

**UNIVERSITATEA DE MEDICINĂ, FARMACIE, ȘTIINȚE ȘI
TEHNOLOGIE „GEORGE EMIL PALADE” DIN TÂRGU MUREȘ**

**ȘCOALA DOCTORALĂ DE LITERE, ȘTIINȚE UMANISTE ȘI APLICATE
DOMENIUL: INGINERIE ȘI MANAGEMENT**

**TEZĂ DE DOCTORAT
REZUMAT**

**CONTRIBUȚII TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE
PRIVIND OPTIMIZAREA PARAMETRILOR
CONDUCTOARELOR DE CUPRU MULTIFILARE**

Doctorand:

Cristina HAVADTÖI

Conducător științific:

Prof. dr. ing. Liviu MOLDOVAN



UNIVERSITATEA DE MEDICINĂ,
FARMACIE, ȘTIINȚE ȘI TEHNOLOGIE
„GEORGE EMIL PALADE”
DIN TÂRGU MUREȘ

**TÂRGU MUREȘ
2022**

CUPRINS

CAPITOLUL 1	
CERCETĂRI ASUPRA STADIULUI ACTUAL PRIVIND REALIZAREA	
CABLAJELOR.....	5
1.1. Obiectivul capitolului 1.....	5
1.2. Cabluri electrice: construcție, clasificare, tipuri constructive.....	5
1.2.1. Construcția cablurilor electrice.....	5
1.2.2. Clasificarea și simbolizarea cablurilor electrice.....	5
1.2.3. Clasele de flexibilitate ale conductoarelor electrice.....	6
1.3. Caracteristicile și parametrii tehnici ai cablurilor electrice.....	6
1.4. Utilizarea cuprului în conductoarele electrice.....	6
1.5. Principalele materiale izolatoare utilizate pentru cabluri.....	7
1.6. Procesul tehnologic de producție al cablurilor.....	7
1.7. Stadiul actual al cercetărilor în domeniul optimizării cablurilor multifilare.....	7
1.8. Concluzii.....	8
 CAPITOLUL 2	
CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND DIMENSIONAREA CABLURILOR.....	
2.1. Obiectivul capitolului 2.....	9
2.2. Metodologie de cercetare utilizată.....	9
2.2.1. Scopul studiului.....	9
2.2.2. Metode și tehnici de cercetare.....	9
2.3. Studiul conductoarelor de cupru din clasa 5 de flexibilitate cu secțiunea de 1 mm ² ...	10
2.4. Rezultate ale analizei și concluzii.....	10
 CAPITOLUL 3	
ELABORAREA METODOLOGIEI PENTRU OPTIMIZAREA	
CONDUCTOARELOR ELECTRICE DIN CLASA 5 DE FLEXIBILITATE.....	11
3.1. Obiectivul capitolului 3.....	11
3.2. Necesitatea elaborării unei metode de optimizare a construcției conductoarelor multifilare.....	11
3.3. Calculul de optimizare al conductoarelor multifilare.....	12
3.3.1. Stabilirea intervalului de valori pentru diametrul firului din componența conductorului multifilar în funcție de prevederile SR EN 60228.....	12
3.3.2. Analiza conductorului din punct de vedere al diametrului firului și al numărului de fire.....	12
3.3.3. Analiza din punct de vedere al masei conductorului.....	12

3.3.4. Influența diametrului firului d și a numărului de fire N asupra costului de producție.....	13
3.3.5. Procedul de optimizare a conductorului.....	13
3.4. Concluzii.....	15

CAPITOLUL 4

VALIDAREA ÎN PRACTICĂ A METODOLOGIEI PENTRU OPTIMIZAREA CONDUCTOARELOR ELECTRICE DIN CLASA 5 DE FLEXIBILITATE ȘI ASIGURAREA CALITĂȚII FABRICAȚIEI.....	15
4.1. Obiectivul capitolului.....	15
4.2. Implementarea în producție a procesului de optimizare a conductoarelor multifilare din clasa 5 de flexibilitate.....	16
4.3. Managementul calității aplicat în producția de cablaje.....	16
4.4. Analiza neconformităților cablurilor și ale cauzelor acestora.....	17
4.4.1. Clasificarea neconformităților cu ajutorul diagramei Pareto.....	17
4.5. Concluzii ale capitolului.....	18

CAPITOLUL 5

CERTIFICAREA CONFORMITĂȚII CONDUCTOARELOR MULTIFILARE DIN CLASA 5 DE FLEXIBILITATE ÎN RAPORT CU CERINȚELE STANDARDULUI IEC 60335 PRIN ÎNCERCĂRI LA SOLICITĂRI MECANICE.....	18
5.1. Obiectivul capitolului.....	19
5.2. Analiza standurilor de testare.....	19
5.2.1. Soluția constructivă a standului realizat.....	19
5.3. Realizarea verificărilor și interpretarea datelor.....	19
5.3.1. Descrierea metodei de testare.....	19
5.4. Concluzii ale capitolului.....	20

CAPITOLUL 6

CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII ORIGINALE, DIRECȚII DE CERCETARE VIITOARE.....	21
6.1. Contribuții în domeniul cercetării teoretice.....	21
6.2. Contribuții originale în domeniul cercetării experimentale.....	22
6.3. Direcții de cercetare viitoare.....	23

BIBLIOGRAFIE.....	24
--------------------------	-----------

CAPITOLUL 1

CERCETĂRI ASUPRA STADIULUI ACTUAL PRIVIND REALIZAREA CABLAJELOR

1.1. Obiectivul capitolului 1

Primul capitol al tezei prezintă și analizează cablurile electrice prin prisma mai multor aspecte. Este evidențiat rolul energiei electrice în dezvoltarea economică și socială și importanța cablurilor electrice în transportul și distribuția energiei electrice și în alimentarea echipamentelor și aparatelor consumatoare de energie electrică.

Se prezintă construcția cablurilor electrice, clasificarea acestora și modul de simbolizare a cablurilor. Sunt analizate proprietățile cablurilor electrice și factorii care influențează aceste proprietăți, făcându-se apoi o prezentare a materialelor folosite la construcția cablurilor electrice utilizate pentru producția de cordoane de alimentare pentru aparate electrocasnice. Sunt evidențiate aspecte referitoare la siguranța în exploatare a cablurilor electrice.

În ultimul subcapitol se face o trecere în revistă a stadiului actual al cercetărilor în domeniul optimizării construcției cablurilor flexibile și sunt prezentate obiectivele cercetărilor care vor fi efectuate în teza de doctorat.

1.2. Cabluri electrice: construcție, clasificare, tipuri constructive

1.2.1. Construcția cablurilor electrice

Un cablu electric se poate defini ca fiind un ansamblu realizat dintr-un singur conductor sau mai multe conductoare, izolate, care constituie unul sau mai multe trasee de circulație a energiei electrice. Din punct de vedere constructiv cablurile electrice sunt compuse dintr-un număr de fire metalice conductoare folosite pentru a conduce energia electrică pe o anumită distanță și un strat izolator exterior, care are și rolul de protecție mecanică a conductorului [6]. Există astfel două componente de bază ale unui cablu, conductorul și izolația.

1.2.2. Clasificarea și simbolizarea cablurilor electrice

Organismul care a realizat standardul pentru simbolizarea cablurilor electrice este CENELEC – Comitetul European pentru Standardizare în Electrotehnică. Simbolizarea se face folosindu-se o codificare alfanumerică. Fiecare literă din denumirea cablului are o semnificație bine determinată de tipul destinației, tensiunea nominală, izolație și manta, secțiunea conductorului, număr de conductoare, existența conductorului de împământare și nu în ultimul rând de secțiunea propriu-zisă.

Culorile izolației cablurilor sunt reglementate prin standardul SR EN 60446 [12], pentru circuitele monofazate: fază (L) = maro, nulul sau neutrul (N) = albastru, împământarea sau nulul de protecție (PE) = verde-galben și trifazate: fază 1 (L1) = maro, faza 2 (L2) = negru, faza 3 (L3) = gri, nulul sau neutrul (N) = albastru, împământarea sau nulul de protecție (PE) = verde-galben.

1.2.3. Clasele de flexibilitate ale conductoarelor electrice

Diversele domenii de utilizare ale cablurilor electrice necesită cerințe diferite ale mărimii secțiunii cablului și flexibilității acestuia. În aplicații în care cablul este montat staționar, cu porțiuni rectilinii de lungime mare, rigiditatea cablului poate fi mai ridicată. În aplicații în care cablul este solicitat la îndoiri, torsiune, schimbări frecvente de poziție, flexibilitatea cablului trebuie să fie mai mare [13].

Conform standardului, SR EN 60228:2005 [16] clasificarea cablurilor din punct de vedere al flexibilității se face în patru clase, numerotate 1, 2, 5 și 6 în ordinea creșterii flexibilității cablului.

1.3. Caracteristicile și parametrii tehnici ai cablurilor electrice

Principalele caracteristici geometrice ale cablurilor electrice sunt lungimea cablului și aria secțiunii transversale.

Cei mai importanți parametrii electrici ai cablurilor sunt: rezistența electrică, rezistivitatea electrică, conductivitatea electrică, tensiunea nominală a cablului și ampacitatea.

Caracteristicile principale ale izolației cablurilor sunt: tensiunea de străpungere, rigiditatea dielectrică și rezistența de izolație.

Testele privind măsurarea rezistenței izolației cablurilor se efectuează în scopul prevenirii apariției fenomenului de „scurt circuit” la cablurile electrice. În timp materialul izolației își poate pierde din calitățile izolatoare datorită procesului de „îmbătrânire”, încălzirii repetate datorită energiei termice corespunzătoare pierderilor în conductor, acțiuni de natură mecanică ce pot produce deteriorarea conductorului etc.

Prin scurtcircuit, se înțelege o legătură electrică accidentală ce poate avea loc între conductorul activ (faza) și pământ (nul) sau între conductoarele active ale unei instalații electrice. Scurtcircuitele au urmări nedorite asupra instalațiilor, dar și asupra echipamentelor sau aparaturii electrice. Efecte ale scurtcircuitelor pot fi: deteriorarea izolației conductoarelor, întreruperea conductoarelor, incendii, electrocutarea și deconectarea instalației de alimentare.

Cablurile mobile și semimobile pentru alimentarea cu energie electrică a aparatelor și echipamentelor electrice pot fi supuse în exploatare la solicitări mecanice. Aceste solicitări nu trebuie să modifice caracteristicile electrice ale cablurilor și nici să producă deteriorarea acestora. Cele mai importante caracteristici mecanice ale cablurilor electrice sunt: rezistența la tracțiune, alungirea sau elongația, raza minimă de curbură și masa conductorului.

1.4. Utilizarea cuprului în conductoarele electrice

Industria europeană a cuprului este formată în prezent din aproximativ 500 de companii. Procentual, utilizarea cuprului rafinat în Europa pentru electricitate și energie în 2018 a fost de 58%, restul reprezentând cupru pentru construcții, în inginerie și transport.

Procesul de producție a conductorului de cupru include o serie de etape de procesare care încep de la prelucrarea minereului de cupru, ce are ca rezultat un produs cu cel puțin 99,5% cupru [38]. Cuprul astfel obținut este turnat în lingouri care prin rafinare electrolitică se transferă pe catodi de cupru, produsul obținut fiind de cel puțin 99,95% cupru pur [39]. Catozii de cupru sunt topiți și trași în bare, care sunt laminate la cald, obținându-se laminate de cupru. Obținerea firelor din cupru

se realizează prin procedeul tehnologic de trefilare, trecerea succesivă printr-o serie de filiere cu diametrul din ce în ce mai mic, până când se ajunge la diametrul dorit.

Firele de cupru utilizate în scopuri electrice sunt fabricate folosind cupru cu pas greu rafinat electrolitic (Cu-ETP) sau cupru fără oxigen (Cu-OF) [41].

Normele și standardele în vigoare stabilesc pentru conductoarele multifilare din cupru o limită superioară a diametrelor firelor, care diferă în funcție de grosimea secțiunii. Pentru conductoare din clasa de flexibilitate 5, la secțiunile de 0,5 mm²; 0,75 mm² și 1,00 mm² diametrul firului de cupru este de maxim 0,21 mm. Pentru secțiunile de 1,00 mm² și 1,5 mm² diametrul stabilit ca limită superioară este de 0,26 mm [16].

1.5. Principalele materiale izolatoare utilizate pentru cabluri

Tipul de izolație este ales în funcție de scopul pentru care este utilizat cablul, caracteristicile acestuia, tensiunea la care va fi operat și de calitatea vizată a izolației. Materialele utilizate sunt materiale termoplastice sau termorigide.

În industria cablajelor cele mai utilizate materiale izolatoare termoplastice și termorigide sunt policlorura de vinil (PVC), cauciucul natural și sintetic etilpropilenic (EPR).

1.6. Procesul tehnologic de producție al cablurilor

Procesul tehnologic al producției cablurilor se compune din:

1. Producția conductorului cu cupru multifilar, care se realizează prin 2 procedee tehnologice: **trefilare** în care se reduc secțiunile transversale al unui fir de cupru la o secțiune mai mică, cu ajutorul unor scule numite filiere și **lițare** care reprezintă procesul de asamblare a unui număr de fire pentru a se realiza secțiunea necesară a conductorului. Pentru lițare se utilizează mașina de lițat care este alimentată cu numărul de tamburi aferent numărului de fire din secțiune. Controalele efectuate sunt verificarea pasului și aspectul secțiunii.

2. Procesul tehnologic de producție al conductorului izolat, se realizează prin procedeul de extrudare care constă în acoperirea conductorului de cupru cu materialul izolator la dimensiunea corespunzătoare. Controalele efectuate pe fluxul procesului de fabricație sunt de rutină, realizate cu aparatul de măsură al diametrului și cu aparatul de măsură al rigidității dielectrice în flux unde se verifică integritatea stratului de izolație prin aplicarea unei tensiuni de 7 kV asupra conductorului izolat.

3. Procesul tehnologic de producție al cablului se compune din procesul de cablare al conductoarelor prin care 2 sau mai multe conductoare izolate sunt răsucite după un anumit pas de cablare specificat în norme și procesul de extrudare prin care conductoarele cablate sunt acoperite cu un strat izolator de diferite culori, de obicei din material de PVC sau cauciuc.

1.7. Stadiul actual al cercetărilor în domeniul optimizării cablurilor multifilare

Fabricația cablajelor în condiții de eficiență economică constituie un subiect de mare actualitate pentru producătorii din industria de profil.

Optimizarea construcției cablurilor multifilare se face încă din faza de proiectare. În cercetările efectuate de Napieralska Juszczak și Napieralski [55] s-a realizat o optimizare prin modelarea procesului de compactizare și răsucire a cablurilor cu secțiunea nominală de 25 mm², în

scopul creșterii conductivității și reducerii masei cablurilor. Pentru modelare s-a folosit soft-ul Abacus v.6.11. Autorii arată că valoarea pasului de răsucire a firelor și numărul de straturi de fire dispuse radial influențează rezistența electrică a conductorului. Metoda de optimizare a procesului tehnologic propusă conduce la scăderea consumului de cupru cu 1,2% și la creșterea vitezei de producere cu 34%.

Un studiu asupra optimizării cablurilor cu diferite secțiuni, în etapa de proiectare, este prezentat de Shafieipour ș.a. [56]. Pentru optimizarea parametrilor electrici este propusă „metoda momentelor” (MoM), cu ajutorul căreia se face un calcul computațional al matricelor impedanței și admitanței cablurilor formate din 3 și 4 sectoare de conductor. Rezultatele sunt comparate cu cele obținute prin simularea în programul COMSOL, arătându-se că proiectarea cu noua metodă propusă conduce la scăderea timpului de calcul computerizat.

Aghamohammadi și Yousefi [57] analizează optimizarea proiectării și a consumului de materiale (cupru) pentru cabluri de înaltă tensiune. Prin reducerea rugozității suprafeței firelor și alegerea unor matrițe adecvate pentru procesul de compactare, autorii arată că poate fi scăzut consumul de cupru cu 2%. O suprafață cât mai netedă a firelor din componența conductorului contribuie la eliminarea contactului punctual, numai pe vârful asperităților, care constituie zone cu o densitate mare a câmpului electric. Un contact pe o suprafață cât mai mare între fire duce la scăderea rezistenței electrice a conductorului.

Determinarea diametrului optim al firelor în scopul scăderii masei cablurilor este studiată și de Čiegis, R, ș.a. [58]. Pornind de la rezultatele cercetărilor efectuate anterior asupra simulării numerice a transferului de căldură conductiv în cablurile electrice [59], autorii au dezvoltat versiuni paralele ale unui algoritm de optimizare: „master-slave” și „data parallel” pe care le-au combinat cu algoritmul pentru studiul transferului de căldură. Pornind de la o greutate inițială a cablului de 7,363g la care temperatura maximă atinsă a fost 99,1°C, calculele efectuate au arătat că se poate reduce masa cablului până la 6,186g, dar cu o creștere a temperaturii până la 103,51°C. Cercetările au fost efectuate cu aplicabilitate la cablurile electrice pentru autovehicule.

Scăderea costurilor de producție este strâns legată de minimizarea pierderilor în procesele tehnologice. Analizând procesul de trefilare într-o companie producătoare de cabluri Chukwuebuka ș.a. [60] au utilizat metoda „Taguchi Orthogonal Array Design” pentru a găsi soluția la problema abaterilor diametrului firului de la valorile nominale. Prin îmbunătățirea toleranței la trefilare s-a reușit reducerea pierderilor anuale cu 72% .

1.8. Concluzii

În contextul actual al creșterii prețului cuprului, folosit ca materie primă pentru fabricarea cablurilor electrice, optimizarea diametrului firelor și a masei conductoarelor de cupru reprezintă o prioritate a compartimentelor de cercetare și a celor de producție din cadrul companiilor producătoare.

Deși în literatura de specialitate sunt prezentate cercetări pentru optimizarea masei cablurilor, acestea sunt realizate fie pentru cabluri de tensiune înaltă și medie, fie pentru cabluri electrice destinate sectorului auto. Din acest motiv, în cadrul cercetărilor efectuate în cadrul prezentei lucrări, îmi propun să analizez modul în care se poate realiza optimizarea cablurilor

electrice din clasa 5 de flexibilitate, destinate echipamentelor și aparatelor electrocasnice, care sunt mai puțin studiate în literatura de specialitate. Acesta va reprezenta un element de noutate pe care îl aduce lucrarea de față.

CAPITOLUL 2

CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND DIMENSIONAREA CABLURILOR

2.1. Obiectivul capitolului 2

Obiectivul principal al acestui capitol îl reprezintă studiul caracteristicilor dimensionale și al parametrilor funcționali ai cablurilor electrice. Am analizat numărul de fire din componența conductorului, diametrul firului și valoarea secțiunii, în strânsă legătură cu caracteristicile electrice reprezentate de rezistența electrică și conductivitate. Cercetarea experimentală s-a realizat asupra unui eșantion de 35 cabluri, de secțiune 1,00 mm², cu trei conductoare multifilare, clasa de flexibilitate 5. Pentru ca studiul să fie reprezentativ, am selectat câte cinci cabluri din producția curentă a șapte producători europeni din Italia, Polonia, Franța, Germania și România.

2.2. Metodologie de cercetare utilizată

2.2.1. Scopul studiului

Studiul a fost realizat în perioada 2019-2020 pe cablurile electrice pentru fabricarea de cordoane de alimentare produse de companii de talie internațională, cu precădere cele care operează pe piața europeană și au filiale în mai multe țări de pe continent.

Scopul acestui studiu a fost să determine modalitățile de fabricare ale cablurilor electrice multifilare din clasa 5 de flexibilitate, de către diverși producători, prin evidențierea diametrelor firelor și a numărului de fire din conductoare. În cadrul studiului am efectuat măsurători asupra eșantionului de cabluri selectat, măsurători pe care le-am efectuat în laboratorul unei companii producătoare de cabluri electrice.

Rezultatele studiului realizat au permis formularea de concluzii privind optimizarea construcției conductoarelor de cupru, utilizate pentru producția cablajelor, care să corespundă standardelor aferente cablurilor și în același timp să aibă costuri de producție cât mai reduse.

2.2.2. Metode și tehnici de cercetare

Studiul cablurilor a constat din efectuarea măsurătorilor și calculelor caracteristicilor electrice și dimensionale ale cablurilor. Mostrele de cabluri prelevate de la cele șapte companii au fost de diferite tipuri, dar cu aceeași secțiune 3G1,00 mm². Am analizat elemente precum, diametrul firului, numărul de fire, rezistența electrică și conductivitatea.

Pentru relevanța studiului am luat în analiză un număr de cinci cabluri pentru producția de cordoane electrice, de la fiecare dintre cele șapte companii furnizoare de cabluri electrice, în final fiind testate 35 de cabluri. Cablurile studiate sunt folosite pentru alimentarea aparatelor

electrocasnice profesionale, care necesită cordoane produse cu materiale izolatoare care au proprietăți superioare celor utilizate pentru aparate electrocasnice uzuale.

Cele mai utilizate cabluri pentru producția de cordoane de alimentare a aparatelor electrocasnice sunt cele de secțiune 1,00 mm², cu trei conductoare. Din acest considerent cablurile studiate cu izolatori PVC, H05VV-F, și cauciuc, H05RN-F, au 3 conductoare de același tip: fază, nul și conductor de protecție.

Numărul de fire a fost determinat separat pentru fiecare conductor analizat. Mărimea secțiunii conductorului a fost determinată cu ajutorul caracteristicilor dimensionale măsurate: diametrele conductoarelor și numărul de fire din secțiune. Pentru măsurarea diametrului firelor și secțiunii conductoarelor am folosit:

- micrometru marca Horex seria 071191663, etalonat la data de 04.03.2019, atestat de certificatul de etalonare cu numărul 05.0535/2020;

- șubler digital Horex seria H1330971, etalonat la data de 04.03.2019, atestat de certificatul de etalonare cu numărul 05.0544/2020.

Măsurătorile diametrelor firelor le-am efectuat pe toate firele din fiecare conductor, după care am calculat media aritmetică a diametrelor.

Caracteristicile electrice pe care le-am analizat sunt rezistența electrică și conductivitatea. Rezistența electrică a fost măsurată cu un comparator în punte Wheatstone, cu care se pot măsura rezistențe cuprinse între 1 Ω și 1 M Ω .

Puntea Wheatstone utilizată pentru măsurarea rezistenței electrice a conductoarelor a fost etalonată la data de 22.11.2019, fiind atestată de certificatul de etalonare cu numărul 05.1903-2019.

Eșantionul analizat pentru fiecare companie producătoare a fost testat pentru determinarea caracteristicilor electrice în următorul mod: am măsurat rezistența electrică pentru toată secțiunea conductorului și am măsurat rezistența electrică pentru toate firele din fiecare conductor.

Conductivitatea cuprului în stare naturală este cunoscută ca fiind de 58.1×10^6 Siemens/m, însă conductivitatea cablurilor, în urma proceselor de fabricație la care au fost supuse, poate suferi modificări.

2.3. Studiul conductoarelor de cupru din clasa 5 de flexibilitate cu secțiunea de 1 mm²

În studiul efectuat, cele șapte companii de la care au fost preluate mostre de cabluri sunt companiile producătoare Pecso Cavi, Nexans, Top Electro, Lapp Kabel, Prysmian, Telefonika Kable și Cableteam.

2.4. Rezultate ale analizei și concluzii

Studiul efectuat pe cablurile electrice pentru cordoane de alimentare ale celor șapte companii producătoare a pus în evidență o serie de diferențe între caracteristicile și parametrii cablurilor.

Din punct de vedere dimensional:

- numărul de fire dintr-un conductor se încadrează între 29 și 32 fire;
- diametrele firelor se încadrează între 0,192 și 0,202 mm.

Din punct de vedere electric:

- rezistența electrică se încadrează între valorile de 17,57 Ω/km și 19,20 Ω/km ;
- conductivitatea se încadrează între valorile 91,82 % și 99,98 %.

Analiza caracteristicilor dimensionale în strânsă legătură cu caracteristicile electrice a permis efectuarea de comparații între produse.

Analizele diametrelor firelor de cupru și ale numărului de fire utilizate în secțiune pentru fiecare cablu, corelate cu caracteristicile electrice, rezistența electrică și conductivitatea, au demonstrat concluziile acestui studiu privind variabilitatea numărului de fire din componența cablurilor din clasa 5 de flexibilitate și a diametrelor firelor folosite de diferitele companii producătoare, care generează mase diferite ale conductoarelor. Am concluzionat că pentru producerea conductoarelor multifilare din clasa 5 de flexibilitate, nu există în momentul de față o metodologie de optimizare a acestora, prin care să se obțină o masă cât mai redusă care ar permite fabricația la costuri mai mici ale producției, concomitent cu asigurarea unei rezistențe electrice a conductoarelor sub valorile impuse de standarde. Metoda de optimizare dezvoltată în cadrul acestei cercetări, prin care se asigură o masă minimă a conductorului, corelată cu numărul de fire și diametrul firelor, constituie un element de noutate științifică și practică.

CAPITOLUL 3

ELABORAREA METODOLOGIEI PENTRU OPTIMIZAREA CONDUCTOARELOR ELECTRICE DIN CLASA 5 DE FLEXIBILITATE

3.1. Obiectivul capitolului 3

Obiectivul prezentului capitol este elaborarea unei metode de stabilire a diametrului și numărului firelor din componența conductoarelor multifilare din clasa 5 de flexibilitate, care să permită realizarea unui optim între costurile de prelucrare, masa conductorului și valoarea rezistenței electrice.

3.2. Necesitatea elaborării unei metodei de optimizare a construcției conductoarelor multifilare

În studiul asupra cablurilor electrice pentru fabricația cordoanelor de alimentare am observat că producătorii lucrează cu diferite valori ale numărului de fire și ale diametrelor firelor, pentru același tip de cablu. Din analiza efectuată în capitolul precedent rezultă că secțiunile cablurilor companiilor producătoare Peso Cavi și Cableteam au numărul maxim de fire din studiu, iar secțiunile cablurilor companiei producătoare Nexans au numărul minim de fire din studiu. Compania Top Electro produce cabluri cu un număr diferit de fire față de celelalte companii, iar companiile Lapp Kabel, Prysmian Kabel und Systeme și Telefonica Kable produc cabluri cu același număr de fire. Astfel rezultă că pentru aceeași secțiune nominală și aceeași parametrii electrici, companiile utilizează un număr diferit de fire.

Din această analiză rezultă că producătorii nu folosesc o metodologie unitară, clară, elaborată și verificată, astfel că fiecare producător își alege numărul de fire din secțiune în funcție de

experiența și determinările proprii.

3.3. Calculul de optimizare al conductoarelor multifilare

3.3.1. Stabilirea intervalului de valori pentru diametrul firului din componența conductorului multifilar în funcție de prevederile SR EN 60228

Conductoarele multifilare din clasa 5 de flexibilitate sunt compuse dintr-un număr N de fire subțiri din cupru. Din punct de vedere funcțional acestea pot fi considerate ca fiind rezistențe electrice distincte, legate în paralel.

Pentru ca pierderile de putere și de energie pe conductor să fie minime, trebuie ca rezistența electrică a conductorului multifilar să fie cât mai mică. Această condiție implică o rezistență a firului cât mai mică și/sau un număr de fire cât mai mare. Standardul SR EN 60228 impune valori maxime ale rezistenței electrice a conductoarelor.

Prin folosirea unui suport matematic adecvat, am demonstrat că în cazul conductoarelor multifilare format din N fire de diametrul d , rezistența electrică a conductorului depinde atât de diametrul firelor cât și de numărul de fire și este invers proporțională cu produsul $N \cdot d^2$.

3.3.2. Analiza conductorului din punct de vedere al diametrului firului și al numărului de fire

Impunând valori ale numărului de fire în intervalul 10...41, am calculat valorile diametrului minim al firului pentru rezistența cablului egală cu rezistența maximă.

Am observat că pentru valori ale lui N cuprinse în intervalul 10...25, valoarea diametrului minim al firelor obținut prin calcul este mai mare decât valoarea maximă a diametrului impusă prin SR EN 60228, care pentru secțiunea nominală de 1 mm² are valoarea $d_{max} = 0,21$ mm. Rezultă că în procesul de producție a cablurilor multifilare de clasa 5 cu secțiunea nominală 1 mm², numărul minim de fire, corespunzător rezistenței maxime, este $N=26$.

Pornind de la condiția $d \leq d_{max}$ am calculat în continuare rezistența conductorului, considerând $d = d_{max}$ pentru valori ale numărului de fire situat în intervalul 10,...,41.

Am observat că pentru valori ale lui N mai mici decât 26, rezistența conductorului este mai mare decât valoarea rezistenței maxime $R_{max} = 19,5$ Ω/km impusă de standardul SR EN 60228. Rezultă că și din punct de vedere al impunerii unui diametru egal cu diametrul maxim prevăzut în standard, valoarea minimă a numărului de fire este de asemenea $N=26$.

În urma analizei rezultă că fiecărui număr de fire N îi corespunde un interval al diametrelor cuprins între un diametru minim și diametru maxim de 0,21 mm, precum și un interval al rezistenței conductorului cuprins între o valoare minimă și valoarea rezistenței maxime de 19,5 Ω/km.

3.3.3. Analiza din punct de vedere al masei conductorului

Masa conductorului este analizată în contextul în care masa tuturor firelor din cupru dintr-un conductor multifilar reprezintă un important factor economic în producția de cabluri. O masă a conductorului cât mai scăzută este echivalentă cu un cost mai redus al cuprului din componența conductorului și implicit cu un cost de producție mai scăzut.

Fiecare fir din componența conductorului reprezintă un cilindru cu diametrul d și lungime L .

Pentru fiecare număr de fire N , valorile masei conductorului se încadrează între un maxim și un minim, proporțional cu valorile diametrului d și produsului $N \cdot d^2$. Masa maximă a conductorului este atinsă atunci când diametrul firului are valoarea maximă prevăzută de standard $d_{max} = 0,21$ mm, valoarea maximă fiind diferită pentru fiecare număr de fire N .

3.3.4. Influența diametrului firului d și a numărului de fire N asupra costului de producție

Tehnologia de fabricație a conductoarelor multifilare presupune 3 operații principale: trefilarea, lițarea și acoperirea cu stratul izolator.

Din punctul de vedere al optimizării procesului tehnologic și al costurilor de producție, pentru alegerea judicioasă a diametrului firelor d și a numărului de fire N , am analizat costurile operațiilor de trefilare și de lițare. Costurile acestor operații sunt exprimate în Euro/kg cablu și se obțin prin înmulțirea costului pe minut pentru realizarea produsului cu timpul normat pentru prelucrarea unui kg de Cu.

3.3.5. Procedul de optimizare a conductorului

Pentru ca pierderile de putere ale conductorului să fie minime, rezistența acestuia trebuie să fie cât mai mică, ceea ce, conform relației, este similar cu o valoare cât mai mare a produsului $N \cdot d^2$.

Din punct de vedere al masei conductorului, aceasta trebuie să fie cât mai mică și deci produsul $N \cdot d^2$ să fie cât mai mic.

Rezultă deci că cele două criterii de optimizare conduc la cerințe diametral opuse:

- o rezistență cât mai mică a conductorului presupune o valoare cât mai mare a produsului $N \cdot d^2$;
- o masă cât mai mică a conductorului presupune o valoare cât mai mică a produsului $N \cdot d^2$.

Pentru a armoniza aceste cerințe divergente se propune introducerea a doi coeficienți:

- un coeficient C_1 , care să aibă în vedere ponderea criteriului rezistenței minime a conductorului;
- un coeficient C_2 , care să aibă în vedere ponderea criteriului masei minime a conductorului.

Ambii coeficienți pot lua valori între 0 și 1: $C_1 \in [0,1]$ și $C_2 \in [0,1]$. Suma celor 2 coeficienți este 1.

Producătorul, în funcție de domeniul de utilizare a cablului, de numărul de ore estimat de funcționare, de solicitările clienților și de costul cuprului din componența cablului, își stabilește valorile pentru coeficienții C_1 și C_2 .

Pentru fiecare număr de fire N , valorile maxime ale produsului $N \cdot d^2$ corespund diametrului maxim $d_{max} = 0,21$, iar valorile minime corespund diametrului minim d_{min} . Valorile maxime ale produsului $N \cdot d^2$ sunt corespunzătoare unei rezistențe minime a conductorului ($C_1=1$) și unei mase maxime ($C_2=0$). Valorile minime ale produsului $N \cdot d^2$ corespund unei rezistențe maxime ($C_1=0$) și unei mase minime ($C_2=1$).

Fiecărui număr N de fire din conductor îi corespunde o valoare maximă și o valoare minimă a produsului $N \cdot d^2$, notate prin $N \cdot d_{max}^2$ și $N \cdot d_{min}^2$. Valoarea maximă a produsului $N \cdot d_{max}^2$ corespunde rezistenței minime, adică $C_1=1$, și masei maxime adică $C_2=0$, iar valoarea minimă a produsului,

$N \cdot d_{min}^2$ corespunde unei rezistențe maxime $C_1=0$ și unei mase minime $C_2=1$. În funcție de valorile coeficienților C_1 și C_2 aleși de producător, se poate calcula o valoare optimă a produsului $N \cdot d^2$.

Decizia alegerii unei singure perechi din perechile de valori (N, d) se va lua în urma stabilirii costului de prelucrare al fiecărei variante de produs, cost ce reprezintă suma dintre costul trefilării, costul lițării și costul cuprului.

Utilizând funcțiile costului de trefilare, respectiv costurile de lițare, am centralizat valorile costurilor de trefilare, lițare precum și costurile de prelucrare, pentru fiecare din perechile de valori (N, d) .

Am demonstrat printr-un suport matematic adecvat că pentru producătorul ale cărui costuri au fost considerate, minimul sumei dintre costul trefilării și costul lițării este pentru un număr de fire $N=31$.

Pentru un număr de fire mic ($N=26, 27, 28$) costurile de prelucrare pentru diferitele valori ale perechii de coeficienți $[C_1, C_2]$ sunt mai apropiate. În schimb, pentru valori mari ale numărului de fire N am constatat că diferențele dintre costurile de prelucrare corespunzătoare diferitelor valori $[C_1, C_2]$ sunt mai mari.

În continuare am determinat valorile diametrului, costului de lițare, costului de trefilare, costului de prelucrare, masa conductorului și rezistența electrică pentru numărul de fire $N=31$ (corespunzător costului minim de prelucrare), în funcție de perechile de coeficienți $[C_1, C_2]$. Cu ajutorul acestor determinări producătorul de conductoare electrice de clasa 5, cu secțiunea de 1 mm^2 , poate determina, după stabilirea perechii de coeficienți $[C_1, C_2]$, diametrul optim al firului pentru conductorul cu $N=31$ fire, căruia îi corespunde costul minim de prelucrare.

Pentru conductoarele cu secțiunea de 1 mm^2 din clasa de flexibilitate 5, pentru costurile de producție ale producătorului analizat, am demonstrat că numărul optim de fire din conductor este de 31. Producătorul, pe baza comenzii primite de la client, stabilește în funcție de cerințele acestuia și de destinația cablului, setul de coeficienți $[C_1, C_2]$, iar apoi poate determina care este diametrul optim al liței din componența conductorului cu 31 de fire.

Optimizarea constructivă a conductorului multifilar a constatat în găsirea acelei perechi formată din numărul de fire – diametrul firului (N, d) , care să satisfacă simultan cerințele privind încadrarea în rezistența electrică impusă de standard, costul minim de prelucrare a conductorului și masa minimă.

În urma analizei etapele procedurii de optimizare sunt:

1. Se stabilesc, conform indicațiilor SR EN 60228, secțiunea nominală a conductorului, diametrul maxim și rezistența electrică maximă corespunzătoare secțiunii alese.
2. Pentru fiecare secțiune nominală se stabilește intervalul în care poate lua valori numărul de fire N , astfel încât diametrul firului și rezistența electrică a conductorului să fie mai mici sau egale cu valorile din standard.
3. Pentru fiecare valoare a numărului de fire N se calculează valoarea diametrului minim al firului d_{min} , diametrul maxim d_{max} fiind impus de standard.
4. Se calculează, pentru fiecare N , valorile minime și maxime ale produsului $N \cdot d^2$: $N \cdot d_{min}^2$, $N \cdot d_{max}^2$.
5. În funcție de domeniul de utilizare a cablului, de numărul de ore estimat de funcționare, de

solicitările clienților, producătorul alege perechea de valori ($C1, C2$).

6. Se calculează valoarea optimă a produsului $N \cdot d^2$.
7. Din analiza proceselor tehnologice se stabilesc costurile proceselor de trefilare și lițare și se stabilesc funcțiile:
 - costul procesului de trefilare în funcție de diametrul firului $C_t = f(d)$;
 - costul procesului de lițare în funcție de numărul de fire din conductor $C_l = f(N)$.Se determină costul de prelucrare în funcție de N și d : $C_p(d, N) = C_t(d) + C_l(N)$
8. Se stabilește valoarea minimă a costului de prelucrare: $C_{p\min}(d, N)$.
9. Din setul de valori $[N, d]$ stabilit se alege perechea de valori (N, d) pentru care costul de prelucrare este minim.
10. La final se pot determina:
 - Rezistența electrică a cablului;
 - Masa unui metru liniar de conductor.

3.4. Concluzii

Metoda de optimizare a fost dezvoltată și exemplificată pe un conductor multifilar cu secțiunea nominală de 1 mm^2 pentru care am demonstrat că numărul optim de fire din conductor este de 31.

Metoda poate fi aplicată însă pentru toate secțiunile nominale ale conductoarelor multifilare din clasa 5 de flexibilitate.

Noua metodă de optimizare constructivă a conductoarelor multifilare de cupru permite găsirea unei perechi formată din număr de fire și diametrul firelor (N, d), care satisface simultan cerințele privind încadrarea în rezistența electrică impusă de standard, masa minimă și un cost de prelucrare redus.

Prin aplicarea metodei de optimizare propuse, metodă ce reprezintă o contribuție proprie dezvoltată în cadrul acestei cercetări doctorale, se realizează o economie importantă de cupru la fabricarea conductoarelor, în condițiile în care se păstrează rezistența electrică în limitele impuse de standard.

CAPITOLUL 4

VALIDAREA ÎN PRACTICĂ A METODOLOGIEI PENTRU OPTIMIZAREA CONDUCTOARELOR ELECTRICE DIN CLASA 5 DE FLEXIBILITATE ȘI ASIGURAREA CALITĂȚII FABRICAȚIEI

4.1. Obiectivul capitolului

Obiectivul capitolului îl reprezintă validarea în practică a metodologiei de optimizare a conductoarelor multifilare din clasa 5 de flexibilitate (prezentat în capitolul 3) prin implementarea acestuia în compania producătoare Top Electro, la fabricarea de cabluri cu 31 de fire.

Un alt obiectiv al capitolului îl constituie asigurarea calității fabricației noilor conductoare multifilare prin tratarea aspectelor specifice managementului calității în producția de cablaje, evidențierea procedurilor de control pe parcursul fabricației și analiza neconformităților cablurilor și ale cauzelor acestora în vederea formulării de măsuri de îmbunătățire a fabricației.

4.2. Implementarea în producție a procesului de optimizare a conductoarelor multifilare din clasa 5 de flexibilitate

Din analiza acestor date se poate concluziona că procesul de optimizare a conductoarelor multifilare din clasa 5 de flexibilitate (prezentat în capitolul 3) a permis determinarea numărului optim de fire în funcție de rezistența electrică, diametrul firului, masa și costurile de producție. În urma implementării acestui proces în companie, a utilizării sale în liniile de producție și determinărilor prezentate în această secțiune, se poate concluziona că procesul este eficient, fiind validat în practică, prin produsele curente fabricate și rezultatele măsurătorilor din laborator.

Cablurile formate din conductoare cu 31 de fire sunt executate în condiții controlate, de către personal executant calificat, utilizând procedurile scrise, special elaborate și echipament în conformitate cu standardele, specificațiile, criteriile și cerințele legale și contractuale.

Verificarea cablurilor cu 31 de fire s-a realizat, la organismul de certificare VDE în urma unui audit de produs prin care s-au analizat: existența procedurilor specifice ale procesului de producție și aplicarea lor, modul în care sunt definite criteriile privind execuția, analiza și aprobarea fabricației, echipamentul folosit și înregistrările de verificare curentă: mentenanța dispozitivelor, calibrarea/etalonarea sculelor, calificarea personalului executant, modul de efectuare a controalelor la aprovizionarea cu materii prime, pe fluxul de fabricație și la finalizarea produsului, responsabilitățile privind elaborarea, verificarea și aprobarea înregistrărilor aferente fabricației.

S-a prelevat un număr de 10 mostre, la fiecare dintre acestea fiind tăiat un cablu cu lungimea de 30 m, din care 25 m reprezintă mostra în sine iar 5 m reprezintă contramosta, care s-au testat în laborator. Pentru fiecare mostră de cablu H05VV-F 3G1,00 cu 31 de fire în secțiune, s-a întocmit câte un buletin de încercări. Toate mostrele au fost etichetate cu informații referitoare la tipul cablului, data de fabricație, lotul și numărul buletinului de încercări a contramostrei.

În cadrul auditului efectuat în producție de organismul de certificare VDE, s-au prelevat mostre de cabluri fabricate la compania Top Electro, inclusiv o mostra de cablu H05VV-F 3G1.00 având 31 de fire și secțiunea de 1 mm, care au fost verificate în laboratorul acestui organism.

4.3. Managementul calității aplicat în producția de cablaje

Îmbunătățirea calității produsului se realizează în primul rând prin coordonarea activităților de pe întregul traseu de fabricație, inclusiv implementarea unui număr mare de cercetări științifice, lucrări de testare în toate etapele de planificare, proiectare, producție, îmbunătățire și exploatare a produsului.

În literatura de specialitate aferentă industriei cablajelor există preocupări privind îmbunătățirea calității firului de cupru. În acest sens, pentru a îmbunătăți calitatea firului în cadrul procesului de trefilare, Vega ș.a. [83] au optimizat designul sculei. Cercetările au indicat că frecarea are efecte semnificative asupra forței de tragere care scade proporțional cu reducerea ariei firului.

Unghiul optim al sculei pentru trefilarea firului se obține atunci când distribuția deformării plastice este uniformă pe diametrul firului.

Santana Martinez ș.a. [84] au analizat parametrii procesului de trefilare: viteza de tragere, forța de tragere, temperatura matriței, temperatura lubrifiantului și distribuțiile tensiunilor. Rezultatele obținute demonstrează modul în care tensiunea de tragere și temperatura sunt afectate de variația coeficientului de frecare, geometria matriței și viteza de tragere. Se susține că un astfel de studiu ar putea ajuta la optimizarea parametrilor operaționali ai procesului de trefilare, ceea ce duce în continuare la îmbunătățirea condițiilor de lubrifiere și a calității produsului, minimizând în același timp consumul de energie în timpul procesului.

Prin implementarea metodologiei Lean într-o fabrică de cabluri de alimentare de joasă tensiune, Alamoudi ș.a. [86] au raportat creșterea performanțelor procesului de producție. Aceștia au utilizat mai multe instrumente specifice metodologiei „Lean”, precum întreținerea planificată, întreținerea autonomă, eficiența globală a echipamentului și evaluarea zilnică a performanței. Rezultatele au indicat faptul că prin utilizarea acestei metodologii, conducerea companiei poate determina și elimina cu ușurință risipa din fabricație, poate maximiza alocarea resurselor, iar durata de fabricație poate fi redusă până la 50%.

O altă preocupare este reprezentată de mentenanța și întreținerea echipamentelor și dispozitivelor de lucru. Într-o companie producătoare de cabluri electrice, Maalem ș.a. [87] au îmbunătățit productivitatea sistemelor de producție prin implementarea întreținerii productive totale, după care au analizat impactul acesteia asupra eficienței generale a echipamentelor, pe două tipuri diferite de mașini utilizate în linia de producție: mașina de trefilare și mașina de extrudare.

Un alt obiectiv major al sistemului de management al calității în companiile de producție a cablajelor îl constituie identificarea defectelor și neconformităților, a cauzelor care le generează, urmată de eliminarea acestor cauze și asigurarea fabricației de produse de înaltă calitate.

Controlul calității, detectarea defectelor și a neconformităților sunt esențiale în asigurarea calității cablurilor electrice. Hanhirova ș.a. [89] au proiectat și implementat un sistem de detectare a defectelor care aplică metode de învățare automată pentru a detecta defectele suprafețelor cablurilor de alimentare. Pentru a mapa suprafața unui cablu în timpul producției, sistemul folosește scanarea laser, în care învățarea automată se realizează printr-o arhitectură de rețea neuronală convoluțională.

În scopul automatizării controlului calității al firelor și cablurilor electrice, prin utilizarea inteligenței artificiale, Lenty ș.a. [90] au construit un sistem automat care controlează diametrul firelor și defectele de suprafață.

4.4. Analiza neconformităților cablurilor și ale cauzelor acestora

4.4.1. Clasificarea neconformităților cu ajutorul diagramei Pareto

Asigurarea calității fabricației noilor conductoare multifilare a permis cu suportul analizei Pareto identificarea defectelor și neconformităților care apar cel mai frecvent în fabricație, care în ordinea descrescătoare a frecvenței de apariție sunt: diametrul prea mic al cablului (43,03%), cablu cu arsuri pe suprafața izolației (30,30%), aspectul cablului fără luciu (18,18%), manta tăiată (3,03%). În urma analizei cauzelor care le generează am formulat unele măsuri care pot duce la

eliminarea neconformităților:

- instruirile suplimentare la locul de muncă în ceea ce privește procesul de extrudare și reglarea parametrilor mașinii de extrudat, pentru consolidarea cunoștințelor în cazul angajaților cu experiență și dobândirea unor noi cunoștințe pentru personalul recent angajat;
- realizarea unui calibru „Nu trece” pentru o verificare mai ușoară a diametrului exterior al cablului;
- realizarea mentenanței lunare la extruderul Samafor, în vederea eliminării unor posibile defecte;
- achiziționarea de uscătoare de granule în vederea eliminării umezelii acumulate prin depozitare;
- depozitarea în cutii care să protejeze produsul;
- înfolierea paletelor și acoperirea acestora;
- îmbunătățirea sistemului de comercializare prin scurtarea perioadelor de livrare astfel încât să se evite depozitarea pe un timp mai îndelungat pentru a preveni apăsarea cablurilor.

4.5. Concluzii ale capitolului

În partea experimentală a cercetării am implementat metodologia de optimizare a conductoarelor multifilare din clasa 5 de flexibilitate în compania producătoare Top Electro, la fabricarea cablurilor cu 31 de fire. Prin această procedură am stabilit numărul de fire al producătorului Top Electro în funcție de masa, diametrul, rezistența electrică și costurile de producție ale conductorului de cupru din clasa de flexibilitate 5, cu secțiunea de 1,00 mm². Implementarea procedurii în cadrul companiei, a avut ca efect fabricarea unor conductoare care au în structura lor 31 de fire și care înlocuiesc cablurile fabricate anterior cu structura compusă din 30 de fire. Măsurătorile efectuate în condiții de laborator și consemnate în buletinele de verificare ale companiei Top Electro, pe noile cabluri cu 31 de fire, validează în practică dezvoltarea teoretică din cadrul tezei. Aceasta este confirmată prin diagramele rezistenței electrice trasate în funcție de diametrul firului, în urma dezvoltării teoretice și a măsurătorilor experimentale, care au forme identice, iar valorile rezistențelor care le descriu sunt foarte apropiate, cu erori care au valori cuprinse în intervalul $0-5 \cdot 10^{-2} \Omega/\text{km}$.

Studierea cauzelor acestor neconformități cu ajutorul diagramei cauză-efect a permis formularea principalelor măsuri corective de înlăturare a acestora, care constau în instruiți tematice ale angajaților, dezvoltarea infrastructurii și dotarea cu dispozitive adecvate, îmbunătățirea procedurilor de mentenanță a utilajelor, revizuirea procedurilor de manipulare-transport-depozitare a produselor.

CAPITOLUL 5

CERTIFICAREA CONFORMITĂȚII CONDUCTOARELOR MULTIFILARE DIN CLASA 5 DE FLEXIBILITATE ÎN RAPORT CU CERINȚELE STANDARDULUI IEC 60335 PRIN ÎNCERCĂRI LA SOLICITĂRI MECANICE

5.1. Obiectivul capitolului

Obiectivul acestui capitol este de a certifica conformitatea conductoarelor multifilare din clasa 5 de flexibilitate, cu 31 de fire și secțiunea de 1,00 mm², produse de compania Top Electro, în raport cu prevederile standardului IEC 60335-1:2020 prin verificări din punct de vedere al rezistenței la solicitările mecanice și asigurarea infrastructurii adecvate prin proiectarea și execuția unui stand digital cu placă de achiziții de date pentru verificarea la solicitările de tracțiune și torsiune cerute de standard.

5.2. Analiza standurilor de testare

Din analiza soluțiilor constructive ale dispozitivelor de încercare am constatat lipsa posibilității înregistrării datelor cu o placă de achiziții de date care ar permite stocarea și accesarea ulterioară a înregistrărilor. Datele înregistrate permit determinarea conformității produsului, dar și analiza calității unui anumit tip de produs, executat pe o anumită perioadă de timp, în comenzi și loturi diferite.

5.2.1. Soluția constructivă a standului realizat

Soluția constructivă a standului conceput și realizat în cadrul acestei cercetări prezintă avantaje în raport cu standurile comerciale existente deoarece, pe același stand se pot face ambele testări, la tracțiune și la torsiune, prin încorporarea în stand a unui senzor și a unei plăci de achiziții de date, rezultatele măsurătorilor pot fi înregistrate și stocate pe un dispozitiv digital.

Din punct de vedere constructiv standul se compune din următoarele elemente principale: un corp de susținere, un braț mobil pe care este atașată o greutate necesară generării forței, în vederea realizării tracțiunii, o camă antrenată de un motor de curent continuu pe care glisează brațul mobil necesar realizării solicitării la tracțiune, un sistem utilizat pentru încercarea la torsiune și sistemul digital de înregistrare.

5.3. Realizarea verificărilor și interpretarea datelor

5.3.1. Descrierea metodei de testare

Metoda de testare a fost elaborată pentru a determina conformitatea din punct de vedere mecanic a cablurilor de secțiune 1,00 mm², clasa a cincea de flexibilitate, utilizate pentru aparate de uz casnic.

Încercările la tracțiune și torsiune pe standul pe care l-am conceput, constau în parcurgerea următoarelor etape:

1. pregătirea eșantionului înainte de încercare prin măsurarea rezistenței electrice;
2. pregătirea standului;
3. prinderea corectă a eșantionului în stand în vederea efectuării încercării la tracțiune;
4. efectuarea încercării la tracțiune;
5. detașarea din sistemul de prindere și marcarea eșantionului în vederea efectuării încercării la torsiune;
6. prinderea în sistemul de prindere pentru efectuarea încercării la torsiune;
7. realizarea încercării la torsiune;

8. detașarea eşantionului și măsurarea decalării marcajelor în urma torsiunii;
9. verificarea rezistenței electrice a cablului după efectuarea încercărilor mecanice, pentru constatarea conformității sau neconformității cablului.

Pregătirea eşantionului înainte de testare începe prin măsurarea inițială a rezistenței electrice a probei și notarea valorii în buletinul de încercări înregistrat în sistemul de management al calității.

Pregătirea standului constă în reglarea greutateii de încercare pentru aplicarea forței de 60N.

Prinderea corectă a eşantionului se realizează inițial prin fixarea acestuia în partea superioară a standului, de senzor, după care se fixează de brațul mobil, astfel încât rolele acestuia să se afle pe partea camei de înălțime maximă.

Pentru a începe efectuarea încercării se pornesc concomitent motorul de acționare a standului și aplicația. Încercarea are o durată de 100 de secunde, după care standul se oprește automat, moment în care se oprește și rularea aplicației de pe calculator.

După încercarea la tracțiune se îndepărtează eşantionul din sistemele de prindere și se marchează cablul cu un marker de culoare deschisă în vederea pregătirii pentru încercarea la torsiune.

Imediat după testul de tracțiune, pe același eşantion se efectuează încercarea la torsiune. Pentru aceasta eşantionul se fixează în sistemul de prindere al dispozitivului de torsiune de pe stand. Un capăt al cablului se fixează în sistemul de prindere și celălalt capăt se fixează de rola cu care se efectuează încercarea. În vederea realizării încercării la torsiune se atașează firul fixat în rola de torsiune, de brațul mobil al standului. Rola de torsiune are diametrul de 4 cm, ceea ce creează un braț al momentului de torsiune de 2 cm.

Încercarea la torsiune se realizează prin aplicarea unui cuplu de 0,25 N·m, format dintr-o forță de 12,5 N și brațul forței de 2 cm.

În urma testării se consemnează rezultatele și se verifică probele vizual și prin măsurători, după care se decide dacă produsul este conform sau, dacă este nevoie de alte decizii cu privire la îmbunătățirea sau schimbarea proceselor de producție sau a materialelor utilizate în proces. În cadrul verificărilor se constată decalajul dintre cordon și clema de prindere la încercarea la tracțiune, care arată distanța de deplasare a cordonului și care nu trebuie să depășească 2 mm, precum și decalajul rezultat în urma încercării la torsiune, care nu trebuie să depășească 4 mm.

Conformitatea produsului se constată prin verificarea electrică, măsurându-se valoarea rezistenței electrice a cablului după efectuarea încercărilor mecanice, valoare care trebuie să fie identică celei măsurate înainte de efectuarea testării.

Validarea în practică a metodei de încercare a cablurilor s-a realizat pe un lot de 20 de cordoane din clasa a cincea de flexibilitate, utilizate pentru aparate de uz casnic, cu secțiuni de 1,00 mm² cu 31 de fire. Acestea se utilizează pentru dispozitive cu un consum moderat de energie electrică, ceea ce necesită încercări mai severe, în care cablurile sunt testate la forțe de 60 N.

5.4. Concluzii ale capitolului

Eficiența încercărilor mecanice de tracțiune și torsiune poate fi asigurată prin utilizarea de standuri moderne digitale, precum cel proiectat și executat în cadrul acestei cercetări, care permite efectuarea testărilor fără transferarea probelor, reducerea timpului total de încercare, reducerea

erorilor umane, vizualizarea efectelor pe care le are solicitarea la tracțiune pe conductorul de cupru în interiorul cablurilor, înregistrarea digitală a rezultatelor cu posibilități de vizualizare și prelucrare ulterioară.

Încercările mecanice efectuate asupra celor 20 de cordoane H05VV-F 3G1,00 au demonstrat că acestea se încadrează în prevederile standardului IEC 60335. Alungirile cablurilor la încercarea de tracțiune se situează între 1,51 -1,54 mm iar la încercarea la torsiune în intervalul 2,93 -2,98 mm.

Infrastructura creată pentru execuția încercărilor, constă într-un stand pentru testarea caracteristicilor mecanice ale cablurilor, care este conceput, proiectat și executat în cadrul acestei cercetări doctorale. Utilizarea s-a curentă în laboratorul de încercări al producătorului de cabluri Top Electro a relevat o serie de concluzii și avantaje ale utilizării sale față de standurile de testare existente la momentul actual:

- standul permite testarea cablurilor în raport cu prevederile standardului IEC 60335 prin încercarea succesivă la tracțiune și torsiune;
- reducerea timpilor totali de încercare a probelor datorită eliminării timpilor de montare/demontare/manevrare a probelor între două dispozitive;
- reducerea erorilor umane, datorită poziționării defectuoase, sau nesigure a greutății de pe stand;
- posibilitatea vizualizării efectelor pe care le are solicitarea la tracțiune pe conductorii de cupru, în interiorul cablurilor;
- oprirea automată a dispozitivului după terminarea numărului de ciclurilor de testare setate;
- înregistrarea digitală a rezultatelor cu posibilități de vizualizare și prelucrare ulterioară.

Fabricația cablurilor din clasa 5 de flexibilitate având secțiunea alcătuită din 31 de fire de 1,00 mm² a fost atestată prin buletinul de analiză și certificatul de aprobare a locului fabricației emis de organismul de certificare VDE.

CAPITOLUL 6

CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII ORIGINALE, DIRECȚII DE CERCETARE VIITOARE

Cercetarea doctorală este relevantă și inovativă în domeniu, deoarece constituie primul studiu de acest fel în domeniul optimizării fabricației conductoarelor de cupru multifilare din clasa 5 de flexibilitate.

Originalitatea tezei derivă din caracterul explorator al cercetărilor doctorale, prin care au fost realizate studii interdisciplinare cu numeroase contribuții științifice de importanță tehnologică, economică și managerială, dintre care se evidențiază contribuțiile prezentate în cele ce urmează.

6.1. Contribuții în domeniul cercetării teoretice

Am analizat stadiul actual privind producerea cablurilor electrice, construcția, clasificarea și

modul de simbolizare, proprietățile cablurilor electrice și factorii care influențează aceste proprietăți, fiind analizate materialele folosite la construcția cablurilor electrice utilizate pentru producția de cordoane de alimentare pentru aparate electrocasnice cât și a metodelor actuale de optimizare a construcției cablurilor flexibile.

Am analizat și am studiat experimental eșantioane de cabluri produse de firme europene reprezentative prin care am arătat că nu există o metodologie de optimizare a conductoarelor, care să conducă la o masă minimă și un cost de producție minim, astfel încât rezistența electrică să fie sub valoarea maximă impusă de standarde.

Am demonstrat că rezistența electrică a conductorului multifilar depinde atât de diametrul firelor (d) cât și de numărul de fire (N) și este invers proporțională cu produsul $N \cdot d^2$. Am arătat că masa conductorului este direct proporțională cu produsul $N \cdot d^2$ și am introdus un set de coeficienți prin care se definește clasa de importanță a criteriilor de rezistență electrică, respectiv clasa de importanță a criteriilor de masă, după cum urmează: $C1$ este coeficientul de valoare a rezistenței electrice, care reflectă calitatea produsului și $C2$ reprezintă coeficientul de valoare a masei, care reflectă costurile de producție.

Am structurat procedeul de optimizare a conductoarelor multifilare din clasa 5 de flexibilitate, cu secțiunea de 1 mm^2 , prin descrierea celor 10 etape care îl alcătuiesc și schema logică aferentă.

Noua metodă inovativă de stabilire a diametrului și numărului firelor din componența conductoarelor multifilare din clasa 5 de flexibilitate, permite realizarea unui optim între costurile de prelucrare, masa conductorului și valoarea rezistenței electrice.

Am cercetat cadrul de asigurare a calității fabricației noilor conductoare multifilare prin tratarea aspectelor specifice managementului calității în producția de cablaje și am sistematizat procedurile de control pe parcursul fabricației.

Am identificat principalele tipuri de neconformități care apar în fabricația cablurilor și am creat o bază utilă de date prin descrierea, studiul cauzelor care le generează și formularea de măsuri de eliminare a neconformităților.

Am proiectat un stand digital cu placă de achiziții de date pentru verificarea cablurilor la solicitările de tracțiune și torsiune.

Am dezvoltat programul software WireBrokePlotter conceput în limbajul C# prin utilizarea NET Framework pentru prelucrarea datelor preluate cu ajutorul standului de încercări.

6.2. Contribuții originale în domeniul cercetării experimentale

Am studiat caracteristicile dimensionale și parametrii funcționali ai cablurilor electrice prin numărul de fire din componența conductorului, diametrul firului și valoarea secțiunii, în strânsă legătură cu caracteristicile electrice formate din rezistența electrică și conductivitate, pe un eșantion reprezentativ format din 35 cabluri, de secțiune $1,00 \text{ mm}^2$, cu trei conductoare multifilare, clasa de flexibilitate 5 aflate în producția curentă a celor mai reprezentativi producători europeni și am arătat factorii care influențează proprietățile cablurilor electrice utilizate pentru producția de cordoane de alimentare ale aparatelor electrocasnice.

Am validat în practică a metodologia de optimizare a conductoarelor multifilare din clasa 5

de flexibilitate prin implementarea acesteia la compania Top Electro din Târgu Mureș în procesele de fabricare a cablurilor cu 31 de fire, confirmată prin concordanța dintre diagramele rezistenței electrice trasate în funcție de diametrul firului, prin utilizarea modelului teoretic respectiv a măsurătorilor experimentale, care au forme identice, iar valorile rezistențelor care le descriu sunt foarte apropiate, cu erori care au valori cuprinse în intervalul $0, \dots, 5 \cdot 10^{-2} \Omega/\text{km}$.

Cu suportul analizei Pareto am identificat defectele și neconformitățile care apar cel mai frecvent în fabricație, care în ordinea descrescătoare a frecvenței de apariție sunt: diametrul cablului prea mic, cablu cu arsuri pe suprafața izolației, aspectul cablului fără luciu, manta tăiată.

Cu ajutorul diagramei cauză-efect am analizat cauzele neconformităților identificate pe care le-am descris în contextul procesului productiv de la compania Top Electro.

Am verificat din punct de vedere al rezistenței la solicitările mecanice conformitatea conductoarelor multifilare din clasa 5 de flexibilitate cu 31 de fire și secțiunea de $1,00 \text{ mm}^2$, produse de compania Top Electro, în raport cu prevederile standardului IEC 60335.

Am dezvoltat o infrastructură adecvată de laborator, prin conceperea și realizarea fizică a unui stand digital cu placă de achiziții de date pentru verificarea cablurilor la solicitările de tracțiune și torsiune.

Am certificat produsul conductor multifilar din clasa 5 de flexibilitate cu 31 de fire la organismul VDE.

Impactul potențial al rezultatelor cercetării poate fi formulat în contextul interdisciplinar al considerațiilor *tehnologice, economice și manageriale* prin:

- **facilitarea** proiectării unor noi structuri optimizate de conductoare, de mase reduse și rezistențe electrice impuse de standarde;
- **reducerea** consumurilor tehnologice de cupru, o materie primă costisitoare;
- **creșterea** eficienței economice a proceselor de fabricație a conductoarelor;
- **creșterea** posibilităților de testare a conductoarelor fabricate prin digitizarea procesului, și vizualizarea rezultatelor testelor;
- **reducerea** timpilor de testare a probelor în laborator;
- **scăderea** probabilităților de apariție a neconformităților prin explorarea lor exhaustivă și cunoașterea metodelor de prevenire, tratare și eliminare;
- **creșterea** prestigiului IOSUD prin prezența în **curentul științific principal** al articolelor publicate și indexate Clarivate.

6.3. Direcții de cercetare viitoare

Deoarece cercetarea se referă la conductoarele de cupru multifilare din clasa 5 de flexibilitate, de secțiune $1,00 \text{ mm}^2$ și nu acoperă întreaga paletă de produse ale producătorilor de cablaje, aceasta poate fi extinsă și îmbunătățită prin studii ulterioare, cu obiective referitoare la:

- Extinderea metodologiei de optimizare a conductoarelor multifilare din clasa 5 de flexibilitate, cu secțiunea de 1 mm^2 către toate secțiunile nominale ale conductoarelor din această clasă care sunt prevăzute în standardul SR EN 60228;
- Metode de optimizare a conductoarelor de cupru din clasele de flexibilitate 1, 2 sau 6;
- Studiul comparativ al conductoarelor fabricate în Europa comparativ cu alte conductoare

- fabricate pe mapamond;
- Elaborarea de noi metode de optimizare a conductoarelor de cupru care să țină seama de compoziția materialului conductor;
 - Metode de optimizare a conductoarelor din alte materiale decât cuprul;
 - Studiul unor materiale alternative care ar putea să înlocuiască conductoarele fabricate în prezent;
 - Optimizarea proceselor tehnologice de fabricație a conductoarelor de cupru multifilare prin reducerea duratelor de proiectare și asimilare în fabricație.

BIBLIOGRAFIE

[6] Brandt, M.J., Johnson, K.M., Elphinston, A.J., Ratnayaka, D.D. *Chapter 19 - Pumping, Electrical Plant, Control and Instrumentation*, Twort's Water Supply (Seventh Edition), Butterworth-Heinemann, pp. 777-828, 2017.

[12] SR EN 60446:2007, *Principii fundamentale si de securitate pentru interfața om-mașină, marcare și identificare. Identificarea conductoarelor prin culoare sau prin reper numeric*, <https://magazin.asro.ro/ro/standard/71085>.

[13] Moore, G.F. *Electric Cables Handbook, Third Edition*, Blackwell Science Ltd, Blackwell Publishing, pp. 233-234, 1997.

[14] Banks, V.A.A., Fraser, P.H., Gracias, D., Willis, A.J. *Wires and Cables, chapter in Newnes Electrical Power Engineer's Handbook (Second Edition)*, Elsevier, pp. 247-278, 2005.

[16] SR EN 60228:2005 – *Conductoare pentru cabluri izolate*, <https://magazin.asro.ro/ro/standard/109521>.

[38] Davenport, W.G., King, M., Schlesinger, M., Biswas A. K. *Extractiv metallurgy of copper*, Pergamon, pp. 330, 2002.

[41] Thue, W.A. *Electrical power cable engineering, Second Edition*, Marcel Dekker, pp. 142, 2003.

[55] Napieralska-Juszczak, E., Napieralski, P. *Optimizing the Manufacturing Process of Twisted Cables: The Result is an Increase in Conductivity and a Reduction in Weight*, IEEE Industry Applications Magazine, pp. 45-52, 2019.

[56] Shafieipour, M., Chen, Z., Menshov, A., De Silvaa, J., Okhmatovski, V. *Efficiently computing the electrical parameters of cables with arbitrary cross-sections using the method-of-moments*, Electric Power Systems Research, 162, pp.37-49, 2018.

[57] Aghamohammadi, F., Yousefi, S. *Optimization of HV cables design & material consumption*, Amazonia Investiga, 7(15), pp. 279-289, 2018.

[58] Čiegis, R., Ilgevičius, A., Liess, H., Meilūnas, M., and Suboč., O. *Numerical simulation of the heat conduction in electrical cables*, Math. Model. and Anal., 12(4), pp. 425-439, 2007.

- [59] Čiegis, R., Čiegis, R., Meilūnas, M., Jankevičiūtė, G., Starikovičius, V. *Parallel numerical algorithms for optimization of electrical cables*, Mathematical Modelling and Analysis, 13(4), pp. 471-482, 2008.
- [60] Chukwuebuka M.U.D, Godwin, H., Igbokwe, N. *Design Approach for Quality Improvement and Cost Reduction: A Case Study of Cable Manufacturing*, Journal of Engineering Research and Reports, pp.1-8, 2020.
- [83] Vega, G., Haddi, A., Imad, A. *Investigation of process parameters effect on the copper-wire drawing*, Materials & Design, Vol. 30, Issue 8, pp. 3308-3312, 2009.
- [84] Santana Martinez, G.A., Qian, W.L., Kabayama L.K., Prisco, U. *Effect of Process Parameters in Copper-Wire Drawing*, Metals, Vol. 10 Issue 1, 105, pp. 1-11, 2020.
- [86] Alamoudi, M., Alamoudi, M.R. *Implementing Lean Methodology in a Power Cable Factory: A Case Study of a Low Voltage Cable*, American Journal of Industrial and Business Management, Vol. 9, pp. 2083-2097, 2019.
- [87] Maalem, L.A.E., Ech-Chhibat, M.E.H, Zahiri, L., Ouajji, H. *Total Productive Maintenance Implementation in Cables Manufacturing: A Case Study*, 1st International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET), pp. 1-6, 2020.
- [89] Hanhirova, J., Harjuhahto, J., Harjuhahto, J., Hirvisalo, V. *A machine learning based quality control system for power cable manufacturing*, IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), pp. 193-198, 2019.
- [90] Lentz, B., Sioma, A., Kwiek, P. *Quality control automation of electric cables using machine vision*, Conference: Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, Vol. 129, pp. 1-11, 2018.