

**MINISTERUL EDUCAȚIEI, CERCETĂRII, TINERETULUI ȘI
SPORTULUI**

**UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA
FACULTATEA DE INGINERIE ÎN ELECTROMECHANICĂ, MEDIU ȘI
INFORMATICĂ INDUSTRIALĂ**

Ing. OCOLEANU Constantin-Florin

Rezumatul tezei de doctorat

**Contribuții la studiul regimurilor de funcționare
a ansamblului linie de contact – pantograf din
structura locomotivelor electrice**

**Conducător științific:
Prof.dr.ing. MANOLEA Gheorghe**

**CRAIOVA
2010**

Cuprins

Lista de simboluri și abrevieri	3
Introducere	5
Capitolul 1 Analiza ansamblului linie de contact-pantograf din structura locomotivelor electrice	
1.1. Introducere	11
1.2. Analiza construcției suspensiei catenare din sistemele de tracțiune electrică	12
1.3. Analiza construcției pantografelor din structura locomotivelor electrice	17
1.3.1. Elementele constructive ale unui pantograf	18
1.3.2. Condiții tehnice și funcționale	18
1.3.3. Tipuri constructive de pantografe și tendințe în construcția lor	20
1.4. Analiza construcției benzii de frecare din structura pantografului	25
1.4.1. Analiza benzii de frecare din grafit	25
1.4.2. Valori caracteristice ale benzilor de frecare din grafit	26
1.4.3. Profiluri standard ale benzilor de frecare	29
1.5. Concluzii	30
Capitolul 2 Analiza contactului pantograf – fir de contact	
2.1. Introducere	32
2.2. Analiza micro și macrogeometrică a contactului fix	33
2.3. Modele matematice pentru studiul contactelor fixe	37
2.3.1. Modele plastice	37
2.3.2. Modele elastice	38
2.3.3. Modele elastoplastice	39
2.4. Modele matematice pentru studiul contactelor alunecătoare	43
2.4.1. Analiza contactului alunecător	43
2.4.2. Modele pentru cazul alunecării uscate și oscilante	45
2.4.3. Modele pentru studiul frecării la deplasări mici ale contactelor	47
2.5. Concluzii	50
Capitolul 3 Contribuții privind studiul contactului pantograf – fir de contact	
3.1. Introducere	52
3.2. Modelul matematic al rezistenței de contact	53
3.3. Contribuții privind determinarea coeficienților de material c și m	56
3.4. Contribuții privind studiul repartiției înălțimii asperităților	58
3.5. Concluzii	69
Capitolul 4 Contribuții privind simularea numerică a regimului termic al ansamblului pantograf – fir de contact	
4.1. Introducere	71
4.2. Metodologia cercetării regimului termic	72
4.2.1. Metodologia rezolvării problemelor cuplate	72
4.2.2. Metodologia analizei unei probleme cu element finit	75
4.3. Modelul matematic pentru studiul regimului termic permanent al benzii de frecare	78
4.4. Contribuții privind simularea numerică 2D a încălzirii firului de contact în regim permanent	81

4.4.1.	Modelul matematic utilizat pentru determinarea numerică a încălzirii firului de contact	81
4.4.2.	Influența efectului pelicular asupra încălzirii firului de contact	83
4.5.	Contribuții privind simularea numerică 2D a încălzirii ansamblului „pantograf-fir de contact” în regim tranzitoriu	86
4.5.1.	Propagarea câmpului termic	86
4.5.2.	Domeniul de analiză și condițiile pe frontieră	89
4.5.3.	Rezultate numerice	90
4.6.	Contribuții privind simularea numerică 3D a încălzirii firului de contact	95
4.7.	Concluzii	97
Capitolul 5 Contribuții experimentale privind ansamblul pantograf – fir de contact		
5.1.	Contribuții privind determinarea experimentală a dependenței rezistenței de contact de forța de apăsare	99
5.2.	Contribuții privind determinarea experimentală a temperaturii firului de contact	103
5.3.	Contribuții privind determinarea experimentală a legii de variație a coeficientului global de cedare a căldurii corespunzător firului de contact	105
5.4.	Contribuții privind determinarea experimentală a temperaturii în contactul pantograf-fir de contact	110
5.5.	Propuneri privind realizarea sistemului de încercare a ansamblului „pantograf – fir de contact”	112
5.6.	Concluzii	120
Capitolul 6 Concluzii și contribuții		
6.1.	Concluzii	122
6.1.1.	Concluzii privind construcția ansamblului suspensie catenară - pantograf	122
6.1.2.	Concluzii privind contactul „pantograf – fir de contact”	122
6.1.3.	Concluzii privind regimul termic staționar și tranzitoriu al ansamblului „pantograf – fir de contact”	122
6.1.4.	Concluzii privind instalațiile pentru studiul ansamblului „pantograf – fir de contact”	122
6.2.	Contribuții personale	123
6.2.1.	Contribuții metodologice	123
6.2.2.	Contribuții teoretice	123
6.2.3.	Contribuții experimentale	124
6.2.4.	Contribuții privind realizarea instalațiilor pentru studiul ansamblului “pantograf- fir de contact”	125
6.3.	Diseminarea rezultatelor obținute	125
6.4.	Direcții de cercetare propuse	125
Lista de figuri		127
Lista de tabele		130
Bibliografie		131

Introducere

Actualitatea și necesitatea temei

În marea majoritate a rețelelor feroviare puterea electrică necesară unei locomotive electrice este transmisă prin sistemul catenară - pantograf. Una dintre cele mai importante caracteristici ale acestui sistem este calitatea captării curentului electric. Rularea locomotivelor electrice ar trebui să se facă ideal cu forțe de contact slabe pentru a minimiza uzura și distrugerea elementelor de contact și fără pierderi electrice.

Contactul „pantograf - fir de contact” reprezintă o problemă importantă a exploatării vehiculelor de tracțiune electrică. Prin acest contact, o bandă de frecare pe un fir rotund, deci suprafață de contact extrem de redusă, se alimentează motoarele locomotivei care împreună au o putere ce depășește mii de kilowați. Calitatea contactului este o problemă studiată în literatura de specialitate întrucât priza de curent trebuie să fie neîntreruptă în condiții de exploatare diferite.

Pe măsură ce vitezele de deplasare cresc mersul devine din ce în ce mai neuniform, producându-se desprinderi care duc la apariția arcurilor electrice și care măresc rezistența de contact. În estimarea uzurii firului de contact și a benzii de frecare a pantografului trebuie luată în considerare și dependența rezistenței electrice de contact de forța de apăsare. O analiză termică a contactului “pantograf - fir de contact” poate ajuta la îmbunătățirea operațiilor de mentenanță legate de supraîncălzirea ansamblului. Deteriorarea benzii de frecare duce la agățarea firului de contact cu consecințe negative asupra traficului din sistemele de tracțiune electrică.

Necesitatea temei tezei de doctorat este impusă de tendința de creștere și în țara noastră a vitezelor de deplasare a trenurilor electrice. Se pot exemplifica încercările de pe noul inel de testări feroviare de la Făurei de stabilire a unui nou record de viteză pe calea ferată din România.

Problema propusă spre rezolvare

Problema propusă spre rezolvare este legată de încălzirea ansamblului „pantograf-fir de contact” și are două componente:

- elaborarea unui model matematic și a unui model fizic pentru studiul rezistenței electrice de contact a ansamblului „pantograf – fir de contact”;
- formularea problemei cuplate câmp termic - câmp electromagnetic pentru studiul regimului termic al ansamblului „pantograf – fir de contact” și rezolvarea numerică.

Obiectivele tezei

Obiectivele tezei vizează rezolvarea problemei propuse dar și crearea condițiilor pentru continuarea cercetărilor teoretice și aplicative din acest domeniu:

- determinarea dependenței rezistenței de contact de forța de apăsare din ansamblul „pantograf - fir de contact”;
- elaborarea unui model 2D și rezolvarea problemei cuplate câmp termic - câmp electromagnetic;
- elaborarea unui model 2D pentru analiza regimului termic tranzitoriu al ansamblului „pantograf - fir de contact”;
- elaborarea unui model 3D pentru studiul regimului termic staționar al firului de contact;
- determinarea influenței efectului pelicular asupra încălzirii firului de contact;
- stabilirea structurii și principiului unei instalații pentru studiul experimental al ansamblului „pantograf - fir de contact”.

Metodologia cercetărilor doctorale

Suportul metodologic și teoretico - științific pentru efectuarea cercetării l-a constituit consultarea de teze de doctorat, cărți, publicații tehnice din domeniu, reviste și lucrări științifice de prestigiu, brevete de invenție, site-uri internet.

Pe baza modelului teoretic al contactului între două suprafețe plane, considerând distribuția înălțimii asperităților normală și o formă sferică pentru asperități s-au determinat teoretic valorile coeficienților de material c și m pentru benzi de frecare din grafit. S-a creat un model fizic experimental pentru studiul rezistenței electrice de contact a ansamblului „pantograf – fir de contact” cu ajutorul căruia s-au determinat pe cale experimentală variația rezistenței electrice de contact în funcție de forța de apăsare și parametrii de material c și m . S-a determinat repartiția înălțimii asperităților cu ajutorul testelor *Kolmogorov*, *Fischer–Snedecor* și *Student*.

Pentru determinarea numerică a încălzirii firului de contact în curent alternativ a fost creat un model 2D și propusă rezolvarea unei probleme cuplate câmp electromagnetic – câmp termic. Modelul matematic utilizat are 2 componente - modelul electromagnetic și modelul termic cuplate prin termenul sursă obținut prin rezolvarea problemei de câmp electromagnetic.

Întrucât în simulările numerice se utilizează coeficientul global de cedare a căldurii h_{Σ} care depinde de temperatură, a fost determinată experimental legea de variație a acestuia cu temperatura pentru firul de contact al suspensiei catenare. Determinarea s-a făcut cu ajutorul rezultatelor experimentale obținute la încălzirea firului de contact în curent alternativ pentru diferite valori ale intensității curentului electric. Utilizând apoi funcția de minimizare în programul de calcul tehnic Mathcad s-a obținut legea de variație, validată apoi prin simulări numerice 2D și 3D folosind metoda elementelor finite.

Câmpul termic al ansamblului „pantograf - fir de contact” și influența parametrilor de material asupra temperaturii au fost studiate considerând cazul discului de contact și cazul particular de încălzire datorită apariției arcului electric.

Pentru studiul regimului termic staționar al firului de contact a fost realizat un model 3D. Rezultatele simulărilor numerice 3D au fost obținute utilizând pentru coeficientul global de cedare a căldurii legea de variație determinată în cadrul cercetărilor efectuate de autor, iar pentru termenul sursă valorile rezultate prin rezolvarea unei probleme 2D. Rezultatele numerice au fost comparate cu rezultatele experimentale pentru calculul erorii relative.

S-a studiat influența efectului pelicular asupra încălzirii firului de contact prin determinări numerice cu ajutorul modelului 2D și prin determinări experimentale. Rezultatele simulărilor numerice obținute prin rezolvarea unei probleme cuplate câmp electromagnetic – câmp termic și a unei probleme de regim termic staționar au fost comparate cu rezultatele experimentale obținute la încălzirea în curent continuu și alternativ a firului de contact din cupru pentru intensități ale curentului electric de 201A, respectiv 301A.

Literatura tehnică națională nu prezintă în detaliu soluțiile constructive ale sistemelor de încercare pentru studiul fenomenelor care apar în ansamblul „pantograf - fir de contact”, acestea fiind doar semnalate în teze de doctorat sau alte publicații. Din analiza soluțiilor constructive prezentate în literatura tehnică internațională au fost stabilite structura și principiul unei instalații propuse pentru studiul experimental al ansamblului „pantograf - fir de contact”.

Noutatea științifică a rezultatelor obținute

Valorile experimentale obținute pentru exponentul m din relația de dependență a rezistenței de contact de forța de apăsare pentru contactul “bandă de frecare din grafit - fir de contact din cupru” au arătat că acestea sunt mult mai mici decât valorile teoretice, în acest caz se poate considera în cercetările din domeniu că suprafața de contact este cilindrică și lucrează în regim de deformare plastică.

Determinarea experimentală a dependenței rezistenței de contact cu forța de apăsare pentru 3 benzi de frecare din grafit cu grad de uzură diferit a permis stabilirea variației rezistenței de contact și a exponentului m cu gradul de uzură.

S-a demonstrat că pentru benzile de frecare din grafit uzate repartiția asperităților poate fi considerată „normală”, iar pentru benzile mai puțin uzate repartiția poate fi considerată de tip „exponențial”. În acest scop s-au utilizat valorile statistice obținute din diagrama rugozității corespunzătoare a trei benzi din grafit și s-a determinat repartiția înălțimii asperităților cu ajutorul testelor *Kolmogorov*, *Fischer – Snedecor* și *Student*.

S-a demonstrat că pentru valori ale curentului electric până la 300 A, curent alternativ, legea de variație determinată pentru coeficientul global de cedare a căldurii poate fi aplicată cu succes deoarece în tracțiunea electrică de curent alternativ valorile curenților nu depășesc 300A.

Modelul termic 2D utilizat pentru determinarea numerică a încălzirii firului de contact în curent alternativ a fost obținut prin rezolvarea unei probleme cuplate câmp electromagnetic – câmp termic. Modelul matematic utilizat are 2 componente - modelul electromagnetic și modelul termic cuplate prin termenul sursă obținut prin rezolvarea problemei de câmp electromagnetic.

S-a demonstrat, pe baza rezultatelor experimentale și numerice, că încălzirea conductorului liniei de contact al suspensiei catenare este influențată și de efectul pelicular.

Rezultatele numerice obținute la studiul regimului termic tranzitoriu 2D al ansamblului „pantograf - fir de contact” au arătat că suprafețele izoterme ale câmpului termic sunt aproape cilindrice, deci se poate utiliza modelul cilindric pentru studiul câmpului termic.

Valoarea aplicativă a lucrării

Rezultatele teoretice obținute au fost aplicate în partea experimentală a tezei și vor fi utilizate, de asemenea, în cercetările ulterioare astfel:

- având în vedere valoarea determinată experimental pentru exponentul m din relația de dependență a rezistenței de contact de forța de apăsare pentru contactul “banda de frecare din grafit - fir de contact din cupru”, se poate considera în cercetările din domeniu că suprafața de contact este cilindrică și lucrează în regim de deformare plastică;
- pentru studiul rezistenței electrice de contact a ansamblului „pantograf - fir de contact” se poate considera o repartiție normală a asperităților benzii de frecare din grafit în cazul unei uzuri pronunțate, iar în cazul unei uzuri mici se poate considera exponențială;
- modelul fizic al ansamblului „pantograf – fir de contact” utilizat pentru studiul variației rezistenței de contact cu forța de apăsare pentru trei benzi de frecare din grafit cu diferite grade de uzură, se va utiliza pentru continuarea cercetărilor privind influența compoziției benzilor de frecare asupra rezistenței de contact;
- pentru studiul numeric al regimului termic în curent alternativ corespunzător firului de contact se poate utiliza cu erori relative mici legea de variație determinată pentru coeficientul global de cedare a căldurii h_2 ;
- modelul matematic și modelul numeric 2D corespunzătoare problemei cuplate câmp electromagnetic – câmp termic au fost utilizate pentru determinarea încălzirii firului de contact în curent alternativ;
- pentru studiul numeric al regimului termic tranzitoriu corespunzător ansamblului „pantograf - fir de contact” se propune utilizarea modelului cilindric;
- sistemul propus pentru studiul experimental al ansamblului „pantograf - fir de contact” va fi utilizat pentru continuarea cercetărilor privind:
 - determinarea coeficientului de frecare pentru diferite condiții de lucru;
 - studiul ratei pierderilor în contact;
 - studiul uzurii materialelor aflate în contact în funcție de viteza de alunecare, natura materialelor, intensitatea curentului electric;
 - studiul influenței arcurilor electrice asupra materialului benzii de frecare și asupra firului de contact;
 - efectul intensității curentului electric asupra frecării și uzurii;
 - dezvoltarea unor noi materiale pentru banda de frecare a pantografului.

Diseminarea rezultatelor

Rezultatele de bază obținute în teză au făcut obiectul a 12 lucrări științifice, 7 ca prim autor și 5 coautor, 2 Cereri de Brevet de Invenție și 3 contracte de cercetare, fiind expuse și discutate la conferințe naționale și internaționale, publicate în reviste de specialitate sau în volumele conferințelor.

Structura tezei

Teza este structurată în șase capitole și aduce contribuții la studiul regimurilor de funcționare a ansamblului „fir de contact - pantograf” din structura locomotivelor electrice. Sunt prezentate 104 relații, 111 figuri, 26 tabele și 122 poziții bibliografice.

În **Capitolul I** s-a realizat o analiză din punct de vedere constructiv a ansamblului suspensie catenară – pantograf. S-au prezentat tipuri de suspensii catenare utilizate pe plan internațional și național, condițiile electrice și mecanice impuse. S-au identificat elementele componente ale unui pantograf, soluții și tendințe constructive pentru domeniul vitezelor mari. S-au analizat benzile de frecare realizate din diferite materiale prezentându-se importanța materialului folosit în construcția lor, având în vedere că o rupere poate agăța firul de contact și provoca grave avarii atât pantografului cât și liniei de contact.

În **Capitolul al II - lea** s-au analizat modelele matematice prezentate în literatura de specialitate pentru studiul contactelor electrice fixe și alunecătoare și prezentate rezultate ale comparării acestora. Foarte multe studii ale rezistenței electrice de contact presupun o distribuție uniformă a microcontactelor corespunzătoare modelelor suprafețelor rugoase. În acest capitol s-au analizat contactul fix și alunecător la nivel micro și macrogeometric în scopul determinării repartiției înălțimii asperităților.

În **Capitolul al III - lea** s-a prezentat un model matematic pentru studiul rezistenței electrice de contact. Cu ajutorul modelului matematic prezentat au fost determinați coeficienții de material c și m considerând diferite distribuții ale înălțimii asperităților. Folosind ca elemente de analiză 3 benzi de frecare din grafit cu grad de uzură diferit a fost obținută diagrama rugozității corespunzătoare.

Pe baza diagramei rugozității s-au determinat valorile înălțimii și numărul aproximativ de asperități, precum și valorile statistice pentru cele 3 probe din grafit. Cu ajutorul valorilor statistice s-a studiat repartiția înălțimii asperităților cu ajutorul testului Kolmogorov.

Pentru 2 din cele 3 benzi de frecare supuse analizei a fost verificată egalitatea dispersiilor și mediilor cu *Testul f Fischer–Snedecor*, respectiv *Testul T student* pentru determinarea unei repartiții cumulate corespunzătoare.

Capitolul al IV - lea cuprinde contribuții privind simularea numerică a ansamblului pantograf – fir de contact. S-au studiat regimurile termice staționar și tranzitoriu corespunzătoare ansamblului fir de contact - pantograf.

Au fost realizate simulări numerice 2D și 3D pentru regimul termic staționar al firului de contact. S-a studiat numeric influența efectului pelicular asupra încălzirii firului de contact precum și regimul termic tranzitoriu datorită apariției arcului electric și influența parametrilor de material asupra pătrunderii câmpului termic în banda de frecare a pantografului.

Capitolul al V- lea prezintă contribuțiile experimentale ale autorului. A fost determinată variația rezistenței de contact cu forța de apăsare pentru 3 benzi de frecare din grafit cu grad de uzură diferit. Folosind rezultatele obținute s-au determinat coeficienții de material c și m care apoi s-au comparat cu valorile obținute pe cale teoretică.

Pentru studiul influenței efectului pelicular asupra încălzirii firului de contact al suspensiei catenare au fost efectuate încălziri în curent continuu și alternativ la diferite valori ale intensității curentului electric.

Întrucât în simulările numerice se utilizează coeficientul global de cedare a căldurii, a fost determinată pe cale experimentală legea de variație cu temperatura a acestuia pentru firul de contact al suspensiei catenare.

Considerând cazul locomotivei electrice în staționare s-a determinat experimental temperatura în contact prin măsurări directe și cu ajutorul camerei cu termoviziune. Literatura tehnică națională nu prezintă în detaliu soluțiile constructive ale sistemelor de încercare pentru studiul fenomenelor care apar în ansamblul „pantograf - fir de contact”, acestea fiind doar semnalate în teze de doctorat sau alte publicații. În acest capitol a fost propusă o variantă constructivă pentru un sistem de încercare a ansamblului pantograf – fir de contact.

Capitolul al VI – lea prezintă concluziile și contribuțiile autorului.

Concluzii și contribuții

Concluzii

Concluzii privind construcția ansamblului suspensie catenară - pantograf

Captatorul de curent este unul din factorii care are o influență mare asupra vitezei de deplasare și asupra costurilor de mentenanță. În literatura de specialitate valorile mărimilor caracteristice ale grafitului sunt diverse, conductibilitatea termică, densitatea și căldura specifică având un rol determinant în utilizarea benzilor de frecare la valori mari ale curentului electric.

Uzura benzii de frecare a pantografului este o caracteristică extrem de importantă având în vedere că o rupere a acesteia poate agăța firul de contact și provoca grave avarii atât pantografului cât și liniei de contact.

Concluzii privind contactul „pantograf – fir de contact”

Pe măsură ce vitezele de deplasare cresc mersul devine neuniform, producându-se desprinderi care duc la apariția arcurilor electrice și care măresc rezistența de contact.

În estimarea uzurii firului de contact și a benzii de frecare a pantografului trebuie luată în considerare și dependența rezistenței electrice de contact de forța de apăsare. Valorile rezistenței de contact sunt dispersate și greu de estimat în ciuda simplității formulelor teoretice.

Concluzii privind regimul termic staționar și tranzitoriu al ansamblului „pantograf – fir de contact”

O analiză termică a contactului pantograf - fir de contact poate ajuta la operațiile de mentenanță legate de supraîncălzirea firului de contact și a benzii de frecare. Rularea locomotivelor electrice ar trebui să se facă ideal cu forțe de contact cât mai slabe pentru a micșora uzura, pentru a evita distrugerea elementelor de contact și pentru reducerea pierderilor în contact astfel încât puterea de alimentare să rămână constantă și să nu apară arcuri electrice.

Pe măsură ce vitezele de deplasare cresc apar desprinderi ale pantografului și implicit arcuri electrice. Câmpul termic al ansamblului „pantograf – fir de contact” și influența parametrilor de material asupra temperaturii pot fi studiate cu o bună aproximare folosind modelul cilindric.

Concluzii privind instalațiile pentru studiul ansamblului „pantograf – fir de contact”

Literatura tehnică națională nu prezintă în detaliu soluțiile constructive ale sistemelor de încercare pentru studiul fenomenelor care apar în ansamblul pantograf - fir de contact, acestea fiind doar semnalate în teze de doctorat sau alte publicații cu circulație restrânsă.

Instalațiile analizate nu au fost destinate unor cercetări de anvergură ale firmelor constructoare de pantografe sau ale firmelor care repară locomotivele electrice. Alte instalații, pentru care sunt disponibile mai multe date constructive, au fost concepute numai pentru studiul mecanismelor de acționare a pantografelor. Se poate trage concluzia că, la nivel național, nu există un stand, un echipament, un sistem profesional cu care să poată fi studiat din punct de vedere electric și termic ansamblul „pantograf – fir de contact”.

Contribuții personale

Contribuții metodologice

În cadrul tezei de doctorat a fost analizat din punct de vedere constructiv ansamblul suspensie catenară – pantograf. S-au prezentat tipuri de suspensii catenare utilizate pe plan internațional și național, condițiile electrice și mecanice impuse.

S-au identificat elementele componente ale unui pantograf, soluții și tendințe constructive pentru domeniul vitezelor mari. S-au analizat benzile de frecare realizate din diferite materiale prezentându-se importanța materialului folosit în construcția lor, având în vedere că o rupere poate agăța firul de contact și poate provoca avarii atât pantografului cât și liniei de contact.

Cu ajutorul relațiilor teoretice din literatura de specialitate a fost prezentată o analiză micro și macrogeometrică a contactelor electrice. Au fost identificate și prezentate modelele matematice folosite în literatura de specialitate pentru studiul contactelor fixe și alunecătoare.

Pentru studierea repartiției înălțimii asperităților benzilor din grafit aplicate pe pantograf s-a elaborat o metodologie specifică constând în înregistrarea diagramei rugozităților cu ajutorul unui rugozimetru digital și utilizarea unei lupe software pentru mărirea locală a diagramei și numărarea asperităților.

Întrucât în teză au fost realizate simulări numerice 2D și 3D având la bază metoda elementului finit au fost prezentate principiul de rezolvare a unei probleme cuplate și metodologia analizei cu element finit. A fost definit termenul „probleme cuplate” și prezentată o structură generală simplificată a problemelor de câmp. Au fost prezentate etapele rezolvării unei probleme 2D și 3D folosind metoda elementelor finite, avantajele și dezavantajele metodelor de predicție a diferitelor fenomene (experiență, calcul analitic și calcul numeric).

Pentru determinarea legii de variație a coeficientului global de cedare a căldurii h_{Σ} în funcție de temperatura firului de contact s-au utilizat rezultatele experimentale obținute la încălzirea firului de contact în curent alternativ pentru diferite valori ale curentului electric, apoi, utilizând funcția de minimizare în programul de calcul tehnic Mathcad s-a validat legea obținută, prin simulări numerice 2D și 3D, folosind metoda elementelor finite.

Au fost estimate erorile obținute la încălzirea în curent alternativ a firului de contact prin compararea rezultatelor experimentale și numerice (2D și 3D). S-au prezentat valorile intensității curentului electric pentru care erorile au valori acceptabile.

Contribuții teoretice

S-au analizat modelele matematice prezentate în literatura de specialitate și s-au făcut comparații între acestea.

Deoarece valorile rezistenței electrice de contact sunt dispersate între limite largi și greu de estimat s-a considerat o formă sferică pentru asperități și distribuția înălțimilor acestora normală și s-a prezentat un model matematic pentru studiul rezistenței electrice de contact.

S-a pus în evidență influența distribuției statistice asupra variației presiunii în contact, folosind relațiile teoretice și mărimile statistice determinate experimental.

S-au determinat teoretic valorile coeficienților de material c și m pentru benzi de frecare din grafit, considerând distribuția asperităților normală și o formă sferică pentru asperități.

S-a stabilit tipul repartiției înălțimii asperităților benzilor din grafit aplicate pe pantograf folosind testele *Kolmogorov*, *Fischer-Snedecor* și *Student*.

S-au obținut valorile variabilei aleatoare a testului Kolmogorov λ_n prin rezolvarea ecuațiilor 3.17 – 3.21. S-a verificat egalitatea dispersiilor și mediilor cu *Testul Fischer-Snedecor* respectiv *Testul T student* pentru determinarea unei repartiții cumulate corespunzătoare.

S-a determinat legea de variație a coeficientului global de cedare a căldurii h_{Σ} în funcție de temperatura firului de contact al suspensiei catenare. Pentru determinarea experimentală a legii de variație a coeficientului global de cedare a căldurii h_{Σ} corespunzător firului de contact, autorul a propus și a aplicat un algoritm dedicat, s-a utilizat funcția de minimizare din programul de calcul tehnic Mathcad și s-a obținut o lege probabilistică.

Contribuții experimentale

S-a realizat un model fizic experimental pentru studiul rezistenței electrice de contact a ansamblului „pantograf – fir de contact”. Cu ajutorul acestui model s-au determinat pe cale experimentală variația rezistenței electrice de contact cu forța de apăsare și parametrii de material c și m . Valorile experimentale ale exponentului m obținute pentru cele 3 benzi de frecare din grafit cu grad de uzură diferit au fost comparate cu valorile calculate analitic.

S-a determinat experimental legea de variație a coeficientului global de cedare a căldurii h_{Σ} cu temperatura prin încălzirea firului de contact în curent alternativ pentru diferite valori ale intensității curentului electric, iar legea de variație a fost validată prin simulări numerice 2D și 3D folosind metoda elementelor finite.

S-a determinat numeric încălzirea firului de contact în curent alternativ cu ajutorul unui model 2D și s-a propus rezolvarea unei probleme cuplate câmp electromagnetic – câmp termic.

S-a studiat experimental (fig. 5.8 – 5.9) și numeric (fig. 4.13 - 4.14) influența efectului pelicular asupra încălzirii firului de contact. A fost obținută evoluția temperaturii în firul de contact pentru intensități ale curentului electric alternativ și continuu 201A, 301A.

S-au studiat numeric câmpul termic al ansamblului „pantograf – fir de contact” și influența parametrilor de material asupra temperaturii considerând cazul discului de contact și cazul particular de încălzire datorită apariției arcului electric.

S-a realizat un model 3D pentru studiul regimul termic staționar al firului de contact. Rezultatele simulărilor numerice 3D (fig. 4.31 - 4.32) au fost obținute utilizând pentru coeficientul global de cedare a căldurii relația (5.8) iar pentru termenul sursă valorile rezultate prin rezolvarea unei probleme 2D, câmp magnetic alternativ.

S-a determinat experimental temperatura în contactul „pantograf – fir de contact” considerând cazul locomotivei electrice în staționare. A fost pus în evidență câmpul termic în contact cu ajutorul unei camere cu termoviziune.

Contribuții privind realizarea instalațiilor pentru studiul ansamblului “pantograf-fir de contact”

S-a construit un dispozitiv special pentru reglarea și măsurarea forței de apăsare și s-a utilizat un echipament industrial pentru măsurarea rezistenței de contact în patru puncte. Cu rezultatele obținute s-au determinat experimental valorile coeficientului de material m pentru cele 3 benzi de frecare din grafit.

S-a realizat o instalație experimentală pentru studiul influenței efectului pelicular asupra încălzirii firului de contact în curent continuu și alternativ pentru aceleași valori ale intensității curentului electric utilizate și în simulările numerice, 201 A respectiv 301 A.

S-a propus un stand pentru studiul complex al ansamblului “pantograf - fir de contact” care face obiectul unei Cereri de Brevet de Invenție și care poate reproduce:

- mișcarea relativă în lungul căii de rulare – prin rotirea cu viteză variabilă a discului pe care se află firul de contact și zig - zagul suspensiei catenare – prin deplasarea cu viteză variabilă la stânga și la dreapta a pantografului;
- forța de contact variabilă;
- arcurile electrice care apar ca urmare a separării firului de contact de pantograf – prin folosirea unui sistem cu vibrații care să forțeze apariția acestora.

S-a realizat un sistem de măsurare a temperaturii în mai multe puncte plasate în apropierea zonei studiate, utilizat și în alte cercetări în care autorul a participat ca membru în echipă. Și această soluție face obiectul unei Cereri de Brevet de Invenție.

Diseminarea rezultatelor obținute

Rezultatele de bază obținute în teză au făcut obiectul a 12 lucrări științifice, 7 ca prim autor și 5 coautor, 2 Cereri de Brevet de Invenție și 3 contracte de cercetare, fiind expuse și discutate la conferințe naționale și internaționale, publicate în reviste de specialitate sau în volumele conferințelor.

Direcții de cercetare propuse

Având în vedere valoarea determinată experimental pentru exponentul m din relația de dependență a rezistenței de contact de forța de apăsare pentru contactul “banda de frecare din grafit - fir de contact din cupru”, se poate studia contactul cu ajutorul unui model care să considere suprafața de contact cilindrică și regimul de deformare plastică.

Modelul fizic al ansamblului „pantograf – fir de contact” s-a utilizat pentru studiul variației rezistenței de contact cu forța de apăsare pentru trei benzi de frecare din grafit și cu diferite grade de uzură. Acesta se va utiliza pentru continuarea cercetărilor privind influența compoziției benzilor de frecare asupra rezistenței de contact.

Se poate studia regimul termic staționar al firului de contact cu ajutorul modelului matematic și modelului 2D corespunzătoare problemei cuplate câmp electromagnetic – câmp termic ținând cont de variația rezistivității electrice cu temperatura.

Pentru studiul numeric al regimului termic tranzitoriu corespunzător ansamblului „pantograf - fir de contact” se poate utiliza modelul cilindric al zonei de contact.

Sistemul propus pentru studiul experimental al ansamblului „pantograf - fir de contact” poate fi utilizat pentru continuarea cercetărilor privind:

- determinarea coeficientului de frecare pentru diferite condiții de lucru;
- studiul ratei pierderilor în contact;
- studiul uzurii materialelor aflate în contact în funcție de viteza de alunecare, natura materialelor, intensitatea curentului electric;
- studiul influenței arcurilor electrice asupra ansamblului;
- efectul intensității curentului electric asupra frecării și uzurii;
- dezvoltarea unor noi materiale pentru banda de frecare a pantografului care să ofere performanțe mai bune de captare la mare viteză.

Bibliografie

- [1] Alboteanu L., **Ocoleanu C. F.**, Novac Al., Manolea Gh., *Remote monitoring system of the temperature of detachable contacts from electric cells*, 10th International Conference on Applied and Theoretical Electricity, ICATE 2010, Craiova, România, 2010.
- [2] Alkram F. Batti, Abdul-Karim Z. Mansur, Fadhil A. Abood, Essam M. Abdul-Baki, *Electromagnetic Thermal Coupled Analysis of a Linear Induction Furnace with Rotational Symmetry*, Journal of Engineering and Development, Vol. 12, No. 1, 2008.
- [3] Babicov M.A., *Aparate electrice, partea I, Bazele teoriei, traducere din limba rusă*, Editura energetică de stat, 1953.
- [4] Baraboi A., Furnică E., *Le regime permanent de l'échauffement d'un contact électrique a point de type glissant*, Buletinul Institutului Politehnic din Iași, 1989.
- [5] Baraboi A., Adam M., *L'échauffement en regime permanent de la piece en graphite d'un contact électrique glissant*, Buletinul Institutului Politehnic din Iași, pp. 33-37, 1990.
- [6] Becker K., Resch U., Zweig B. W., *Optimizing high-speed overhead contact lines*, Elektrische Bahnen, pp. 243–248, September, 1994.
- [7] Bucca G, Collina A., *A procedure for the wear prediction of collector strip and contact wire in pantograph–catenary system*, Wear 266, pp. 46–59, 2009.
- [8] Burwell J.T., Strang C.D., *The increment friction coefficient – a nonhydrodynamic component of boundary lubrication*, J. Appl., Phys.20, 1949.
- [9] Canudas de Wit C, Olsson H, Astrom KJ, Lischinsky P., *A new model for control of systems with friction*, IEEE Transactions, Automatic Control, 40(3), pp. 419–25, 1995.
- [10] Cârstea D., Valli A., Cârstea I., *Simulation of coupled magnetic and thermal fields in the electromagnetic devices*, The 6th International Power Systems Conference, Timișoara, România, pp. 107-112, 2005.
- [11] Chang W.R., Etsion I., Bogy D.B., *An elastic-plastic model for the contact of rough surfaces*, ASME J. Tribology, 109, pp. 257-263, 1987.
- [12] Chi T., Ballinger T., Olds R., Zecchino M., *Surface Texture Analysis Using Dektak Stylus Profilers*, 2004.
- [13] Cho Yong Hyeon, *Numerical simulation of the dynamic responses of railway overhead contact lines to a moving pantograph, considering a nonlinear dropper*, Journal of sound and vibration 315, 2008.
- [14] Chunju T., Zhenhua C., Jintong X., *Thermal wear and electrical sliding wear behaviours of the polyimide modified polymer-matrix pantograph contact strip*, Tribology International 42, pp. 995-1003, 2009.
- [15] Cismaru D. C., Nicola D. A., Manolea Gh., *Locomotive electrice. Rame si trenuri electrice*, Ed. SITECH, 2009.
- [16] Cividjian G.A., *Aparate electrice, vol. I*, Reprografia Univ. din Craiova, 1979.
- [17] Cividjian G.A., *Modeles Statistiques et Fiabilite*, Ed. Universității din Craiova, 2003.
- [18] Cividjian G.A., Pascu I., Bunescu A., Matei D., Dolan A., *Experimental study of the resistance of flat Cu-W contacts*, XII-th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA, Proceedings, Vol.1, 31 May-1 June, Bulgaria, pp.58-65, 2001.
- [19] Cividjian G., Broscăreanu D., *Thermal field propagation in one, two and three dimensional half space*, XI-International Workshop on Optimization and Inverse Problems in Electromagnetism, Sofia, Bulgaria, 2010.
- [20] Collina Andrea, Bucca Giuseppe, *Procedure for the wear prediction of collector strip and contact wire in pantograph-catenary system*, Wear 266, 2008, pp. 59-64.
- [21] Collina Andrea, Bruni Stefano, *Numerical simulation of pantograph-overhead equipment interaction*, Vehicle System Dynamics, vol.38, no.4, pp. 261-291, 2002.
- [22] Cooper M. G., Mikic B. B., Yovanovich M. M., *Thermal contact conductance*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 12, pp. 279—300, 1969.

- [23] Coza Andreea, *These de doctorat-Railways EMC: assessment of infrastructure impact*, Lille, 2005.
- [24] Dahl Pr., *Measurement of solid friction parameters of ball bearings*, 6th annual symposium on incremental motion, control system and devices, University of Illinois, 1977.
- [25] Dai L., Lin J., Liu Y., Ding X., *Calculation and study on strip cubage temperature of pantograph pan in sliding electric contact abrasion*, Journal of the China Railway Society, Vol. 24, no. 5, pp. 56-61, 2002.
- [26] Dankowicz H., *Modelling of dynamic friction phenomena*, ZAMM, 79, pp. 399–409, 1999.
- [27] Drezner Z., Turel O., Zerom D., *A modified Kolmogorov-Smirnov test for normality*, Munich Personal RePEc Archive, MPRA 2008.
- [28] Drăghici A., Călceanu I., *Cartea mecanicului de locomotive electrice*, 1980.
- [29] Feng I., Ming, *The influence of surface activity on friction and surface damage*, Wear 4, 1961.
- [30] Feng Z., Zang M., Xu Y., *Effect of the electric current on the friction and wear properties of the CNT-Ag-G composites*, Carbon, pp.2685-2692, 2005.
- [31] Greenwood J. A., Williamson B. P., *Contact of nominally flat surfaces*, Proc., Roy. Soc., London, A295, pp. 300–319, 1966.
- [32] Hacman L., *Cercetări privind mecanismele pantograf utilizate la mijloacele de transport*, Teză de doctorat, Craiova, 2010.
- [33] Hall L. D., Mba D., Bannister R. H., *Acoustic emission signal classification in condition monitoring using the Kolmogorov-Smirnov statistic*, Journal of Acoustic emission, Vol. 19, pp. 209-228, 2001.
- [34] Hayashiya, Hitoshi; Mandai, Tsuyoshi; Nakajima, Hitoshi; Ideno, Ichiro *Influence of the Arc between the Contact Wire and the Pantograph on the Material of the Contact Strip*, IEEJ Transactions on Power and Energy, Volume 127, Issue 6, pp. 718-724, 2007.
- [35] He D.H., Manory R., Grady N., *Wear of railway contact wires against current collector materials*, Wear 215, pp. 146–155, 1998.
- [36] He D.H., Manory R., Sinkis H., *A sliding wear tester for overhead wires and current collectors in light rail systems*, Wear 239, pp. 10–20, 2000.
- [37] Hortopan, G., *Aparate electrice*, Editura Tehnică, București, 1993.
- [38] Hortopan, G., *Aparate electrice-teorie, proiectare și încercări*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1972.
- [39] Jamari J., Schipper D.J., *Experimental investigation of fully plastic contact of a sphere against a hard flat*, Transactions of the ASME, Vol. 128, April 2006.
- [40] Kim E. I., Omelchenko V. T., Harin S. N., *Mathematical models of thermal processes in electric contacts*, Nauka, Alma Ata, 1977.
- [41] Kubo Sh., *Wear tester for current collecting materials for high speed railway*, Railway Technology Avalanche, no. 6, September 1, 2004.
- [42] Landi A., Menconi L., Sani L., *Hough transform and thermo-vision for monitoring pantograph-catenary system*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 220, no. 4, pp. 435-447, 2006.
- [43] Ling F. F., *On asperity distributions of metallic surfaces*, Journal of Applied Physics, vol. 29, no. 8, 1958.
- [44] Liou J. L., Lin J. F., *A microcontact model developed for asperity heights with a variable profile fractal dimension, a surface fractal dimension, toposity and non-gaussian distribution*, Journal of Mechanics, Vol. 25, No. 1, 2009.
- [45] Ma X. C., He G. Q., He D. H., Chen C. S., Hu Z. F., *Sliding wear behaviour of copper-graphite composite material for use in maglev transportation system*, Wear 265, pp. 1087-1092, 2008.
- [46] Majid Bahrami, *These - Modeling of Thermal Joint Resistance for Sphere-Flat Contacts in a Vacuum*, Waterloo, Ontario, Canada, 2004.
- [47] Majid Bahrami, Yovanovich M., Culham J., *A compact model for contact of rough spheres*, ASME J. of Tribology, Vol. 127, No. 4, pp. 884 – 889, 2005.
- [48] Manfred Lindmayer, *Modeling of contact heating and erosion under arc influence*, 24th International Conference on Electrical Contacts, Saint-Malo, France 2008.
- [49] Manolea, Gh., Drighiciu, A.M., Nedelcut, C., *Experimental results regarding driving of compressors in the auxiliary services of electrical locomotives*, CNAE'98, Craiova, octombrie, 1998.
- [50] Manolea Gh., *Bazele cercetării creative*, Ed. AGIR, București, 2006.
- [51] Manolea Gh., *Le transfert technologique - solution de valorification des resultats des recherches scientifiques*, Buletinul Institutului Politehnic din Iași, 2006.
- [52] Manolea, Gh., Țapu D., Nedelcuț C., *Rezultate privind conceperea unui vehicul inteligent pentru transportul de călători*, SINGRO București, 2008.
- [53] Mihăilescu D., *Locomotive și trenuri electrice cu motoare de tracțiune asincrone*, E.D.P., Buc.
- [54] Ming Feng-I., *Metal Transfer and Wear*, Journal of Applied Physics., Vol. 23, 1952.
- [55] Novac Al., Manolea Gh., Ravigan Fl., Alboteanu L., **Ocoleanu C. F.**, Șulea F., *Sistem de monitorizare de la distanță a temperaturii contactelor electrice demontabile de curenți intensi*, Cerere de Brevet de Invenție, OSIM, nr. A00939 din 05.10.2010.
- [56] Nicola D., Cismaru D., *Tracțiune electrică, fenomene, modele, soluții*, Vol.1, SITECH, Craiova, 2006.

- [57] Nițucă C., *Teză de doctorat – Probleme de captare a curentului de la linia de contact pentru vehicule acționate electric*, Iași 2003.
- [58] Nițucă C., Cantemir L., Chiriac G., Aparaschivei A., *Considerations regarding the influence of the inertia of the pantograph head the interaction pantograph-catenary*, Buletinul Institutului Politehnic Iași, Tom XLVIII, Fasc. 5 C, pg. 287-292, 2002.
- [59] Nițucă C., Cantemir L., Gheorghiu Alina, Chiriac G., *Modeling and simulation of the interaction pantograph-catenary*; The 4th International Conference on Electromechanical and power systems SIELMEN 2003, Vol III, pg. 47-50, Chișinău 26-27 september 2003.
- [60] Nițucă C., Cantemir L., Gheorghiu Alina, Chiriac G., *Simulation of the pantograph-catenary interaction*; The 4th International Conference on Electromechanical and power systems SIELMEN 2003, Vol III, pg. 51-54, Chișinău 26-27 september 2003.
- [61] Nițucă C., Cantemir L., Chiriac G., Gheorghiu Alina, *Aspects regarding the influence of the temperature range over the contact line*, Buletinul Institutului Politehnic Iași, 2004.
- [62] Nițucă C., Rachid Ahmed, Cantemir L., Chiriac G., Gheorghiu Alina, *Constructive and experimental aspects regarding the electric power collecting for very high speed traction*, The 6th International Conference on Electromechanical and power systems, Chișinău, 2007.
- [63] **Ocoleanu C.F.**, Popa I., Manolea Gh., *Study of the Skin Effect Influence on Electric Railway System Supply Line Heating*, Environmental problems and development, Proceeding of the 1st WSEAS International Conference on Urban Rehabilitation And Sustainability, Bucharest, Romania, 2008.
- [64] **Ocoleanu C.F.**, Popa I., Manolea Gh., Dolan A.I., *Temperature measurement in contact pantograph-AC contact line*, Proceedings of 11th WSEAS International Conference on Automatic, Control, Modeling and Simulation, Istanbul, Turkey, pp. 184 – 188, May 30-June 1, 2009.
- [65] **Ocoleanu C.F.**, Popa I., Manolea Gh., Dolan A.I., Vlase S., *Temperature investigation in contact pantograph-AC contact line*, International Journal of circuits, systems and signal processing, Issue 3, Volume 3, pp. 154-163, 2009.
- [66] **Ocoleanu C. F.**, Manolea Gh., Cividjian G.A., *Experimental study of contact resistance variations for pantograph-contact line contact*, Proceedings of WSEAS International Conference on Risk Management, Assessment and Mitigation, Bucharest, Romania, pp. 101-105, 2010.
- [67] **Ocoleanu C. F.**, Manolea Gh., Cividjian G.A., Bulucea A., *Numerical Study of Thermal Field of Pantograph Contact Strip-Contact Line Wire Assembly*, WSEAS International Conferences, Kantaoui, Sousse, Tunisia, May 3-6, 2010.
- [68] **Ocoleanu C. F.**, Manolea Gh., Cividjian G., Dolan A. I., *Study of unevenness height distribution for graphite pantograph contact strip*, 10th International Conference on Applied and Theoretical Electricity, ICATE 2010, Craiova, România, October 8-9, 2010.
- [69] **Ocoleanu C. F.**, Manolea Gh., Nicola D. A., *Sistem de încercare ansamblului fir de contact - pantograf din structura locomotivelor electrice*, Cerere de Brevet de Invenție, UCV nr. 35/11.10.2010.
- [70] Onea Romulus, *Construcția, exploatarea și întreținerea instalațiilor fixe de tracțiune electrică feroviară*, ASAB, București, 2004.
- [71] Olsson H., *Control systems with friction - Doctoral thesis*, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, 1996.
- [72] Ostlund S., Gustafsson A., Buhrkall L., Skoglund M., *Condition monitoring of pantograph contact strip*, 4th IET International Conference on Railway Condition Monitoring, pp. 37 – 41, 2008.
- [73] Peicov Al., Tușaliu P., Popa I., Leoveanu M., Chelaru R., *Aparate electrice – îndrumar de laborator*, Universitatea din Craiova, Facultatea de Electrotehnică.
- [74] Pizzigoni B., Collina A., Flapp ., Melzi S., *Effect of metallised carbon content of collector strip on the wear of contact wire-collector strip pair in railway systems*, Tribotest, vol. 13, Issue 1, pp. 35-47, 2006.
- [75] Popa A., S., Argeșanu V., *Tribologic aspects concerning the contact surface roughness, in case of sliding electric contacts*, The annals of University “Dunărea de Jos” Of Galați, Fascicle VIII, Tribology, 2004.
- [76] Popescu L., *Aparate electrice 1- curs*, Universitatea „Lucian Blaga, Sibiu”, Facultatea de inginerie, 2002.
- [77] Popa I., *Modelisation numerique du Trasfert Thermique-Methodes des Volumes Finis*, Editura Universitaria, Craiova, 2002.
- [78] Popa I., *Modelisation numerique du Trasfert Thermique-Methodes des Volumes Finis*, Editura Universitaria, Craiova, 2008.
- [79] Popa I., Cauți I., Floricău D., **Ocoleanu C. F.**, *Modeling and Optimization of High Currents Dismountable Contacts*, SIELMEN 2007, Chișinău, Republic of Moldova, Annals of the University of Craiova, pp. 76 – 81, 2007.
- [80] Popa I., Cauți I., Floricău D., **Ocoleanu C. F.**, *Modeling of High Currents Dismountable Contacts*, Przegląd Elektrotechniczny–Conferencje, pp. 44 – 47, 2007.
- [81] Popa I., Cauți I., Manolea Gh., **Ocoleanu C. F.**, Floricău D., Vlase S., *Numerical modeling and experimental results of high currents dismountable contacts*, PROCEEDINGS 23rd European Conference on Modelling and Simulation ECMS 2009, June 9th – 12th, Madrid, Spain, pp. 745-750, 2009.
- [82] Ragnar Holm, *Electric Contacts*, 4-th ed., Springer-Verlag, Berlin/New York, 1967.

- [83] Rauter Frederico Grases, Pombo Joao, Ambrosio Jorge, Chalansonnet Jerome, Bobillot Adrien, Pereira Manuel Seabra, *Contact model for the pantograph-catenary interaction*, Journal of system, design and dynamics, vol.1, no.3, 2007.
- [84] Schunk Bahntechnik , *Current Collection Systems for Catenary Dependent Vehicles*, 2000.
- [85] Soren Andersson, Anders Soderberg, Stefan Bjorklund, *Friction models for sliding dry, boundary and mixed lubricated contacts*, Tribology International, 40, pp.580–587, 2007.
- [86] Stribeck R., *Die Wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager*, Z Ver Dtsch Zucker-Ind 1902, 45(36).
- [87] Timotin, Al., *Lecții de bazele electrotehnicii*, Editura Didactica si Pedagogica, Bucuresti, 1970.
- [88] Tsuchiya Hiroshi, *Development of a new pantograph contact strip for ultrahigh speed operations*, Railway Technology Avalanche, no. 14, August 10, 2006.
- [89] Tsukizoe T., Hisakado T., *On the mechanism of contact between metal surfaces-the penterating depth and the average clearance*, Journal of Basic Engineering, vol. 87, no.3, pp. 666—674, 1965.
- [90] Tsukizoe T., Hisakado T., *On the mechanism of contact between metal surfaces: Part2 - the real area and number of contact points*, Journal of Lubrication Tech., pp. 81—88, 1968.
- [91] Turecek Pavel, *The methods of monitoring a sliding contact quality and their sensitivity on mechanical stimulus*, Doctoral Degree Programme (2).
- [92] Tu Chuan-jun, Chen Zhen-hua, Chen Ding, Yan Hong-ge, He Feng-yi, *Tribological behavior and wear mechanism of resin-matrix contact strip against copper with electrical current*, Transactions of nonferrous metals society of China, 18, pp. 1157-1163, 2008.
- [93] Usuda Takayuki, *Estimation of wear and strain of contact wire using contact force of pantograph*, QR of RTRI, vol. 48, No. 3, aug. 2007.
- [94] Wang Yaw-Juen, *Analysis of the Skin Effect for Calculating Frequency-Dependent Impedance of the TRTS Power Rail*, Proc. Natl. Sci. Counc., Vol. 23, pp. 419-428, 1999.
- [95] Williamson J. B., Pullen J., Hunt R. T., *The shape of solid surfaces*, Surface Mechanics, ASME, New York, pp. 24—35, 1969.
- [96] www.buhrkall.dk/OHs%20Lars%20Buhrkall%20Paris%206-11-2003.pdf
- [97] www.documents.epfl.ch/users/a/al/allenbac/www/documents/ResuT111.pdf
- [98] www.esat.kuleuven.be/electa/publications/fulltexts/pub_467.pdf
- [99] www.Europac EUROPAC-UIC-D07-dissemination_D2224
- [100] www.faiweley.fr/fr/pub/categories_produits/17a.pdf
- [101] www.faiweleytransport.com/uk/pub/categories_produits/17c.pdf
- [102] www.faiweley.com/fr/pub/produits/30a.pdf
- [103] www.kilowattclassroom.com/Archive/GndTestArticle.pdf
- [104] www.lafn.org/~dave/trans/rail/electric_rr.html#ss4.1
- [105] www.mitutoyo.co.uk/Mit/downloads/form/E4164-178-SJ301.pdf
- [106] www.mocad.cstb.fr/simulations.htm
- [107] www.morgancarbon.com
- [108] www.PanTrac 2008_Transit Current Collectors_Brochure.pdf
- [109] www.ptc.com/products/proengineer
- [110] www.ptc.com/products/mathcad
- [111] www.quickfield.com
- [112] www.quickfield.com/free_doc.htm
- [113] www.schunk.com
- [114] www.shop.micronplus.ro/pdf/Brosura%20camere%20FLUKE%20TiR%20series.pdf
- [115] www.sohim.by/en/catalog/carbon/en/cccompos/
- [116] www.teza_capitol-modelarea_cibernetico_econ.pdf
- [117] www.ursi.org/Proceedings/ProcGA02/papers/p0096.pdf
- [118] <http://www.usinenouvelle.com/industry/omicron-electronics-8607/micro-ohmmeter-cpm-p37956.html>
- [119] *** Contract de cercetare 21-024/18.09.2007, PARTENERIATE, *Sistem de monitorizare locală și de la distanță a contactelor electrice de curenți intensi, pentru eliminarea avariilor datorate contactului imperfect și creșterea securității în alimentarea cu energie.*
- [120] *** Grant CEEX 126/2006, *Cercetări privind realizarea unui vehicul inteligent pentru transportul sigur, confortabil și eficient de călători.*
- [121] *** Contract 269/29.10.2008, Program INOVARE 2008, *Tehnologie eficientă de exploatare mecanizată a cărbunelui cu banc subminat la minele din Valea Jiului aliniată la performanțele înregistrate în țările UE.*
- [122] *** Contract 22106/2008, Program PARTENERIATE, *Analiza eficienței energetice a utilizării acționărilor cu turație variabilă în instalațiile industriale.*