



Universitatea Națională de Știință și Tehnologie  
**POLITEHNICA** din București  
Școala Doctorală de Inginerie **ENERGETICĂ**



# TEZĂ DE DOCTORAT

Contribuții la studiul ciclului de viață  
al stațiilor electrice

Contributions to the study of the life cycle  
of power substations

**Autor:** Ing. Georgiana ION

**Conducător de doctorat:** Prof. dr. ing. Sorina COSTINAȘ

BUCUREȘTI

2024

## CUPRINS

<b>CAPITOLUL 1: INTRODUCERE</b> .....	<b>4</b>
1.1. MOTIVAȚIE.....	4
1.2. SCOP.....	4
1.3. PROBLEMELE ABORDATE ȘI CONTRIBUȚIILE ORIGINALE REPREZENTATIVE .....	5
<b>CAPITOLUL 2: STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRII ASUPRA CICLULUI DE VIAȚĂ AL STAȚIILOR ELECTRICE ȘI IDENTIFICAREA TENDINȚELOR ÎN CONTEXTUL SMART GRIDS</b> .....	<b>6</b>
2.1. SINTEZA METODELOR ȘI TEHNICILOR DE CERCETARE AVANSATĂ A CICLULUI DE VIAȚĂ.....	6
2.2. MONITORIZAREA ȘI DIAGNOZA STAȚIILOR ELECTRICE .....	6
2.3. MENTENANȚA STAȚIILOR ELECTRICE.....	7
2.4. MODELE DE DECIZII PENTRU EVALUAREA CICLULUI DE VIAȚĂ .....	7
2.5. RELAȚIA ÎNTRE LCC ȘI ADOPTAREA NOILOR TEHNOLOGII .....	8
<b>CAPITOLUL 3: MODELE MATEMATICE DE ESTIMARE A CICLULUI DE VIAȚĂ. VALIDAREA ÎN CADRUL STAȚIILOR ELECTRICE</b> .....	<b>8</b>
3.1. MODELAREA MATEMATICĂ A CICLULUI DE VIAȚĂ .....	9
3.2. ANALIZA MODELELOR MATEMATICE ALE CICLULUI DE VIAȚĂ.....	9
3.4. PROPUNERE DE ÎMBUNĂTĂȚIRE A MODELULUI MATEMATIC AL LCC .....	10
<b>CAPITOLUL 4: EXTINDEREA CICLULUI DE VIAȚĂ PRIN MANAGEMENTUL MENTENANȚEI ECHIPAMENTELOR DIN STAȚIILE ELECTRICE. ABORDARE GREEN LEAN SIX SIGMA</b> .....	<b>11</b>
4.1. CONCEPTE ȘI ABORDĂRI MANAGERIALE .....	11
4.1.1. LEAN și SIX SIGMA .....	11
4.1.2. LEAN SIX SIGMA (LSS).....	11
4.1.3. GREEN LEAN SIX SIGMA (GLSS) .....	12
4.2. STUDII DE CAZ: APLICAREA CONCEPTULUI GLSS PENTRU MANAGEMENTUL MENTENANȚEI ECHIPAMENTELOR DIN TREI STAȚII ELECTRICE DE ÎNALTĂ TENSIUNE .....	12
4.2.1 ETAPA 1 GLSS: DEFINIRE.....	12
4.2.2 ETAPA 2 GLSS: MĂSURAREA PERFORMANȚELOR TEHNICE ALE ECHIPAMENTELOR DE ÎNALTĂ TENSIUNE.....	13
4.2.3. ETAPA 3 GLSS: ANALIZA IMPACTULUI DEFECTĂRII ECHIPAMENTELOR DE ÎNALTĂ TENSIUNE ASUPRA PERFORMANȚELOR STAȚIILOR .....	14
4.2.4. ETAPA 4 GLSS: ÎMBUNĂTĂȚIREA MANAGEMENTULUI MENTENANȚEI ECHIPAMENTELOR DE ÎNALTĂ TENSIUNE.....	14
4.2.4.1. Propunerea unui indice global de prioritate a acțiunilor de mentenanță (ig) .....	15

4.2.4.2. Propunerea unei noi metodologii de ierarhizare a echipamentelor electrice din punctul de vedere al priorității acțiunilor de mentenanță.....	15
4.2.4.3. Simulări grafice în Matlab pentru prioritizarea activităților de mentenanță pentru cele trei stații electrice, pe categorii de echipamente.....	16
4.2.5. ETAPA 5 GLSS: CONTROLUL REZULTATELOR ETAPELOR ANTERIOARE PENTRU ÎMBUNĂTĂȚIRE CONTINUĂ.....	16
4.2.5.1. Controlul prioritizării activităților de mentenanță pe categorii de echipamente pentru cele trei stații electrice .....	16
4.2.5.2. Propunerea unui algoritm al unui proces decizional pentru îmbunătățire continuă ..	18
4.3.CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE.....	18
<b>CAPITOLUL 5 PERSPECTIVE DE CONTINUARE A CERCETĂRILOR.....</b>	<b>19</b>
<b>DISEMINAREA REZULTATELOR CERCETĂRILOR EFECTUATE ÎN CADRUL TEZEI..</b>	<b>20</b>
<b>BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ.....</b>	<b>20</b>

**Cuvinte cheie:** ciclu de viață, Green Lean Six Sigma, indice global de prioritate a lucrărilor de mentenanță, LCC, managementul mentenanței, modelare matematică, monitorizare, simulare, stații electrice.

## CAPITOLUL 1:

### INTRODUCERE

#### 1.1. MOTIVAȚIE

Ciclul de viață al echipamentelor electrice se referă la durata de timp de la planificare, proiectare, dezvoltare, instalare, până la operare, mentenanță, re tehnologizare, modernizare și demolare. Etapa de re tehnologizare/modernizare este o strategie de reînnoire a activelor ce vizează optimizarea rezultatelor managementului activelor. Informațiile despre starea activelor, colectate în timpul etapei de exploatare/mentenanță, sunt utilizate pentru asigurarea îmbunătățirii continue de mărire a ciclului de viață.

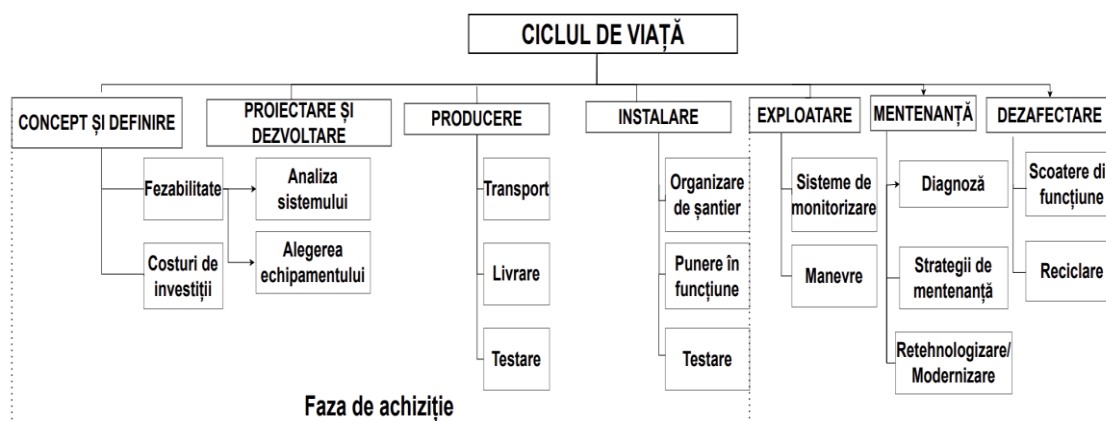


Fig. 1. Etapele ciclului de viață.

Lean Six Sigma este o tehnică utilizată în managementul activelor. În domeniul energetic, ea poate fi utilizată în producerea, transportul și distribuția energiei electrice pentru gestionarea activelor și îmbunătățirea satisfacției utilizatorilor. Această tehnică eficientă se concentrează pe patru aspecte esențiale: profitabilitate, calitate, productivitate și cost. Cu toate acestea, strategiile Lean și Six Sigma nu sunt suficiente pentru a îndeplini obiectivele de minimizare a deșeurilor, prevenirea poluării, stocarea energiei și a resurselor și reducerea costurilor. Astfel, s-a identificat o nouă metodologie, Green Lean Six Sigma, care utilizează aspecte ale metodologiilor tradiționale Lean și Six Sigma, oferind în același timp instrumentele necesare pentru a decide, implementa și susține îmbunătățiri care au un impact pozitiv și asupra mediului.

#### 1.2. SCOP

Teza analizează soluțiile care acoperă situația existentă și își propune să demonstreze justetea necesității și oportunității implementării conceptului Green Lean Six Sigma pentru managementul activelor din stațiile electrice de înaltă tensiune, precum și fezabilitatea acestui scop, respectând în același timp cerințele de reglementare și de consum, într-o expunere acceptabilă la risc.

### 1.3. PROBLEMELE ABORDATE ȘI CONTRIBUȚIILE ORIGINALE REPREZENTATIVE

Această lucrare reprezintă o contribuție în domeniul managementului mentenanței stațiilor electrice și propune rezolvarea problemelor prin implementarea metodologiei Green Lean Six Sigma.

**Capitolul 1** este o scurtă introducere în tematica lucrării, prezentând obiectivele și motivația acesteia. De asemenea, în acest capitol se oferă o succintă prezentare a conținutului tezei.

**Capitolul 2** este dedicat unui studiu bibliografic aprofundat pentru determinarea stadiului actual al cercetărilor asupra ciclului de viață al stațiilor electrice și pentru recunoașterea rolului managementul mentenanței în contextul smartgrid.

În **capitolul 3** este prezentat un studiu teoretic privind modelele matematice ale ciclului de viață și aplicabilitatea acestora în stațiile electrice. Sunt analizate 39 modele matematice de estimare ale ciclului de viață abordate de-al lungul timpului.

**Capitolul 4** prezintă un studiu teoretic și practic asupra oportunității extinderii ciclului de viață al stațiilor electrice prin abordarea metodologiilor tradiționale de management al activelor *Lean*, *Six Sigma* și *Lean Six Sigma*.

Este abordat în premieră conceptul *Green Lean Six Sigma* în domeniul stațiilor electrice și sunt făcute observații privind utilizarea instrumentelor *GLSS* în diferitele faze ale metodei *Definire, Măsurare, Analiza, Îmbunătățire și Control (DMAIC)* pentru a pune în evidență modul în care mentenanța contribuie la *LCC*.

*Faza I:* S-a formulat problema, s-au identificat restricțiile și s-au stabilit metodele de colectare a datelor de proiectare, construcție, punere în funcțiune, exploatare și mentenanță.

*Faza a II-a:* Măsurarea/ monitorizarea și colectarea datelor de la 491 echipamente electrice de înaltă tensiune aflate în funcțiune în cele 3 stații. Obiectivul a fost identificarea principalilor factori care afectează performanțele tehnice și analiza consecințelor defectării acestora asupra comportării dinamice a instalațiilor electrice.

*Faza a III-a:* Procesul de mentenanță a activelor din stațiile electrice a fost examinat și toate operațiunile și activitățile asociate direct și indirect cu mentenanța au fost analizate în scopul îmbunătățirii proceselor: s-a creat un chestionar de evaluare a impactului defectării echipamentelor electrice asupra sănătății și siguranței personalului și a mediului, s-a propus îmbunătățirea chestionarelor pentru evaluarea impactului defectării asupra stării tehnice și a importanței, s-au propus indici de stare tehnică ( $i_{st}$ ), importanță ( $i_{imp}$ ), protecția mediului, sănătate și securitate ( $i_{mss}$ ), s-au realizat simulări numerice și calcularea celor 3 indici, pe baza datelor obținute din măsurători/monitorizări pentru echipamentele electrice considerate.

*Faza a IV-a:* Propunerea unei soluții de îmbunătățire a mentenanței stațiilor prin generarea unui indice global de prioritate a acțiunilor de mentenanță ( $i_g$ ) s-a realizat pentru implementarea și monitorizarea soluțiilor adoptate în timpul etapei de analiză. S-a determinat, prin simulări grafice în Matlab, prioritatea activităților de mentenanță în funcție de mărimea indicelui global de performanță, pentru toate cele 491 echipamente electrice din stațiile analizate.

*Faza a V-a:* Controlul are drept scop asigurarea sustenabilității rezultatelor obținute la nivelul stațiilor și a beneficiilor financiare la nivelul companiei, beneficii datorate măririi ciclului de viață al echipamentelor electrice.

În final s-au identificat principalele contribuții științifice și tehnice.

**Capitolul 5** prezintă perspectivele de continuare a cercetărilor prin realizarea unei analize de tip SWOT cu scopul de a identifica punctele forte și punctele slabe ale factorilor interni (la nivel de companie) și factorilor externi (atribuite mediului).

## CAPITOLUL 2:

### STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRII ASUPRA CICLULUI DE VIAȚĂ AL STAȚIILOR ELECTRICE ȘI IDENTIFICAREA TENDINȚELOR ÎN CONTEXTUL SMART GRIDS

#### 2.1. SINTEZA METODELOR ȘI TEHNICILOR DE CERCETARE AVANSATĂ A CICLULUI DE VIAȚĂ

În literatura tehnică de specialitate se identifică numeroase abordări pentru analiza ciclului de viață (eng. *LCC - Life Cycle Cost*) a unei stații electrice. Figura 2.1. prezintă evoluția în timp a publicațiilor în funcție de tipul de metodă de cercetare abordată.

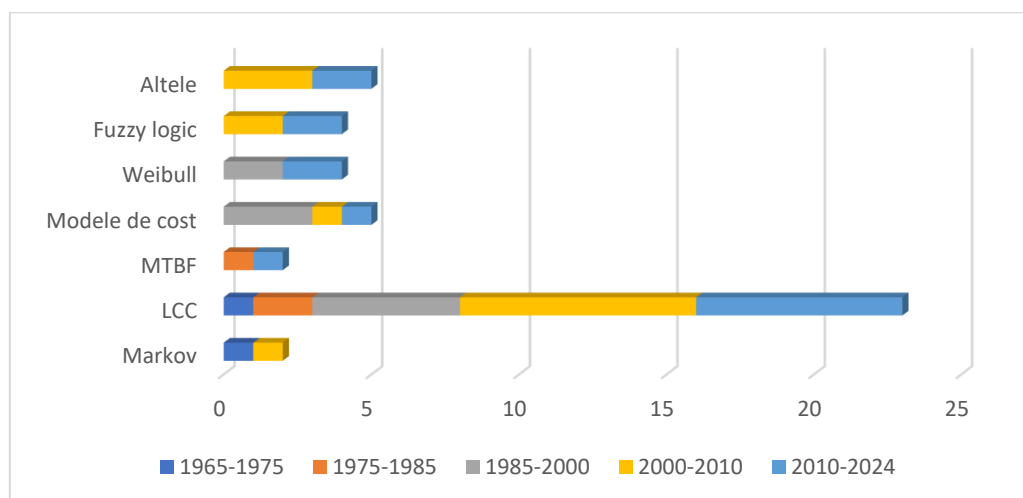


Fig. 2.1. Rezultatele documentării cu privire la evoluția publicațiilor în funcție de metoda de cercetare a LCC abordată.

În analiza *LCC*, procesul de optimizare este aplicat fiecărei alternative considerate în studiu [1]. Așadar, procesul de optimizare înseamnă găsirea unui set de parametri care minimizează *LCC* și care poate fi aplicat în activitățile specifice *LCC*, cum ar fi optimizarea proiectării, optimizarea înlocuirii echipamentelor, optimizarea mentenanței, optimizarea pieselor de schimb, luând în considerare restricțiile specifice etc.

#### 2.2. MONITORIZAREA ȘI DIAGNOZA STAȚIILOR ELECTRICE

Sistemele de monitorizare actuale și/sau diagnosticare automată îmbunătățesc supravegherea echipamentelor electrice în timp real și planificarea mentenanței. Metodele de evaluare a stării tehnice și de diagnoză, elaborarea politicilor de mentenanță, precum și managementul activelor, permit un acces sporit la informații valoroase privind parametrii critici ai stațiilor electrice, impun identificarea și evaluarea tendințelor din domeniu și o analiză detaliată a acestora.

Metodele și protocoalele de comunicație, împreună cu măsurile de securitate cibernetică implementate în cadrul sistemului de monitorizare, permit operatorului de sistem electroenergetic să vizualizeze operarea generală a stației electrice în timp real. Datele eșantionate oferă informații de detaliu pentru analiza stării tehnice a sistemului în scopul evitării apariției unor incidente.

### 2.3. MENTENANȚA STAȚIILOR ELECTRICE

Gestionarea mentenanței în contextul ciclului de viață este caracterizată de doi factori: restricțiile de necontinuitate a alimentării cu energie electrică a consumatorilor și LCC. Pe baza conceptului LCC se evită mentenanța echipamentelor care și-au depășit durata de viață efectivă. Renovarea sau înlocuirile în perioada de maturitate sunt opțiuni care trebuie evaluate pentru eliminarea parțială sau totală a cauzelor de defectare. Combinația dintre TBM (*eng. Time Based Maintenance*) și CBM (*eng. Condition Based Maintenance*) este strategia principală pentru acțiunile de mentenanță care se desfășoară în prezent. RCM (*eng. Reliability Centred Maintenance*) este o metodă care stabilește soluția optimă pe baza estimărilor sistematice ale stării echipamentelor. Utilizează criterii precum: istoric de mentenanță, experiența cu echipamente similare, date din timp real etc. Pe baza acestora, se identifică tipul de mentenanță care trebuie efectuată și ajută la stabilirea unui program de mentenanță.

Atât în cadrul companiilor de transport cât și în cadrul celor de distribuție a energiei electrice, există o serie de strategii de mentenanță pentru îmbunătățirea fiabilității echipamentelor (figura 2.2). Majoritatea companiilor utilizează o combinație de strategii care țin seama de aspectele practice și economice ale planificării mentenanței și maximizării disponibilității echipamentelor. Scopul este de a găsi soluții atât pe termen scurt, pentru optimizarea mentenanței și înlocuirea activelor existente, cât și pe termen lung, pentru optimizarea proiectării noilor active pentru a reduce nevoile viitoare de mentenanță și înlocuire.

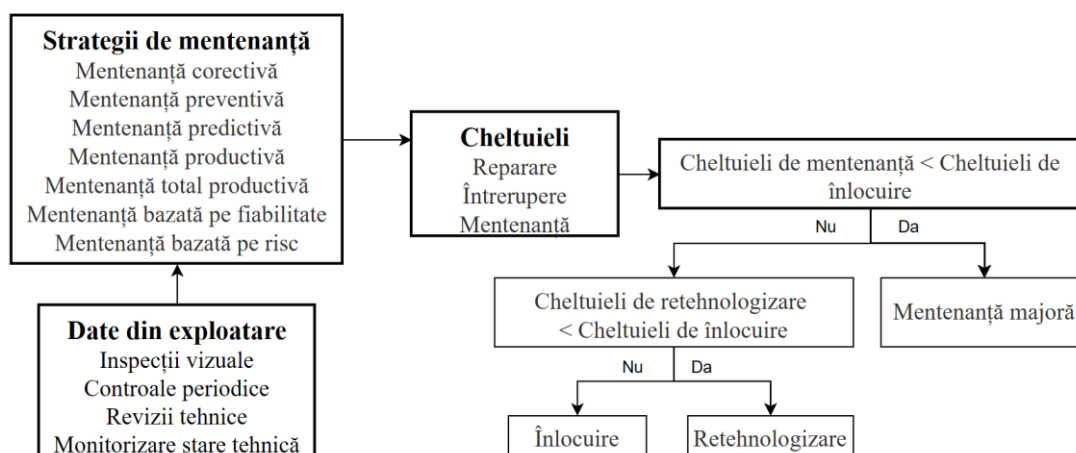


Fig. 2.2. Sinteza strategiilor de mentenanță și a activităților asociate

### 2.4. MODELE DE DECIZII PENTRU EVALUAREA CICLULUI DE VIAȚĂ

Strategiile de suport pentru luarea deciziilor se stabilesc prin identificarea activităților necesare pentru a menține la un nivel acceptabil fiabilitatea sistemului, prin realizarea unei mentenanțe optime și/sau înlocuirea componentelor critice ale sistemului. Companiile de transport și sistem folosesc o combinație de strategie bazată pe timp, bazată pe condiții, bazată pe fiabilitate, în funcție de diverse situații, cum ar fi: tipul echipamentului, poziția în sistem, accesibilitatea, disponibilitatea întreruperilor, înregistrările de fiabilitate, vârsta echipamentelor, disponibilitatea pieselor etc.

Operatorii de sistem se confruntă cu luarea deciziilor de reparare sau înlocuire a unui echipament, majoritatea acestora fiind în favoarea înlocuirii. Din acest motiv, este necesar să se facă o analiză economică completă prin care să se evalueze costurile de reparare și costurile de înlocuire. O decizie incorectă poate avea un impact semnificativ asupra performanței echipamentelor, a costurilor de mentenanță și de operare.

## 2.5. RELAȚIA ÎNTRE LCC ȘI ADOPTAREA NOILOR TEHNOLOGII

Necesitatea implementării Smart Grid este influențată de îmbătrânirea echipamentelor electrice, de limitările termice, limitările operaționale și de securitatea alimentării cu energie electrică. Implementarea rețelei inteligente are ca rezultat optimizarea și reducerea insecurității cauzate de apariția evenimentelor accidentale ce au loc în timpul exploatarea instalațiilor de transport și distribuție a energiei electrice.

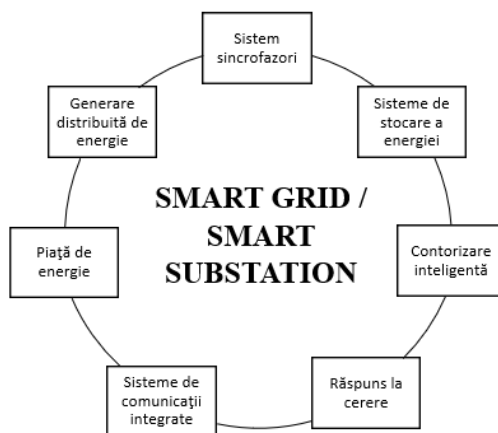


Fig. 2.3. Identificarea principalelor caracteristici ale rețelei inteligente / stație inteligentă

Rețeaua inteligentă depinde în mod direct de un sistem de comunicații fiabil, robust și sigur, cu o capacitate de viteză ridicată a datelor. Preocupările viitoare vor pune accent pe dezvoltarea unor algoritmi de securitate îmbunătățiți care să fie compatibili, pentru comunicarea în cadrul rețelei inteligente, și pe protocoale, precum și pe identificarea unor metode pentru reducerea și eliminarea interferențelor. În figura 2.3. sunt prezentate principalele caracteristici ale rețelei inteligente care sunt cerute de operatorii de sistem pentru satisfacerea consumatorilor și pentru asigurarea siguranței în funcționare a rețelei.

*LCC* contribuie la luarea deciziilor legate de alegerea tehnologiilor digitale aplicate în domenii, precum: managementul ciclului de viață, sisteme de stocare a energiei electrice, vehicule electrice, protecția mediului ambiant.

## CAPITOLUL 3:

### MODELE MATEMATICE DE ESTIMARE A CICLULUI DE VIAȚĂ. VALIDAREA ÎN CADRUL STAȚIILOR ELECTRICE

În cadrul acestui capitol accentul s-a pus pe evoluția modelelor matematice de estimare a ciclului de viață. La început se urmărea asigurarea funcționării în siguranță a sistemului prin exploatarea echipamentelor electrice utilizând modelele de fiabilitate, tehnici Markov etc, Ulterior, s-a încercat să se găsească soluții legate de evaluarea stării tehnice a echipamentelor, probleme legate de mediu, s-au dezvoltat modelele matematice prin care se realizează analizele cost-beneficiu. După care, algoritmi genetici au fost utilizați pentru a obține o viziune mai clară asupra costurilor ciclului de viață.

Abordarea diverselor metode pentru creșterea duratei de viață a unei stații electrice, de la reducerea emisiilor de SF<sub>6</sub>, avantajele utilizării GIS, până la îmbunătățirea programelor de



mentenanță, introducerea sistemelor de automatizare, introducerea unor sisteme mai avansate de monitorizare, metode de evaluare a incertitudinii, programare dinamică etc, au condus la rezultate avantajoase cu privire la acest subiect.

Tehnicile de optimizare a modelării matematice pentru îmbunătățirea duratei de viață trebuie să utilizeze metode stocastice și probabilistice pentru a satisface incertitudinile legate de siguranță în funcționare a sistemului în momentul apariției unui defect.

Cerințele legate de mediu pun presiune pe majoritatea companiilor de transport și distribuție pentru satisfacerea politicilor de mediu. De aceea, încă din procesul de proiectare trebuie să se realizeze studii de reducere a emisiilor de carbon.

Cele 39 de modele matematice analizate oferă perspective diverse cu privire la modul de evaluare a ciclului de viață al stațiilor electrice. Cu o mentenanță adecvată și cu un management al activelor potrivit cerințelor se pot obține rezultate spre mărirea duratei de viață a unei stații electrice. Studiile au evidențiat faptul că în analiza stării echipamentelor electrice pe lângă evaluarea tehnică, intră și componenta economică care are un rol esențial în decizii cu privire la reparații sau chiar înlocuiri. De aceea trebuie să se țină cont și de partea economică atunci când se realizează proiectul de planificare al stațiilor electrice.

### 3.1. MODELAREA MATEMATICĂ A CICLULUI DE VIAȚĂ

Modelarea matematică este folosită în toate domeniile de activitate, fiind utilă pentru a descrie un fenomen sau pentru a înțelege cum funcționează un sistem sau pentru a face predicții cu privire la comportamentul unor active. Pentru a construi un model matematic al ciclului de viață al unei stații electrice, este important să se ia în considerare toate aspectele care pot influența funcționarea în siguranță a instalației electrice.

Figura 3.1 arată evoluția în timp a publicațiilor în funcție de domeniul de analiză.

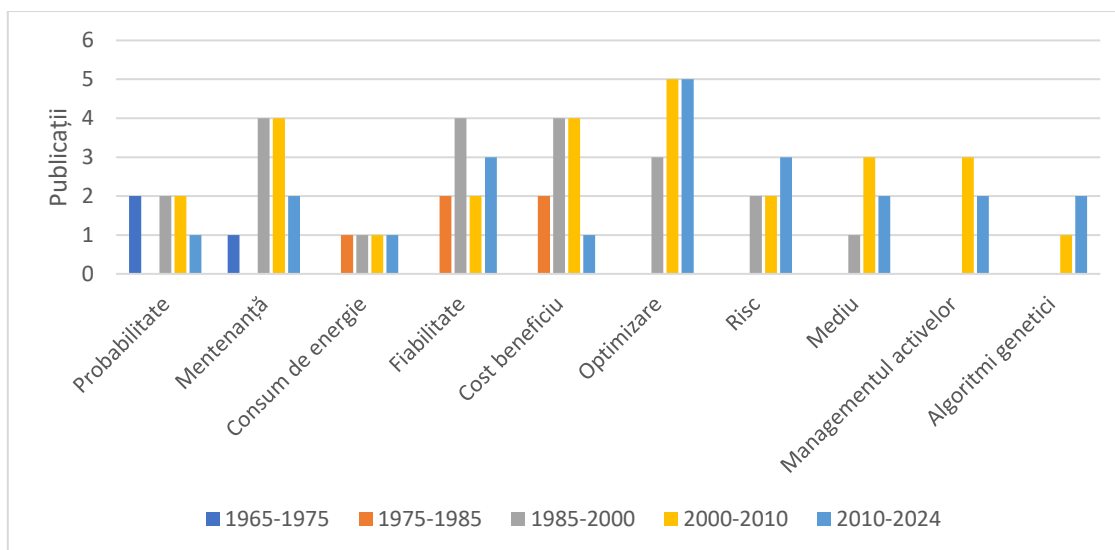


Fig. 3.1. Rezultatele documentării privind evoluția publicațiilor în funcție de domeniul de analiză

### 3.2. ANALIZA MODELELOR MATEMATICE ALE CICLULUI DE VIAȚĂ

Pentru a clasifica publicațiile cheie, au fost explorate baze de date, au fost identificate și analizate un număr de 106 articole de reviste și lucrări prezentate la conferințe de profil. Cu accent pe o mai bună înțelegere a celor mai eficiente strategii de modelare *LCC*, sunt investigate

diferite concepte, avantaje și bariere împreună cu o analiză calitativă a celor mai comune aplicații și domenii de utilizare.

Prin urmare, atunci când se construiește un model matematic de estimare a ciclului de viață se iau în considerare toate etapele în care este implicat fiecare echipament electric, inclusiv proiectarea, operarea, mentenanța, repararea, suportul și retragerea definitivă a acestuia din exploatare [2]. Începând cu secolul al XX-lea, cercetătorii s-au preocupat de estimarea duratei de viață rămase a stațiilor electrice. Accentul principal a fost pus pe fiabilitatea sistemului, pe performanța sistemului în funcție de starea echipamentului, pe o mai bună gestionare a costurilor pe tot parcursul ciclului de viață al elementului studiat. Începând cu anul 2000, accentul s-a pus pe deteriorarea echipamentelor electrice din stații și costurile asociate acestora.

Prelungirea duratei de viață a stațiilor este influențată de alegerea strategiilor pe termen lung [3]. Este afectată în principal de costurile de mentenanță, dar și de problemele de mediu. Prin urmare, majoritatea studiilor folosesc costul ciclului de viață ca model matematic pentru a crește durata de viață a stațiilor electrice.

### 3.4. PROPUNERE DE ÎMBUNĂTĂȚIRE A MODELULUI MATEMATIC AL LCC

Pentru a stabili un model matematic este important să se facă un studiu comparativ între diverse modele matematice, să se țină cont de variabilele ce se doresc a fi utilizate, disponibilitatea datelor și a parametrilor. Pe lângă aceste aspecte, cercetătorii trebuie să țină cont și de etapele de simulare a modelului, să aibe o viziune mai amplă asupra problemelor și necesităților actuale.

Pornind de la structura ciclului de viață prezentată în [2] și ținând cont de [4], se poate considera ca și model matematic ecuația (3.1) :

$$C_{LC} = C_A + \sum \frac{1}{(1+r)^{y_1}} C_O + \sum \frac{1}{(1+r)^{y_2}} C_M + \sum \frac{1}{(1+r)^{y_3}} C_R + \sum \frac{1}{(1+r)^{y_4}} C_F + \sum \frac{1}{(1+r)^{y_5}} C_E + \sum \frac{1}{(1+r)^{y_6}} C_{SSM} + \sum \frac{1}{(1+r)^{y_7}} C_D \quad (3.1)$$

unde :

$C_{LC}$  – costul ciclului de viață;  $C_A$  – costul de achiziții;  $C_O$  – costul de exploatare;  $C_M$  – costul de mentenanță;  $C_R$  – costul de reparații;  $C_F$  – costul suplimentar în caz de avarie;  $C_E$  – costul protecției mediului ambiant;  $C_{SSM}$  – costul asigurării sănătății și siguranței personalului de exploatare;  $C_D$  – costul de dezafectare a stației electrice;  $r$  – rata de actualizare;  $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7$  – anii în care costurile sunt incluse.

Modelul costului ciclului de viață este utilizat pentru a lua decizii cu privire la investițiile necesare pentru construirea unei stații electrice. Introducerea ratei de actualizare este justificată prin faptul că unele costuri apar la momente de timp diferite. De aceea, este necesar să se dezvolte un cadru de optimizare multialgoritm pentru găsirea unei soluții adecvate. Fiind un model robust, cu posibilități de dezvoltare, oferă posibilitatea de adaptare la cerințele viitoare.

Studiul de caz s-a concentrat pe beneficiile economice aduse de înlocuirea echipamentelor electrice vechi și implicit integrarea stației electrice în sistemul SCADA, reducând astfel semnificativ timpul de operare, de mentenanță. De asemenea, prin această investiție are loc o reducere estimată prudentă a cheltuielilor de operare și mentenanță cu 50%.

S-a utilizat ca și model matematic venitul net actualizat exprimat prin relația 3.2:

$$VNA = \sum_{t=1}^D \frac{V_t - (I_t + C_t)}{(1+i)^t} \quad (3.2)$$

unde :  $V_t$  – beneficiul anual obținut în urma realizării investiției;  $I_t$  – investiția anuală;  $C_t$  – cheltuieli anuale de exploatare;  $D$  – durata de studiu;  $i$  – rata de actualizare.

Pentru analiza cost – beneficiu s-a considerat o durată de studiu de 15 ani și o rată de actualizare de 5%. De asemenea au fost luate în considerare 2 cazuri : cazul 1 – cazul în care nu se implementează modernizarea și cazul 2 – cazul în care se implementează modernizarea.

Cheltuielile cu activitățile de mentenanță și reparații au reprezentat peste 27% din cheltuielile totale. Acestea se datorează vechimii și gradului avansat de uzură al echipamentelor existente, precum și a menținerii acestora în exploatare chiar dacă acestea sunt îmbătrânite. În momentul în care echipamentele sunt înlocuite se observă o scădere semnificativă a cheltuielilor cu 50%.

Analizând cheltuielile dinainte și după considerarea investiției și introducându-le în formula (3.6), rezultă că  $VNA > 0$ , ceea ce înseamnă că investiția este rentabilă.

## CAPITOLUL 4:

### EXTINDEREA CICLULUI DE VIAȚĂ PRIN MANAGEMENTUL MENTENANȚEI ECHIPAMENTELOR DIN STAȚIILE ELECTRICE ABORDARE GREEN LEAN SIX SIGMA

#### 4.1. CONCEPTE ȘI ABORDĂRI MANAGERIALE

##### 4.1.1. LEAN și SIX SIGMA

Originile *Lean* sunt legate de sistemul de producție Toyota, în care principalul obiectiv de management a fost reducerea deșeurilor [5]. Conceptul se bazează pe eliminarea risipei și îmbunătățirea fluxului în producție [6]-[8]. Metodologia *Six Sigma* a fost implementată pentru prima oară de Motorola (1987) și se bazează pe identificarea și eliminarea defectelor cu scopul de a îmbunătăți performanța sistemului [6], [9]. Motorola a creat o serie de pași, care au fost înlocuiți ulterior de către General Electric (GE) cu patru faze: măsurare, analiză, îmbunătățire și control. După aceea, faza de definire a fost adăugată înainte de faza de măsurare pentru a forma procesul *DMAIC* (eng. *Define, Measure, Analyze, Improve and Control*).

Există multe domenii în care cele două metodologii au baze comune în ceea ce privește: originea, principiile, conceptele, obiectivele și abordarea managementului de proiect. Diferențele dintre cele două metodologii constau în: definiție, complexitate, modul în care sunt privite, abordate, domeniul de aplicare, identificarea lacunelor, natura nivelului problemei etc. Astfel, integrarea celor două metodologii este posibilă și benefică.

##### 4.1.2. LEAN SIX SIGMA (LSS)

Adoptarea modelului LSS pentru optimizarea mentenanței preventive [89] poate ajuta la realizarea unei analize de stabilire a obiectivelor operaționale și planificare a acțiunilor de mentenanță. Pentru atingerea obiectivelor, modelul trebuie să parcurgă următorii pași:

- adoptarea unei structuri organizaționale bazată pe activitățile de mentenanță și nu pe strategii;
- introducerea unor măsuri de performanță pentru fiecare activitate de mentenanță.
- identificarea factorilor care afectează îmbunătățirea activităților de mentenanță.

- identificarea tuturor elementelor de cost legate de modificările factorilor care afectează îmbunătățirea activităților de mentenanță.

### 4.1.3. GREEN LEAN SIX SIGMA (GLSS)

Datorită limitărilor Lean și Six Sigma, companiile au nevoie de tehnici solide din punct de vedere științific care să ajute la luarea eficientă a deciziilor de mediu [10]-[14]. Cea mai utilizată abordare este DMAIC [10], care este recunoscută ca un ciclu de îmbunătățire continuă a rezolvării problemelor (fig. 4.1).

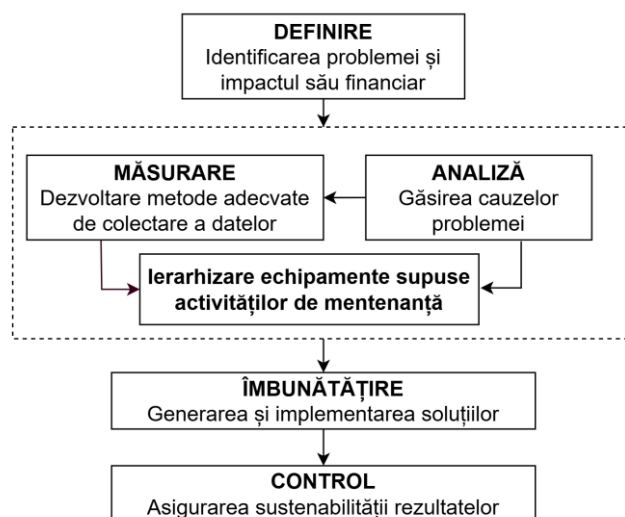


Fig. 4.1. Etapele GLSS

*Green Lean Six Sigma (GLSS)* este o strategie care poate ajuta companiile în domeniul energetic la atenuarea impactului asupra mediului, cum ar fi poluarea, emisiile de carbon, epuizarea resurselor și consumul de energie.

## 4.2. STUDII DE CAZ: APLICAREA CONCEPTULUI GLSS PENTRU MANAGEMENTUL MENTENANȚEI ECHIPAMENTELOR DIN TREI STAȚII ELECTRICE DE ÎNALTĂ TENSIUNE

### 4.2.1 ETAPA 1 GLSS: DEFINIRE

*Scopul* acestei etape este de a oferi managerului de mentenanță o metodă alternativă de lucru care să fie utilizată pentru mărirea ciclului de viață a unei stații electrice luând în considerare toate etapele ciclului de viață.

*Obiective:* serviciu fiabil de alimentare cu energie electrică pentru utilizatorii finali; durabilitatea stației electrice; posibilitatea înlocuirii izolației stațiilor compacte cu SF6 cu gaze free-SF6; modalități de autodiagnosticare și autovindecare a echipamentelor electrice; atenuarea impactului de mediu asupra stațiilor electrice; stimularea evacuării energiei electrice produsă fără emisii de carbon.

Pentru aplicarea conceptului GLSS, se consideră trei stații electrice cu tensiuni și scheme monofilare diferite, din cadrul rețelei de transport. Toate cele trei stații aparțin SEN și sunt situate în zona centrală a țării.

*Restricții:* Standarde de performanță, în vigoare, pe care trebuie să le respecte echipamentele electrice.

*Soluții:* stații digitalizate; stații noi, amplasate chiar în centrul de consum al sarcinilor pentru limitarea pierderilor de putere și energie electrică; flexibilitate în sistemele de control al puterii electrice tranzitate.

#### 4.2.2 ETAPA 2 GLSS: MĂSURAREA PERFORMANTELOR TEHNICE ALE ECHIPAMENTELOR DE ÎNALTĂ TENSIUNE

Etapa de măsurare include colectarea informațiilor, precum și analiza datelor existente pentru stabilirea unei metode fiabile de măsurare a parametrilor procesului și performanței. Această etapă include unor instrumente de măsurare avansate. Identificarea potențialelor defecțiuni de proiectare sau de punere în funcțiune se realizează utilizând *FMEA*.

În cadrul acestei etape s-au prezentat tabele de identificare a factorilor care afectează performanțele tehnice ale echipamentelor de înaltă tensiune. Aceste tabele includ: tipul de echipament, componentele principale ale echipamentului, factorii care afectează performanțele tehnice ale echipamentului și procesele de degradare a echipamentului (modurile de defectare majore și minore).

Echipamentele de înaltă tensiune luate în considerare sunt: întreruptoare, separatoare, transformatoare de măsură de curent și tensiune și descărcătoare.

Stațiile electrice luate în considerare în cadrul studiului de caz sunt echipate cu două tipuri de întreruptoare (fig. 4.2):

- întreruptoare cu izolație în hexafluorură de sulf, fabricate de *ABB*, *Areva*, *Siemens* (59 de întreruptoare, dintre care 1 înruptor *GIS*);
- întreruptoare cu izolație în ulei, fabricate de *EP Craiova* (14 întreruptoare).

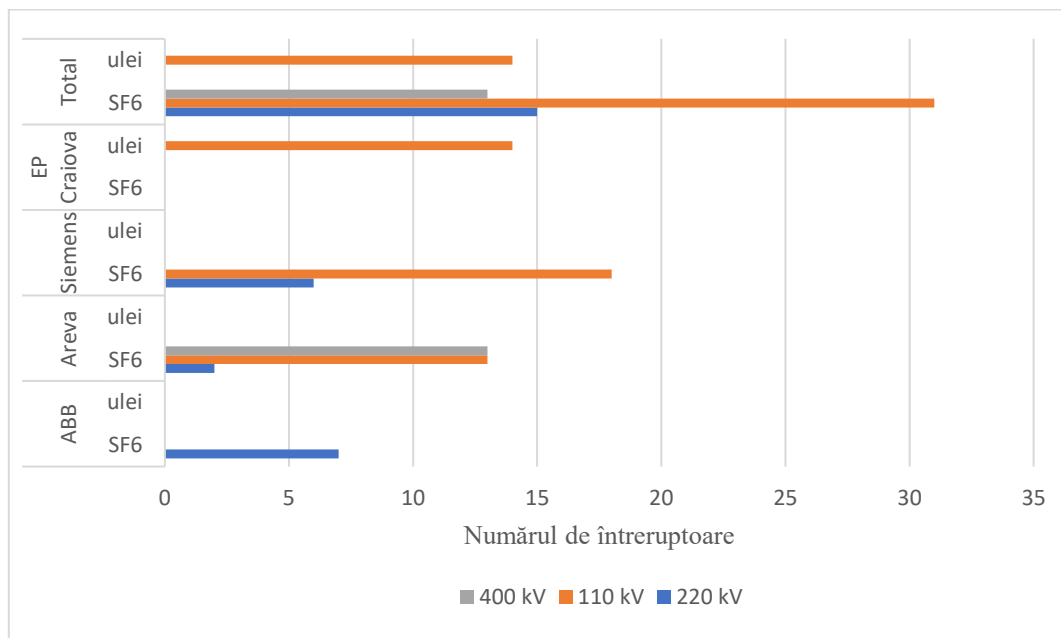


Fig. 4.2 Tipuri de întreruptoare evaluate, clasificate în funcție de nivelul de tensiune, mediul de stingere a arcului electric și de firmele producătoare ale acestora.

În cadrul acestei etape este prezentat un exemplu cu principalele puncte de măsurare și aparatele de măsură utilizate pentru evaluarea echipamentelor pe baza indicilor de stare tehnică, importanță și de sănătate și securitate.

### 4.2.3. ETAPA 3 GLSS: ANALIZA IMPACTULUI DEFECTĂRII ECHIPAMENTELOR DE ÎNALTĂ TENSIUNE ASUPRA PERFORMANTELOR STAȚIILOR

Etapa verifică dacă măsurile aplicate corespund cu rezultatele așteptate și dacă cerințele stabilite pentru îmbunătățirea procesului de mentenanță sunt aplicabile sau ar trebui redefinite și filtrate. Etapa include, de asemenea, erorile potențiale, precum și cauzele acestora.

Criteriile de evaluare a echipamentelor sunt utilizate pentru a determina indicii (stare tehnică, importanță, sănătate și securitate a personalului) necesari pentru a face o ierarhizare a echipamentelor. Fiecare tip de echipament are un set specific de criterii de performanță.

Există rate de criticitate (scoruri) pentru indicii de stare tehnică și importanță, de la 1 la 5. Majoritatea activelor evaluate vor fi în grupurile 1 și 2. Acest lucru înseamnă că echipamentele nu necesită nicio acțiune de remediere specifică la momentul evaluării. Cele din grupurile 3, 4 și 5 ar trebui să aibă un plan de acțiune individual în funcție de modul de defectare identificat, rata generală de progresie și expunerea la criticitate.

#### (1). Indicele de stare tehnică

Criteriile folosite pentru evaluarea indicelui de stare tehnică pot fi: experiența operațională, inspecțiile vizuale sau rezultatele măsurătorilor și monitorizării.

$$i_{st} = \prod_{n=1}^5 \text{Criteriu } n. \quad (4.1.)$$

#### (2). Indicele de importanță

Cunoașterea doar a stării tehnice a echipamentului nu este suficientă pentru planificarea activităților de mentenanță, este necesară estimarea consecințelor de defectare. Importanța unui echipament poate depinde de: aspecte tehnice, aspecte sociale și legale, aspecte financiare, impact asupra mediului, siguranței locului de muncă, sănătății ocupaționale etc. Indicele de importanță este un rezultat al evaluării riscului.

$$i_{imp} = \prod_{m=1}^5 \text{Criteriu } m \quad (4.2)$$

#### (3). Indicele de protecția mediului, sănătate și securitate

În acest caz, evaluarea și acordarea scorurilor se face de la 1 la 7 pentru consecințele cele mai probabile de apariție a unor avarii, la nivel de echipament al unei stații electrice, asupra sănătății ocupaționale, siguranței personalului de exploatare și a mediului ambiant.

$$I_{mss} = \prod_{s=1}^7 \text{Criteriu } s \quad (4.3)$$

S-au propus chestionare de evaluare a stării tehnice, a importanței și a sănătății și securității în muncă. Pe baza datelor obținute din măsurători, precum și a celor preluate din sistemele de monitorizare se poate atribui fiecărui criteriu de evaluare un scor. Pentru fiecare echipament din cadrul celor 3 stații electrice supuse analizei, se calculează indicii. Rezultatele obținute au fost reprezentate grafic.

### 4.2.4. ETAPA 4 GLSS: ÎMBUNĂȚĂȚIREA MANAGEMENTULUI MENTENANȚEI ECHIPAMENTELOR DE ÎNALTĂ TENSIUNE

Etapa are ca scop identificarea, implementarea și monitorizarea soluțiilor adoptate în timpul etapei de analiză, pentru a se asigura că soluția aleasă este cea optimă. Această fază include și standardizarea procedurilor de mentenanță, crearea unei aplicații de îmbunătățire a

informațiilor, proceduri, definirea strategiei de îmbunătățire, eliminarea activităților care nu sunt necesare și evaluarea riscurilor.

#### 4.2.4.1. Propunerea unui indice global de prioritate a acțiunilor de mentenanță ( $i_g$ )

Pe baza analizei stării tehnice a echipamentului, a importanței acestuia și al protecției mediului, sănătății și securității personalului operativ, se propune corelarea celor trei indicatori și calcularea unui **indice global de prioritate a acțiunilor de mentenanță** ( $i_g$ ). Expresia generală de calcul este:

$$i_g = \sqrt{i_{st}^2 + i_{imp}^2 + i_{mss}^2} \quad (4.4)$$

Cu ajutorul mediului de programare Matlab a fost realizată o reprezentare grafică 3D. Rezultatele pot fi reprezentate într-un sistem de coordonate x-y-z ca în Fig. 4.3. Pe axa ox se reprezintă indicatorul stării tehnice a echipamentului importanței ( $i_{st}$ ). Pe axa oy se reprezintă indicatorul importanței echipamentului în cadrul rețelei electrice ( $i_{imp}$ ). Pe axa oz se reprezintă indicatorul de mediu, sănătate și siguranță a personalului operativ ( $i_{ms}$ ).

Pentru fiecare punct de coordonate ( $i_{st}$ ,  $i_{imp}$ ,  $i_{ms}$ ) va rezulta câte un indice global ( $i_g$ ).

#### 4.2.4.2. Propunerea unei noi metodologii de ierarhizare a echipamentelor electrice din punctul de vedere al priorității acțiunilor de mentenanță

Pe baza valorii  $i_g$  se propune realizarea unei clasificări, care va indica o ierarhizare a echipamentelor electrice din punctul de vedere al priorității acțiunilor de mentenanță.

Distanțele de la fiecare punct  $g(i_{st}, i_{imp}, i_{ms})$  la origine (0,0,0) se vor nota cu  $d$ .

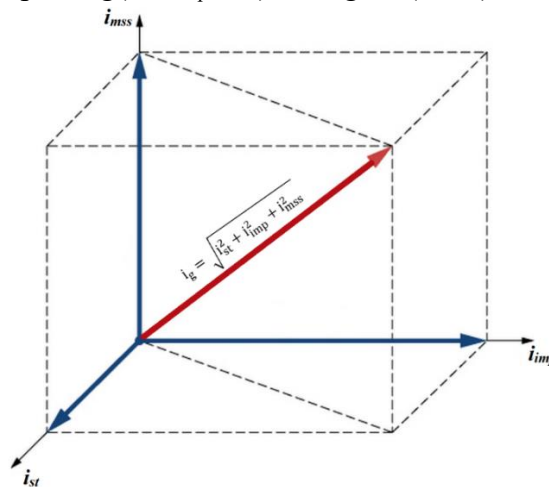


Fig. 4.3 Principiul determinării grafice a distanței  $d$  în diagrama de prioritate.

Stabilirea priorității acțiunilor de mentenanță se va face în funcție de distanțele  $d$  din diagrama de prioritate. Pentru fiecare echipament se calculează o distanță  $d_k$ , cu  $k = 1 \dots n$ , unde  $n = \text{nr. echipamentelor}$ . Analiza comparativă a mărimii distanțelor  $d_k$  stabilește ordinea în care echipamentele vor fi supuse acțiunilor de mentenanță. Echipamentele electrice care au cele mai mari distanțe  $d_k$  vor avea prioritate.

#### 4.2.4.3. Simulări grafice în Matlab pentru prioritizarea activităților de mentenanță pentru cele trei stații electrice, pe categorii de echipamente

S-au reprezentat diagrame 3D care evidențiază modul de stabilire a acțiunilor de mentenanță în funcție de mărimea **indicelui global de prioritate a acțiunilor de mentenanță**. Principial, evaluarea dependenței dintre fiecare doi indici  $i_{imp} = f(i_{st})$ ,  $i_{mss} = f(i_{st})$ ,  $i_{mss} = f(i_{imp})$  se va face prin utilizarea unor reprezentări grafice bidimensionale.

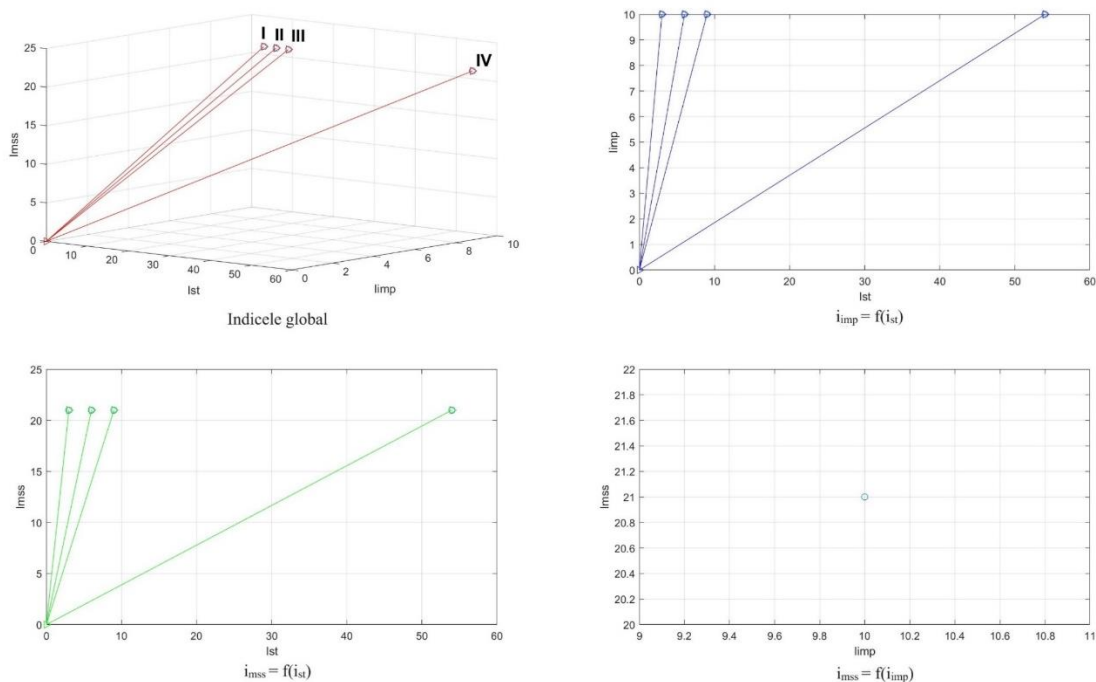


Fig. 4.4 Exemplu de stabilire a priorității activităților de mentenanță pentru întreruptoarele din stația A – 220 kV

Analiza grafică pentru prioritizarea activităților de mentenanță s-a realizat pentru fiecare dintre cele trei stații electrice, pentru fiecare întreruptor și separator din componența acestora.

Pentru stația A, analiza s-a extins și asupra transformatoare de măsură tensiune și a transformatoarelor de măsură curent.

#### 4.2.5. ETAPA 5 GLSS: CONTROLUL REZULTATELOR ETAPELOR ANTERIOARE PENTRU ÎMBUNĂTĂȚIRE CONTINUĂ

##### 4.2.5.1. Controlul prioritizării activităților de mentenanță pe categorii de echipamente pentru cele trei stații electrice

Într-o primă etapă, s-a controlat importanța echipamentului electric și s-a analizat în funcție de starea sa tehnică, pentru a estima nivelul impactului mentenanței (scăzut, mediu, ridicat) asupra scăderii riscului de defectare. Apoi, s-a urmărit impactul asupra mediului a echipamentului în funcție de starea sa tehnică, precum și în funcție de importanța acestuia, pentru ca echipamentul să își îndeplinească rolul în cadrul rețelei de transport cu respectarea criteriilor de specificație, inclusiv cerințele legate de mediu.

S-a prezentat rezultatul ierarhizării pe categorii a echipamentelor electrice, luate în considerare în studiu, în funcție de valoarea indicelui global de prioritate a acțiunilor de mentenanță rezultat.



Analizând rezultatele se pot realiza prognoze, se iau decizii și se planifică următoarele acțiuni de mentenanță. În funcție valoarea indicelui global se face o clasificare a activităților de mentenanță necesare, astfel:

- $i_g \in [ 0,50)$  – funcționare normală;
- $i_g \in [ 50, 1000)$  – inspecții tehnice;
- $i_g \in [ 1000, 5000)$  – mentenanță minoră;
- $i_g \in [ 5000, 10000)$  – mentenanță majoră;
- $i_g \geq 10000$  – înlocuire componente/echipament.

Pe baza clasificării de mai sus, s-au realizat graficele din figurile 4.5 și 4.6 pentru a evidenția întreruptoarele din cadrul stației A (220 kV, respectiv 110 kV), care depășesc limitele de funcționare în condiții de siguranță, precum și activitățile ce vor fi aplicate în funcție de valoarea indicelui global. Același principiu se aplică și pentru celelalte echipamente din componența stațiilor electrice.

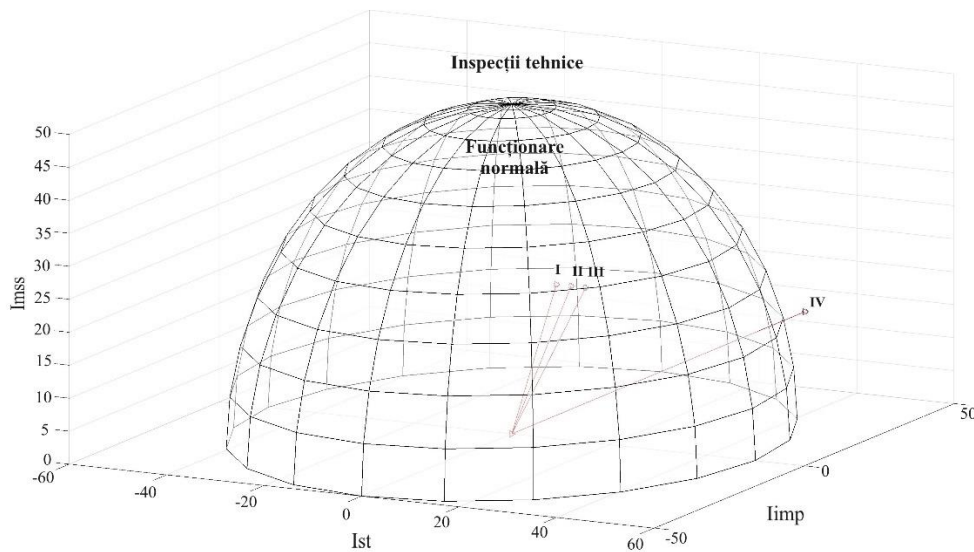


Fig. 4.5 Ierarhizarea activităților de mentenanță în funcție de valoarea indicelui global pentru întreruptoarele din stația A – 220 kV

Analizând figura 4.5, majoritatea întreruptoarelor se află în emisfera care definește funcționarea normală și, doar un întreruptor este în exteriorul acesteia, ceea ce înseamnă că acesta va avea nevoie de inspecții suplimentare. În ceea ce privește stația A – 110 kV (figura 4.6), valorile indicelui global sunt mult mai mari și din acest motiv s-au construit 3 emisfere: prima emisferă acoperă echipamentele ce au nevoie de inspecții tehnice ( $i_g < 1000$ ), a doua emisferă se ocupă de întreruptoarele pentru care  $i_g \in [ 1000, 5000)$  și care necesită activități de mentenanță minoră, iar a treia emisferă stabilește echipamentele ce sunt prioritare din puncte de vedere al necesității activităților de mentenanță majoră. Se observă că întreruptoarele din categoria VIII au valoarea indicelui global mai mare de 10000, ce conduce la înlocuiri de componente sau chiar la înlocuirea echipamentului.

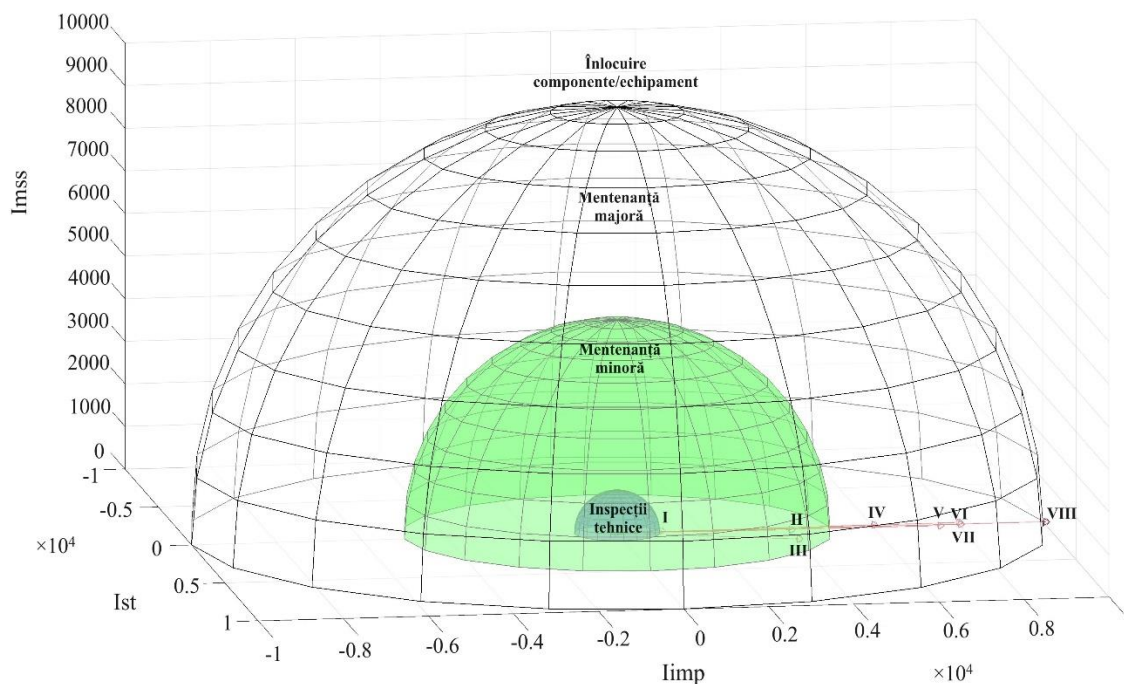


Fig. 4.6 Ierarhizarea activităților de mentenanță în funcție de valoarea indicelui global pentru întreruptoarele din stația A – 110 kV

#### 4.2.5.2. Propunerea unui algoritm al unui proces decizional pentru îmbunătățire continuă

Procesul decizional poate fi explicat prin prezentarea lui ca o diagramă de flux de decizie. Aceasta detaliază o vedere de ansamblu asupra procesului pe trei niveluri de decizie diferite: nivelul echipamentului, nivelul stației și nivelul companiei.

Deciziile de înlocuire a echipamentelor prin diferite soluții nu depind numai de rata crescută de defectare, ci și de disponibilitatea pieselor de schimb sau de capacitatea actuală a echipamentului.

Combinarea datelor/informațiilor tehnice ale soluțiilor cu date economice relevante va avea ca rezultat o cuantificare a costurilor și beneficiilor pentru fiecare soluție. Informațiile tehnice ale soluțiilor nu ar trebui exprimate exclusiv în termeni economici, ci ar putea fi exprimate și în alți termeni, cum ar fi fiabilitatea sau durata de viață estimată. Performanțele sistemului (topologia și dezvoltarea rețelei, modificarea curbei de sarcină) influențează procesul decizional cu privire la active. Consecințele și impacturile posibile asupra sistemului sunt obținute din calculele de fiabilitate.

Costurile și beneficiile soluțiilor sunt combinate cu riscurile implicate de fiecare soluție. Scopul este de a ajunge la decizia optimă cu privire la cerințele externe (informații sociale). Pentru a finaliza procesul decizional trebuie luate în considerare atât riscurile de siguranță cât și cele sociale. O echilibrare a riscurilor va duce la decizia finală.

### 4.3.CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

Prezentul capitol propune evaluarea și gestionarea riscurilor și identifică o metodologie nouă, Green Lean Six Sigma, care utilizează aspecte ale metodologiilor tradiționale Lean și Six Sigma, oferind în același timp instrumentele necesare pentru a decide, implementa și susține îmbunătățiri care au un impact pozitiv și asupra mediului.

Procesul de mentenanță a activelor din stațiile electrice a fost examinat și toate operațiunile și activitățile asociate direct și indirect cu mentenanța au fost analizate în scopul îmbunătățirii proceselor.

S-au generat și implementat soluții originale. De remarcat:

- Crearea unui chestionar de evaluare a impactului defectării echipamentelor electrice asupra sănătății și siguranței personalului și a mediului ambiant;
- Propuneri de îmbunătățire a chestionarelor pentru evaluarea impactului defectării asupra stării tehnice și a importanței, care vor putea fi utilizate și în susținerea unor programe de mentenanță centrata pe fiabilitate;
- Propunerea unor indici de protecția mediului, sănătate și securitate ( $i_{mss}$ ), stare tehnică ( $i_{st}$ ), importanță ( $i_{imp}$ ), în scopul analizei performanțelor întreruptoarelor, separatoarelor, transformatoarelor de măsură de curent, transformatoarelor de măsură de tensiune și descărcătoarelor;
- Simulări numerice ale celor 3 indici, pe baza datelor obținute din măsurători/monitorizări și a scorurilor atribuite conform chestionarelor de evaluare, pentru fiecare echipament din cadrul celor 3 stații electrice care au făcut obiectul studiilor de caz. S-au analizat: 73 întreruptoare (cu izolație în ulei, în hexafluorura de sulf și GIS), 206 separatoare, 77 transformatoare de măsură de curent, 81 transformatoare de măsură de tensiune, 54 descărcătoare.
- Propunerea unei soluții de îmbunătățire a mentenanței stațiilor prin generarea unui indice global de prioritate a acțiunilor de mentenanță a avut ca obiectiv implementarea și monitorizarea soluțiilor adoptate în timpul etapei de analiză.
- Determinarea prin simulări grafice în Matlab, în funcție de indicele global de prioritate a acțiunilor de mentenanță, a ierarhiei pentru 491 echipamente din cele 3 stații analizate.
- Controlul prioritizării activităților de mentenanță pe categorii de echipamente pentru cele trei stații electrice.
- Propunerea unui algoritm al unui proces decizional pentru îmbunătățire continuă. Etapa de control este foarte importantă deoarece confirmă îmbunătățirile implementate, facilitează repartizarea bugetului și planificarea lucrărilor.

Urmând cei cinci pași prezentați, aplicând instrumente robuste de analiză și un sistem de management dedicat, se preconizează o economie cu cheltuielile de mentenanță cu cel puțin 20% mai mare decât în cazul aplicării mentenanței centrate pe fiabilitate.

## CAPITOLUL 5

### PERSPECTIVE DE CONTINUARE A CERCETĂRILOR

Colectarea și organizarea informațiilor pe baza unei analize de tip SWOT (Tabel 5.1) a punctelor tari și a celor slabe, a oportunităților și a amenințărilor a permis identificarea perspectivelor de continuare a cercetărilor întreprinse în prezenta teză și previzionarea evoluției unui proiect de implementare a GLSS la nivelul companiei de transport a energiei electrice.

## DISEMINAREA REZULTATELOR CERCETĂRILOR EFECTUATE ÎN CADRUL TEZEI

### I. 2 Articole publicate în reviste indexate WoS cu factor de impact/1 ca prim autor + 1 Articol trimis la Buletinul UPB, aflat în stadiul de recenzare

- **Georgiana Ion**, Sorina Costinaș, Andrei Stan, *Analysis of the Evolution of Mathematical Models for Estimating Life Cycle of Power Substations*, TEM JOURNAL-TECHNOLOGY EDUCATION MANAGEMENT INFORMATICS, Ed. UIKTEN, Volume 13/2024, Issue 1, pp. 5-15, ISSN 2217-8309, DOI: 10.18421/TEM131-01, **IF=0.6, WOS:001179511200030**.
- Stan Andrei, Sorina Costinaș, **Georgiana Ion**, *Overview and Assessment of HVDC Current Applications and Future Trends*. Energies 2022, Vol. 15, Issue 3, Article Number 1193. <https://doi.org/10.3390/en15031193>, FEB 2022, eISSN1996-1073, **IF=3, WOS:000755376100001**.
- **Georgiana Ion**, Sorina Costinas, *Application of green lean six sigma for maintenance management of electrical equipment in transmission substations*, Scientific Bulletin, National University of Science and Technology POLITEHNICA of Bucharest, Serie C: Electrical Engineering (în curs de recenzare)

### II. 3 lucrări științifice publicate în volumele unor conferințe indexate IEEEExplore/ 2 ca prim autor

- **Georgiana Ion**, Sorina Costinas, Andrei Stan, Florin Bălășiu, *Assessment of Life Cycle of Autotransformers*, Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET), 2022 International Conference on, IEEE, Prague, Czech Republic, 20-22 July, 2022. **DOI: 10.1109/ICECET55527.2022.9872982**
- **Georgiana Ion**, Sorina Costinas, Andrei Stan, Marius Eugen Tiboaca, *Trends to Increase the Life Cycle of a Substation in Context of Smart Grid*, 10th International Conference on Energy and Environment (CIEM2021), oct. 2021, ISBN: 978-1-6654-4584-9/21, Publisher: IEEE, **DOI: 10.1109/CIEM52821.2021.9614762**.
- Marius Eugen Tiboaca-Ciupageanu, Sorina Costinas, **Georgiana Ion**, Andrei Stan, *Machine Learning Algorithms for Load Forecasting Based on Big Data*, 2023 11th International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM), Bucharest, Romania, 2023, pp. 1-5, **DOI: 10.1109/CIEM58573.2023.10349757**.

## BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [1] *Kawauchi Yoshio, Marvin Rausand*, "Life Cycle Cost (LCC) analysis in oil and chemical process industries." Toyo Engineering Corp, Chiba (1999).
- [2] *International Electrotechnical Commission*, "IEC 60300-3-3: 2017 Dependability management–Part 3-3: Application guide–Life cycle costing", Geneva, Elveția, 2017
- [3] *Balzer G., Neumann C.*, "Asset simulation and life cycle assessment for gas insulated substation", RECIFE: Assessing and improving power system security, reliability and performance in light of changing energy sources, 2011, report 87
- [4] *Sarma Kamal C., Hojjat Adeli*, "Life-cycle cost optimization of steel structures", International Journal for Numerical Methods in Engineering 55, no. 12 (2002), pp. 1451-1462, DOI:10.1002/0470867353.ch8

- [5] *Ghane Kamran*, “A model and system for applying Lean Six sigma to agile software development using hybrid simulation”, 2014 IEEE International Technology Management Conference (ITMC), Chicago, IL, USA, pp. 1–4, DOI:10.1109/itmc.2014.6918594
- [6] *Siddh Man Mohan, Soni Gunjan, Gadekar Gaurav, Jain Rakesh*, “Integrating lean six sigma and supply chain approach for quality and business performance”, 2014 2nd International Conference on Business and Information Management (ICBIM), Durgapur, India, pp. 53-57, DOI:10.1109/icbim.2014.6970949
- [7] *Rabii Ouardaoui, Naoufal Sefiani, Omar Akouri*, “Model of a maintenance process improvement approach inclusioning Lean Six Sigma and Preventive Maintenance optimization”, 2018 International Colloquium on Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA), Tangier, Morocco, pp. 19–24, DOI:10.1109/LOGISTIQUA.2018.8428285
- [8] *Trubetskaya Anna, Olivia McDermott, Anthony Ryan*, "Application of Design for Lean Six Sigma to strategic space management" *The TQM Journal* 35, no. 9, 2023, pp. 42-58
- [9] *Souraj Salah, Abdur Rahim, Juan A. Carretero*, “The integration of six sigma and lean management”, *International Journal of Lean Six Sigma*, vol. 1 no 3, 2010, pp. 249-274, DOI: 10.1108/20401461011075035
- [10] *Farrukh Amna, Sanjay Mathrani, Aymen Sajjad*. "A DMAIC approach to investigate the green lean six sigma tools for improving environmental performance" 2021 IEEE Asia-Pacific Conference on Computer Science and Data Engineering (CSDE), Brisbane, Australia, 2021, pp. 1-6, DOI: 10.1109/CSDE53843.2021.9718462.
- [11] *Nagadi Khalid*, “Implementation of green, lean and six sigma operations for sustainable manufacturing. A Review”, *International Journal of Production Management and Engineering*, 2022, 10(2), pp. 159-171.
- [12] *Trubetskaya Anna, Olivia McDermott, Anthony Ryan*, "Application of Design for Lean Six Sigma to strategic space management" *The TQM Journal* 35, no. 9, 2023, pp. 42-58
- [13] *Antony Jiju, Hoerl Roger, Snee Ron*, “An Overview of Lean Six Sigma”, A practical guide for continuous improvement professionals in higher education, 2020, DOI:10.1108/978-1-78769-929-820201002.
- [14] *Gholami Hamed, Norhazrina Jamil, Muhamad Zameri Mat Saman, Dalia Streimikiene, Safian Sharif, Norhayati Zakuan*, "The application of green lean six sigma", *Business Strategy and the Environment* 30, no. 4, 2021, pp:1913-1931, DOI:10.1002/bse.2724
- [15] *Georgiana Ion, Sorina Costinaș, Andrei Stan, Marius Eugen Țiboacă*, “Trends to Increase the Life Cycle of a Substation in Context of Smart Grid”, 10th International Conference on Energy and Environment (CIEM 2021), oct. 2021, ISBN: 978-1-6654-4584-9/21, DOI: 10.1109/CIEM52821.2021.9614762
- [16] *Comănescu, Gh., Costinaș, Sorina, Iordache, M.*, “Partea electrică a centralelor și stațiilor. Note de curs”, Editura Proxima, Seria Cursuri Universitare, București, 2005, 349p, ISBN 973-7636-08-2.