

INFLUENȚA FACTORILOR CONSTRUCTIVI ȘI FUNCȚIONALI ASUPRA REZISTENȚEI MECANICE LA SOLICITĂRI STATICE ȘI VARIABLE A CONDUCTOARELOR DE ÎNALTĂ TENSIUNE

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnica Timișoara

în domeniul de doctorat Inginerie Mecanică

autor ing. Daniel Vasile ACHIRILOAIEI

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Ion DUMITRU

luna 12 anul 2018

Prezenta teză de doctorat cuprinde 7 capitole, 147 de pagini, 114 figuri și diagrame, 29 de tabele, 95 de titluri bibliografice.

Tematica tezei se încadrează în noile direcții de cercetare privind transportul și distribuția energiei electrice, abordând conceptul durabilității conductoarelor electrice de înaltă tensiune în condițiile sarcinilor variabile generate de vibrațiile eoliene. Având în vedere duratele lungi de exploatare ale acestor linii aeriene și condițiile impuse de mediul înconjurător, se evidențiază o serie de elemente care stau la baza apariției fenomenului de oboseală. Lucrarea sintetizează problematicile mecanismelor de degradare și efectele manifestate de acestea asupra conductoarelor de tipul 450/75 din componența LEA 220kV, în condițiile de exploatare specifice zonei de vest a României.

Teza de doctorat prezintă un caracter interdisciplinar prin îmbinarea cercetării utilizând informații teoretice și experimentale din următoarele domenii: mecanică și rezistența materialelor, vibrații, mecanica fluidelor, energetică, chimie, fiabilitate, măsuratori terestre, informatică, matematică.

Principalele obiective ale tezei sunt:

- sistematizarea și corelarea materialului bibliografic ce permite o urmărire logică a problematicii durabilității conductoarelor LEA;
- identificarea factorilor constructivi și ai mediului de lucru care influențează durabilitatea conductoarelor din zona de vest a României;
- realizarea unor echipamente și dispozitive care să permită folosirea bazei materiale a laboratorului de Rezistența Materialelor pentru studii experimentale pe sârme, în condiții specifice liniilor electrice aeriene;
- efectuarea de încercări experimentale asupra unor conductoare de oțel-aluminiu, asupra sârmelor componente și interpretarea rezultatelor;
- cercetări privind variația proprietăților mecanice a sârmelor din componența conductoarelor după perioade lungi de exploatare;
- identificarea zonelor de inițiere și propagare a fisurilor de oboseală, precum și particularitățile pe care acestea le prezintă în cazul conductoarelor;
- analiza stării de tensiuni și deformații din zonele de contact ale conductorului prin dezvoltarea unei metodologii de modelare numerică cu elemente finite;
- studiu experimental pe conductoare aeriene cu privire la rezistența la oboseală.

În **Capitolul 1** al lucrării, se prezintă o trecere în revistă a stadiului actual al cercetărilor privind creșterea siguranței în exploatare a liniilor electrice aeriene și identificarea zonelor critice, precum și a proceselor care duc la ruperea prematură a acestora. S-au

prezentat tipurile de solicitări mecanice ale conductoarelor produse de încărcările statice și tipurile de oscilații generate de vibrațiile induse de vânt. Se evidențiază complexitatea și dificultățile de corelare a caracteristicilor mecanice, a solicitării sârmelor și a comportării conductorului în ansamblu.

Capitolul 2 prezintă elementele principale privitoare la construcția, geometria precum și materialele care compun conductoarele (sârme, toroane, miez, tipuri de toroane, structuri speciale) cu evidențierea unor aspecte teoretice ale unor caracteristici mecanice, a solicitării sârmelor și comportarea conductorului în ansamblul LEA. După ce sunt prezentate elementele constructive, sunt analizate tehnologiile de fabricație ale sârmelor de aluminiu și oțel (trefilarea sârmelor), procesele tehnologice prin care sârmele de oțel și de aluminiu sunt răsucite pentru a forma conductoarele (procedeele de toronare), identificându-se influența tehnologiilor de fabricație asupra caracteristicilor mecanice ale conductoarelor.

Se face o trecere în revistă a unor aspecte legate de particularitățile geometrice și de solicitările la care este supus un conductor. Sunt analizate aspectele analitice ale unghiurilor de așezare a sârmelor asupra rezistenței la contact a acestora. Procesele tehnologice (mecanice, termochimice, chimico-termice, electrochimice) conduc la apariția unor defecte care se manifestă prin modificări structurale ale sârmelor. Trefilarea crează o serie de modificări ale rețelei cristaline de tip punctual, liniar sau de suprafață, îmbunătățește rezistența mecanică și duritatea, dar scade ductilitatea, tenacitatea și rezistența la oboseală. În procesul tehnologic de dispunere elicoidală a straturilor, sârmele sunt supuse unor forțe exterioare având direcție axială și normală pe cilindrul ce le caracterizează. Acest proces produce eforturi în masa materialului, iar la exterior crează zone de tip concentratori de tensiune sub forma unor linii, în cazul sârmelor aflate pe același strat, și punctiforme, interstrat.

În prima parte a **Capitolului 3** se face descrierea tipului și caracteristicilor conductoarelor și a sârmelor componente care fac subiectul cercetării, respectiv conductoare noi și conductoare utilizate timp de 42 de ani, în cadrul LEA Timișoara-Arad. Totodată, se prezintă o serie de analize făcute pe sârmele celor două stări ale conductoarelor constând în determinarea stării suprafețelor, a prezenței aglomerărilor de elemente chimice și de particule solide (folosind spectroscopia de radiație X cu dispersie de energie). S-au evidențiat modificările proprietăților de material pentru sârmele din componența conductoarelor utilizate în transportul de energie (cu ajutorul analizei termice diferențiale). Se prezintă o serie de particularități ale coroziunii conductoarelor după perioade lungi de exploatare precum și o serie de factori caracteristici mediului înconjurător din zona de vest a țării noastre. Pe această bază se pot determina o serie de indici necesari pentru prezicerea duratei de viață preconizată a conductoarelor. Cele de mai sus justifică necesitatea existenței unei atenții deosebite cu privire la existența unor analize viitoare în ceea ce privește efectul de îmbătrânire asupra duratelor de viață ale conductoarelor LEA, personalizate de zona pe care o străbate.

A doua parte a capitolului prezintă un studiu al efectului curgerii aerului peste profilul conductorului cu privire la variația presiunii exercitate asupra acestuia, folosind metoda simulării numerice și simulării experimentale. Pe baza unor programe de calcul s-au efectuat o serie de simulări de curgere la diferite viteze ale vântului, cu ajutorul cărora s-au identificat tipurile și poziția vârtejurilor Karman, modul de alternare al acestora și valoarea presiunii dinamice în diverse puncte de pe suprafața conductorului. Experimental s-a realizat o instalație de curgere a aerului peste profilul conductorului 450/75, folosind un marcator de curgere care a impus o curgere laminară la intrare, cu formare de vârtejuri la ieșire. Cu ajutorul rezultatelor obținute s-au trasat diagramele de variație a presiunii în funcție de viteza de curgere și, pe această bază, s-a propus o ecuație care corelează viteza vântului cu presiunea dinamică aplicabilă la simulările numerice ale stărilor de tensiune din sârmele conductorului.

În partea finală a capitolului se prezintă modul de determinare a amplitudinii tensiunii la încovoiere pentru conductorul 450/75, folosind ecuația Poffenberger–Swart și având la

baza săgeata reală dintr-o deschidere cu lungimea de 258m. Măsurarea săgeților reale s-a efectuat folosind o metodă proprie de determinare a poziției conductoarelor în anumite deschideri de pe traseul LEA – Timișoara-Arad – care au fost repetate în diferite condiții atmosferice. Această metodă folosește tehnici de măsurători geodezice și aparatură cu unde laser de o precizie mult mai ridicată față de metodele clasice.

Metodica a evidențiat variații foarte mari ale sagetilor conductoarelor în decursul unui an, fapt care se reflectă în variații ale tensiunilor de contact din zonele clemelor de fixare. Determinarea săgeților reale a permis aplicarea corectă a calculelor și determinarea amplitudinii tensiunii personalizate de deplasarea pe verticală a conductorului, în condițiile modificării parametrilor de funcționare.

În cadrul **Capitolului 4** sunt prezentate elemente teoretice cu privire la contactul sârmelor din zona clemelor de fixare ale conductorului, elemente de mecanica și fizica contactului în domeniul elasto-plastic și aplicarea teoriei lui Hertz în cazul corpurilor de revoluție. De asemenea, se analizează contactul cilindru-cilindru, cu evidențierea distribuției tensiunilor și deformațiilor din zona de contact, pentru diferite unghiuri de înclinare a celor doi cilindri.

Cea de-a doua parte a capitolului conține o analiză numerică a stării de tensiuni și deformații care a fost făcută cu ajutorul programului de simulare ABAQUS, pe modele numerice care respectă caracteristicile mecanice și dimensionale, la care s-au folosit discretizări fine. Acest studiu numeric al contactului dintre sârmele conductorului constituie o bază de calcul în ceea ce privește apariția și dezvoltarea amprentelor de pe suprafețele sârmelor. Rezultatele teoretice au fost validate experimental cu ajutorul metodologiilor prezentate în Capitolul 5.

Cu ajutorul datelor obținute prin analiza cu elemente finite s-au putut observa zonele unde tensiunile sunt maxime, în cazul contactului dintre sârme, și cum se manifestă efectul creșterii presiunii normale. Astfel, s-a observat că valoarea maximă a tensiunii se înregistrează pe conturul amprentelor, la granița suprafeței de contact. Folosind modulul de analiză cu elemente finite extinse “XFEM” și criteriul de rupere bazat pe tensiunea principală maximă “MaxPS”, s-au determinat punctele de inițiere și propagare a fisurilor dispuse de-a lungul perimetrului amprente. Cu datele prelevate s-au trasat diagramele deformațiilor plastice ce prezintă variațiile tridimensionale ale amprentelor create în zonele de contact. S-a analizat dependența dintre suprafața amprente și adâncimea de penetrare.

Acest studiu are o importanță deosebită, deoarece oferă o înțelegere mai precisă și mai clară a stărilor de deformații și a stărilor de tensiuni la contactul sârmelor, permițând evidențierea unor parametri importanți pentru studiul diferitelor contacte create de unghiurile de amprentare. Acceptând variația liniară a presiunii normale s-a obținut o variație neliniară a tensiunii echivalente precum și modificarea raportului dintre suprafața și profunzimea amprente. Modelarea contactului dintre sârme evidențiază faptul că apariția și dezvoltarea mecanismului de rupere a conductorului nu pot fi înțelese fără o abordare punctuală a fenomenelor care intervin în acest proces. Interpretarea aspectului amprentelor furnizează informații cu privire la regimul de exploatare al conductorului și la crearea premizelor apariției unor ruperi locale.

Capitolul 5 este dedicat în totalitate determinării proprietăților elastice și mecanice ale conductorului 450/75 și a sârmelor componente. Capitolul conține mai multe încercări de laborator cum ar fi tracțiune, amprentare, determinarea durității, forfecare, îndoire alternantă și răsucire. Toate acestea au avut ca scop determinarea modificării caracteristicilor mecanice ale conductorului după 42 de ani de exploatare și a factorilor implicați în procesul de degradare.

În prima etapă se prezintă dispozitivele și echipamentele concepute și adaptate pentru a se putea efectua încercările în condiții similare celor din exploatare. Cea mai mare parte a capitolului cuprinde o analiză făcută pe sârmele noi și folosite în transportul de energie

electrică. Sunt prezentate metodologiile de lucru, materialele folosite, interpretări grafice, calcule și interpretarea rezultatelor. Analiza a cuprins și o nouă interpretare a curbelor caracteristice (σ - ϵ) în punctele corespunzătoare pentru 30, 50, 70 și 85 % din forța de rupere nominală a conductorului 450/75.

Acest studiu a permis o analiză comparativă a conductorului nou și îmbătrânit cu prezentarea unor rezultate concrete și o descriere a influenței manifestate de forma și dimensiunile amprentei asupra durabilității sârmelor. Importanța existenței amprentelor la suprafața sârmelor este evidențiată, în cadrul încercărilor, de apariția și dezvoltarea fisurilor. S-a evidențiat că fisurile inițiate pe marginile amprentelor se dezvoltă într-un plan ce străbate amprenta și prezintă o înclinație de 45° față de axa sârmei. În baza rezultatelor obținute se propun o serie de ecuații, cu ajutorul cărora se face cuantificarea caracteristicilor dimensionale ale amprentei pentru sârme noi și îmbătrânite, în funcție de forța normală și unghiul de înclinare al acestora. Prin aceste ecuații se evidențiază nivelul degradării sârmelor după anumite perioade de exploatare.

Capitolul 6 prezintă un model tridimensional elasto-plastic al ansamblului conductor-clemă de susținere. Pe baza acestui model s-a dezvoltat o metodologie numerică de înaltă fidelitate pentru o analiză precisă a tensiunilor și deformațiilor care apar în zonele de contact a conductoarelor cu clemele de fixare. Existența datelor acestui model nou creat și a rezultatelor sale permite dezvoltarea unor condiții de testare imposibil de creat în laborator, în scopul obținerii de rezultate elocvente. Pentru a îmbogăți efortul de cercetare în rezolvarea problemelor de oboseală, care sunt decisive pentru proiectarea și durata de viață a conductoarelor, acest studiu contribuie la înțelegerea contactului complex și a mecanicii ansamblului conductor-clemă, în vederea dezvoltării unei abordări numerice pentru studierea ruperilor cauzate de oboseala conductoarelor.

O altă contribuție importantă a constat în efectuarea unor încercări experimentale de oboseală a conductoarelor, cu scopul de a completa și valida simulările teoretice. Încercarea la oboseală a constat în analiza comportamentului și a duratei de viață a conductorului nou 450/75 care a fost supus unor solicitări variabile. Acesta s-a făcut prin adaptarea mașinii de încercări MOT 2500kN/13m pentru crearea unui regim variabil al solicitărilor și cu respectarea condițiilor impuse de metoda de testare la oboseală a conductoarelor aeriene IEC 62568. Încercarea la oboseală s-a executat până la ruperea primei sârme, fără a se depăși numărul maxim convențional de 109 cicluri. Cu ajutorul acestei încercări s-a trasat curba de oboseală pentru a putea face predicții asupra duratei de viață a conductorului 450/75 pentru diferite amplitudini ale deplasării.

În vederea evidențierii detaliate a comportamentului la oboseală a conductorului s-au făcut o serie de încercări experimentale pe sârmele de aluminiu pe baza solicitărilor ciclice. Analiza durabilității sârmelor s-a făcut pe baza încercării la oboseală de tracțiune folosind cicluri oscilante pozitive, ce sunt specifice condițiilor de solicitare variabilă create prin exploatarea LEA. Sunt prezentate rezultatele obținute pe sârme noi, sârme amprentate precum și sârme îmbătrânite, prin trasarea curbei Wöhler de oboseală. Acestea sunt prezentate separat, pe fiecare tip de sârmă și prin suprapuneri, pentru a evidenția influența amprentelor și a duratei de exploatare asupra rezistenței la oboseală.

Particularitățile apariției și dezvoltării fisurilor de oboseală și ale aspectului sârmelor rupte prin încercări la oboseală sunt detaliate în ultima parte a Capitolului 6. În general, se evidențiază trei zone ce caracterizează ruperea, fiecare cu caracter distinct. O caracteristică importantă a oboselei, în acest caz, este neomogenitatea distribuției deformațiilor din material, în special, la numere mari de cicluri. S-a constatat o influență puternică a amprentelor asupra rezistenței la oboseală. Rezistența la oboseală scade cu 37% în cazul sârmelor îmbătrânite și, cu până la 62%, în cazul sârmelor amprentate, față de sârmele debitate dintr-un conductor nefolosit. Partea finală prezintă particularități ale aspectului zonelor de rupere ale sârmelor care au fost supuse la încercări la oboseală.

Capitolul 7 prezintă concluziile generale ale lucrării, contribuțiile originale din cadrul tezei, conform cu obiectivele propuse, și expunerea modului de valorificare a rezultatelor obținute în domeniul studiat.

Principalele contribuții se referă la:

- întocmirea unei sinteze documentare asupra stadiului actual al cercetărilor;
- identificarea de factori nefavorabili pentru durata de viață și care se dezvoltă din procesul de fabricație al conductoarelor;
- evaluarea factorilor de mediu specifici zonei de exploatare LEA – Porțile de Fier-Arad – care influențează direct starea conductoarelor;
- elaborarea unui studiu asupra formelor de manifestare a coroziunii sârmelor conductorului 450/75 după o perioadă de 42 de ani de funcționare;
- analiza efectului de degradare a sârmelor prin aplicarea spectroscopiei cu raze X și prin metoda analizei termice;
- realizarea instalației de marcare și evidențiere a curgerii fluxului de aer peste profilul conductorului;
- conceperea modelului numeric pentru determinarea presiunii dinamice aplicate de vânt;
- propunerea ecuației pentru corelarea vitezei vântului cu presiunea dinamică aplicată conductorului;
- analiza numerică a stării triaxiale de tensiuni și deformații la contactul dintre sârmele conductorului 450/75 cu evidențierea punctelor de inițiere a fisurilor;
- modelarea cu elemente finite a ansamblului conductor-clemă (450/75-CSA5) și analiza stării de tensiuni și deformații la solicitări statice și la oboseală;
- elaborarea unui studiu experimental privind influența efectului de îmbătrânire a sârmelor conductorului 450/75 pe baza modificării caracteristicilor mecanice la tracțiune, forfecare, răsucire, încovoiere alternată;
- propunerea de ecuații pentru cuantificarea caracteristicilor dimensionale ale amprentei în funcție de forțele normale aplicate;
- analiza influenței formei și dimensiunilor amprentei asupra rezistenței la tracțiune statică și oboseală a sârmelor conductorului 450/75;
- întocmirea unui set de măsuratori ale conductoarelor LEA în diferite condiții de mediu și determinarea săgeților reale;
- determinarea experimentală a rezistenței la oboseală pentru conductorul 450/75 și încadrarea acestuia în normele EPRI;
- efectuarea unui studiu asupra particularităților structurale și a microtopo-grafiei zonelor de rupere prin oboseală a sârmelor de aluminiu.

BIBLIOGRAFIE

1. [A.A. Fadel, 2012] A.A. Fadel, D. Rosa, L.B. Murça, J.L.A. Ferreira, J.A. Araujo, Effect of high mean tensile stress on the fretting fatigue life of an Ibis steel reinforced aluminium conductor, International Journal of Fatigue, Vol. 42, 2012, pp. 24-34.
2. [Arturo, 2002] Arturo Baltazar, Cesar D., Hernandez-Salazar, Betsabe Manzanares-Martinez, Study of wave propagation in a multiwire cable to determine structural damage, NDT&E International, Vol. 43, 2010, 726-732.
3. [ASTM E-1876-01] ASTM E-1876-01, Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation Technique of Vibration.
4. [Azevedo, 2002] Azevedo C.R.F., Cescon T., Failure analysis of aluminium cable steel reinforced (ACSR) conductor of the transmission line crossing the Parana River, Engineering Failure Analysis, Vol. 9(6), 2002, pp. 645-664.
5. [Azevedo, 2009] Azevedo C.R.F., A.M.D. Henriques, A.R. Pulino Filho, J.L.A. Ferreira, J.A. Araujo - Fretting fatigue in overhead conductors: Rig design and failure analysis of a Grosbeak aluminium cable steel reinforced conductor, Engineering Failure Analysis, Vol. 16, 2009, pp. 136-151.
6. [Blevins, 1984] Blevins R., Fluid Dynamics Handbook, Van Norstrand Reinhold, New York, 1984.
7. [Černín, 2008] Černín K., Reconstruction of conductor movement and monitoring of high voltage, Ph.D thesis, Brno University of Technology, 2009.
8. [Cigada, 1997] Cigada A., Diana G., Flaco M., Fossati F., Manenti A., Vortex induced shedding and wake-induced vibrations in single and bundle cables, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 72, 1997, pp. 253-263.
9. [Cormier, 1999] Cormier NG, Smallwood BS, Sinclair GB, Meda G., Aggressive submodelling of stress concentrations, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 46, 1999, pp. 889-909.
10. [Dumitru, 2003] Dumitru I., Negut N., Elemente de Elasticitate, Plasticitate si Rezistența materialelor, vol. I, Ed. Politehnica, Timișoara, 2003
11. [Dumitru, 2009] Dumitru I., Bazele calculului la oboseală, Editura Eurostampa, Timișoara, 2009
12. [Dumitru, 2017] Dumitru I. Cernescu A. , Oboseala conductoarelor liniilor electrice aeriene, Editura Academiei Române, București, 2017.
13. [EPRI, 2006] EPRI Transmission Line Reference Book: wind induced conductor motion, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, United States, 2006.
14. [Havard, 1992, I] Havard D.G., Bellamy G., Buchan P.G., Aged ACSR conductors. Part I: Testing procedures for conductors and line items, IEEE Trans Power Delivery, 1992 Vol. 7, pp. 581-587.
15. [Havard, 1992, II] Havard DG, Bellamy G., Buchan P.G., Aged ACSR conductors. Part II: Prediction of remaining life, IEEE Trans Power Delivery, 1992, Vol. 7, pp. 588-595.
16. [Irvine, 2005] Irvine Tom, Welcome to Azevedo o vibrationdat, 2006.
17. [Johnson, 2010] Johnson K.L., Contact Mechanics, Cambridge University Press, 2010, ISBN: 0-521-34796-3.
18. [Kunt, 2015] Kun L., Dumitru I., Achiriloaiei D., Kun K.N, Influence of phase shift and amplitude ratio on the principal stresses and directions in multiaxial fatigue testing, Advanced Materials Research Vol 1111, pp 103-109, 2015.
19. [Levesque, 2009] Levesque F., Analyse de la fatigue par petits d'ébattements (fretting fatigue) de fils d'un conducteur électrique, Université Laval Québec, 2009.
20. [Levesque, 2011] Levesque F., Goudreau S., Cloutier L., Cardou A., Finite element model of the contact between a vibrating conductor and a suspension clamp, Tribology International, Vol. 44, 2011, pp. 1014-1023.
21. [Lăzărescu, 2011] Lăzărescu I., Alumiuniul, Editura Tehnică, 1978.
22. [Locket, 1981] Locket, F.J., Cousins, R.R., Plast. Rubber Proc. Appl., 1, 25, 1981.
23. [McConnell, 2006] McConnell K.G., Zemke W.P., A model to predict the coupled axial torsion properties of acsr electrical conductors, 2006.
24. [McGill, 1986] McGill P.B., Ramey G.E., Effect of suspension clamp geometry on transmission line fatigue, Journal of Energy Engineering, ASCE 1986, Vol 112(3), pp.168-184.
25. [Qi, 2013] Qi Gang, Computational modeling for stress analysis of overhead transmission line stranded conductors under design and fretting fatigue conditions, Montreal, Canada, 2013.
26. [Zhu, 2014] Zhu Hui-ling, Zhu Xin-yin, Wang Yu-lin, Numerical analysis of sliding friction coefficient and the normal pressure between the cable wire, International journal on smart sensing and intelligent systems vol. 7, no. 4, 2014.