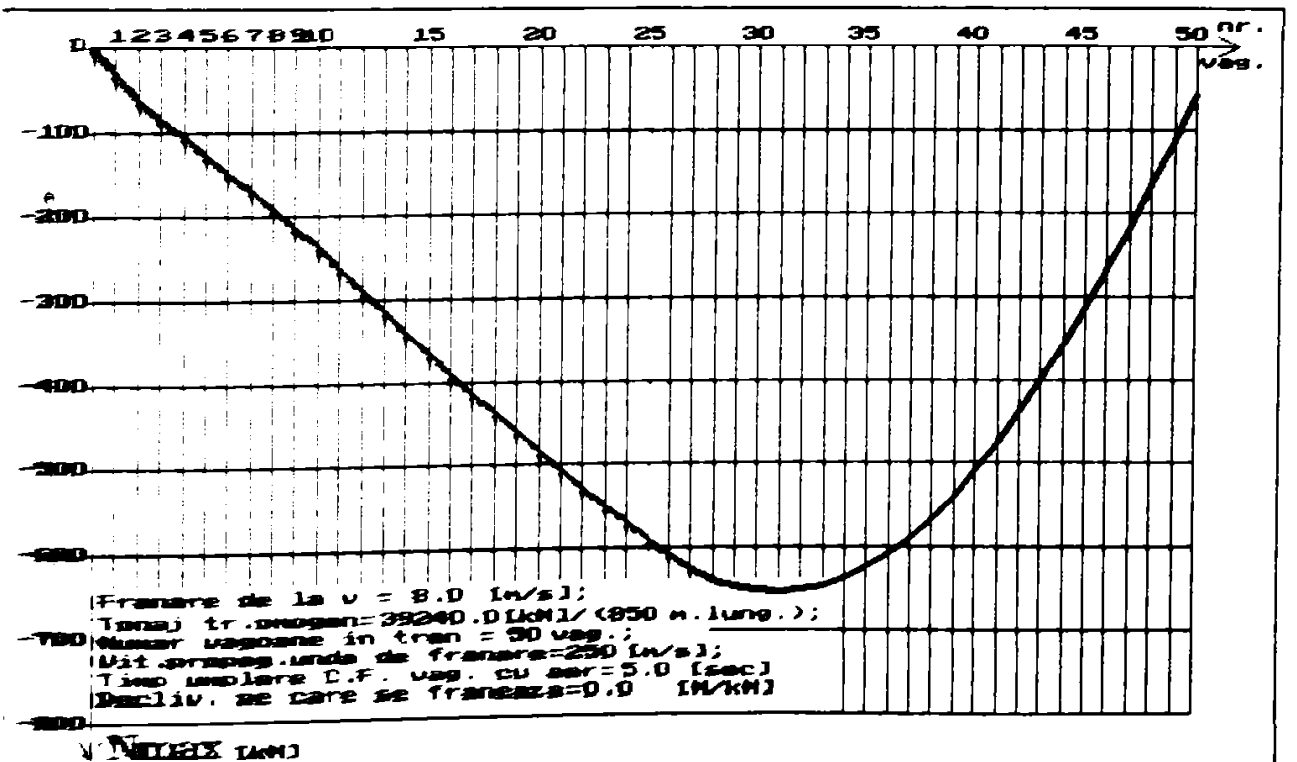


Fig. 3.52. Influența mărimii timpului de umplere cu aer a cilindrilor de frână de la locomotivă (6 secunde) asupra valorii forțelor dinamice longitudinale.

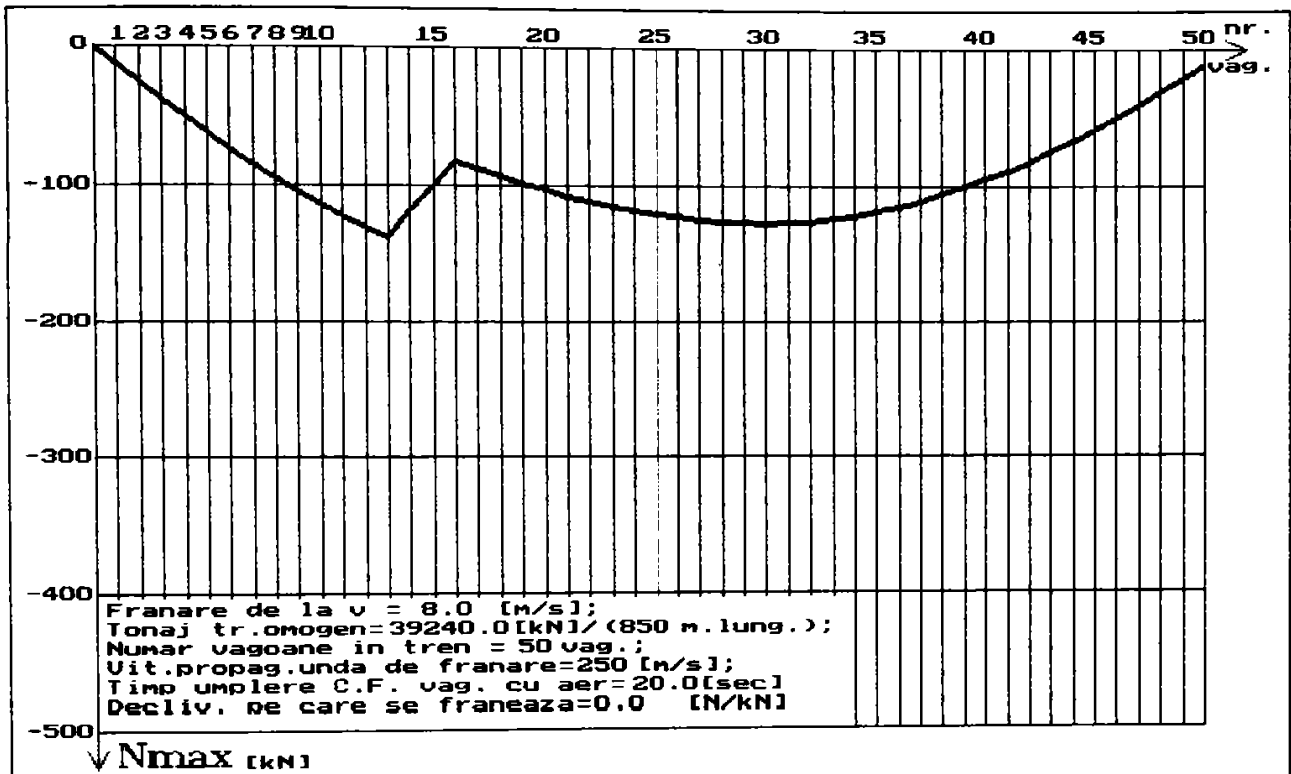


Fig. 3.53. Influența a 12 osii nefrânate plasate în prima treime a trenului asupra valorii forțelor dinamice longitudinale.

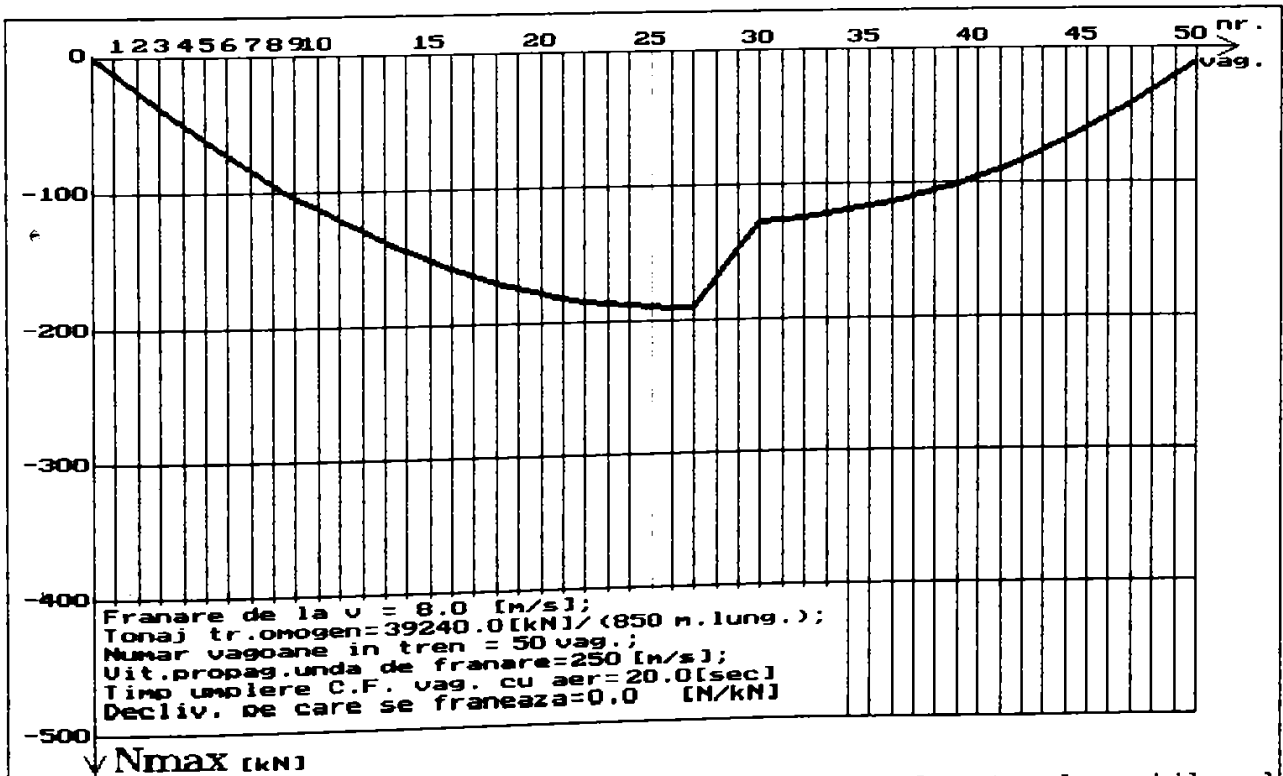


Fig. 3.54. Influența a 12 osii nefrânate plasate la mijlocul trenului asupra valorii forțelor dinamice longitudinale.

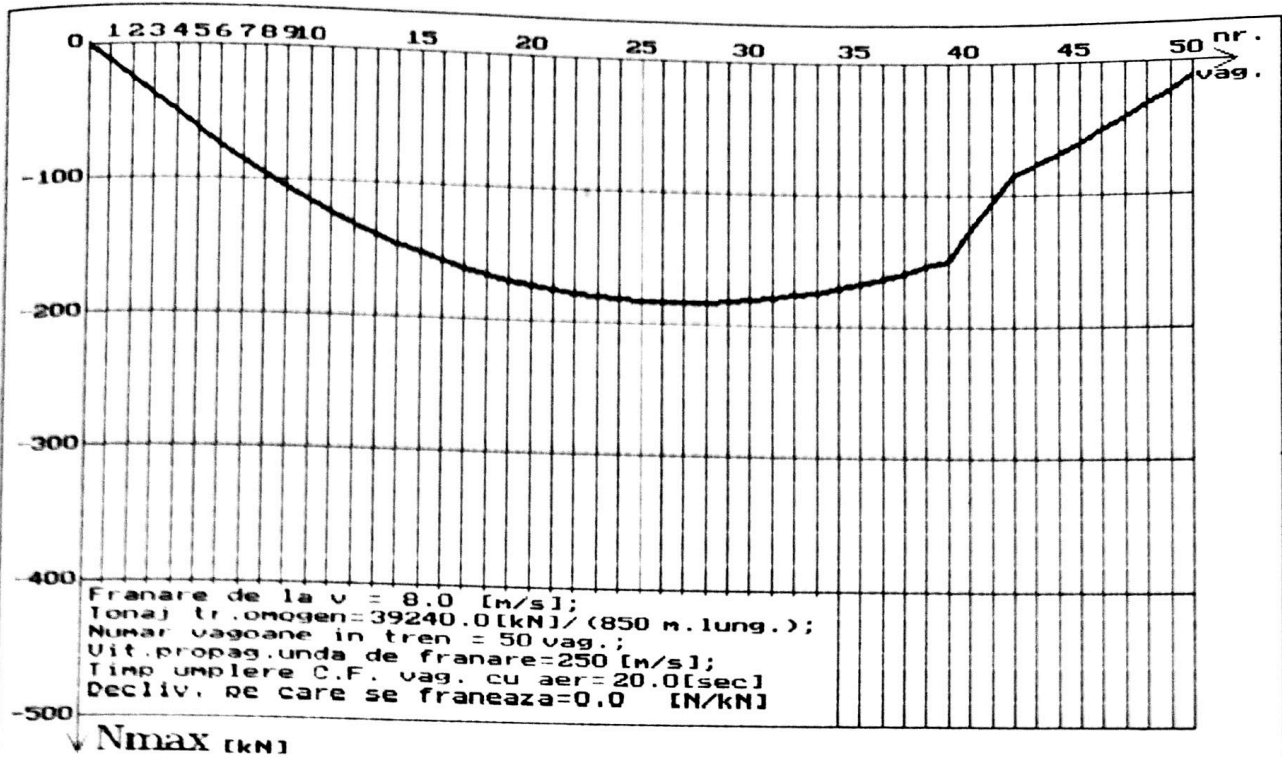


Fig. 3.55. Influența a 12 osii nefrânate plasate în ultima treime a trenului asupra valorii forțelor dinamice longitudinale.

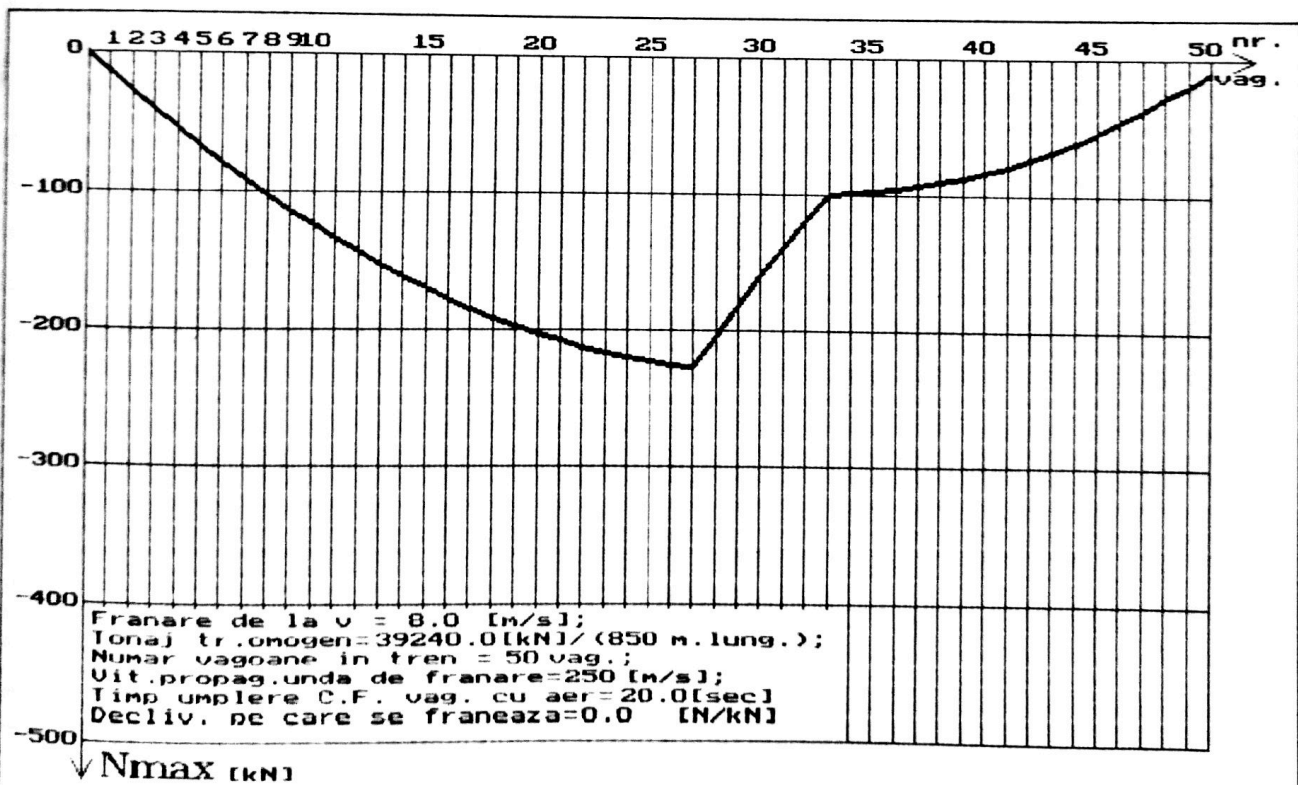


Fig. 3.56. Influența a 24 osii nefrânate plasate la mijlocul trenului asupra valorii forțelor dinamice longitudinale.

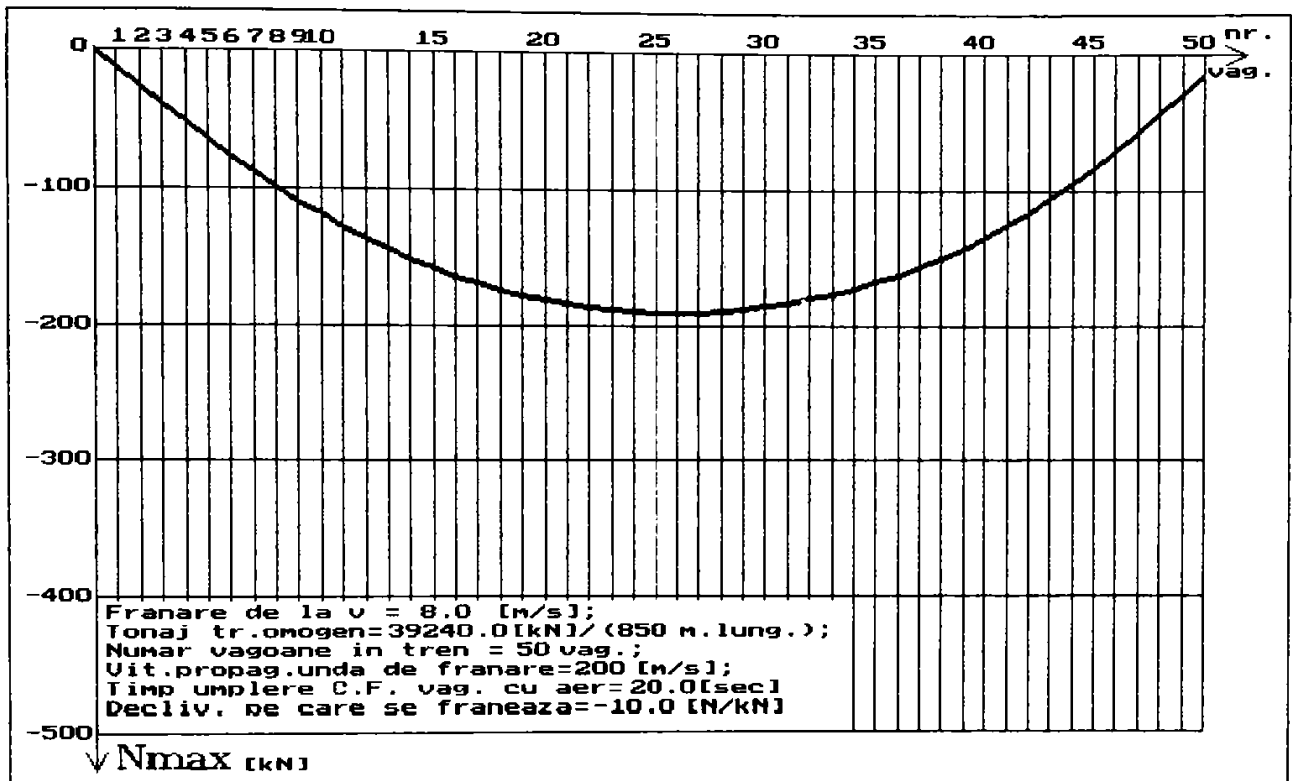


Fig. 3.57. Influența declivității pe care are loc frânarea asupra valorii forțelor dinamice longitudinale.

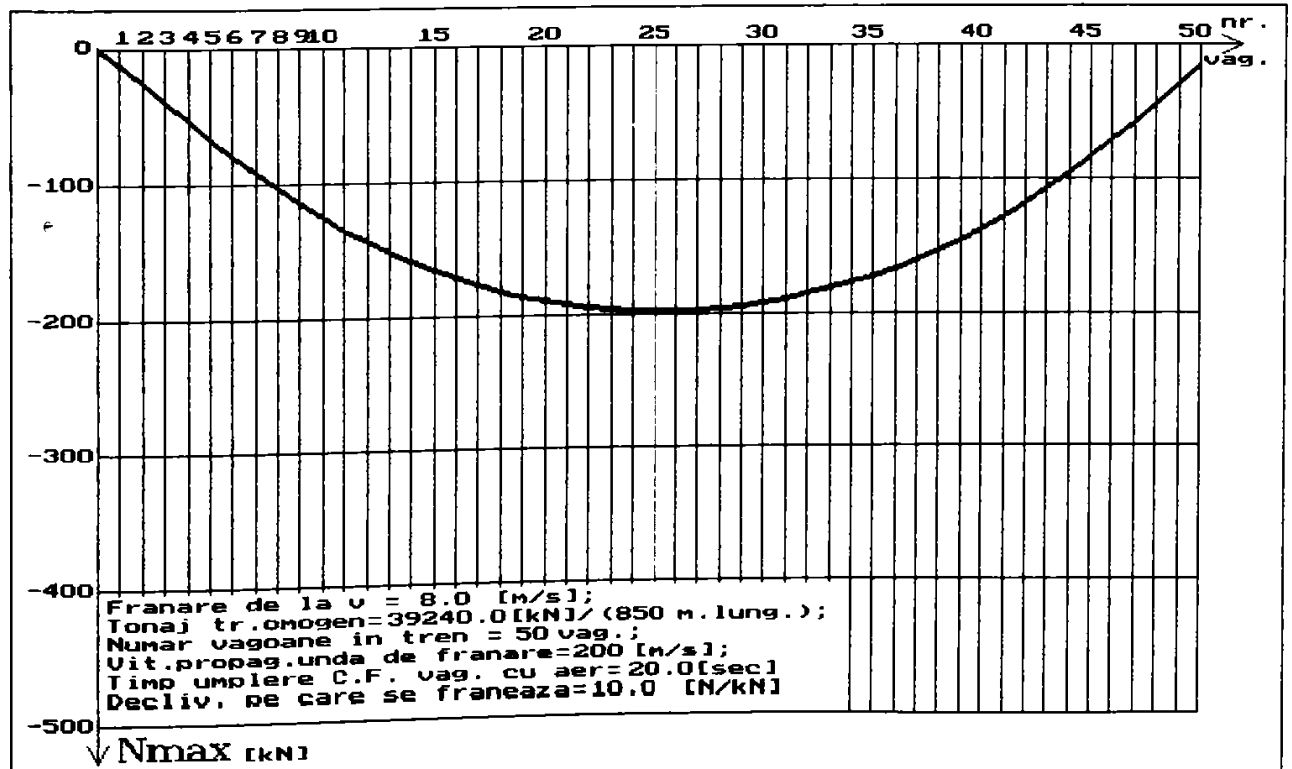


Fig. 3.58. Influența declivității pe care are loc frânarea asupra valorii forțelor dinamice longitudinale.

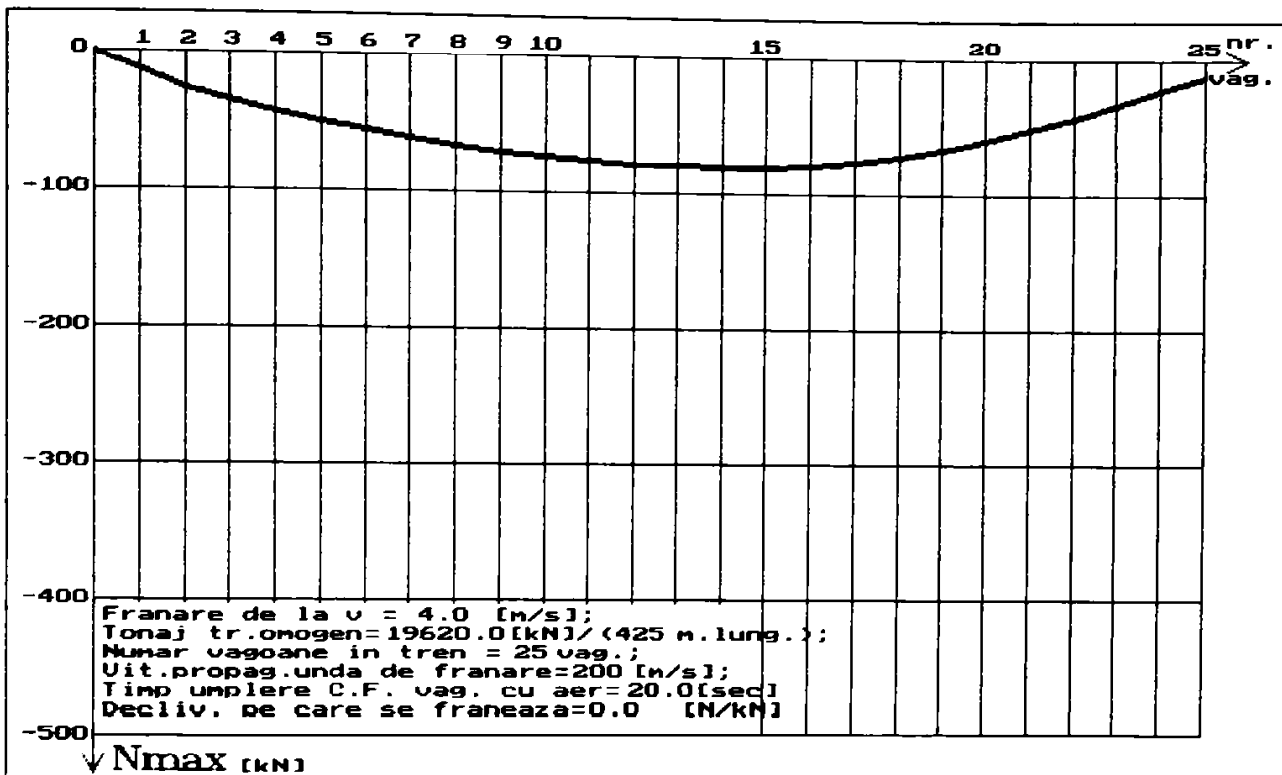


Fig. 3.59. Influența tonajului trenului (a lungimii conductei generale) asupra valorii forțelor dinamice longitudinale.

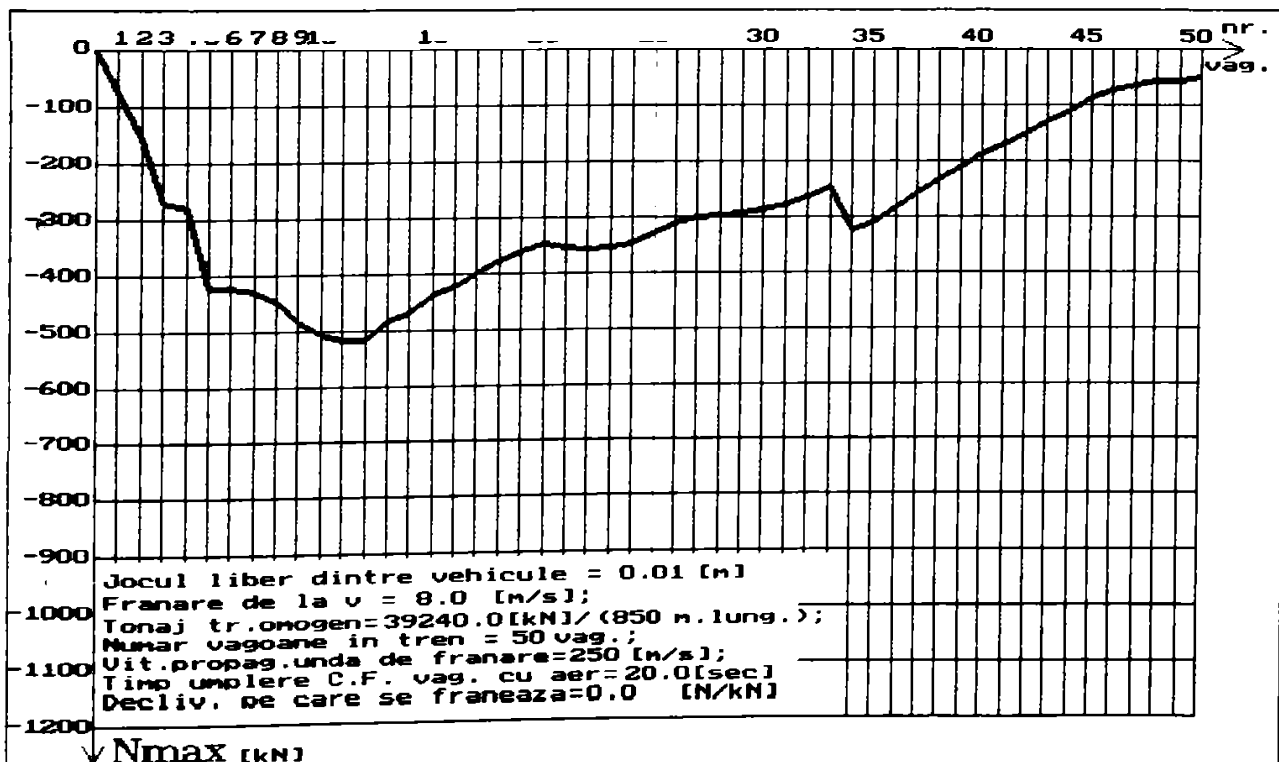


Fig. 3.60. Influența jocului liber dintre vehicule în cazul frânării din plină accelerare asupra valorii forțelor dinamice longitudinale.

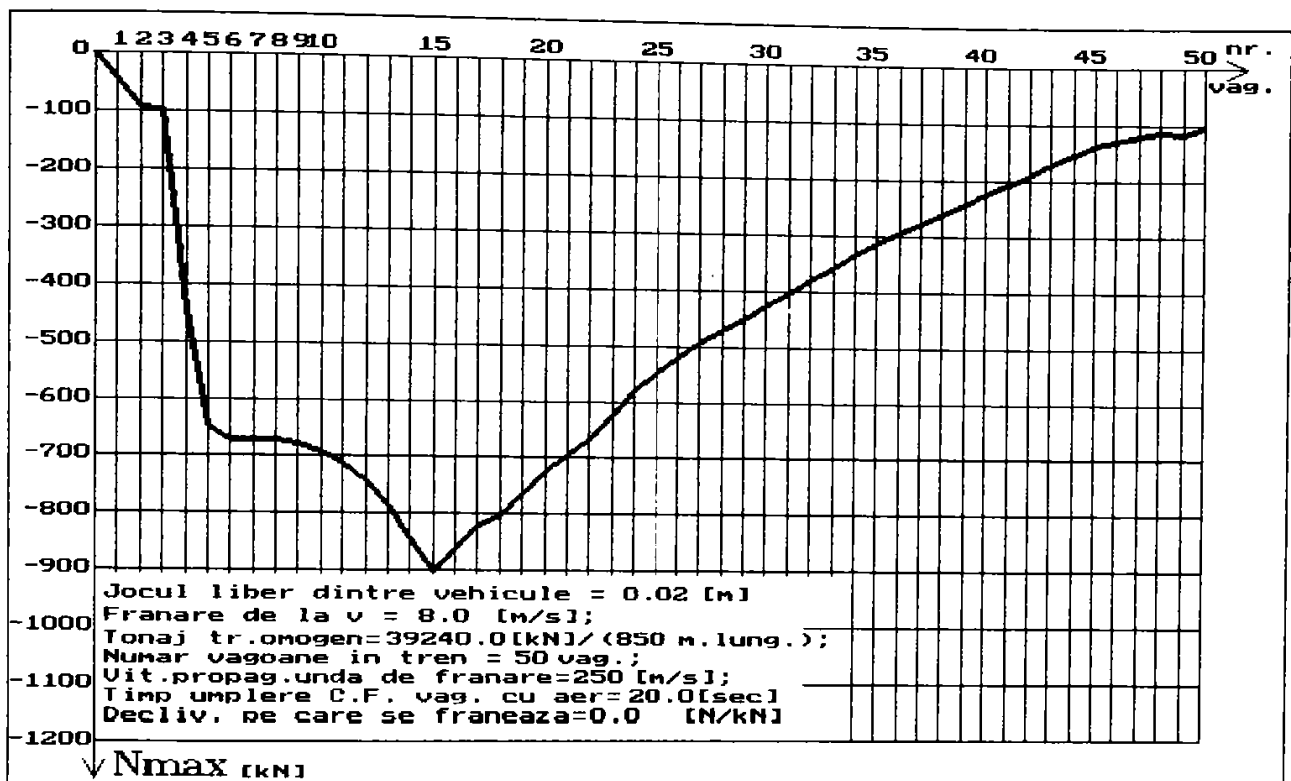


Fig. 3.61. Influența jocului liber dintre vehicule în cazul frânării din plină accelerare asupra valorii forțelor dinamice longitudinale.

forțelor dinamice longitudinale este mai mare, figura 3.56.;

-în urma analizării rezultatelor obținute după simularea regimului de mișcare tranzitoriu al trenului frânat care circulă pe declivități, rezultă că valoarea forțelor dinamice longitudinale maxime nu este influențată în mod semnificativ de faptul că trenul frânat circulă în palier, figura 3.46., pe o pantă, figura 3.57., sau în rampă, figura 3.58.;

-odată cu scăderea lungimii trenurilor, valorile maxime ale forțelor dinamice longitudinale scad, ca urmare a faptului că pentru un anumit tip de frânare (de exemplu o frânare de serviciu) viteza de propagare a undei de frânare crește și deci diferența dintre forțele de frânare ale vehiculelor scade, figura 3.59.;

-în cazul în care are loc comanda frânării trenului din plină accelerare a cestuia datorită unor cauze cum ar fi: slaba pregătire profesională a mecanicului de locomotivă, frânare de urgență fie datorită intrării în acțiune a instalației INDUSI sau a dispozitivelor de siguranță și vigilență de pe locomotivă, fie datorită ruperii trenului, etc., în corpul trenului apar forțe dinamice longitudinale de comprimare având valori foarte mari, care depind direct proporțional de mărimea jocului liber dintre vehiculele

trenului, figura 3.60. și figura 3.61.;

Analiza rezultatelor obținute în cazul regimului tranzitoriu de mers al trenurilor, atât pentru cazul frânării acestuia cât și pentru cazul demarajului, impune concluzia generală că una din cele mai semnificative influențe asupra valorilor maxime ale forțelor dinamice longitudinale o are mărimea jocului liber dintre vehiculele trenurilor de marfă, joc ce apare în procesul formării și compunerii acestora. Pentru reducerea valorilor maxime ale forțelor dinamice longitudinale rezultă necesitatea ca valoarea jocului liber să fie zero. În exploatarea curentă a căilor ferate acest lucru nu este posibil datorită următoarelor cauze:

- se îngreunează foarte mult activitatea de compunere și formare a trenurilor de marfă;

- în cazul unui tren de marfă, format din vehicule ce nu au joc liber între ele, la circulația prin curbe având raze mici și foarte mici, rezistențele la înaintare ale vagoanelor ar fi foarte mari atât datorită rezistenței curbei cât și faptului că toate arcurile inelare ale tamponelor de pe firul interior al curbei ar trebui comprimate cu o anumită valoare.

În concluzie trebuie stabilit un compromis între aceste cerințe contradictorii privind mărimea jocului liber între vehicule. Având în vedere faptul că în cazul demarajului unui tren de marfă format din vagoane înzestrate cu aparate de tracțiune discontinue cu arcuri volute, existența unui joc liber mai mare de circa 0,03 metri între vehicule conduce la comprimarea totală a arcurilor volute dintre vagoane, comprimare urmată de transmiterea neelastică în continuare a șocului, figura 3.9., precum și unele concluzii prezentate în literatura de specialitate se poate accepta această valoare a jocului liber de 0,03 metri ca fiind o valoare optimă din punct de vedere al compromisului necesar de realizat între cerințele contradictorii prezentate mai sus.

Totodată mai trebuie arătat că în cazul unor trenuri de marfă containere, specializate de perisabile sau vietăți pentru export, sau TEEM care sunt frânate în regim de călători, precum și în toate cazurile când are loc frânarea din plină accelerare, în corpul trenului apar forțe dinamice longitudinale de comprimare de ordinul a 600-900 kN, figurile 3.51. și 3.61.. Aceste forțe dinamice longitudinale maxime produc comprimarea completă a arcurilor inelare ale tamponelor dintre vehiculele din zona de mijloc a trenului,

comprimare urmată de transmiterea neelastică în continuare a forțelor dinamice longitudinale direct la șasiul vagoanelor. În plus dacă în această zonă a trenului există vagoane pe două osii goale sau încărcate cu mult sub capacitatea maximă, apare pericolul de descărcare a osiilor vagoanelor respective, descărcare urmată de deraierea acestora.

Analizând toate datele prezentate mai sus, rezultă că în cazul trenurilor de călători forțele dinamice longitudinale au valori foarte mici. Acest lucru se datorește pe de o parte legării fără joc a vagoanelor, iar pe de altă parte lungimii reduse a conductei generale de aer.

CAPITOLUL 4

REZULTATE EXPERIMENTALE

4.1. GENERALITAȚI

În acest capitol se prezintă rezultatele unor serii de măsurători experimentale efectuate în timpul remorcării trenurilor de marfă pe calea ferată, măsurători ce au avut drept scop determinarea mărimii și distribuției forțelor dinamice longitudinale în toate regimurile de mers precum și a condițiilor în care apar maximele acestora.

Aceste rezultate obținute experimental se prezintă grafic și în ordine cronologică, mai întâi cele obținute în Europa, iar apoi cele obținute în țară.

De asemenea se mai prezintă măsurătorile experimentale efectuate de autor în trenuri de marfă care au circulat pe raza Regionalei S.N.C.F.R. Timisoara, și care au fost îndrumate din stația Ronaț-Triaș.

În toate cazurile se prezintă comparativ și rezultatele obținute de autor în urma simulărilor pe calculator, simulări realizate în baza rulării programelor originale de calcul [Anexa 1], [Anexa 2], [Anexa 3] și [Anexa 4].

Trebuie menționat că încă de la primele măsurători experimentale ce au avut drept scop doar studiul funcționării frânelor din trenuri, în mod indirect s-au tras și concluzii privind modul de manifestare și evoluție al forțelor dinamice longitudinale din aceste trenuri.

Astfel într-o dare de seamă asupra experiențelor de frânare care au avut loc la Berlingthon (S.U.A.), comisia a semnalat că intensitatea șocurilor ce se produc la frânare crește mai repede decât pătratul numărului de vagoane din trenuri.

Ulterior, în timpul unor experiențe cu frâna americană AB (la trenuri de 150 de vagoane pe patru osii), experiențe ce au avut drept scop stabilirea raportului optim între timpul de umplere cu aer a cilindrului de frână și viteza de propagare a undei de frânare, dinamometrul vagonului nr. 149 al trenului a înregistrat un șoc de 5.850 kN, ocazie cu care a deraiat boghiul vagonului nr. 135, iar capătul dinainte al vagonului nr. 98 a

fost strivit de cutia vagonului nr. 97, care s-a ridicat deasupra bogiurilor.

Deasemenea, cu ocazia unor experiențe de frânare efectuate în anul 1930, de către căile ferate transcaucaziene din fosta U.R.S.S., după o frânare de serviciu totală de la viteza de 40 km/h, trenul de experiență s-a oprit liniștit, fără șocuri, iar posturile de observație de la mijlocul și de la urma trenului au raportat că nu au observat reacțiuni dinamice longitudinale în tren. Totuși, la revizia trenului s-a constatat că trenul este rupt în trei locuri, cauza fiind aranjarea incorectă și neuniformă a vagoanelor încărcate și goale, cu frână și fără frână în tren.

Actualmente preocupări legate de determinarea forțelor dinamice longitudinale are U.I.C., mai ales în cazul trenurilor rapide de marfă, realizându-se un program de calcul al acestor forțe pentru regimul tranzitoriu de mișcare al trenurilor [123].

4.2. REZULTATE EXPERIMENTALE OBTINUTE ÎN STRĂINĂTATE

Odată cu introducerea în cercetarea experimentală a timbrelor tensiometrice și a electronicii aferente, în cursul anilor cincizeci, studiul direct efectuat prin măsurători reale în trenuri aflate în circulație pe calea ferată, a devenit metoda de bază a cercetării experimentale a dinamicii longitudinale a trenului oricare ar fi categoria acestuia, atât în timpul regimului permanent de mișcare, cât și mai ales în timpul regimurilor tranzitorii de mișcare ale acestuia.

În cursul anului 1954 și mai ales în cursul anului 1955, la căile ferate din Ural și din Siberia s-au înregistrat un număr exagerat de mare de ruperi de traverse frontale ale unor vagoane pe două osii, smulgeri de cuple automate din traversele frontale sau chiar ruperea unor cuple automate. Ca urmare a acestor ruperi de trenuri, a fost demarat un ambițios program de cercetări experimentale, la care au participat toate vagoanele laborator și dinamometrice existente la vremea respectivă în fosta U.R.S.S.. Până la începutul anilor șaiszeci s-au efectuat cele mai numeroase, amănunțite și extinse măsurători experimentale desfășurate până atunci. Aceste măsurători de ordinul sutelor, au avut loc atât în trenuri de marfă omogene special compuse și pregătite pentru determinarea și înregistrarea forțelor dinamice

longitudinale cât și mai ales în trenuri reale aflate în circulație pentru toate regimurile de mers, fie tranzitorii fie permanente. În toate cazurile s-au folosit cuple automate tensiometrice, dotate fiecare cu câte două timbre tensiometrice, existând pentru fiecare caz în parte câte 8-12 puncte de măsurare distribuite în lungul trenului.

Programul de desfășurare al acestor măsurători experimentale a fost extrem de amănunțit, urmărindu-se măsurarea și înregistrarea forțelor dinamice longitudinale atât în timpul regimului de mers permanent în cazul circulației pe o linie având profil variabil, cât și mai ales în timpul regimurilor tranzitorii de mers, adică în timpul demarajului unor trenuri de diferite tonaje, întinse sau comprimate total sau parțial înaintea demarajului, s-au având vagoane frânate la urma trenului, precum și în timpul frânării acestora în diverse moduri (frânări de serviciu cu diferite depresiuni în conducta generală a trenului, frânări rapide, frânări combinate cu tragerea semnalului de alarmă la urma trenului sau la mijlocul acestuia, etc.), și de la diferite viteze de circulație.

Rezultatele și înregistrările obținute în urma experiențelor, precum și concluziile corespunzătoare au fost prezentate pe larg în unele lucrări din literatura de specialitate, [21] și [111].

O parte din rezultatele acestor măsurători experimentale directe se prezintă pe figurile 4.1....4.4., împreună cu rezultatele obținute de autor în urma simulărilor realizate în condiții corespunzătoare și care s-au bazat pe programele originale prezentate în capitolele 2 și 3, pentru diferite regimuri de mers ale trenurilor, precum și pentru diverse variante de demaraj sau frânare, astfel:

-pe figura 4.1. se prezintă distribuția forțelor dinamice longitudinale în lungul unui tren de marfă omogen (tonaj 40.653 kN, remorcare cu două L.E. în cap) care circulă în regim de mers permanent pe un profil de linie cu declivitate variabilă;

-pe figura 4.2. se prezintă distribuția forțelor dinamice longitudinale maxime în lungul unui tren de marfă omogen (tonaj 29.700 kN, remorcare cu o locomotivă electrică), fără jocuri libere între vehicule în timpul demarajului din aliniament și palier;

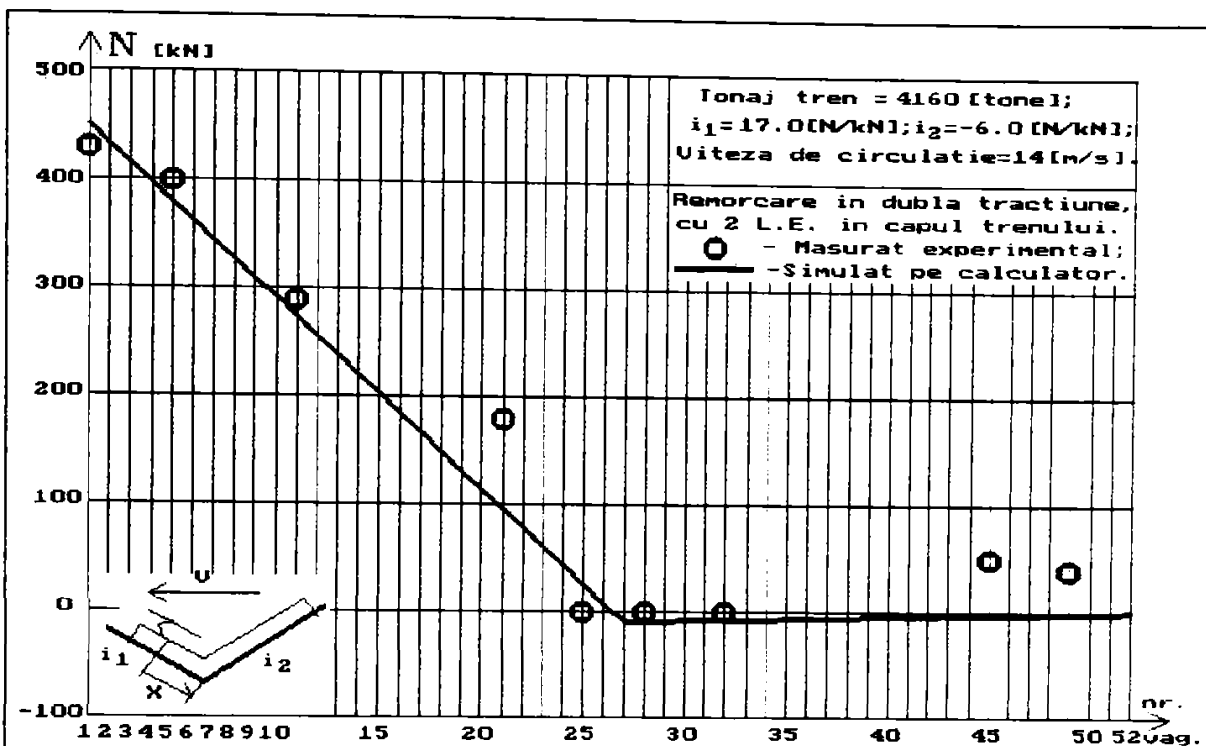


Fig. 4.1. Forțele dinamice longitudinale care acționează în timpul circulației unui tren de marfa omogen pe o linie cu profil variabil.

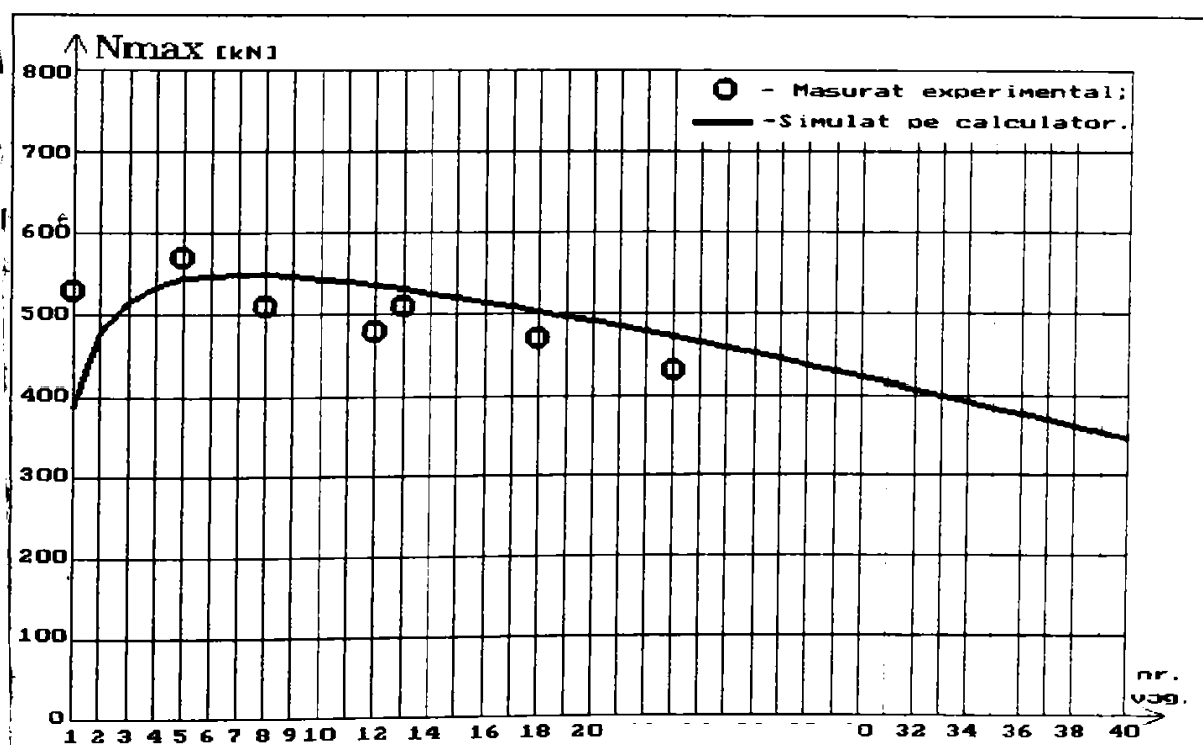
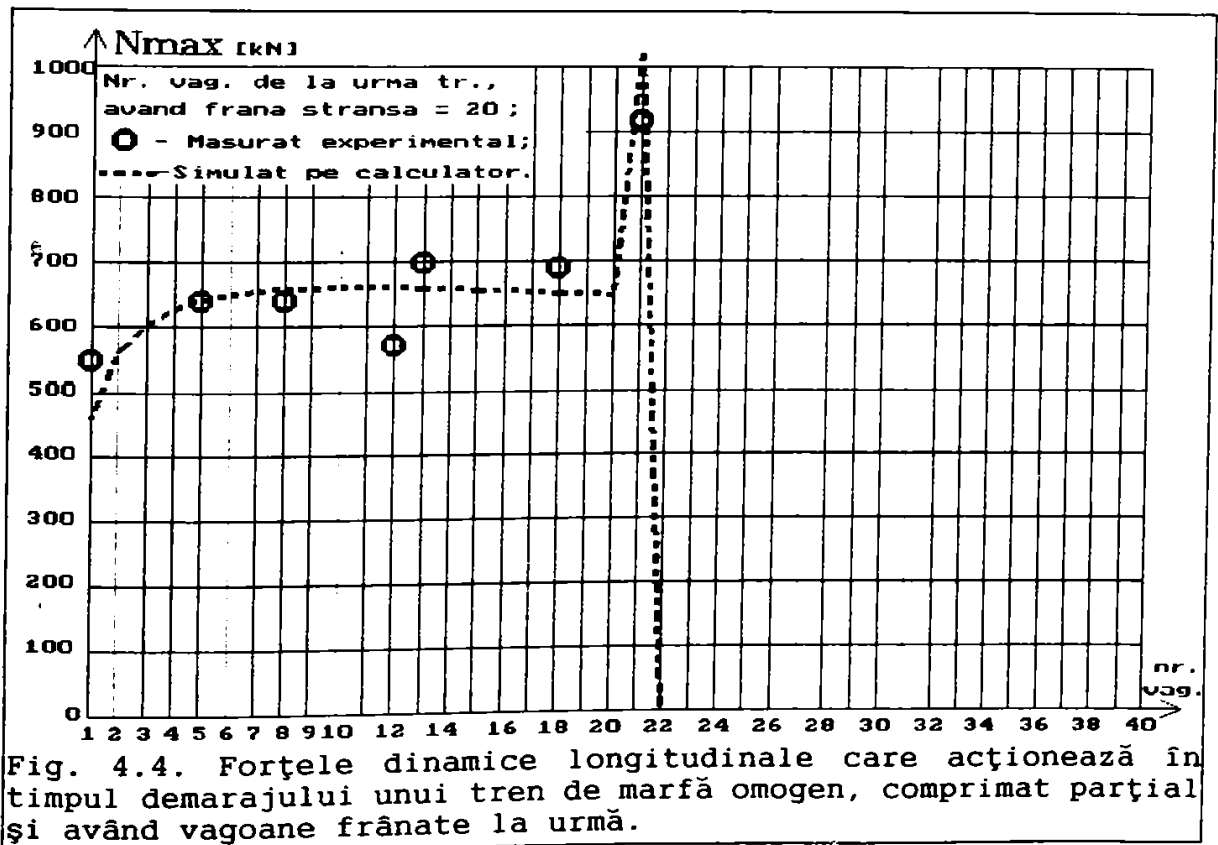
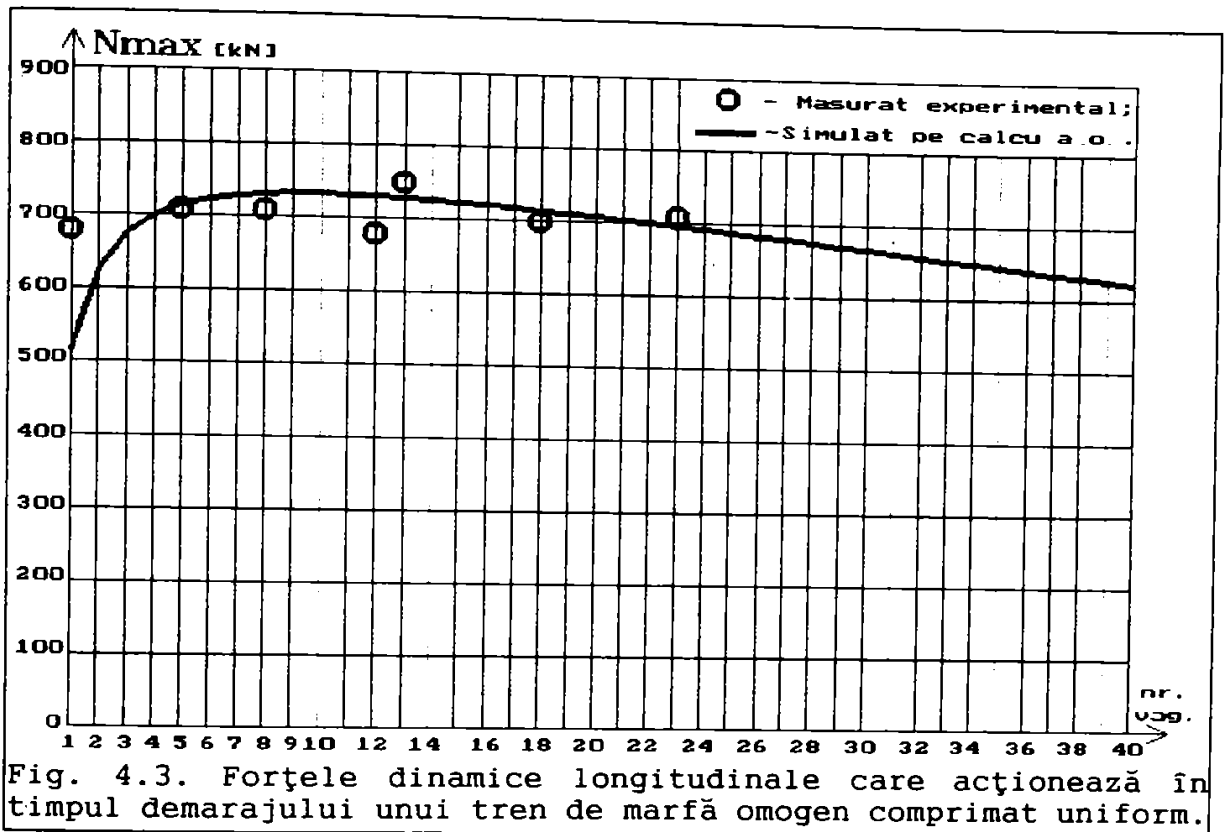


Fig. 4.2. Forțele dinamice longitudinale care acționează în timpul demarajului unui tren de marfă omogen.



-pe figura 4.3. se prezintă distribuția forțelor dinamice longitudinale maxime în lungul unui tren de marfă omogen (tonaj 29.700 kN, comprimare uniformă înaintea demarajului, remorcare cu o locomotivă electrică) în timpul demarajului din aliniament și palier;

-pe figura 4.4. se prezintă distribuția forțelor dinamice longitudinale maxime în lungul unui tren de marfă omogen (tonaj 29.700 kN, comprimare parțială și 20 de vagoane frânate la urmă, remorcare cu o locomotivă electrică), în timpul demarajului din aliniament și palier.

Tot în fosta U.R.S.S., în cursul anilor șaizeci au avut loc

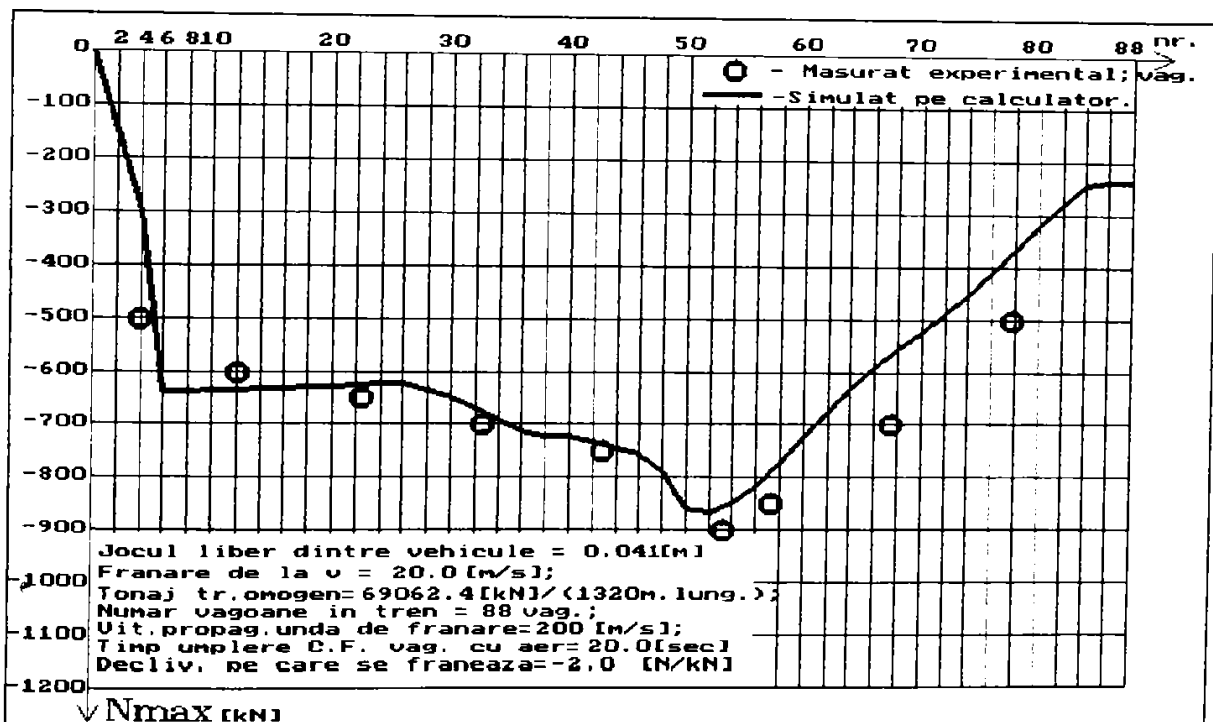


Fig.4.5. Forțele dinamice longitudinale care acționează în timpul frânării unui tren de marfă omogen din plină accelerare.

un șir de experiențe efectuate în condiții reale de exploatare de pe calea ferată și care au avut drept scop studiul comportării saboților din masă plastică realizați din compoziție 6KB-10 comparativ cu comportarea saboților din fontă în timpul frânării trenurilor de marfă de foarte mare tonaj. Rezultatele obținute precum și concluziile corespunzătoare au fost prezentate pe larg în [46]. Pe figura 4.5. se prezintă comparativ distribuția forțelor dinamice longitudinale maxime în lungul trenului, măsurate experimental și simulate pe calculator, în timpul

frânării rapide din plină accelerare, de la viteza de 20 m/s, a unui tren de marfă omogen având tonajul de 69.062 kN.

4.3. REZULTATE EXPERIMENTALE OBTINUTE ÎN ȚARA

În cursul anului 1978 pe căile ferate din țara noastră, Institutul de cercetări și proiectări tehnologice în transporturi București a efectuat o serie de măsurători experimentale în timpul circulației în regim de mers frânat a unui tren rapid de marfă experimental, urmărindu-se aspecte legate în special de dinamica longitudinală a trenului, în cazul unor frânări rapide din plină accelerare sau din viteză constantă, frânări efectuate de la diferite viteze de circulație. Rezultatele obținute precum și concluziile corespunzătoare se prezintă în [92].

Pe figura 4.6. și 4.7. se prezintă comparativ unele dintre aceste rezultate experimentale împreună cu rezultatele obținute de autor după simulările corespunzătoare efectuate pe calculator astfel:

-pe figura 4.6. se prezintă distribuția forțelor dinamice longitudinale maxime în lungul trenului pentru cazul frânării rapide în aliniament și palier a unui tren rapid de marfă neomogen având tonajul de 10.791 kN, de la viteza constantă de circulație de 6 m/s;

-pe figura 4.7. se prezintă distribuția forțelor dinamice longitudinale maxime în lungul trenului în cazul frânării rapide în aliniament și palier a unui tren rapid de marfă neomogen având tonajul de 10.791 kN, din plină accelerare a acestuia de la viteza de 3 m/s.

De asemenea, în perioada 1993-1994 REFER-București a efectuat o altă serie de măsurători experimentale, urmărindu-se în general aceleași aspecte ca mai sus, iar o parte din rezultatele obținute se prezintă pe figurile 4.8. și 4.9., comparativ cu rezultatele simulărilor corespunzătoare pe calculator astfel:

-pe figura 4.8. se prezintă distribuția forțelor dinamice longitudinale maxime în lungul trenului pentru cazul frânării rapide în aliniament și palier a unui tren rapid de marfă omogen având tonajul de 16.481 kN de la viteza constantă de circulație de 27 m/s;

-pe figura 4.9. se prezintă distribuția forțelor dinamice

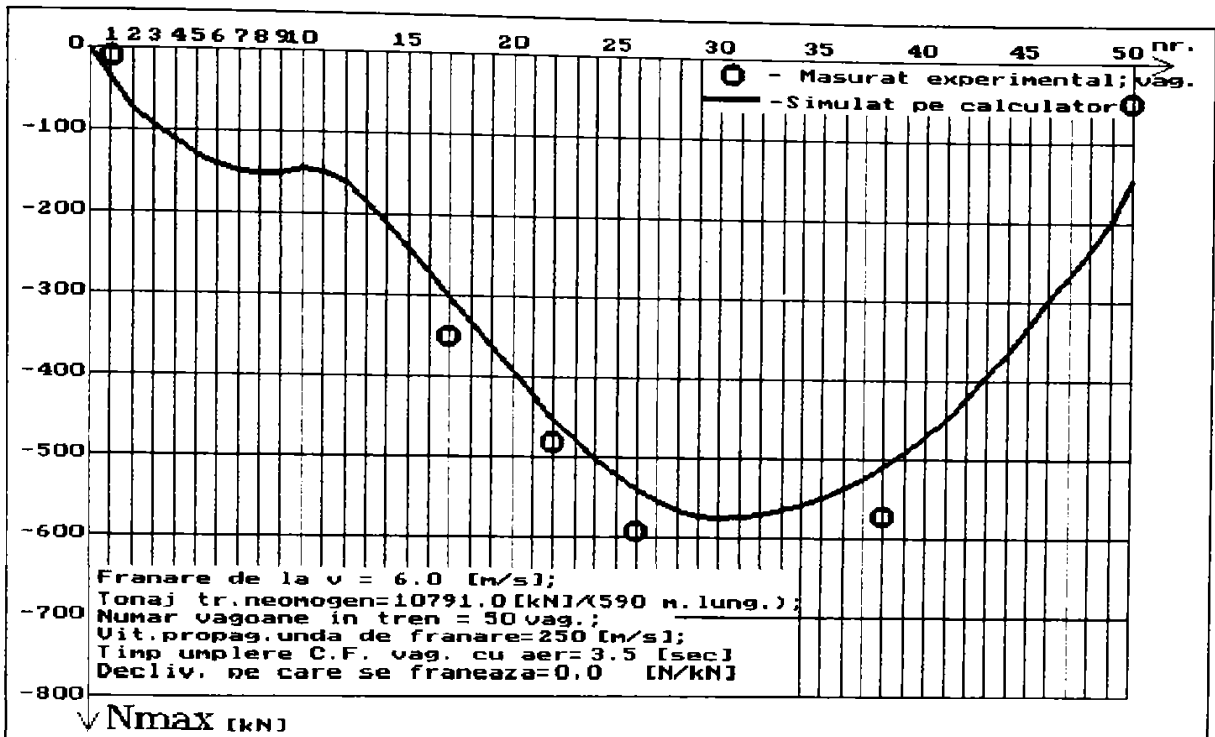


Fig. 4.6. Forțele dinamice longitudinale care acționează în timpul frânării unui tren de marfă neomogen din viteză constantă.

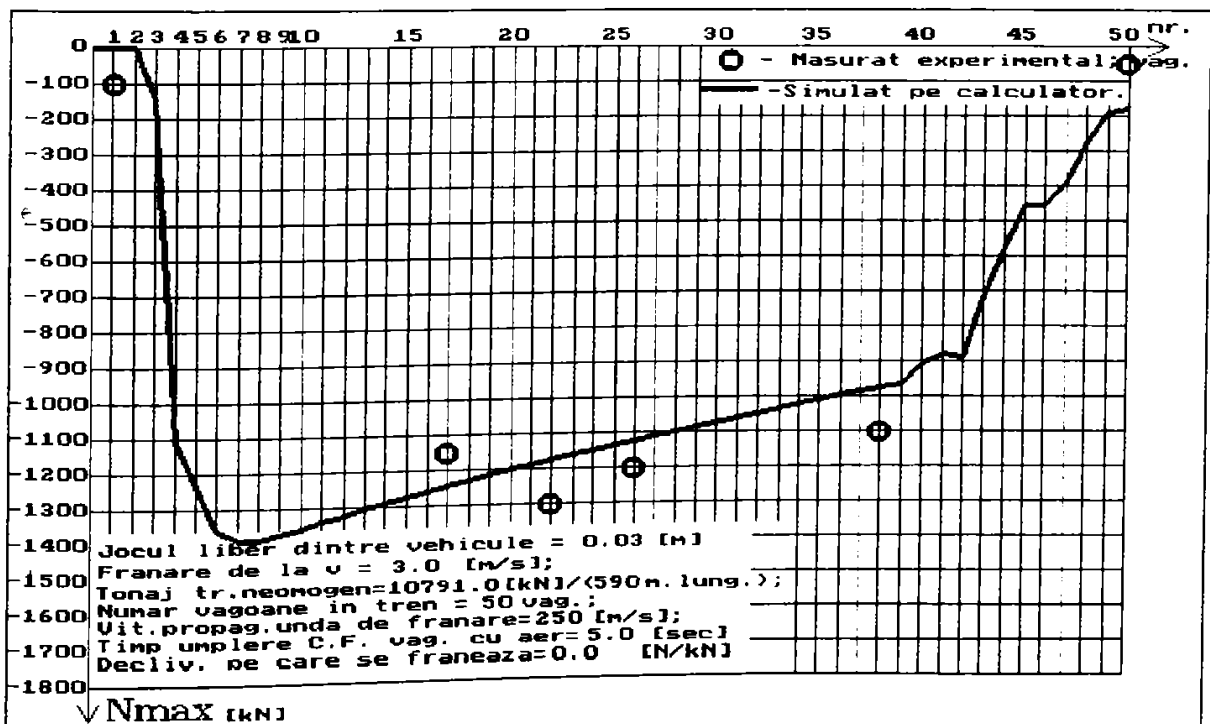


Fig. 4.7. Forțele dinamice longitudinale care acționează în timpul frânării unui tren de marfă neomogen din plină accelerare.

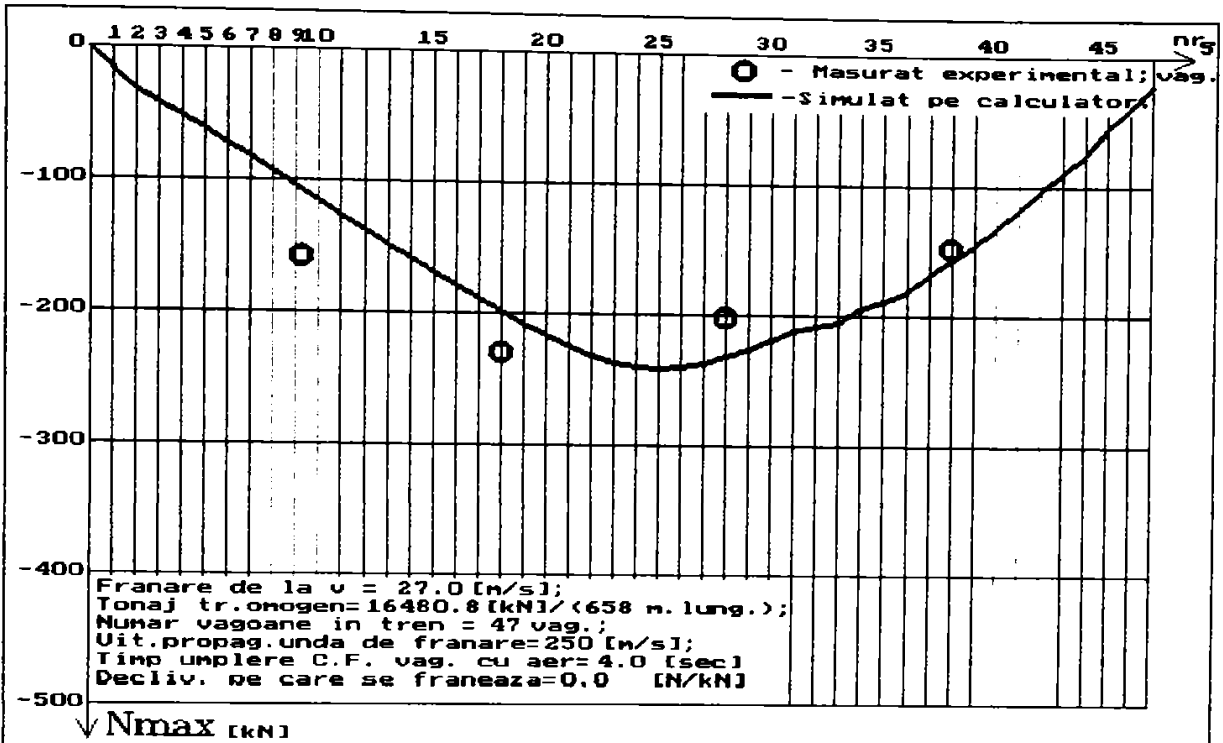


Fig. 4.8. Forțele dinamice longitudinale care acționează în timpul frânării unui tren de marfă omogen din viteză constantă.

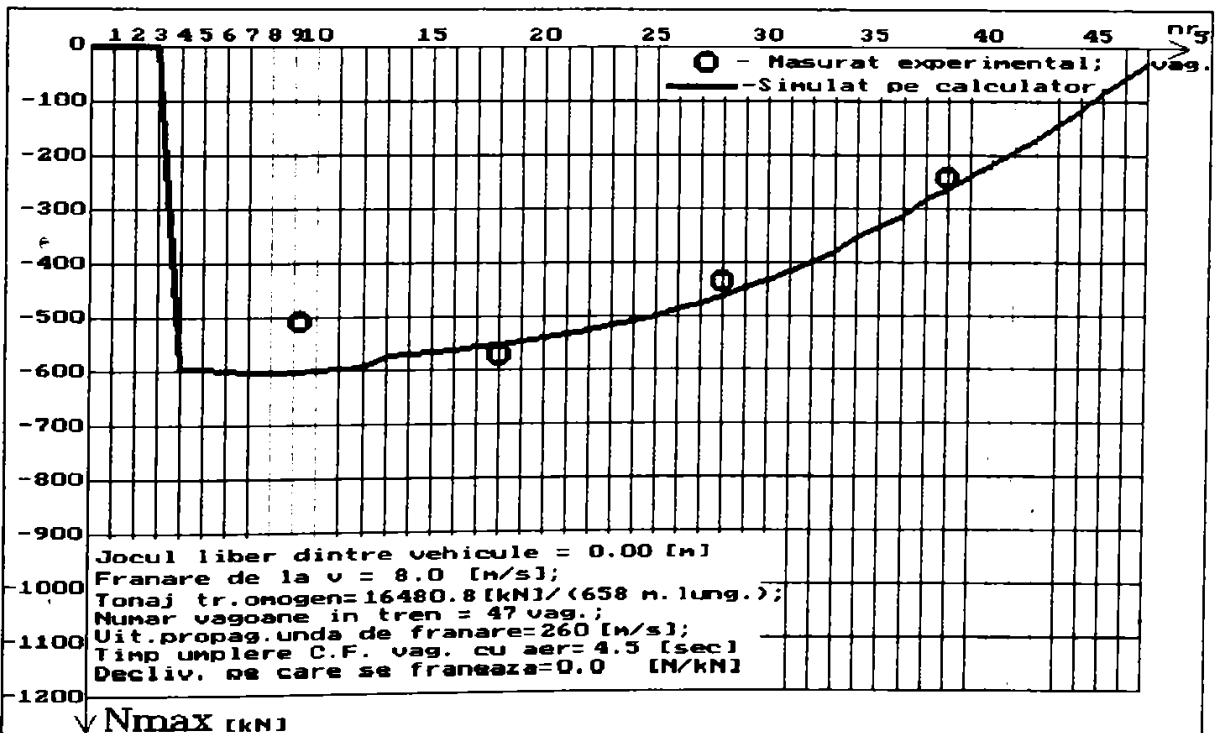


Fig. 4.9. Forțele dinamice longitudinale care acționează în timpul frânării unui tren de marfă omogen din plină accelerare.

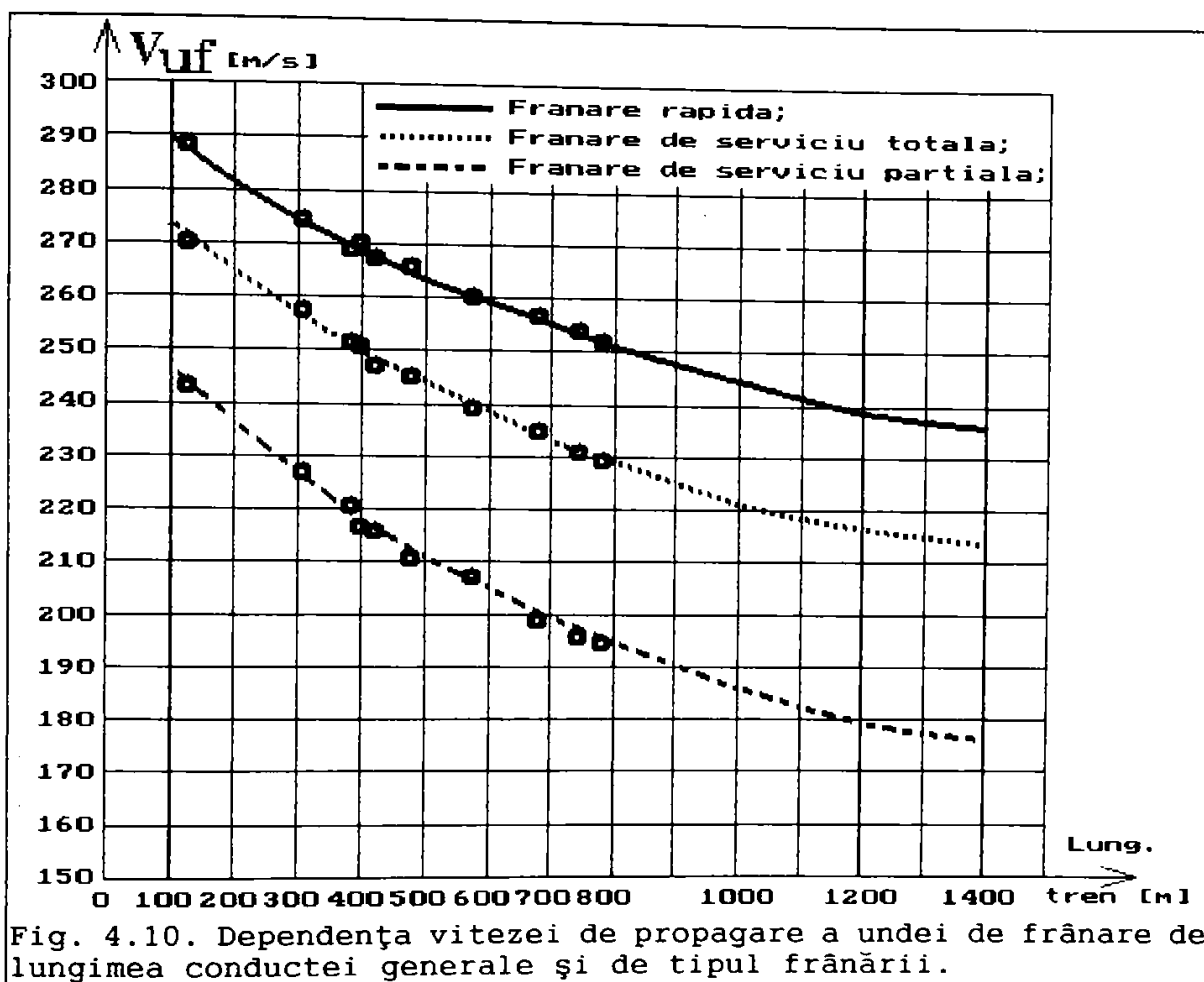
longitudinale maxime în lungul trenului pentru cazul frânării rapide în aliniament și palier, din plină accelerare a unui tren rapid de marfă omogen având tonajul de 16.481 kN, de la viteza de 8 m/s;

4.4. REZULTATE EXPERIMENTALE ȘI MĂSURĂTORI EFECTUATE ÎN TRENURI REALE DIN EXPLOATEREA CURENTĂ A CĂILOR FERATE ROMANE

În perioada 21-23 iulie 1997, autorul a efectuat o serie de măsurători, în grupa de pregătire a trenurilor de marfă din stația Ronaț Triaj. Aceste măsurători au avut drept scop principal studiul propagării undei de aer și a undei de frânare după comanda unei frânări în conductele general ale unor trenuri de marfă omogene și neomogene, trenuri ce au avut tonaje și lungimi diferite, [Anexa 5]. De asemenea s-a mai urmărit și scoaterea în evidență a factorilor ce au o influență semnificativă asupra valorilor vitezelor de propagare a undei de aer și respectiv a undei de frânare, oricare ar fi tipul frânării comandate. S-au efectuat frânări rapide, precum și frânări de serviciu totale sau parțiale. Pentru fiecare caz în parte s-au efectuat câte trei măsurători în condiții identice, utilizându-se cronometre digitale, după care s-au determinat valorile medii obținute.

Se cunoaște că imediat după comanda unei frânări, începe evacuarea aerului din conducta generală a trenului, prin orificiul corespunzător al robinetului mecanicului. Scăderea presiunii aerului nu se propagă instantaneu până la urma trenului ci într-un anumit interval de timp, iar fenomenul de propagare în lungul trenului a scăderii presiunii aerului după ce a avut loc comanda frânării se numește undă de aer. Viteza de propagare a undei de aer ca medie a valorilor măsurate de autor pentru mai multe cazuri a fost de 323,7 m/secundă. Aceasta nu a depins de lungimea conductei generale de aer, de tipul frânării efectuate și nici de valoarea presiunii aerului în conducta generală.

După trecerea undei de aer prin fața unui distribuitor activ, începe scăderea locală a presiunii aerului, iar dacă această scădere se face cu o anumită viteză atunci se produce intrarea în acțiune a distribuitorului de aer și deci se declanșează frânarea vagonului respectiv. Ca urmare intrarea în acțiune a distribuitoarelor de aer se face succesiv, unul după



ăltul, începând de la capul spre urma trenului, iar acest fenomen de propagare în lungul trenului a acțiunii frânelor se numește undă de frânare. Rezultatele experimentale obținute de autor pentru viteza de propagare a undei de frânare, V_{uf} , se prezintă pe figura 4.10., pentru diferite tipuri de frânare comandate.

Analizând curbele prezentate pe figura 4.10. se pot trage următoarele concluzii importante:

- pentru un anumit tip de frânare viteza de propagare a undei de frânare depinde în mod semnificativ de lungimea conductei generale a trenului. Cu cât lungimea acesteia este mai mică cu atât crește valoarea vitezei de propagare a undei de frânare;
- viteza de propagare a undei de frânare în lungul trenului depinde de asemenea în mod semnificativ și de felul frânării. Astfel, în cazul frânărilor rapide viteza de propagare a undei de frânare are valori mai mari decât în cazul unei frânări de serviciu totale. La rândul ei, viteza de propagare a undei de

frânare pentru o frânare de serviciu totală este mai mare decât cea corespunzătoare unei frânări de serviciu parțiale.

Analizând concluziile prezentate mai sus, rezultă că forțele dinamice longitudinale în cazul unei frânări de serviciu totale sunt mai mari decât în cazul unei frânări rapide, dacă comanda frânării are loc după trecerea unui anumit interval de timp de la încetarea forței de tracțiune.

CAPITOLUL 5

SINTEZA LUCRĂRII, CONCLUZII GENERALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

Teza de față, privind studiul și analiza forțelor dinamice longitudinale ce acționează în trenurile aflate în circulație pe calea ferată, reprezintă un pas necesar în activitatea de remorcare a trenurilor de călători și marfă din S.N.C.F.R., deoarece în condițiile necesității unui progres continuu și de aliniere la performanțele existente pe plan mondial a transportului feroviar românesc, va apare și la noi în țară obligativitatea sporirii vitezelor de circulație precum și a tonajelor trenurilor.

Această lucrare a fost elaborată în baza unor cercetări minuțioase și îndelungate, cercetări care au contribuit în mod esențial la identificarea problematicii domeniului abordat, a stadiului actual privind determinarea forțelor dinamice longitudinale în trenuri în mod teoretic sau experimental, precum și la formularea obiectivului lucrării. Lista cu referințele bibliografice cuprinde în mare parte lucrări specifice domeniului abordat precum și lucrări generale publicate pe plan național sau mondial, în ultimii cizzeci de ani, ceea ce ilustrează preocupările, precum și importanța acordată acestui domeniu de mare interes al exploatării de zi cu zi a materialului rulant de cale ferată.

O parte importantă din cercetările științifice întreprinse de autor și prezentate în lucrarea de față se referă la determinarea valorilor maxime ale forțelor dinamice longitudinale care apar în toate regimurile de mers ale trenurilor, la identificarea factorilor ce influențează într-o măsură mai mică sau mai mare mărimea acestor forțe, la modul de evoluție în timp și de distribuție în lungul trenului a acestora, precum și la stabilirea condițiilor în care se poate atinge maximum acestor forțe atât în timpul regimului tranzitoriu de mișcare cât și în timpul regimului de mers permanent al trenurilor. Cealaltă parte a cercetărilor științifice, având un caracter original și fiind desfășurate pe o perioadă de mai mulți ani, are aplicabilitate

practică specifică domeniului abordat și s-a concretizat prin elaborarea mai multor programe de calcul care modelează și simulează cu o foarte bună aproximare comportarea dinamică a trenurilor în timpul mișcării acestora pe calea de rulare, în toate regimurile de mers, etapă în care autorul și-a utilizat experiența practică dobândită în timpul activității din sectorul de exploatare al S.N.C.F.R..

În plus s-au efectuat și cercetări experimentale în condiții reale din exploatarea curentă a materialului rulant de cale ferată, cercetări legate de mișcarea aerului în conducta generală a frânei automate a trenului, dar și de modul de variație a presiunii aerului în cilindrii de frână din tren, după comanda unei frânări.

În cele ce urmează sunt menționate acele contribuții considerate ca având un caracter original.

1. Stabilirea pricipiilor specifice ale modelării și simulării pe calculator a dinamicii mișcării trenurilor de călători și marfă pe calea ferată, atât în regim de mers permanent cât și în regim tranzitoriu.

În capitolul 1 s-au particularizat principiile general valabile ale modelării și simulării comportării sistemelor mecanice pentru cazul specific al fenomenelor dinamice ce au loc în timpul mișcării trenurilor pe calea de rulare, atât în regim de mers permanent cât și în regim tranzitoriu. Autorul a elaborat mai multe modele conceptuale originale, specifice care reflectă esența fenomenelor fizice ce au loc în timpul remorcării trenurilor pe calea de rulare. În plus s-a ținut seama de caracterul neliniar al legăturilor elastice dintre vehiculele ce intră în compunerea trenurilor, care influențează în mod esențial apariția, evoluția și distribuția forțelor dinamice longitudinale.

2. Elaborarea modelului mecanic și de calcul pentru determinarea forțelor dinamice longitudinale ce apar și se manifestă în timpul circulației trenurilor în regim de mers permanent.

În capitolul 2 au fost concepute și elaborate modelele mecanice și matematice, schemele echivalente, precum și programele de simulare în limbaj Turbo Pascal V 7.0, pentru cazul circulației trenurilor de călători și marfă în regim de mers

permanent pe o cale de rulare având declivitatea constantă sau variabilă, insistându-se pe cazurile cele mai des întâlnite în exploatarea curentă a materialului rulant de cale ferată. În plus se mai scot în evidență atât factorii care influențează asupra valorilor maxime ale forțelor dinamice longitudinale cât și condițiile de apariție a acestora.

Analizând rezultatele obținute și prezentate sub formă de grafice se trage concluzia generală că ruperea aparatelor de tracțiune aflate în bună stare de funcționare nu se poate produce în timpul circulației trenurilor în acest regim de mers, oricare ar fi tipul și puterea locomotivei de remorcare.

3. Stabilirea modelelor mecanice și de calcul în scopul determinării valorilor maxime și a modului de evoluție în timp a forțelor dinamice longitudinale ce apar și acționează în regimurile tranzitorii de mers ale trenurilor.

În capitolul 3 au fost stabilite modelele mecanice, modelele matematice precum și schemele echivalente, împreună cu programele originale de simulare specifice pentru toate cele trei cazuri de circulație a trenurilor avute în vedere și anume:

- cazul demarajului unui tren format din vagoane înzestrate cu aparate de tracțiune discontinue cu arcuri volute;
- cazul demarajului unui tren format din vagoane înzestrate cu aparate de tracțiune discontinue cu arcuri inelare;
- cazul frânării unui tren de la viteza maximă de circulație.

Pentru rezolvarea sistemelor formate din 80 - 100 de ecuații diferențiale neliniare de gradul întâi, autorul a utilizat metoda Runge-Kutta de ordinul patru, în baza căreia a conceput, proiectat și realizat mai multe programe de simulare originale pe calculator în limbaj Turbo Pascal V 7.0, pentru toate cele trei cazuri avute în vedere.

În baza analizei rezultatelor obținute după simulările efectuate se scot în evidență factorii care exercită o influență semnificativă asupra apariției, asupra modului de manifestare precum și asupra valorilor maxime ale forțelor dinamice longitudinale, după care se trage concluzia că în anumite cazuri de remorcare ale trenurilor în regim tranzitoriu, atunci când forțele dinamice longitudinale depășesc cu mult valoarea forței de comprimare completă a dispozitivelor elastice ale aparatelor

de tracțiune dintre vagoane, tensiunile reale din aparatele de tracțiune ce apar în urma transmiterii neelastice a șocurilor sunt mai mari decât cele rezultate din calculele de verificare, și ca urmare în acest regim de mers al trenurilor există pericolul deformării, fisurării sau ruperii aparatelor de tracțiune. De asemenea, în cazul frânărilor de serviciu totale ale trenurilor de la viteza critică de frânare, se trage concluzia că apar forțe dinamice longitudinale în zona de mijloc a trenului, forțe a căror valoare maximă este mai mare decât valoarea forței ce produce comprimarea completă a dispozitivelor elastice ale aparatelor de ciocnire, și ca urmare mai ales în timpul frânării trenurilor care circulă în curbe de raze mici, există pericolul de ridicare de pe șină a osiilor vagoanelor ușoare din corpul trenurilor, sau de deformare a șasiului acestora.

4. Efectuarea de măsurători în trenuri de marfă aflate în circulație, în stația S.N.C.F.R. Ronaț-Triaș.

În capitolul 4 se prezintă rezultatele obținute de autor în urma măsurătorilor efectuate în stația Ronaț-Triaș, în perioada 21-23 iulie 1997, privind vitezele de propagare ale undei de aer, ale undei de frânare, modul de variație a presiunii aerului din cilindrii de frână ai vagoanelor din tren, etc., pentru frânări de serviciu, parțiale sau totale, și în cazul frânărilor rapide, precum și concluziile ce rezultă din acestea.

Lucrarea de față prezintă o deschidere pe plan național în domeniul extrem de vast al comportării dinamice a trenurilor în timpul remorcării acestora pe calea de rulare, tratând în mod unitar problematica apariției, evoluției și distribuției forțelor dinamice longitudinale în toate regimurile de mers ale trenurilor și prezentând unele concluzii esențiale pentru siguranța circulației feroviare, respectiv pentru integritatea materialului rulant de cale ferată.

O parte din rezultatele cercetărilor științifice teoretice și experimentale au fost deja publicate sau comunicate, acestea asigurând un suport științific ce ar putea constitui un bun prilej de continuare a colaborării cu S.N.C.F.R. și cu unitățile de profil.

Metodologia de calcul, precum și programele de simulare și modelare numerică originale, prezentate în lucrare sunt utile

specialiștilor din domeniu care își desfășoară activitatea în cercetarea, proiectarea, producția sau exploatarea materialului rulant de cale ferată, precum și celor din învățământul de specialitate.

Autorul își propune continuarea lucrărilor în domeniul de cercetare științifică care constituie obiectul tezei de doctorat, cu o referire specială privind mijloacele și măsurile necesare de aplicat pentru prevenirea sau reducerea intensității acțiunii nefavorabile ale forțelor dinamice longitudinale din trenurile în mișcare.

BIBLIOGRAFIE

1. ASTAHOV P.N., ș.a.: Soprotivlenie troganiju s mesta vagonov na rolikovyh podsipnikah, în: Vestik vsesojuyn. naucno-issled. in-ta. z.-d. transporta, Moscova, Nr. 2/1972.
2. ASTAHOV P.N.: O soprotivleniipodviznogosostava pri malyh skorostjah dvizenija, în: Vestik vsesojuyn. naucno-issled. in-ta. z.-d. transporta, Moscova, Nr. 4/1973.
3. BABICICOV A.M. și EGORCENCO V.F.: Tracțiunea trenurilor. Teorie, calcule, încercări, București, Oficiul de presă, editura și documentare C.F.R., 1951.
4. BALTAC TH., ș.a.: Fenomene dinamice la frânarea reostatică, în: Revista Căilor Ferate, București, Nr. 6/1970.
5. BALTAC TH.: Frânarea dinamică a trenurilor, București, Editura M.T.Tc. Centrul de documentare și publicații tehnice-M.T.Tc., 1971.
6. BARBU V.: Metode matematice în optimizarea sistemelor diferențiale, București, Editura Academiei R.S.R., 1989.
7. BĂLĂȘCAN GH.: Aparatul de amortizare a cuplei automate, în: Revista Căilor Ferate Române, București, Nr. 8/1972.
8. BĂLĂȘCAN GH.: Introducerea aparatului de amortizare pentru cupla automată, prim pas în asigurarea trecerii la cupla automată a vehiculelor de cale ferată, în: Revista Căilor Ferate Române, București, Nr. 2/1973.
9. BELEA C., ș.a.: Metode algebrice și algoritmi de sinteză optimală a sistemelor dinamice, București, Editura Academiei R.S.R., 1985.
10. BERNHARDT M.: Numerische Berechnung von Langskraften in Eisenbahnzügen mit Hilfe des Digitalrechners. în: Wiss. Zeit. der Hochs. "Friedrich List.", Dresda, (18), Nr. 2/1971.
11. BRATEȘ M.: Criteriu privind dimensionarea elementelor componente ale aparatului de tracțiune. în: Revista

- Căilor Ferate, București, Nr. 12/1969.
12. BRINDEU L., ș.a.: Mecanică și vibrații, culegere de probleme pentru calculator, Timișoara, Editura Universității Tehnice Timișoara (Lito), 1993.
 13. BUCUR C.M.: Metode numerice, Timișoara, Editura Facla, 1973.
 14. BUCUR C.M., ș.a.: Matematici speciale. Calcul numeric, București, E.D.P., 1983.
 15. BUTENKO A.I.: O vlijanii krivizny silovoj harakteristiki i koeficienta pogloscenija energii nelinejnyh mezvagonnyh svjazej na rasprostranenie vozmuscenij konečnoj amplitudy vdol' poezda v rezime ego troganija s mesta. În: Trudy M.I.I.T., Moscova, Nr. 390/1971.
 16. CAȘIN P.: Un procedeu de calcul al perioadei de oscilație sub sarcini dinamice. În: Revista Căilor Ferate, București, Nr. 12/1959.
 17. CERNEȚKI V.I., ș.a.: Metode matematice și algoritmi în studiul sistemelor automate, București, Editura Tehnică, 1973.
 18. CRISTEA V., ș.a.: Turbo Pascal 6.0, București, Editura Teora, 1992.
 19. DANCEA I.: Programarea calculatoarelor numerice pentru rezolvarea problemelor cu caracter tehnic și de cercetare științifică, Cluj-Napoca, Editura Dacia, 1973.
 20. DAVID T.: Noile vagoane de marfă de 60 tone ale C.F.R.. În: Revista Căilor Ferate, București, Nr. 8/1966.
 21. DENISOV B.A.: Rezul'taty issledovanija prodol'noj dinamiki poezda na perelomah profilja puti. În: Vestik vsesojuyn. naucno-issled. in-ta. z.-d. transporta, Moscova, Nr. 4/1961.
 22. DINCĂ F. și TEODOSIU C.: Vibrații neliniare și aleatoare, București, Editura Academiei R.S.R., 1969.
 23. DODESCU GH.: Metode de calcul numeric, București, E.D.P., 1976.
 24. DONCIU T., ș.a.: Indrumător pentru calcule de tracțiune și frânare a trenurilor, București, Editura M.T.Tc., 1974.

25. DORN W.S., ș.a.: Metode numerice cu programe în Fortran 4, București, Editura Tehnică, 1976.
26. DUMITRU I.: Aplicarea metodei elementului finit la calculul solicitărilor prin șoc. În: Buletinul Științific și Tehnic al U.T.Timișoara, Timișoara, Tom 40 (54), 1995.
27. DUNGAN M.C.: Vagoane și frâne, Timișoara, Editura I.P. "Traian Vuia" (Lito), 1988.
28. GALEEV A.U.: Voprosy mehaniki poezda, Moscova, Transzeldorizdat, 1958.
29. GAVRUȚA P., ș.a.: Metode numerice, Timișoara, Editura I.P. "Traian Vuia" (Lito), 1989.
30. GEORGESCU A.: Aproximații asimptotice, București, Editura Tehnică, 1989.
31. GREBENJUK P.T.: K rascetu prodol'nyh usilij v poezdah pri tormozenii. În: Vestik vsesojuyn. naucno-issled. in-ta. z.-d. transporta, Moscova, Nr. 6/1973.
32. GREBENJUK P.T., ș.a.: Metod issledovanija processov rasprostranenija vozmuscenij v sverdlinnyh u soedinennyh poezdah. În: Vestik vsesojuyn. naucno-issled. in-ta. z.-d. transporta, Moscova, Nr. 1/1977.
33. GREBENJUK P.T., ș.a.: Prodol'nye sily v gruzovyh poezdah pri tormozenii. În: Vestik vsesojuyn. naucno-issled. in-ta. z.-d. transporta, Moscova, Nr. 5/1980.
34. GROȘANU I., și BRÎNDEU L.: Vibrații Mecanice, Timișoara, Editura I.P. "Traian Vuia" (Lito), 1986.
35. GRUMĂZESCU M., ș.a.: Combaterea zgomotului și vibrațiilor, București, Editura Tehnică, 1964.
36. HANKS K.: Simularea în timp real și rolul ei în sistemul informatic al companiilor. În: P.C. Report, București, Nr. 49/1996.
37. HARRIS C. și CREDE C.: Șocuri și vibrații, București, Editura Tehnică, 1968.
38. HOANCĂ V., ș.a.: Stabilirea forțelor dinamice longitudinale în trenurile de marfă, la frânarea ordinară. În: Revista Căilor Ferate, București, Nr. 10/1970.

39. HOANCĂ V., ș.a.: Stabilirea forțelor dinamice longitudinale la demararea trenurilor de marfă. In: Revista Căilor Ferate, București, Nr. 3/1971.
40. IEREMIA I.: Unele noțiuni de bază privind arcurile elicoidale. In: Revista Căilor Ferate, București, Nr. 11/1959.
41. JAENICHEND D., ș.a.: Die Bewertung der Bremstechnik der Guterzuge durch Simulation des Bremsvorganges auf einem Personalcomputer. In: Vissensch. Zschr. d. Hochschule fur Verkehrswesen "Friedrich List", Dresda, Nr. 5/1988.
42. JUKOVSKIJ N.E.: Polnoe sobranie socinenij, Moscova, O.N.T.I., vol. 8, 1937.
43. KAGAN B.M., ș.a.: Rezolvarea problemelor ingineresti cu calculatoare numerice, București, Editura Tehnică, 1965.
44. KALISZ E.: Simulare, In: P.C. Report, București, Nr. 49/1996.
45. KARVAȚCHI B.L.: Teoria generală a frânelor automate, București, Oficiul de presă, editură și documentare C.F.R., 1950.
46. KAZARINOV V.M., ș.a.: O prodol'nyh usilijah pri tormozenii gruzovyh poezdov cugunnymi i kompozicionnymi kolodkami. In: Vestik vsesojuyn. naucno-issled. in-ta. z.-d. transporta, Moscova, Nr. 7/1961.
47. LARIONESCU D.: Metode numerice, București, Editura Tehnică, 1989.
48. LAZARJAN V.A., ș.a.: Primenenie electronnogo modelirovanija v statisticeskih issledovanijah prodol'nyh sil dejstvujuscih na vagony pri puske poezda v hod. In: Vestik vsesojuyn. naucno-issled. in-ta. z.-d. transporta, Moscova, Nr. 5/1972.
49. LI SANTI B., ș.a.: Algorithms, programing, Pascal, S.U.A., California, Wadsworth Publishing Company, 1987.
50. MANASKIN L.A.: Opredelenie zestkostisvjazi pri issledovanijah perehodnyh rezimov dvizenija gruzovyh poezdov, vagony kotoryh oborudovanyh frikcionnymi pogloscajuscimi aparatami avtoscepki. In: Izv. V.U.Z. Masinostr., Moscova, Nr. 1/1972.

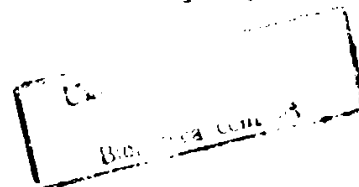
51. MICULA GH. și PAVEL P.: Ecuatii diferențiale și integrale prin probleme și exerciții, Cluj-Napoca, Editura Dacia, 1989.
52. MIRIȚĂ I.I.: Programarea și utilizarea calculatoarelor electronice în industria minieră, București, E.D.P., 1983.
53. MOCANU D.R., și VANCA I.I.: Arcuri volute, București, Editura Căilor Ferate, 1958.
54. MOSZYNSKI V.: Metode numerice de rezolvarea ecuațiilor diferențiale ordinare, București, Editura Tehnică, 1973.
55. MUNTEAN G.: Cercetări privind dinamica circulației trenurilor în curbe. În: Buletinul Științific și Tehnic al I.P.Timișoara, Timișoara, Seria mecanică, Tom 19, fasc. 2/1974.
56. NICOLA C-TIN., ș.a.: Acoperirea reciprocă a tamponelor. În: Revista Căilor Ferate, București, Nr. 3/1969.
57. NICOLAAS H.C.E.Z.: Unele considerații asupra problemei deraierii ținând în mod special seama de introducerea cuplei automate. Traducere din limba germană, București, Centrul de documentare și publicații tehnice-M.T.Tc., Editura M.T.Tc., 1970.
58. PANĂ T.: Absorbitori dinamici de vibrații, București, Editura Tehnică, 1984.
59. PANKIN N.A., ș.a.: Langsschwingungen im Zugverband. În: Deutsche Eisenbahntechnik, Berlin, Nr. 5/1972.
60. PANKIN N.A., ș.a.: Rasprostranenie sil'nyh vozmuscenij vdol' poezda pri dvizuscemsja ih istocnike. În: Vestik vsesojun. naucno-issled. in-ta. z.-d. transporta, Moscova, Nr. 1/1974.
61. PAP P.: Studiul forțelor dinamice longitudinale la tracțiunea și frânarea trenurilor. În: Volumul lucrărilor sesiunii de comunicări științifice a Univ. "Aurel Vlaicu" din Arad, 7-8 mai 1992, Arad, vol. 3.
62. PAP P., ș.a.: Calculul ramei boghiului de la locomotiva electrică de 5100 kW pentru export Yugoslavia. În: Volumul lucrărilor sesiunii de comunicări științifice a Univ. "Aurel Vlaicu" din Arad, 7-8 mai 1992, Arad, vol.3.

63. PAP P.: Mijloace și măsuri pentru îmbunătățirea comportării dinamice a trenurilor. Referat nr. 2, Catedra de Material Rulant de Cale Ferată a Univ. "Politehnica" Timișoara, 1 Octombrie 1992, Timișoara.
64. PAP P.: Metode numerice aplicate în dinamica longitudinală a materialului rulant. în: Volumul lucrărilor sesiunii de comunicări științifice a Univ. "Aurel Vlaicu" din Arad, 16-17 mai 1996, Arad, vol. 7.
65. PAP P.: Dinamica mișcării pe cale a trenurilor în regim de mers permanent. Comunicat la "Zilele academice Timișene", Ed. a V a, 22-24 mai 1997, Timișoara.
66. PAP P.: Metode numerice în dinamica longitudinală a trenurilor. Simpozion internațional "Informatica și progresul tehnic suport al restructurării feroviare", 24-25 septembrie 1997, Timișoara.
67. PONOMARIOV S.D., ș.a.: Calculul de rezistență în construcția de mașini. Vol. 3, București, Editura Tehnică, 1964.
68. POPA A., ș.a.: Tracțiunea trenurilor, București, E.D.P., 1965.
69. POSTOLACHE M.: Metode numerice în algebră, București, Editura Universității Politehnica (Lito), 1993.
70. RAFIROIU M.: Modele de simulare în construcții, Timișoara, Editura Facla, 1982.
71. RAKANOVIC R., ș.a.: Poremecajna sila u programiranom sudaru pri ranziranju vagona. Internațional scientific conference heavy machinery, HM'96, Proceedings, Kraljevo, iunie 1996.
72. RĂDOI M, ș.a.: Elemente de vibrații mecanice, București, Editura Tehnică, 1973.
73. REICH O., ș.a.: Löse und Anfahproblem von langen Zügen mit Mittelpufferkupplungen. In: Vissensch. Zschr. d. Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List", Dresda, Nr. 3/1972.
74. REICH O., ș.a.: Rechentechnisches Simulationsverfahren zum Untersuchen der Längsdynamik in Zügen. In: Deutsche Eisenbahntechnik, Berlin, Nr. 6/1973.

75. REICH O., ș.a.: Rechenprogramme zur digitalen Simulation Längsdynamischer Vorgänge bei Wagen und Zügen der Eisenbahn. În: ZEV-Glas. Ann. 114, Nr. 3/1990.
76. ROMAN M., ș.a.: Contribuții privind utilizarea calculatorului electronic la studiul proceselor de frânare. În: Revista Căilor Ferate, București, Nr. 1-2/1991.
77. SALVADORI M.G.: Metode numerice în tehnică, București, Editura Tehnică, 1972.
78. SATOSHI M.: Simulation of coupler force of freight train with new pneumatic brake valve. În: Quart. Repts. Railway Techn. Res. Inst. (11), Nr. 4/1970.
79. SATOSHI M.: Simulation of coupler force of freight train with new pneumatic brake valve. Part 2. În: Quart. Repts. Railway Techn. Res. Inst. (12), Nr. 2/1971.
80. SCALES B.T.: British railways experimental brakevan. În: Paper. Amer. Soc. Mec. Engrs., Nr. WA-240/1961.
81. SEBEȘAN ȘT. și TILEA D.: Frânarea trenurilor, București, Editura Transporturilor și Telecomunicațiilor, 1963.
82. SEBEȘAN I.: Dinamica vehiculelor de cale ferată, București, Editura Tehnică, 1995.
83. SELENSKIJ E.I.: Rascet frikcionnyh amortizatorov udara s ucetom nestacionarnogo rezima trenija. În: Vestik vsesojuzn. naucno-issled. in-ta. z.-d. transporta, Moscova, Nr. 5/1972.
84. SILAȘ GH.: MECANICĂ. Vibrații mecanice, București, E.D.P., 1968.
85. SILAȘ GH.: Vibrații mecanice, București, Editura Tehnică, 1968.
86. SILAȘ GH.: Culegere de probleme de vibrații mecanice. Vol 2, București, Editura Tehnică, 1968.
87. SIMA V.: Metode noi în matematica aplicată, București, Editura Științifică, 1992.
88. SOSTARICS G., BALOGH V.: Vasuti jarmüvek, Budapesta, Tankönyvkiado, 1991.
89. STARJINSKII B.M.: Prikladnie metodi nelineinih kolebanii, Moscova, Nauka, 1977.

90. STĂNCIULESCU FL.: Analiza și simularea sistemelor neliniare. Editura Academiei R.S.R., București, 1974.
91. STEPANOV V.V.: Curs de ecuații diferențiale, București, Editura Tehnică, 1955.
92. STOICA M.: Comportarea dinamică a trenurilor de tonaje și viteze sporite în timpul frânării. În: Revista Transporturilor și Telecomunicațiilor, București, Nr. 5/1978.
93. STOICA M.: Calculul analitic al forțelor longitudinale din tren în timpul frânării. Sesiunea de comunicări științifice a Fac. de Transporturi din I.P. București, București, 16-17 Martie 1979.
94. STOICA M. și CRUCEANU C.: Influența dispozitivului de golire întârziată a conductei generale de aer a trenului de marfă asupra timpilor de scadere a presiunii de la 5 bari la 3,5 bari. În: Revista Căilor Ferate Române, București, Nr. 4/1993.
95. STOICU-TIVADAR L., ș.a.: Teoria sistemelor. Îndrumător de laborator, Timișoara, Editura Universității Tehnice Timișoara (Lito), 1995.
96. STUART R.D.: Introducere în analiza Fourier, cu aplicații în tehnică, București, Editura Tehnică, 1971.
97. TEODORESCU D.: Sisteme automate deterministe, București, Editura Tehnică, 1984.
98. TIBILOV T.A.: Asimptoticheskie metodi issledovania kolebanii podvijnivo sostava, Moscova, Transport, 1970.
99. TILEA D., ș.a.: Cercetări experimentale privind comportarea trenurilor lungi de marfă în timpul frânării. În: Revista Transporturilor și Telecomunicațiilor, Nr. 6/1978.
100. TOLKACEV A.V.: O cislennom metode reseniya uravneniya dvizeniya poezda. În: Vestik vsesojuzn. naucno-issled. in-ta. z.-d. transporta, Moscova, Nr. 7/1972.
101. TOLSTOV G.P.: Serii Fourier, București, Editura Tehnică, 1955.
102. TRANDAFIR R.: Matematici superioare, București, Editura Facla, 1976.

103. TURCU I.: Frânarea trenurilor de mare viteză fără șocuri. În: Revista Căilor Ferate, București, Nr. 2/1968.
104. TURCU I.: Unele aspecte ale frânării trenurilor de mare viteză. În: Revista Căilor Ferate, București, Nr. 5-6/1969.
105. TURCU I.: Influența greutateii aderente la frânarea trenurilor. În: Revista Căilor Ferate Române, București, Nr. 3/1971.
106. ȚÂNCU M.L.: Utilizarea paralelismului în probleme de simulare. PC Report, București, Nr. 49/1996.
107. UNGUREANU ȘT.: Sensibilitatea sistemelor dinamice, București, Editura Tehnică, 1988.
108. VASILIU D., ș.a.: Simularea numerică a sistemelor automate hidraulice cu programul SIMULINK-MATLAB, PC Report, București, Nr. 49/1996.
109. VĂDUVA I., ș.a.: Introducere în programarea automată, București, E.D.P., 1973.
110. VĂDUVA I.: Modele de simulare cu calculatorul, București, E.D.P., 1981.
111. VERSINSKIJ C.V.: Prodol'naja dinamika vagonov v gruzovy poezdah, Moscova, Transzeldorizdat, 1957.
112. VERSINSKIJ C.V., ș.a.: Prodol'nye sily v poezde na soprjazenij ogranicivajuscih uklonov vypuklyh ucastkov profilja puti. În: Vestik vsesojuyn. naucno-issled. in-ta. z.-d. transporta, Moscova, Nr. 7/1975.
113. VERSINSKIJ C.V., ș.a.: Dinamika vagona, Moscova, Transport, 1978.
114. VINOCUROV M.V.: Vagoane, vol. 2, București, Editura Tehnică a Transporturilor, 1952.
115. VOGEL E., ș.a.: Mittels elektronischen Analogrechners erzeugte fahrdynamische Kennlinien für die gebremste Bewegung schnellfahrender Eisenbahnzüge. În: Vissensch. Zschr. d. Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List", Dresda, Nr. 5/1972.
116. VOINEA R.P. și STROE I.V.: Sisteme dinamice, București, Editura Institutului Politehnic din București, 1994.



117. ZEEVENHOOVEN N.H.C.E.: Unele considerații asupra problemei deraierii ținând în mod special seama de introducerea cuplei automate. Traducere din limba germană, București, Ministerul Transporturilor, Centrul de documentare și publicații tehnice, 1970.
118. WOLFGANG H.: Die Dynamik beim Bremsen schnellfahrender Reisezüge. În: Elektrische Bahnen eb, Berlin, Nr. 6/1988.
119. WOLFSHANT M.: Simularea 3D a coordonării traficului pe un aeroport, PC Report, București, Nr. 49/1996.
120. *** Determinarea cauzelor ruperii trenurilor, remorcate în simplă și dublă tracțiune. Studiul forțelor din tren și statistica ruperilor, București, M.T.Tc., I.C.P.T.T., Contract nr. 7342/1977, 1977.
121. *** Development of hydraulic drawgear au buffers for long freight trains. În: Railway Gaz., 117, Nr. 26/1962.
122. *** Indrumător. Calcule de tracțiune, Institutul de studii și cercetări în transporturi, București, Editura M.T.Tc., 1971.
123. *** ORE, Question B 36, Document technique DT 178, Instrucțiuni pour l'utilisation du programme de calcul B 36/Rp 22 "Calculs theoriques des efforts longitudinaux se produisant dans les trains", Utrecht, decembrie 1986.
124. *** Simularea sistemelor mecanice, București, Centrul de documentare și publicații tehnice M.T.Tc., Editura M.T.Tc. 1970.

ANEXE

ANEXA 1135

ANEXA 2141

ANEXA 3147

ANEXA 4151

ANEXA 5167

ANEXA 1

```

PROGRAM PROFVARL;{Regim de mers permanent}
uses crt,graph;{Circulatia trenului pe decl. variabila,il si i2}
var
  xx,yy,e,m1:integer;{Parametri mod grafic}
  i,j:integer;{contoare ciclu for}
  ni:integer;{nr de iteratii necesar ptr. rezolv. ec. transc. a
spatiului parcurs}
  a,b,c:real;{limit.& mijloc.interval de valori al variabilei t
din ecuatia transcendentă}
  lim1,lim2:integer;{Lungime tren pana la pc. de frantura al
profilului}
  z1,z2:integer;{Distanta pana la sectiunea de calcul a fortelor
longitudinale}
  K,L,M:real;{coeficientii ec. diferentiale a miscarii trenului
}
  H:real;{coeficient de simplific. a relatiilor de calc. al
spatiului x de pe fig.}
  nv:integer;{numar vagoane din tren}
  lt:integer;{lungimea convoiului de vagoane in metri}
  u,q,o,p:real;{coeficientii radacinilorecuatiei caracteristice
a ecuatiei diferentiale a miscarii trenului}
  r1,r2:real;{radacinile ecuatiei caracteristica a ec.
diferentiale a misc.}
  num:real;{Numitorul fractiilor K,L,M}
  vit1,vit2,vit3,vit4,vita,vitb:real;{Viteza trenului}
  acc1,acc2,acc3,acc4,acca,accb:real;{Acceleratia trenului}
  c1,d1,e1,c2,d2,e2:real;{Parametri de calcul a fertelor
longitudinale}
  Gv1:real;{Tonaj tren in [kN]}
  delta,delta1:real;{Discriminantii ec. caracteristice}
  ab:real;{Spatiul parcurs}
  a1,a2,a3,a4,a5,a6,a7,a8,a9,a10:string;{Parametri afisare text
in mod grafic}
const
  {ab=Spatiul parcurs in metri}
  FOA=399266.0;FOB=-10065.0;{Fo=FOA+FOB*v [N]}
  Gvag=1920;{Tonaj tren in tone forta}
  v0=4.722;{viteza initiala de inceput a calc. [m/s]}
  i1=7.0;i2=-16.0;{valoarea declivitatiilor pe care circula
trenul in [N/kN]}
  G11=1226.25;{greutatea locomotivei [kN]}
  g1=0.15;{coeficient de masa pentru locomotiva}
  a1=2.254;b1=0.0612;{R0L=a1+b1*v [N]}
  gv=0.05;{coeficient de masa pentu vagoane}
  av=1.526;bv=0.04;{R0v=av+bv*v [N]}
  g=9.81;{acceleratia gravitacionala [m/(s*s)]}
  eps:real=0.0000001;{precizia de calcul a valorii timpului in
ecuatia transcendentă}
  x0=0;{spatiul initial}
  type cs=array[1..4] of integer;{Vector spatiu,x de pe figura}
  type d=array[1..4] of real;{Vector timp, corespunzator
spatiului parcurs, x}
  type cn=array[1..4,1..24] of real;{Vector forte longitudinale}
  var x:cs;var t:d;var N:cn;

```



```

function S(t:real):real;{Spatiul parcurs atunci cand delta<0}
begin

S:=(H*cos(q*t)+(v0/q-u/q*H)*sin(q*t))*exp(u*t)+M/L-ab;{sqrt(K*
K/4-L)<0}
end;
function Y(t:real):real;{Spatiul parcurs atunci cand delta>0}
begin

Y:=v0/(r1-r2)*(1-r2/v0*H)*exp(r1*t)-v0/(r1-r2)*(1-r1/v0*H)*exp
(r2*t)+M/L-ab;
end;
begin
Gv1:=Gvag*g;{tonaj tren in kN}
nv:=Gvag div 80;writeln('Numar vag.= ',nv:2);
lt:=nv*17;writeln('Lungime tren= ',lt:3,'[metri]');
num:=1000*((1+gl)*G11/g+(1+gv)*Gv1/g);
K:=(b1*G11+bv*Gv1-FOB)/num;writeln('K=',K);
L:=(i1-i2)*Gv1/(num*lt);writeln('L=',L);
M:=(FOA-(al*G11+i1*G11+av*Gv1+i2*Gv1))/num;
writeln('M=',M);writeln('o=',-K/L);
deltal:=abs(K*K/4-L);delta:=sqrt(deltal);writeln('p=',delta);
H:=x0-M/L;
for i := 1 to 4 do
begin
x[i]:=(i-1)*(nv div 4)*17;
writeln(' x[' ,i:1, ']=',x[i]:3,'[metri]');
end;
readkey;
if (K*K/4-L) <= 0.0 then
begin
      W r i t e l n ( ' D i s c r
      ',K*K/4-L:6:3);writeln('Sqrt=',sqrt(-1*(K*K/4-L)):5:2);
      u:=-K/2;q:=delta;
      for i := 1 to 4 do
begin
a:=-1;
b:=x[i]/v0+25*i;
ab:=x[i];
ni:=0;
while abs(a-b) > abs(eps) do
begin
c:=(a+b)/2.0;
ni:=ni+1;
if S(c) < 0.0 then a:=c else b:=c;
end;
t[i]:=c;
write('t=',c:7:4,'[secunde] ');
write(' Nr. iteratii=',ni:3);
writeln(' Spatiul parcurs=',S(c):9:7,'[metri]');
end;
for i := 1 to 4 do
begin
vit1:=(H*cos(q*t[i])+(v0/q-u/q*H)*sin(q*t[i]))*u*exp(u*t[i]);
vit2:=(-H*sin(q*t[i])+(v0/q-u/q*H)*cos(q*t[i]))*q*exp(u*t[i]);
vita:=vit1+vit2;

```

```

acc1:=(u*u-q*q)*(H*cos(q*t[i])+(v0/q-u/q*H)*sin(q*t[i]))*exp(u
*t[i]);
acc2:=2.0*u*q*(H*sin(q*t[i])-(v0/q-u/q*H)*cos(q*t[i]))*exp(u*t
[i]);
  acca:=acc1-acc2;
  lim1:=x[i] div 17;
  lim2:=lim1+1;
  for j := 1 to lim1 do
    begin
      z1:=(j-1)*17;
      c1:=-1000*((1+g1)*G11/g+(1+gv)*Gv1/g*z1/lt);
      d1:=FOB-bl*G11-bv*Gv1*z1/lt;
      e1:=FOA-(al+i1)*G11-(av+i1)*Gv1*z1/lt;
      N[i,j]:=c1*accu+d1*vita+e1;
    end;
  for j := lim2 to nv do
    begin
      z2:=(j-1)*17;
      c2:=1000*(1+gv)*Gv1/g*(lt-z2)/lt;
      d2:=bv*Gv1*(lt-z2)/lt;
      e2:=(av+i2)*Gv1*(lt-z2)/lt;
      N[i,j]:=c2*accu+d2*vita+e2;
    end;
end
else
begin
  o:=-K/2;
  p:=delta;
  r1:=o+p;
  r2:=o-p;
  for i := 1 to 4 do
    begin
      a:=-1;
      b:=x[i]/v0+25*i;
      ab:=x[i];
      ni:=0;
      while abs(a-b) > abs(eps) do
        begin
          c:=(a+b)/2.0;
          ni:=ni+1;
          if Y(c) < 0.0 then a:=c else b:=c;
        end;
      t[i]:=c;
      write('t=',c:7:4);
      write('  Nr.iteratii=',ni:3);
      writeln('  Spatiul parcurs=',Y(c):9:7);
    end;
  for i := 1 to 4 do
    begin
      vit3:=r1*v0/(r1-r2)*(1-r2/v0*H)*exp(r1*t[i]);
      vit4:=r2*v0/(r1-r2)*(1-r1/v0*H)*exp(r2*t[i]);
      vitb:=vit3-vit4;
      acc3:=r1*r1*v0/(r1-r2)*(1-r2/v0*H)*exp(r1*t[i]);
      acc4:=r2*r2*v0/(r1-r2)*(1-r1/v0*H)*exp(r2*t[i]);
      accb:=acc3-acc4;
      lim1:=x[i] div 17;
      lim2:=lim1+1;
    end;
  end;

```

```

    for j := 1 to lim1 do
      begin
        z1:=(j-1)*17;
        c1:=-1000*((1+g1)*G11/g+(1+gv)*Gv1/g*z1/lt);
        d1:=FOB-b1*G11-bv*Gv1*z1/lt;
        e1:=FOA-(a1+i1)*G11-(av+i1)*Gv1*z1/lt;
        N[i,j]:=c1*accb+d1*vitb+e1;
      end;
    for j := lim2 to nv do
      begin
        z2:=(j-1)*17;
        c2:=1000*(1+gv)*GV1/g*(lt-z2)/lt;
        d2:=bv*Gv1*(lt-z2)/lt;
        e2:=(av+i2)*Gv1*(lt-z2)/lt;
        N[i,j]:=c2*accb+d2*vitb+e2;
      end;
    end;
end;readkey;
for i := 1 to 4 do
  begin
    for j := 1 to nv do
      begin
        write(' N[' ,i:1,j:2, ']=',N[i,j]:10:2);
      end;
    end;readkey;
    e:=detect;
    initgraph(e,m1,'C:\tp\bgi');
    xx:=getmaxx;yy:=getmaxy;
    rectangle(60,60,xx-60,yy-60);
    for i := 1 to 4 do {Caroiaj vertical intrerupt}
      begin
line(round(i*(xx-120)/(nv-1))+60,60,round(i*(xx-120)/(nv-1))+60,yy-140);
      end;
    for i := 5 to nv-11 do {Caroiaj vertical}
      begin
line(round(i*(xx-120)/(nv-1))+60,60,round(i*(xx-120)/(nv-1))+60,yy-60);
      end;
    for i := nv-11 to nv-1 do{Caroiaj vertical continuare}
      begin
line(round(i*(xx-120)/(nv-1))+60,146,round(i*(xx-120)/(nv-1))+60,yy-60);
      end;
    for i := 1 to 3 do{Caroiaj orizontal}
      begin
line(60,round(i*(yy-120)/4+60),xx-60,round(i*(yy-120)/4+60));
      end;
    moveto(60,60);
    for i := 1 to 1 do
      setlinestyle(0,0,3);
    begin
moveto(60,yy-round(N[i,1]/300000*(yy-120-(yy-120)/4)+60+(yy-12

```

```

0)/4));
    for j := 1 to nv do
    begin
    lineto(round((j-1)*(xx-120)/(nv-1))+60,yy-round(N[i,j]/300000*
(yy-120-(yy-120)/4)+60+(yy-120)/4));
    end;
    end;
    for i := 2 to 2 do
    setlinestyle(1,0,3);
    begin

moveto(60,yy-round(N[i,1]/300000*(yy-120-(yy-120)/4)+60+(yy-12
0)/4));
    for j := 1 to nv do
    begin
    lineto(round((j-1)*(xx-120)/(nv-1))+60,yy-round(N[i,j]/300000*
(yy-120-(yy-120)/4)+60+(yy-120)/4));
    end;
    end;
    for i := 3 to 3 do
    setlinestyle(2,0,3);
    begin

moveto(60,yy-round(N[i,1]/300000*(yy-120-(yy-120)/4)+60+(yy-12
0)/4));
    for j := 1 to nv do
    begin
    lineto(round((j-1)*(xx-120)/(nv-1))+60,yy-round(N[i,j]/300000*
(yy-120-(yy-120)/4)+60+(yy-120)/4));
    end;
    end;
    for i := 4 to 4 do
    setlinestyle(4,$AAAA,3);
    begin

moveto(60,yy-round(N[i,1]/300000*(yy-120-(yy-120)/4)+60+(yy-12
0)/4));
    for j := 1 to nv do
    begin
    lineto(round((j-1)*(xx-120)/(nv-1))+60,yy-round(N[i,j]/300000*
(yy-120-(yy-120)/4)+60+(yy-120)/4));
    end;
    end;
    setlinestyle(0,0,3); {Trasare fig.}
    line(70,370,117,400);line(176,357,117,400);
    setlinestyle(0,0,1);

line(86,368,116,387);line(116,388,166,353);line(166,353,173,363);
line(86,368,80,378);line(99,378,95,384);{Locom.}
line(97,375,95,368);line(95,368,102,366);{Pantograf}
line(95,384,86,397);line(117,400,108,412);

line(88,395,112,409);line(108,401,111,408);line(103,409,111,40
9);{Cota}
line(90,350,144,350);line(90,350,98,345);line(90,350,98,355);
outtextxy(113,338,'V');

outtextxy(90,403,'X');outtextxy(145,385,'i2');outtextxy(65,382

```

```

, 'i1');
line(90,360,115,375);{Linie de contact}
str(X[1]:2,a7);str(X[2]:3,a8);str(X[3]:3,a9);str(X[4]:3,a10);
setlinestyle(0,0,3);line(360,67,430,67);outtextxy(440,65,'X=');
outtextxy(460,65,a7);outtextxy(479,65,'[m]');
setlinestyle(1,0,3);line(360,79,430,79);outtextxy(440,76,'X=');
outtextxy(460,76,a8);outtextxy(489,76,'[m]');
setlinestyle(2,0,3);line(360,91,430,91);outtextxy(440,88,'X=');
outtextxy(460,88,a9);outtextxy(489,88,'[m]');
setlinestyle(4,$AAAA,3);line(360,103,430,103);outtextxy(440,10
0,'X=');
outtextxy(460,100,a10);outtextxy(489,100,'[m]');
str(Gvag:4,a1);
outtextxy(360,112,'Tonaj tren =');outtextxy(459,112,a1);
outtextxy(494,112,'[tone]');
str(i1:5:1,a2);
outtextxy(355,124,'i1=');outtextxy(373,124,a2);outtextxy(413,1
24,'[N/kN]');
str(i2:5:1,a3);outtextxy(459,125,',');
outtextxy(465,124,'i2=');outtextxy(490,124,a3);outtextxy(530,1
24,'[N/kN]');
str(v0:6:3,a4);
outtextxy(360,136,'Viteza initiala=');outtextxy(485,136,a4);
outtextxy(535,136,'[m/s]');
for i := 1 to nv do {Afisare numar vagoane}
begin
str(i:2,a5);
outtextxy(round((i-1)*(xx-120)/(nv-1))+50,yy-54,a5);
end;
for i := 1 to 3 do {Afisare valori forte longitudinale}
begin
str((4-i)*100,a6);
outtextxy(34,round((i-1)*(yy-125)/4)+58,a6);
end;
outtextxy(27,yy-65,'-100');{Afisare -100}
outtextxy(45,yy-153,'0');{Afisare zero}
setlinestyle(0,0,2);
line(xx-60,yy-60,xx-40,yy-60);line(xx-50,yy-65,xx-40,yy-60);
line(xx-50,yy-55,xx-40,yy-60);outtextxy(xx-53,yy-74,'nr. ');
outtextxy(xx-52,yy-54,'vag. ');
line(60,60,60,40);line(55,50,60,40);line(65,50,60,40);
settextstyle(triplexfont,horizdir,1);
outtextxy(70,35,'N');
settextstyle(defaultfont,horizdir,1);
outtextxy(90,47,'[kN]');
readkey;
closegraph;
end.

```

ANEXA 2

```

PROGRAM DEMARAJ;{Demaraj tren omogen avand 50 vagoane de marfa
incarcate}
uses crt,graph;
const
  F01=100000.0;{Forta de tractiune aplicata brusca primului vagon
in Newtoni}
  c=200;{c este numarul de pasi de integrare}
  h=0.1;{h este valoarea pasului de integrare}
  d=0.03;{Jocul dintre tampoanele vagoanelor in metri}
  ft=0.02;{Comprim. init. tampoane in metri }
  ktd=1088235.2;{Rigiditate destindere arc inelar echivalent tampon
in N/m}
  pl=1.0;{procentul de crestere al fortei de tractiune
dezvoltata-}
  p2=1.0;{-de locomotiva dupa q1 si q2 secunde}
  q1=1.0;{intervalul de timp dupa care are loc cresterea fortei
de trac-}
  q2=2.0;{-tiune cu procentele p1 si p2 in secunde in secunde}
  Rd=-0.06;{rezistenta la demaraj locomotivei si a vagoanelor in
Newtoni/kg, care include declivitatea de pe care se demareaza}
  nrv=50; {numarul de vagoane (FARA LOCOMOTIVA !!!)}
  { ATENTIE !!! NUMARUL DE VEHICULE DIN TREN ESTE nrv+1 !!!}
  j1=0.15;{coeficientul de masa al locomotivei}
  jv=0.05; {coef. de masa al vagoanelor}
  a=1254165.0;b=75522000.0;{coeficientii arcului volut
echivalent}
var
  K1,K2,K3,K4:array[1..2*(nrv+1)] of real; { K11....K420 sunt
coeficientii iteratiilor metodei Runge-Kutta}
  i:integer;{i este contorul numarului de iteratii}
  j:integer;
  xx,yy,e,m:integer;
  a1,a2,a3,a4,a5,a6,a7,a8,a9,a10,a11,a12,a13:string;
  F0:real;{Forta de tractiune}
  xv,mv,xxv,y:array[1..nrv+1] of real;
  { y = Vitezele initiale ale vehiculelor la t=0}
  s,v:array[1..nrv+1,1..c] of real;
  nv:array[2..nrv+1,1..c] of real;
  nmax:real;{Maximul fortelor dinamice longitudinale}
  jmax:integer;{Numarul vagonului la care apare forta nmax.}
function fv(i:integer):real;
  var temp,temp1:real;
begin
  case i of
  1: begin {Locomotiva}
    if xv[1] <= ft then
      begin
fv:=1/(mv[1]*(1+j1))*(F0+ktd*ft/2-mv[1]*Rd)
      end
    else
      begin
    if xv[1] <= d then
      begin
fv:=1/(mv[1]*(1+j1))*(F0-mv[1]*Rd)
      end
    end
  end
end

```

```

        end
    else
        begin
fv:=1/(mv[1]*(1+j1))*(F0-a*(xv[1]-xv[2])-b*(xv[1]-xv[2])*(xv[1]-xv[2])*(xv[1]-xv[2]))-mv[1]*Rd);
        end;
        end;
    2..nrv: begin    {Vagon oarecare i, ptr i=2..nrv}{nrv=penultimul
vagon}
        if xv[i-1] <= d then
            begin
                fv:=0.0
            end
            else
                begin
                    temp:=xv[i]-xv[i-1];
                    templ:=xv[i]-xv[i+1];
                    if xv[i] <= ft then
                        begin
fv:=1/(mv[i]*(1+jv))*(a*temp+b*temp*temp*temp+kt*d*ft/2-mv[i]*Rd);
                        end
                            else
                                begin
                                    if xv[i] <= d then
                                        begin
fv:=1/(mv[i]*(1+jv))*(a*temp+b*temp*temp*temp-mv[i]*Rd);
                                        end
                                            else
                                                begin
fv:=1/(mv[i]*(1+jv))*(a*temp+b*temp*temp*temp-a*templ-b*templ*
templ*templ-mv[i]*Rd);
                                                end;
                                                    end;
                                                        end;
        end;
        end;
    nrv+1: begin    {Ultimul vagon din tren}
        if xv[nrv] <= d then
            begin
                fv:=0.0
            end
            else
                begin
                    temp:=xv[nrv+1]-xv[nrv];
fv:=1/(mv[nrv+1]*(1+jv))*(a*temp+b*temp*temp*temp-mv[nrv+1]*Rd);
                end;
            end;
        end;
    end;
    {-----Programul principal-----}
    begin
mv[1]:=125000.0;{masa locomotivei in kilograme}
mv[2]:=80000.0;mv[3]:=80000.0;mv[4]:=80000.0;
mv[5]:=80000.0;mv[6]:=80000.0;{masa fiecarui-}
mv[7]:=80000.0;mv[8]:=80000.0;mv[9]:=80000.0;mv[10]:=80000.0;{
-vagon in kg}

```

```

mv[11]:=80000.0;mv[12]:=80000.0;mv[13]:=80000.0;mv[14]:=80000.0;
mv[15]:=80000.0;mv[16]:=80000.0;mv[17]:=80000.0;mv[18]:=80000.0;
mv[19]:=80000.0;mv[20]:=80000.0;mv[21]:=80000.0;mv[22]:=80000.0;
mv[23]:=80000.0;mv[24]:=80000.0;mv[25]:=80000.0;mv[26]:=80000.0;
mv[27]:=80000.0;mv[28]:=80000.0;mv[29]:=80000.0;mv[30]:=80000.0;
mv[31]:=80000.0;mv[32]:=80000.0;mv[33]:=80000.0;mv[34]:=80000.0;
mv[35]:=80000.0;mv[36]:=80000.0;mv[37]:=80000.0;mv[38]:=80000.0;
mv[39]:=80000.0;mv[40]:=80000.0;mv[41]:=80000.0;
y[1]:=sqrt(2*((F01-Rd*mv[1])*(d+ft)+ktd*ft*ft*0.5)/((1+j1)*mv[
1]));
write(y[1]:6:3);readkey;
for i := 2 to nrv+1 do
begin
y[i]:=0.0;
end;
for j:=1 to nrv+1 do
begin
xxv[j]:=0;
end;
for i:=1 to c do
begin{B}
if i < q1/h then
F0:=F01
else
if i < q2/h then
F0:=p1*F01
else
F0:=p2*F01;
for j:=1 to nrv+1 do
begin
xv[j]:=xxv[j];
end;
for j:=1 to 2*(nr+1) do
if odd(j) then K1[j]:=h*fv((j div 2)+1)
else K1[j]:=h*y[j div 2];
}-----}
for j:=1 to nrv+1 do xv[j]:=xxv[j]+K1[2*j]/2;
for j:=1 to 2*(nr+1) do
if odd(j) then K2[j]:=h*fv((j div 2)+1)
else K2[j]:=h*(y[j div 2]+K1[j-1]/2);
}-----}
for j:=1 to nrv+1 do xv[j]:=xxv[j]+K2[2*j]/2;
for j:=1 to 2*(nr+1) do
if odd(j) then K3[j]:=h*fv((j div 2)+1)
else K3[j]:=h*(y[j div 2]+K2[j-1]/2);
}-----}
for j:=1 to nrv+1 do xv[j]:=xxv[j]+K3[2*j];
for j:=1 to 2*(nr+1) do
if odd(j) then K4[j]:=h*fv((j div 2)+1)
else K4[j]:=h*(y[j div 2]+K3[j-1]);
}-----}
writeln;
writeln(i);
for j:=1 to nrv+1 do
begin
xxv[j]:=xxv[j]+(K1[2*j]+2*K2[2*j]+2*K3[2*j]+K4[2*j])/6;
write(' x',j,'=',xxv[j]:7:3);
s[j,i]:=xxv[j];

```



```

        y[j]:=y[j]+(K1[2*j-1]+2*K2[2*j-1]+2*K3[2*j-1]+K4[2*j-1])/6;
        v[j,i]:=y[j];write(' V',j,'=',y[j]:7:4);
            end;
end;
for i := 1 to c do
    for j:=2 to nr+1 do

nv[j,i]:=a*(s[j-1,i]-s[j,i])+b*sqr(s[j-1,i]-s[j,i])*(s[j-1,i]-
s[j,i]);
{-----Determinare Nmax-----}
nmax:=0.0;
for j := 2 to nr+1 do
begin
    for i := 1 to c do
        begin
            if nv[j,i] > nmax then
                begin
                    nmax:=nv[j,i];
                    jmax:=j;
                end;
        end;
end;
write('nmax=',nmax/1000:6:1);write('nr. vag.=',jmax-1:2);
{-----}
---}
readkey;
e:=detect;
initgraph(e,m,'c:\tp\bgi');
xx:=getmaxx;yy:=getmaxy;
rectangle (60,60,xx-60,yy-60);
for i := 1 to round(c*h) do {Trasare caroi aj vertical}
begin

line(round(i*(xx-120)/(c*h)+60),60,round(i*(xx-120)/(c*h)+60),
67);
end;
for i := 1 to round(c*h/3) do {Trasare caroi aj vertical
continua re}
begin

line(round(i*(xx-120)/(c*h)+60),117,round(i*(xx-120)/(c*h)+60)
,125);
end;
for i := 1 to round(c*h/3) do {Trasare caroi aj vertical
continua re}
begin

line(round(i*(xx-120)/(c*h)+60),175,round(i*(xx-120)/(c*h)+60)
,yy-60);
end;
for i := round(c*h/3) to round(c*h) do {Trasare caroi aj vertical
continua re}
begin

line(round(i*(xx-120)/(c*h)+60),119,round(i*(xx-120)/(c*h)+60)
,yy-60);
end;
setlinestyle(0,0,3);{Trasare variatie forta dintre locom si

```

```

primul vagon}
for j:=2 to 2 do
begin
  moveto(60,yy-round(nv[j,1]*(yy-120)/600000+45));
  for i := 1 to c do
    begin
      lineto(round(i/c*(xx-120)+60),yy-round(nv[j,i]*(yy-120)/600000
+60));
    end;
  end;
setlinestyle(2,0,1);
for j:=3 to jmax-1 do begin
  moveto(60,yy-round(nv[j,1]*(yy-120)/600000+60));
  for i := 1 to c do begin
    lineto(round(i/c*(xx-120)+60),yy-round(nv[j,i]*(yy-120)/600000
+60));
    end;
  end;
for j:=jmax to jmax do begin
  moveto(13*jmax,yy-round(nv[j,1]*(yy-120)/600000+60));
  for i := 1 to c do begin
    if nv[j,i] = 0.0 then setlinestyle(0,0,1)
    else
      begin
        setlinestyle(0,0,3);
        lineto(round(i/c*(xx-120)+60),yy-round(nv[j,i]*(yy-120)/600000
+60));
      end;
    end;
  end;
setlinestyle(2,0,1);
for j:= jmax+1 to nrv+1 do begin
  moveto(60,yy-round(nv[j,1]*(yy-120)/600000+60));
  for i := 1 to c do begin
    lineto(round(i/c*(xx-120)+60),yy-round(nv[j,i]*(yy-120)/600000
+60));
    end;
  end;
str(F01/1000:4:0,a1); str(c,a2); str(h:4:2,a3); str(d:5:2,a4);
str(p1:4:1,a5);
str(p2:4:1,a6);str(q1:5:2,a7);str(q2:5:2,a8);str(nrv:2,a9);str
(ft:4:2,a13);
settextstyle (0,0,1);
outtextxy(67,70,'F');outtextxy(73,74,'o');outtextxy(82,70,'=');
outtextxy(85,70,a1);
outtextxy(120,70,'[kN];');
outtextxy(166,70,'Nr. pasi integrare =');
outtextxy(328,70,a2);outtextxy(350,70,'');
outtextxy(360,70,'Pasul de integrare =');
outtextxy(522,70,a3);outtextxy(555,70,'');
outtextxy(65,88,'Joc intre vehic.=');
outtextxy(199,88,a4);
outtextxy(243,88,'[m];');
outtextxy(274,88,'Nr. vagoane =');

```

```

outtextxy(385,88,a9);
outtextxy(403,88,';');
outtextxy(410,88,'Decliv.--10[N/kN];');
outtextxy(65,106,'Tren compus omogen;');
outtextxy(225,106,'Compr. tampoane =');
outtextxy(366,106,a13);outtextxy(396,106,'[m].');
setlinestyle(0,0,1);
line(60,60,60,38);
line(60,40,55,50);line(60,40,65,50);
settextstyle(1,0,2);
outtextxy(67,34,'Nmax [kN]');
line(xx-60,yy-60,xx-40,yy-60);
line(xx-40,yy-60,xx-50,yy-55);line(xx-40,yy-60,xx-50,yy-65);
outtextxy(xx-55,yy-90,'t');outtextxy(xx-65,yy-63,'[sec]');
settextstyle(6,0,3);
outtextxy(65,115,'Nmax=');str(nmax/1000:5:1,a11);outtextxy(135
,115,a11);
outtextxy(207,115,'[kN],');
o u t t e x t x y ( 6 5 , 1 4 5 , ' l a v a g .
nr. ');str(jmax-1:2,a12);outtextxy(158,145,a12);
outtextxy(185,145,'. ');
settextstyle(0,0,1);
for i := 1 to 5 do
  begin
    l           i           n           e
    (60,round(i*(yy-120)/6+60),xx-60,round(i*(yy-120)/6+60));{Tras
are}
    end;                                     {caroiaj
orizantal}
for i := 0 to round(c*h)-1 do{Afisare valori timp}
begin
str(i:2,a9);outtextxy(round(i*(xx-120)/(c*h))+50,yy-55,a9)
end;
for i := 1 to 6 do{Afisare valori forte longitudinale}
begin
str(i*100:2,a10);outtextxy(35,round((7-i)*(yy-120)/6)-5,a10)
end;
readkey;
closegraph;
  end;
end.

```

ANEXA 3

```

PROGRAM DEMARAJ2;{Demaraj tren omogen de marfă cu aparate de
tracțiune cu amortizare, complet comprimat}
uses crt,graph;
var
  i,j:integer;{contor ptr. ciclul for}
  xx,yy,e,m:integer;{parametri mod grafic}
  a1,a2,a3,a4,a5:string;{param. afisare text pe grafic}
  GL,s1,delta,fec:real;{greut.locom.,jocultotal,diferentarezist.
specifice}
const
  F0=100000.0;{forta de tractiune a locomotivei,in N}
  n=40;{numarul vag. din tren}
  j1=0.02;{jocul liber intre vehicule in metri}
  decl=2.0;{declivitatea de pe care se demareaza, in N/kN}
  ft=0.01;{compr.initiala a tamp. identica la toate vehic. in
metri}
  kt=1088235.2;{rigidit.la dest.a unui arc inelar de la tampon in
N/m}
  fa0=0.036;{precompr.init a arcului inelar echival al
ap.tractiune in metri}
  fa20=0.02;
  ka1=357140.0;{rigiditatea la comprimare a arcului inelar
echivalent al legaturii dintre vagoane}
  ka2=4000000.0;
  alfa=1.15;{(1+gama locom),factor de masa ptr. locom}
  beta=1.05;{(1+gama vag),factor de masa ptr. vag}
  rd1=4.0;rdv=4.0;{rezist. specifică la demaraj a locomotivei si
a vagoanelor (cu rulmenti) in N/kN}
  rol=2.0;rov=2.0;{rezistența specifica la înaintare a locomotivei
si a vagoanelor (cu rulmenti) in N/kN}
  g=9.81;{acceleratia gravitacionala}
  ML=125000.0;{masa locomotivei in kg}
  MV1=80000.0;{masa unui vagon in kg}
  type c1=array[1..n] of real;
  var Nmax:c1;{vector forte longitud. maxime}
  type c2=array[1..n] of real;
  var EC:c2;{vector energie cinetica a partii din fata a tren,in
miscare}
  type c3=array[1..n] of real;
  var MV:c3;{vector al maselor vagoanelor trenului}
  type c4=array[1..n] of real;
  var X:c4;{vector X din relatia de determin. a fortei Nmax}
  type c5=array[1..n] of real;
  var Y:c5;{vector Y din relatia de determin. a fortei Nmax}
  type c6=array[1..n] of real;
  var Z:c6;{vector Z din relatia de determin. a fortei Nmax}
  type c7=array[1..n] of real;
  var s:c7;{vector joc total intre doua vehic. s=j+ft}
  type c8=array[1..n] of real;
  var famax:c8;{vector alungire max. a aparatelor de tractiune}
  type c9=array[1..n] of real;
  var GV:c9;{vector greutate vagoane din tren}
  type c10=array[1..n] of real;
  var A:c10;

```

```

type c11=array[1..n] of real;
var B:c11;
type c12=array[1..n] of real;
var C:c12;
type c13=array[1..n] of real;
var D:c13;
begin
GL:=ML*g/1000;s1:=j1+ft;delta:=rdv-rov;fec:=ka1/ka2*(fa0+fa20);
  for i := 1 to n do
    begin
      MV[i]:=MV1;GV[i]:=MV[i]*g/1000;s[i]:=s1;
    end;
  for i := 1 to 1 do
    begin
      A[i]:=0.0
    end;
  for i := 2 to n do
    begin
      A[i]:=A[i-1]+GV[i-1];
    end;
  for i := 1 to 1 do
    begin
      B[i]:=MV[i]
    end;
  for i := 2 to n do
    begin
      B[i]:=B[i-1]+MV[i]
    end;
  for i := 1 to 2 do
    begin
      C[i]:=0.0
    end;
  for i := 3 to n do
    begin
      C[i]:=C[i-1]+GV[i-2]
    end;
  for i := 1 to 1 do
    begin
      EC[i]:=(F0-(rd1+decl)*GL)*s[i]+kt*ft*ft/2;
      X[i]:=beta*F0+GL*((rdv+decl)*alfa-(rol+decl)*beta);
      Y[i]:=alfa*ML+beta*MV[i];
      Z[i]:=sqrt((MV[i]*MV[i]*X[i]*X[i])/(Y[i]*Y[i]*ka2*ka2)+(2*MV[i]
      ]*(beta*EC[i]-fec*X[i]))/(Y[i]*ka2)+fec*fec);
      famax[i]:=MV[i]*X[i]/(Y[i]*ka2)-fec+Z[i];
      Nmax[i]:=MV[i]*X[i]/Y[i]+ka2*Z[i]
    end;
  for i := 2 to 2 do
    begin
      D[i]:=(F0-(rol+decl)*GL)*(s[i]+fa20+famax[i-1]);
      EC[i]:=EC[i-1]+D[i]-(rdv+decl)*GV[i-1]*s[i]-ka1*fa20*fa20/2-ka
      2*famax[i-1]*famax[i-1]/2+kt*ft*ft/2;

      X[i]:=beta*F0+GL*((rdv+decl)*alfa-(rol+decl)*beta)+beta*delta*
      GV[i-1];
      Y[i]:=alfa*ML+beta*(MV[i-1]+MV[i]);
      Z[i]:=sqrt((MV[i]*MV[i]*X[i]*X[i])/(Y[i]*Y[i]*ka2*ka2)+(2*MV[i]
      ]*(beta*EC[i]-fec*X[i]))/(Y[i]*ka2)+fec*fec);
      famax[i]:=MV[i]*X[i]/(Y[i]*ka2)-fec+Z[i];
    end;
end;

```

```

    Nmax[i]:=MV[i]*X[i]/Y[i]+ka2*Z[i]
end;
for i := 3 to n do
begin
{ for j := 1 to i-1 do
begin
    A[j]:=A[j]+GV[j];
end; }

X[i]:=beta*F0+GL*((rdv+decl)*alfa-(rol+decl)*beta)+beta*delta*
A[i];
{ for j := 1 to i do
begin
    B[j]:=B[j]+MV[j];
end; }
Y[i]:=alfa*ML+beta*B[i];
{ for j := 1 to i-2 do
begin
    C[j]:=C[j]+GV[j]
end;}

D[i]:=(F0-(rol+decl)*GL-(rov+decl)*C[i])*(s[i]+fa20+famax[i]);
EC[i]:=EC[i]+D[i]-(rdv+decl)*GV[i]*s[i]-kal*fa20*fa20/2-ka2*fa
max[i]*famax[i]/2+kt*ft*ft/2;
Z[i]:=sqrt((MV[i]*MV[i]*X[i]*X[i])/(Y[i]*Y[i]*kal*ka2)+(2*MV[i
]*(beta*EC[i]-fec*X[i]))/(Y[i]*ka2)+fa20*fec);
    famax[i]:=MV[i]*X[i]/(Y[i]*ka2)-fec+Z[i];
    Nmax[i]:=MV[i]*Y[i]/Y[i]+kal*Z[i]
end;
for i := 1 to n do
begin
    write(' famax=',famax[i]:6:4)
end;writeln;
readkey;
{ for i := 1 to n do
begin
    write(' A=',A[i]:8:2)
end;}
for i := 1 to n do
begin
    write(' Nmax=',Nmax[i]:9:2)
end;readkey;
begin
    e:=detect;
    initgraph(e,m,'c:\tp\bgi');
    xx:=getmaxx;yy:=getmaxy;
    rectangle(60,60,xx-60,yy-60);
    for i := 1 to n-2 do {caroiaj vertical}
        begin

line(round(i*(xx-120)/(n-1)+60),60,round(i*(xx-120)/(n-1)+60),
yy-60);
            end;
            for i := 1 to 2 do{caroiaj orizontal}
                begin

line(60,round(i*(yy-120)/3+60),xx-60,round(i*(yy-120)/3+60));
                    end;

```

```

moveto(60,yy-round(Nmax[1]/300000*(yy-120)+60));
for i := 0 to n-1 do{trasare variatie forte Nmax}
begin

lineto(round(i/(n-1)*(xx-120)+60),yy-round(Nmax[i+1]/300000*(y
y-120)+60));
end;
for i := 1 to n do{Afisare numar vagoane}
begin
str(i:2,a1);
outtextxy(round((i-1)*(xx-120)/(n-1.2))+50,yy-54,a1);
end;
for i := 1 to 3 do{Afisare valori forte longitudinale}
begin
str((4-i)*100,a2);
outtextxy(35,round((i-1)*(yy-125)/3+58),a2);
end;
outtextxy(50,yy-65,'0');{afisare origine axe}
setlinestyle(0,0,1);
line(xx-60,yy-60,xx-40,yy-60);line(xx-50,yy-65,xx-40,yy-60);
line(xx-50,yy-55,xx-40,yy-60);outtextxy(xx-53,yy-87,'nr. ');
outtextxy(xx-56,yy-74,'vag. ');
line(60,60,60,40);line(55,50,60,40);line(65,50,60,40);
settextstyle(triplexfont,horizdir,1);
outtextxy(70,35,'Nmax');
settextstyle(defaultfont,horizdir,1);
outtextxy(127,47,'[kN]');
readkey;
closegraph;
end;
end.

```

ANEXA 4

```

Program FRANARE;{Franare locom plus 50 vagoane }
uses crt,graph; {ATENTIE!! TRENUL ARE 12 OSII NEFRANATE (TREI
VAGOANE NEFRANATE)}
const c=300;{Nr pasi de integrare}
type sir=array[1..c] of real;
const
    N1=12;{Nr. vagoane cu frana din fata grupului de vagoane
nefranate}
    VAGNEF=3;{Nr. vagoane nefranate din corpul trenului}
    l=17.0;{Lungime conducta generala un vagon in metri}
    vf=250.0;{Viteza de propagare a undei de franare in m/s}
    pcnl=2.1;{Pres. max. aer in C.F. locomotiva}
    pcn=3.8;{Idem vagoane}
    tul=30.0;{Timp umplere cu aer C.F. locomotiva in sec}
    tu=18.5;{Idem vagoane}
    g=9.81;
    decl=0.0;{Val declivitate pe care circula trenul in N/kN}
    vmax=8.0;{Viteza maxima de circulatie de la care se incepe
franarea in m/s}
    h=0.2;{Val pas integrare}
    j1=0.15;j=0.05;{Coef. de masa locom. si vagoane}
    kt=4700000.0;{Rigiditate arc inelar tampon la comprimare in
N/m}
    kt1=1100000.0;{Rigiditate arc inelar tampon la destindere
in
    N/m}
    al=442551.6;{Coeficienti instalatie de frana locom}
    bl=134640.0;{Idem}
    a=200611.42;{Coeficienti instal de frana vag}
    b=12272.0;{Idem}
VAR
    a1,a2,a3,a4,a5,a6,a7,a8,a9:string;{parametri afisare text
pe
    grafic}
    fis:TEXT;
    ca1,ca2,ca3:real;
    mere,max:integer;
    mm: array[1..50] of real;{Masele vehiculelor in kg}
    kz:array[0..3,1..50] of real;
    kx:array[0..3,1..50] of real;
    xx,yy,i,jj:longint;
    e,m:integer;
    t:integer;{Timpul in secunde}
    x: array[1..50] of real;{Spatiul parcurs in m}
    z: array[1..50] of real;{Vitezele vehic in m/s}
    nn:array[2..50] of sir;{Forte dinamice longitudinale in N}
    cmax1,cmax2:array[2..50] of real;{Compr. max arc inelar fata
si spate}
    ccurl,ccur2:array[2..50] of real;{Compr. curenta arc inelar
fata si spate}
    Nmax: array[1..50] of real;{Forta dinamica longitudinala
maxima pentru vagoane}
    zz:sir;
{-----DECLRATIEDEFUNCTII-----}
function f(u:integer;t,x1,x2,x3,z1,z2,z3:real):real;
var rl,rv,niul1,niul2,niul3,zzz,niuv1,niuv2,niuv3:real;

```



```

begin{Inceput declaratii de functii}
{-----LOCOMOTIVA-----}
    if u=1 then
        begin{2}
            r1:=2960.0+9.16*z1*z1;{Rezist la inaintare a locomot in
N/kN}
            if kt*ccurl[2] > kt1*cmaxl[2] then{NU se produce destind arc
inelar spate locom}
                begin
                    if t <= (1/vf+0.6) then{nu exista forta de franare}
                        f:=(-r1-decl*mm[1]*g/1000+kt*(x2-x1))/(mm[1]*(1+j1))
                    else
                        if t <= (1/vf+1.5) then{Salt presiune in C.F.}
                            begin
                                niu11:=(17.7*(2.1*sqrt(t-1/vf)/sqrt(tul))+54.6)/(147.5*(2.1*sq
rt(t-1/vf)/sqrt(tul))+55.12)*(3.6*z1+100)/(18*z1+100);
                                f:=(-(al*(2.1*sqrt(t-1/vf)/sqrt(tul))-bl)*niu11-r1-decl*mm[1]*
g/1000+kt*(x2-x1))/(mm[1]*(1+j1))
                            end
                        else
                            if t < (1/vf+1.5+tul) then{Crestere pres in
C.F.}
                                begin
                                    niu12:=(17.7*((pcn1-0.5)/tul*(t-1/vf)+0.41)+54.6)/(147.5*((pcn
1-0.5)/tul*(t-1/vf)+0.41)+55.12)*(3.6*z1+100)/(18*z1+100);
                                    f:=(-(al*((pcn1-0.5)/tul*(t-1/vf)+0.41)-bl)*niu12-r1-decl*mm[1
]*g/1000+kt*(x2-x1))/(mm[1]*(1+j1))
                                end
                            else{Pres in C.F.= presiune nominala maxima}
                                begin
                                    niu13:=(17.7*pcn1+54.6)/(147.5*pcn1+55.12)*(3.6*z1+100)/(18*z1
+100);
                                    f:=(-(al*pcn1-bl)*niu13-r1-decl*mm[1]*g/1000+kt*(x2-x1))/(mm[1
]*(1+j1))
                                end;
                            end
                        else{s-a produs destinderea arc inelar spate locom}
                            begin
                                if t <= (1/vf+0.6) then
                                    f:=(-r1-decl*mm[1]*g/1000+kt1*(x2-x1))/(mm[1]*(1+j1))
                                else
                                    if t <= (1/vf+1.5) then
                                        begin
                                            niu11:=(17.7*(2.1*sqrt(t-1/vf)/sqrt(tul))+54.6)/(147.5*(2.1*sq
rt(t-1/vf)/sqrt(tul))+55.12)*(3.6*z1+100)/(18*z1+100);
                                            f:=(-(al*(2.1*sqrt(t-1/vf)/sqrt(tul))-bl)*niu11-r1-decl*mm[1]*
g/1000+kt1*(x2-x1))/(mm[1]*(1+j1))
                                        end
                                    else
                                        if t < (1/vf+1.5+tul) then
                                            begin
                                                niu12:=(17.7*((pcn1-0.5)/tul*(t-1/vf)+0.41)+54.6)/(147.5*((pcn
1-0.5)/tul*(t-1/vf)+0.41)+55.12)*(3.6*z1+100)/(18*z1+100);
                                                f:=(-(al*((pcn1-0.5)/tul*(t-1/vf)+0.41)-bl)*niu12-r1-decl*mm[1
]*g/1000+kt1*(x2-x1))/(mm[1]*(1+j1))
                                            end
                                        else
                                            begin

```

```

niul3:=(17.7*pcn1+54.6)/(147.5*pcn1+55.12)*(3.6*z1+100)/(18*z1
+100);
f:=(-(a1*pcn1-b1)*niul3-r1-decl*mm[1]*g/1000+kt1*(x2-x1))/(mm[
1]*(1+j1))
end;
end;
end;
{-----De la primul vag pana la ultimul vag. cu frana-----}
if ((u>1) and (u<=N1)) then
begin
rv:=1280+3.84*z2*z2;{Rez la inaintare a vag in N/kN}
{a}if kt*ccur2[u] > kt1*cmax2[u] then{nu s-a destins arc inel
spate}
begin
if kt*ccur1[u] > kt1*cmax1[u] then{nu s-a destins arc
inel fata}
begin
if t <= (u*1/vf+0.35) then
f:=(-rv-decl*mm[u]*g/1000-kt*(x2-x1)+kt*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))
else
if t <= (u*1/vf+1.5) then
begin
niuv1:=12/(3.6*z2+40);
ca1:=niuv1;
f:=(-(a*(2.5*sqrt(t-u*1/vf)/sqrt(tu))-b)*niuv1-rv-decl*mm[u]*g
/1000-kt*(x2-x1)+kt*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))
end
else
if t < (u*1/vf+1.5+tu) then
begin
zzz:=(1-u*0.003);
niuv2:=12/(3.6*z2+40);
ca2:=niuv2;
f:=(-(a*((pcn-0.7)/tu*(t-u*1/vf)*(1-u*0.003)+0.46)-b)*niuv2-rv
-decl*mm[u]*g/1000-kt*(x2-x1)+kt*(x3-x2))/(mm[2]*(1+j))
end
else
begin
niuv3:=(6*pcn+58.0)/(50.3*pcn+83.864)*(3.6*z2+100)/(18*z2+100);
ca3:=niuv3;
f:=(-(a*pcn-b)*niuv3-rv-decl*mm[u]*g/1000-kt*(x2-x1)+kt*(x3-x2
))/(mm[u]*(1+j))
end;
end
else{s-a destins arc inel fata, dar nu s-a destins arc inel
spate}
begin
if t <= (u*1/vf+0.35) then
f:=(-rv-decl*mm[u]*g/1000-kt1*(x2-x1)+kt*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))
else
if t <= (u*1/vf+1.5) then
begin
niuv1:=12/(3.6*z2+40);
ca1:=niuv1;
f:=(-(a*(2.5*sqrt(t-u*1/vf)/sqrt(tu))-b)*niuv1-rv-decl*mm[u]*g
/1000-kt1*(x2-x1)+kt*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))

```

```

                end
            else
                if t < (u*1/vf+1.5+tu) then
                    begin
                        zzz:=(1-u*0.003);
                        niuv2:=12/(3.6*z2+40);
                        ca2:=niuv2;
                        f:=(-(a*((pcn-0.7)/tu*(t-u*1/vf)*(1-u*0.003)+0.46)-b)*niuv2-rv
                        -decl*mm[u]*g/1000-kt1*(x2-x1)+kt*(x3-x2))/(mm[2]*(1+j))
                    end
                else
                    begin
                        niuv3:=(6*pcn+58.0)/(50.3*pcn+83.864)*(3.6*z2+100)/(18*z2+100);
                        ca3:=niuv3;
                        f:=(-(a*pcn-b)*niuv3-rv-decl*mm[u]*g/1000-kt1*(x2-x1)+kt*(x3-x
                        2))/(mm[u]*(1+j))
                    end;
                end;
            end;
        end
        else{s-e destinde arcul inelar spate}
        begin
            if kt*ccurl[u] > kt1*cmax1[u] then{nu se dest arc in fata, dar
            se dest spate}
                begin
                    if t <= (u*1/vf+0.35) then

                        f:=(-rv-decl*mm[u]*g/1000-kt*(x2-x1)+kt1*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))
                    else
                        if t <= (u*1/vf+1.5) then
                            begin
                                niuv1:=12/(3.6*z2+40);
                                ca1:=niuv1;
                                f:=(-(a*(2.5*sqrt(t-u*1/vf)/sqrt(tu))-b)*niuv1-rv-decl*mm[u]*g
                                /1000-kt*(x2-x1)+kt1*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))
                            end
                        else
                            if t < (u*1/vf+1.5+tu) then
                                begin

                                    zzz:=(1-u*0.003);
                                    niuv2:=12/(3.6*z2+40);
                                    ca2:=niuv2;
                                    f:=(-(a*((pcn-0.7)/tu*(t-u*1/vf)*(1-u*0.003)+0.46)-b)*niuv2-rv
                                    -decl*mm[u]*g/1000-kt*(x2-x1)+kt1*(x3-x2))/
                                    (mm[2]*(1+j))
                                end
                            else
                                begin
                                    niuv3:=(6*pcn+58.0)/(50.3*pcn+83.864)*(3.6*z2+100)/(18*z2+100);
                                    ca3:=niuv3;
                                    f:=(-(a*pcn-b)*niuv3-rv-decl*mm[u]*g/1000-kt*(x2-x1)+kt1*(x3-x
                                    2))/(mm[u]*(1+j))
                                end;
                            end
                        end
                    else{se destinde arc in spate, se destinde arc inel fata}
                    begin
                        if t <= (u*1/vf+0.35) then

                            f:=(-rv-decl*mm[u]*g/1000-kt1*(x2-x1)+kt1*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end

```

```

        else
            if t <= (u*1/vf+1.5) then
                begin
niuv1:=12/(3.6*z2+40);
ca1:=niuv1;
f:=(-(a*(2.5*sqrt(t-u*1/vf)/sqrt(tu))-b)*niuv1-rv-decl*mm[u]*g
/1000-kt1*(x2-x1)+kt1*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))
                end
            else
                if t < (u*1/vf+1.5+tu) then
                    begin
zzz:=(1-u*0.003);
niuv2:=12/(3.6*z2+40);
ca2:=niuv2;
f:=(-(a*((pcn-0.7)/tu*(t-u*1/vf)*(1-u*0.003)+0.46)-b)*niuv2-rv
-decl*mm[u]*g/1000-kt1*(x2-x1)+kt1*(x3-x2))/(mm[2]*(1+j))
                    end
                else
                    begin
niuv3:=(6*pcn+58.0)/(50.3*pcn+83.864)*(3.6*z2+100)/(18*z2+100);
ca3:=niuv3;
f:=(-(a*pcn-b)*niuv3-rv-decl*mm[u]*g/1000-kt1*(x2-x1)+kt1*(x3-
x2))/(mm[u]*(1+j))
                    end;
                end;
            end;
        end;
    end;
    {-----Grup vagoane nefranate-----}
    if ((u>N1) and (u<=N1+VAGNEF)) then
        begin
            rv:=1280+3.84*z2*z2;{Rez la inaintare a vag in N/kN}
            if kt*ccur2[u] > kt1*cmax2[u] then{nu s-a destins arc inel
spate}
                begin
                    if kt*ccur1[u] > kt1*cmax1[u] then{nu s-a destins arc
inel fata}
                        begin
                            if t <= (u*1/vf+0.35) then

f:=(-rv-decl*mm[u]*g/1000-kt*(x2-x1)+kt*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))
                                else
                                    if t <= (u*1/vf+1.5) then
                                        begin
niuv1:=0.0;
f:=(-(a*(2.5*sqrt(t-u*1/vf)/sqrt(tu))-b)*niuv1-rv-decl*mm[u]*g
/1000-kt*(x2-x1)+kt*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))
                                        end
                                    else
                                        if t < (u*1/vf+1.5+tu) then
                                            begin
zzz:=(1-u*0.003);
niuv2:=0.0;
f:=(-(a*((pcn-0.7)/tu*(t-u*1/vf)*(1-u*0.003)+0.46)-b)*niuv2-rv
-decl*mm[u]*g/1000-kt*(x2-x1)+kt*(x3-x2))/(mm[2]*(1+j))
                                            end
                                        else
                                            begin

```

```

niuv3:=0.0;
f:=(-(a*pcn-b)*niuv3-rv-decl*mm[u]*g/1000-kt*(x2-x1)+kt*(x3-x2
))/(mm[u]*(1+j))
                                end;
else{s-a destins arc inel fata, dar nu s-a destins arc inel
spate}
begin
if t <= (u*1/vf+0.35) then
f:=(-rv-decl*mm[u]*g/1000-kt1*(x2-x1)+kt*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))
else
if t <= (u*1/vf+1.5) then
begin
niuv1:=0.0;
f:=(-(a*(2.5*sqrt(t-u*1/vf)/sqrt(tu))-b)*niuv1-rv-decl*mm[u]*g
/1000-kt1*(x2-x1)+kt*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))
end
else
if t < (u*1/vf+1.5+tu) then
begin
zzz:=(1-u*0.003);
niuv2:=0.0;
f:=(-(a*((pcn-0.7)/tu*(t-u*1/vf)*(1-u*0.003)+0.46)-b)*niuv2-rv
-decl*mm[u]*g/1000-kt1*(x2-x1)+kt*(x3-x2))/(mm[2]*(1+j))
end
else
begin
niuv3:=0.0;
f:=(-(a*pcn-b)*niuv3-rv-decl*mm[u]*g/1000-kt1*(x2-x1)+kt*(x3-x
2))/(mm[u]*(1+j))
end;
end;
end
else{se destinde arcul inelar spate}
begin
if kt*ccurl[u] > kt1*cmax1[u] then{nu se destinde arc in fata,
dar se destinde spate}
begin
if t <= (u*1/vf+0.35) then
f:=(-rv-decl*mm[u]*g/1000-kt*(x2-x1)+kt1*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))
else
if t <= (u*1/vf+1.5) then
begin
niuv1:=0.0;
f:=(-(a*(2.5*sqrt(t-u*1/vf)/sqrt(tu))-b)*niuv1-rv-decl*mm[u]*g
/1000-kt*(x2-x1)+kt1*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))
end
else
if t < (u*1/vf+1.5+tu) then
begin
zzz:=(1-u*0.003);
niuv2:=0.0;
f:=(-(a*((pcn-0.7)/tu*(t-u*1/vf)*(1-u*0.003)+0.46)-b)*niuv2-rv
-decl*mm[u]*g/1000-kt*(x2-x1)+kt1*(x3-x2))/
(mm[2]*(1+j))
end
end
end

```

```

                                else
                                begin
niuv3:=0.0;
f:=(-(a*pcn-b)*niuv3-rv-decl*mm[u]*g/1000-kt*(x2-x1)+kt1*(x3-x
2))/(mm[u]*(1+j))
                                end;
                                end
                                else{se destinde arc in spate, se destinde arc inel
fata}
                                begin
                                if t <= (u*1/vf+0.35) then

f:=(-rv-decl*mm[u]*g/1000-kt1*(x2-x1)+kt1*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))
                                else
                                if t <= (u*1/vf+1.5) then
                                begin
niuv1:=0.0;
f:=(-(a*(2.5*sqrt(t-u*1/vf)/sqrt(tu))-b)*niuv1-rv-decl*mm[u]*g
/1000-kt1*(x2-x1)+kt1*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))
                                end
                                else
                                if t < (u*1/vf+1.5+tu) then
                                begin
zzz:=(1-u*0.003);
niuv2:=0.0;
f:=(-(a*((pcn-0.7)/tu*(t-u*1/vf)*(1-u*0.003)+0.46)-b)*niuv2-rv
-decl*mm[u]*g/1000-kt1*(x2-x1)+kt1*(x3-x2))/(mm[2]*(1+j))
                                end
                                else
                                begin
niuv3:=0.0;
f:=(-(a*pcn-b)*niuv3-rv-decl*mm[u]*g/1000-kt1*(x2-x1)+kt1*(x3-
x2))/(mm[u]*(1+j))
                                end;
                                end;
                                end;
                                end;

                                end;
{---De la primul vag cu frana dupa vagnef pana la penultimul
vag--}
                                if ((u>N1+VAGNEF) and (u<max)) then
                                begin
rv:=1280+3.84*z2*z2;{Rez la inaintare a vag in N/kN}
                                if kt*ccur2[u] > kt1*cmax2[u] then{nu s-a destins arc inel spate}
                                begin
                                if kt*ccurl1[u] > kt1*cmax1[u] then{nu s-a destins arc
inel fata}
                                begin
                                if t <= (u*1/vf+0.35) then

f:=(-rv-decl*mm[u]*g/1000-kt*(x2-x1)+kt*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))
                                else
                                if t <= (u*1/vf+1.5) then
                                begin
niuv1:=12/(3.6*z2+40);
cal:=niuv1;
f:=(-(a*(2.5*sqrt(t-u*1/vf)/sqrt(tu))-b)*niuv1-rv-decl*mm[u]*g
/1000-kt*(x2-x1)+kt*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))

```

```

                end
            else
                if t < (u*1/vf+1.5+tu) then
                    begin
                        zzz:=(1-u*0.003);
                        niuv2:=12/(3.6*z2+40);
                        ca2:=niuv2;
                        f:=(- (a*((pcn-0.7)/tu*(t-u*1/vf)*(1-u*0.003)+0.46)-b)*niuv2-rv
                        -decl*mm[u]*g/1000-kt*(x2-x1)+kt*(x3-x2))/(mm[2]*(1+j))
                    end
                else
                    begin
                        niuv3:=(6*pcn+58.0)/(50.3*pcn+83.864)*(3.6*z2+100)/(18*z2+100);
                        ca3:=niuv3;
                        f:=(- (a*pcn-b)*niuv3-rv-decl*mm[u]*g/1000-kt*(x2-x1)+kt*(x3-x2
                        ))/(mm[u]*(1+j))
                    end;
                end
            else{s-a destins arc inel fata, dar nu s-a destins arc inel
            spate}
                begin
                    if t <= (u*1/vf+0.35) then
                        f:=(-rv-decl*mm[u]*g/1000-kt1*(x2-x1)+kt*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))
                    else
                        if t <= (u*1/vf+1.5) then
                            begin
                                niuv1:=12/(3.6*z2+40);
                                ca1:=niuv1;
                                f:=(- (a*(2.5*sqrt(t-u*1/vf)/sqrt(tu))-b)*niuv1-rv-decl*mm[u]*g
                                /1000-kt1*(x2-x1)+kt*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))
                            end
                        else
                            if t < (u*1/vf+1.5+tu) then
                                begin
                                    zzz:=(1-u*0.003);
                                    niuv2:=12/(3.6*z2+40);
                                    ca2:=niuv2;
                                    f:=(- (a*((pcn-0.7)/tu*(t-u*1/vf)*(1-u*0.003)+0.46)-b)*niuv2-rv
                                    -decl*mm[u]*g/1000-kt1*(x2-x1)+kt*(x3-x2))/(mm[2]*(1+j))
                                end
                            else
                                begin
                                    niuv3:=(6*pcn+58.0)/(50.3*pcn+83.864)*(3.6*z2+100)/(18*z2+100);
                                    ca3:=niuv3;
                                    f:=(- (a*pcn-b)*niuv3-rv-decl*mm[u]*g/1000-kt1*(x2-x1)+kt*(x3-x
                                    2))/(mm[u]*(1+j))
                                end;
                            end;
                        end
                    end
                else{se destinde arcul inelar spate}
                    begin
                        if kt*ccurl[u] > kt1*cmax1[u] then{nu se dest arc in fata, dar
                        se destinde spate}
                            begin
                                if t <= (u*1/vf+0.35) then
                                    f:=(-rv-decl*mm[u]*g/1000-kt*(x2-x1)+kt1*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))
                                end
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end

```

```

else
    if t <= (u*1/vf+1.5) then
        begin
niuv1:=12/(3.6*z2+40);
cal:=niuv1;
f:=(-(a*(2.5*sqrt(t-u*1/vf)/sqrt(tu))-b)*niuv1-rv-decl*mm[u]*g
/1000-kt*(x2-x1)+kt1*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))
        end
    else
        if t < (u*1/vf+1.5+tu) then
            begin
zzz:=(1-u*0.003);
niuv2:=12/(3.6*z2+40);
ca2:=niuv2;
f:=(-(a*((pcn-0.7)/tu*(t-u*1/vf)*(1-u*0.003)+0.46)-b)*niuv2-rv
-decl*mm[u]*g/1000-kt*(x2-x1)+kt1*(x3-x2))/
(mm[2]*(1+j))
            end
        else
            begin
niuv3:=(6*pcn+58.0)/(50.3*pcn+83.864)*(3.6*z2+100)/(18*z2+100);
ca3:=niuv3;
f:=(-(a*pcn-b)*niuv3-rv-decl*mm[u]*g/1000-kt*(x2-x1)+kt1*(x3-x
2))/(mm[u]*(1+j))
            end;
        end
    else{se dest arc in spate, se dest arc inel fata}
        begin
            if t <= (u*1/vf+0.35) then

f:=(-rv-decl*mm[u]*g/1000-kt1*(x2-x1)+kt1*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))
                else
                    if t <= (u*1/vf+1.5) then
                        begin
niuv1:=12/(3.6*z2+40);
cal:=niuv1;
f:=(-(a*(2.5*sqrt(t-u*1/vf)/sqrt(tu))-b)*niuv1-rv-decl*mm[u]*g
/1000-kt1*(x2-x1)+kt1*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))
                        end
                    else
                        if t < (u*1/vf+1.5+tu) then
                            begin
zzz:=(1-u*0.003);
niuv2:=12/(3.6*z2+40);
ca2:=niuv2;
f:=(-(a*((pcn-0.7)/tu*(t-u*1/vf)*(1-u*0.003)+0.46)-b)*niuv2-rv
-decl*mm[u]*g/1000-kt1*(x2-x1)+kt1*(x3-x2))/(mm[2]*(1+j))
                            end
                        else
                            begin
niuv3:=(6*pcn+58.0)/(50.3*pcn+83.864)*(3.6*z2+100)/(18*z2+100);
ca3:=niuv3;
f:=(-(a*pcn-b)*niuv3-rv-decl*mm[u]*g/1000-kt1*(x2-x1)+kt1*(x3-
x2))/(mm[u]*(1+j))
                            end;
                        end;
                    end;
                end;
            end;
        end;

```



```

end;
{-----Ultimul vagon din tren-----}
if u=max then
begin
  rv:=1280+3.84*z2*z2;
  if kt*ccurl[u] > kt1*cmax1[u] then{nu se destinde arc
inelar fata}
begin
  if t <= (u*1/vf+0.35) then
f:=(-rv-decl*mm[u]*g/1000-kt*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))
else
  if t <= (u*1/vf+1.5) then
begin
niuv1:=12/(3.6*z3+40);
f:=(-(a*(2.5*sqrt(t-u*1/vf)/sqrt(tu))-b)*niuv1-rv-decl*mm[u]*g
/1000-kt*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))
end
else
  if t < (u*1/vf+1.5+tu) then
begin
zzz:=(1-u*0.003);
niuv2:=12/(3.6*z3+40);
f:=(-(a*((pcn-0.7)/tu*(t-u*1/vf)*(1-u*0.003)+0.46)-b)*niuv2-rv
-decl*mm[u]*g/1000-kt*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))
end
else
begin
niuv3:=(6*pcn+58.0)/(50.3*pcn+83.864)*(3.6*z3+100)/(18*z3+100);
f:=(-(a*pcn-b)*niuv3-rv-decl*mm[u]*g/1000-kt*(x3-x2))/(mm[u]*(
1+j))
end;
end
else{se dest arc inelar fata}
begin
  if t <= (u*1/vf+0.35) then
f:=(-rv-decl*mm[u]*g/1000-kt1*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))
else
  if t <= (u*1/vf+1.5) then
begin
niuv1:=12/(3.6*z3+40);
f:=(-(a*(2.5*sqrt(t-u*1/vf)/sqrt(tu))-b)*niuv1-rv-decl*mm[u]*g
/1000-kt1*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))
end
else
  if t < (u*1/vf+1.5+tu) then
begin
zzz:=(1-u*0.003);
niuv2:=12/(3.6*z3+40);
f:=(-(a*((pcn-0.7)/tu*(t-u*1/vf)*(1-u*0.003)+0.46)-b)*niuv2-rv
-decl*mm[u]*g/1000-kt1*(x3-x2))/(mm[u]*(1+j))
end
else
begin
niuv3:=(6*pcn+58.0)/(50.3*pcn+83.864)*(3.6*z3+100)/(18*z3+100);
f:=(-(a*pcn-b)*niuv3-rv-decl*mm[u]*g/1000-kt1*(x3-x2))/(mm[u]*
(1+j))
end;
end;
end;
end;

```

```

end;

{-----Sfarsit parte declarativa de
functii-----}
begin{Inceput program principal}
clrscr;
write('Introduceti nr. de vagoane ale trenului ( <51 ) :');
readln(max);

assign(fis,'masa.dat');
Reset(fis);
readln(fis,mm[1]);
for i:=2 to max do
    readln(fis,mm[i]);
close(fis);
for i:=1 to max do{Conditii initiale pentru ecuatiile
diferentiale}
    begin
        z[i]:=vmax;
        x[i]:=0.0;
            cmax1[i]:=0.0;
            cmax2[i]:=0.0;
    end;
for i:= 2 to max do
    begin
        Nmax[i]:=0.0;
    end;
{-----Calcul coeficienti metoda RUNGE-KUTTA-----}
for t := 1 to c do
    begin
        kz[0,1]:=h*f(1,t*h,x[1],x[2],0,z[1],0,0);
        kx[0,1]:=h*z[1];
        for i:=2 to max-1 do
            begin
                kz[0,i]:=h*f(i,t*h,x[i-1],x[i],x[i+1],0,z[i],0);
                kx[0,i]:=h*z[i];
            end;
        kz[0,max]:=h*f(max,t*h,0,x[max-1],x[max],0,0,z[max]);
        kx[0,max]:=h*z[max];

        {-----
        ---}
        kz[1,1]:=h*f(1,t*h+h/2,x[1]+kx[0,1]/2,x[2]+kx[0,2]/2,0,z[1]+kz
[0,1]/2,0,0);
            kx[1,1]:=h*(z[1]+kz[0,1]/2);
            for i:=2 to max-1 do
                begin
                    kz[1,i]:=h*f(i,t*h+h/2,x[i-1]+kx[0,i-1]/2,x[i]+kx[0,i]/2,x[i+1
]+kx[0,i+1]/2,0,z[i]+kz[0,i]/2,0);
                        kx[1,i]:=h*(z[i]+kz[0,i]/2);
                end;
            kz[1,max]:=h*f(max,t*h+h/2,0,x[max-1]+kx[0,max-1]/2,x[max]+kx[
0,max]/2,0,0,z[max]+kz[0,max]/2);
                kx[1,max]:=h*(z[max]+kz[0,max]/2);

            {-----
            ---}
            kz[2,1]:=h*f(1,t*h+h/2,x[1]+kx[1,1]/2,x[2]+kx[1,2]/2,0,z[1]+kz

```

```

[1,1]/2,0,0);
  kx[2,1]:=h*(z[1]+kz[1,1]/2);
  for i:=2 to max-1 do
  begin
kz[2,i]:=h*f(i,t*h+h/2,x[i-1]+kx[1,i-1]/2,x[i]+kx[1,i]/2,x[i+1]
+kx[1,i+1]/2,0,z[i]+kx[1,i]/2,0);
  kx[2,i]:=h*(z[i]+kz[1,i]/2);
  end;

kz[2,max]:=h*f(max,t*h+h/2,0,x[max-1]+kx[1,max-1]/2,x[max]+kx[1,max]
/2,0,0,z[max]+kz[1,max]/2);
  kx[2,max]:=h*(z[max]+kz[1,max]/2);
{-----}
---}

kz[3,1]:=h*f(1,t*h+h,x[1]+kx[2,1],x[2]+kx[2,2],0,z[1]+kz[2,1],
0,0);
  kx[3,1]:=h*(z[1]+kz[2,1]);

  for i:=2 to max-1 do
  begin
kz[3,i]:=h*f(i,t*h+h,x[i-1]+kx[2,i-1],x[i]+kx[2,i],x[i+1]+kx[2,i+1],
0,z[i]+kz[2,i],0);
  kx[3,i]:=h*(z[i]+kz[2,i]);
  end;

kz[3,max]:=h*f(max,t*h+h,0,x[max-1]+kx[2,max-1],x[max]+kx[2,max],
0,0,z[max]+kz[2,max]);
  kx[3,max]:=h*(z[max]+kz[2,max]);
{-----}
---}

  for i:=1 to max do
  z[i]:=z[i]+(kz[0,i]+2*kz[1,i]+2*kz[2,i]+kz[3,i])/6;{Vitezele
vehic}
  write('vl=',z[1]:4:1);
  for i:=1 to max do
  x[i]:=x[i]+h*(z[i]+(kz[0,i]+kz[1,i]+kz[2,i])/6);{Spatiul
parcurs}
  write('xl=',x[1]:5:1);
  writeln(' n24=',kt*(x[25]-x[24]):6:1);
  for i:=2 to max do
  begin
  nn[i][t]:=round(kt*(x[i]-x[i-1]));{Forte dinamice
longitudinale}
  if Nmax[i] <= nn[i][t] then{Maxim forte dinamice longitud}
  begin
  Nmax[i] := nn[i][t];
  end;
  ccur1[i]:=x[i]-x[i-1];{Comprim curenta fata}
  ccur2[i]:=x[i+1]-x[i];{Idem spate}
  if cmax1[i] <= ccur1[i] then
  begin
  cmax1[i]:=ccur1[i];{Comprim maxima fata}
  end;
  if cmax2[i] <= ccur2[i] then
  begin
  cmax2[i]:=ccur2[i];{Comprim maxima spate}

```

```

        end;
    end;
writeln; readkey;
begin{PARTE GRAFICA DIN PROGRAM}
e:=detect;
initgraph(e,m,'c:\tp\bgi');
xx:=getmaxx;yy:=getmaxy;
rectangle (60,60,xx-60,yy-60);
for i := 1 to round(3*c*h/4)-1 do {Trasare caroi aj vertical}
begin
line(round(i*(xx-120)/(c*h)+60),60,round(i*(xx-120)/(c*h)+60),
yy-130);
end;
for i := round(3*c*h/4)-1 to round(c*h) do {Trasare caroi aj
vertical continuare}
begin
line(round(i*(xx-120)/(c*h)+60),60,round(i*(xx-120)/(c*h)+60),
yy-60);
end;
for i := 1 to 4 do {Trasare caroi aj orizontal}
begin
line (60,round(i*(yy-120)/5+60),xx-60,round(i*(yy-120)/5+60));
end;

for mere:=2 to max do
begin
if mere=round(max/2) then
setlinestyle(0,0,3)
else
setlinestyle(0,0,1);
moveto(60,60);
for i := 1 to c do {Trasare forte longitudinale}
begin
lineto(round(i*(xx-120)/c+60),60+round(nn[mere][i]*(yy-120)/50
0000));
end;

for i := 1 to round(c*h)-1 do{Afisare timp}
begin
str(i:2,a1);
outtextxy(round(i*(xx-120)/(c*h))+50,50,a1);
end;
for i := 1 to 5 do{Afisare valori forte longitudinale}
begin
str(-(i)*100,a2);
outtextxy(27,round(i*(yy-120)/5+56),a2);
end;
outtextxy(50,55,'0');{afisare origine axe}
setlinestyle(0,0,1);
line(xx-60,60,xx-40,60);line(xx-50,65,xx-40,60);
line(xx-50,55,xx-40,60);outtextxy(xx-85,46,'t[sec]');
line(60,yy-60,60,yy-40);line(55,yy-50,60,yy-40);line(65,yy-50,
60,yy-40);
settextstyle(triplexfont,horizdir,1);
outtextxy(70,yy-60,'Nmax');
settextstyle(defaultfont,horizdir,1);
outtextxy(127,yy-47,'[kN]');
outtextxy(65,352,'Franare de la v =');

```

```

str(vmax:3:1,a3);outtextxy(210,352,a3);outtextxy(245,352,'[m/s
];');
outtextxy(65,362,'Tonaj tr.omogen=');
str((max*80*g):5:1,a4);outtextxy(195,362,a4);outtextxy(252,362
,'[kN]');
str((1*max):3:0,a9);outtextxy(294,362, '(');
outtextxy(302,362,a9);outtextxy(332,362,'m.lung.);');
outtextxy(65,372,'Numar vagoane in tren =');
str(max:2,a5);outtextxy(255,372,a5);outtextxy(275,372,'vag.);');
outtextxy(65,382,'Vit.propag.unda de franare=');
str(round(vf):3,a6);outtextxy(282,382,a6);outtextxy(310,382,'[
m/s];');
outtextxy(65,392,'Timp umplere C.F. vag. cu aer=');
str((tu+1.5):3:1,a7);outtextxy(308,392,a7);outtextxy(340,392,'
[sec]');
outtextxy(65,402,'Decliv. pe care se franeaza=');
str(decl:3:1,a8);outtextxy(290,402,a8);outtextxy(334,402,'[N/k
N]');
end;
readkey;
closegraph;
begin
e:=detect;
initgraph(e,m,'c:\tp\bgi');
xx:=getmaxx;yy:=getmaxy;
rectangle(60,60,xx-60,yy-60);
for i := 2 to round(3*max/4)-3 do{Trasare caroi aj vertical}

line(round((i-1)*(xx-120)/max+60),60,round((i-1)*(xx-120)/max+
60),yy-130);
for i := round(3*max/4)-3 to max do{Trasare caroi aj vertical
continuare}

line(round((i-1)*(xx-120)/max+60),60,round((i-1)*(xx-120)/max+
60),yy-60);
for i := 1 to 4 do {Trasare caroi aj orizontal}
begin
line(60,round(i*(yy-120)/5+60),xx-60,round(i*(yy-120)/5+60));
end;

for i := 1 to 5 do{Afisare valori forte longitudinale}
begin
str(-(i)*100,a2);
outtextxy(27,round(i*(yy-120)/5+56),a2);
end;
outtextxy(50,55,'0');{afisare origine axe}

for i := 1 to 8 do{Afisare numar vagoane}
begin
str(i:2,a1);
outtextxy(round(i*(xx-120)/max)+50,50,a1);
end;
for i := 9 to 9 do {Afisare numar vagoane}
begin
str(i:2,a1);
outtextxy(round(i*(xx-120)/max)+50,50,a1);
end;
for i := 10 to 10 do {Afisare numar vagoane}

```

```

begin
  str(i:2,a1);
  outtextxy(round(i*(xx-120)/max)+52,50,a1);
  end;
for i := 15 to 15 do {Afisare numar vagoane}
  begin
    str(i:2,a1);
    outtextxy(round(i*(xx-120)/max)+52,50,a1);
    end;
for i := 20 to 20 do {Afisare numar vagoane}
  begin
    str(i:2,a1);
    outtextxy(round(i*(xx-120)/max)+52,50,a1);
    end;
for i :=25 to 25 do {Afisare numar vagoane}
  begin
    str(i:2,a1);
    outtextxy(round(i*(xx-120)/max)+52,50,a1);
    end;
for i := 30 to 30 do {Afisare numar vagoane}
  begin
    str(i:2,a1);
    outtextxy(round(i*(xx-120)/max)+52,50,a1);
    end;
for i := 35 to 35 do {Afisare numar vagoane}
  begin
    str(i:2,a1);
    outtextxy(round(i*(xx-120)/max)+50,50,a1);
    end;
for i := 40 to 40 do {Afisare numar vagoane}
  begin
    str(i:2,a1);
    outtextxy(round(i*(xx-120)/max)+50,50,a1);
    end;
for i := 45 to 45 do {Afisare numar vagoane}
  begin
    str(i:2,a1);
    outtextxy(round(i*(xx-120)/max)+50,50,a1);
    end;
for i := 50 to 50 do {Afisare numar vagoane}
  begin
    str(i:2,a1);
    outtextxy(round(i*(xx-120)/max)+50,50,a1);
    end;

setlinestyle(0,0,3);
moveto(60,60);
for i := 2 to max do {Trasare forte longitudinale maxime in
lungul trenului}
  begin
    lineto(round(i*(xx-120)/max+60),60+round(Nmax[i]*(yy-120)/5000
00));
    end;
    setlinestyle(0,0,1);
line(xx-60,60,xx-40,60);line(xx-50,65,xx-40,60);
line(xx-50,55,xx-40,60);outtextxy(xx-50,45,'nr. ');outtextxy(xx
-58,65,'vag. ');
line(60,yy-60,60,yy-40);line(55,yy-50,60,yy-40);line(65,yy-50,

```

```

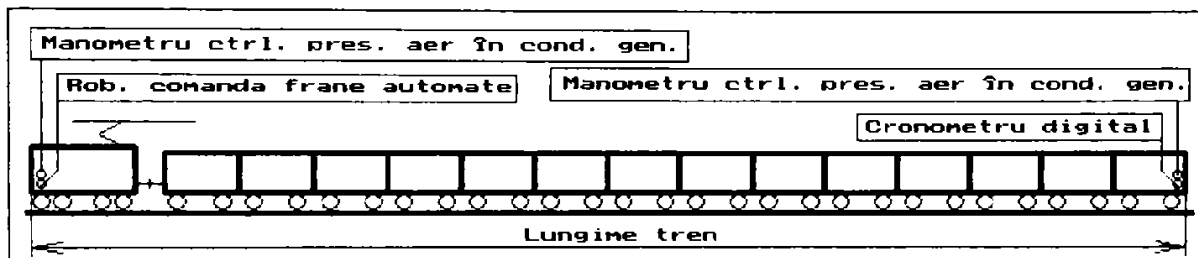
60,yy-40);
settextstyle(triplexfont,horizdir,1);
outtextxy(70,yy-60,'Nmax');
settextstyle(defaultfont,horizdir,1);
outtextxy(127,yy-47,'[kN]');
outtextxy(65,352,'Franare de la v =');
str(vmax:3:1,a3);outtextxy(210,352,a3);outtextxy(245,352,['m/s
]);
outtextxy(65,362,'Tonaj tr.omogen=');
str((max*80*g):5:1,a4);outtextxy(195,362,a4);outtextxy(252,362
,['kN/']);
str((l*max):3:0,a9);outtextxy(294,362, '(');
outtextxy(302,362,a9);outtextxy(332,362,'m.lung.);');
outtextxy(65,372,'Numar vagoane in tren =');
str(max:2,a5);outtextxy(255,372,a5);outtextxy(275,372,'vag.;');
outtextxy(65,382,'Vit.propag.unda de franare=');
str(round(vf):3,a6);outtextxy(282,382,a6);outtextxy(310,382,['
m/s]);');
outtextxy(65,392,'Timp umplere C.F. vag. cu aer=');
str((tu+1.5):3:1,a7);outtextxy(308,392,a7);outtextxy(340,392,'
[sec]');
outtextxy(65,402,'Decliv. pe care se franeaza=');
str(decl:3:1,a8);outtextxy(290,402,a8);outtextxy(334,402,['N/k
N]');
  readkey;
closegraph;
  end;
end;
end.

```

ANEXA 5

Rezultate experimentale obținute în urma măsurătorilor efectuate în stația Ronaț Triaș

Schema de amplasare a instrumentelor de măsură și control în corpul trenurilor se prezintă pe figura de mai jos:



Rezultatele măsurătorilor sunt trecute în tabelul următor:

Nr. crt.	Nr. tren	Tonaj [kN]	Lungime [m]	Va [m/s]	Vuf [m/s]		
					Fr. serv.1	Fr. serv.2	Fr. rapid
1.	96 608	8 839	308	324.2	227.2	258.5	275.1
2.	96 663	5 631	129	320.8	243.1	270.2	288.3
3.	96 612	10 870	783	326.2	194.2	229.5	251.8
4.	25 413	8 348	422	322.7	215.9	247.6	268.1
5.	23 130	16 903	383	323.4	220.8	251.7	269.8
6.	22 218	10 065	575	324.8	207.6	239.8	260.1
7.	22 216	14 833	478	325.3	211.1	245.7	266.3
8.	23 701	19 532	400	323.3	216.9	250.2	270.1
9.	22 219	12 822	680	322.6	198.8	235.1	256.7
10.	22 743	14 715	745	324.1	195.1	230.7	253.1

Legendă:

- Va: viteza de propagare a undei de aer;
- Vuf: viteza de propagare a undei de frânare;
- Fr. serv.1: frânare de serviciu cu o depresiune de 70 kN/m²;
- Fr. serv.2: frânare de serviciu totală.